第 2 章　解析手法の違いによる設計内容の比較

1.3 節の研究の目的で示したとおり, 本章では従来の格子解析を用いた橋梁設計の各手続きに関する課題，または検討余地を整理し，一定せん断流パネル解析，または FEM 解析を用いた場合における橋梁設計の各手続きを横並びで比較する．そのとき，1.1 節で示したように，解析結果として得られる断面力または応力，あるいは変位が鋼道路橋の設計に対してどのような性質であるのかを考察するため，以下の 3 点に着目して検討する．

① 各設計行為で求められる作用応力などについて，通常は，特別な手続きを必要とせずに解析結果から直接得られる．

　例として，公称応力が求められる場合に，解析結果から得られる作用断面力を用いて断面計算を行うことで，公称応力としての作用応力を得られる場合などが挙げられる．

② 各設計行為で求められる作用応力などについて, 理論上, 解析結果から直接得ることができずに, 別途検討しなければならない．

　例として，鉛直荷重を受ける全橋モデルを作成したものの，横力を受ける場合の部材のモデル化を行っていないために, 別途計算モデルを検討しなければならない場合などが挙げられる．

③ 各設計行為で求められる作用応力などについて，通常は，解析結果から他の内容も混在して得られることが多いために，別途処理しなければならないことがある．しかし，求められる水準で成果を得るための処理方法が確立していないことが多い．

　例として，公称応力が求められる場合に，解析結果から 2 次応力も混在した局所的な作用応力が得られるために，公称応力とするには別途処理をしなければならないものの，処理を行う要素範囲や処理方法が確立しておらず，個別に検討しなければならない場合などが挙げられる．

橋梁設計における手続きとして，本検討では鋼上部構造の部材の設計における代表的な項目を抽出した．従来の格子解析，一定せん断流パネル解析，FEM 解析のそれぞれを主体とした場合の橋梁設計の手続きにおいて, それぞれの解析の特徴を踏まえた最も合理的な設計フローは異なる場合がある．例えば，格子解析を主体とした場合は，格子解析を行った後に主桁断面を決めてから中間補剛材の配置を設計するが，FEM 解析の場合は，解析モデルに中間補剛材を含めて主桁の要素分割にも反映することから, 最初の解析モデル作成時には中間補剛材の配置を決めておくことが考えられる. ただし, 解析手法ごとの最も合理的な設計フローはそもそも確立されていないことから，従来の格子解析による設計フローを基本として，各解析手法を用いた橋梁設計の手続きを比較する．なお，一定せん断流パネル解析または FEM 解析を主体とした橋梁設計を行う場合，照査内容が共通でも各解析手法における各手続き内の作業手順等が異なる場合がある．その場合は，照査内容ごとに各解析手法の設計フローを示し，作業手順の違いがわかるようにした．

対象とする橋梁形式は，鋼橋で実績が多く一般的な橋梁形式と考えられる連続合成 I 桁橋，および立体ラーメン橋の 2 形式とする. 従来形式の多主 I 桁橋と少数 2 主 I 桁橋は共通事項が多いことから, 連続合成板桁橋にまとめた．立体ラーメン橋は，鋼床版箱桁橋と門型ラーメン鋼製橋脚の剛結構造を想定し，両形式を含むものとした．さらに，従来の格子解析では局所的な応力性状の把握ができないと考えられる構造として，以下の照査項目も検討対象とした．

・曲線少数 I 桁橋：主桁フランジの曲率による 2 次応力度

・曲線細幅箱桁橋：主桁フランジの曲率と断面変形による 2 次応力度
　　中間ダイアフラムのせん断応力度
・方杖ラーメン橋：隅角部の作用応力度
・単弦ローゼ橋：アーチリブと補剛桁間の隅角部における作用応力度

なお，現行（2012）の道路橋示方書[2.1)]（以下，「道示」という）に許容値が規定されている場合は，道示の中の対象となる章番号や節番号を記載した．

比較表の形式および凡例は以下のとおりである．

【比較表の形式】

表が大きく 1 ページに収まらない場合、下記の[表示方法 1]全体のほか、[表示方法 2]部分のように、表を分割して表示する。

[表示方法 1] 全体

[表示方法 2-1] 部分

[表示方法 2-2] 部分

設計行為		設　計　手　法		
設計フロー	項目	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
主桁などの対象部材の設計行為をフローで示す	設計フローの中の具体の項目を示す。	左記の項目ごとに、従来設計で行う作業を示す。	左記の項目ごとに、せん断パネル解析による設計で行う作業を示す。	左記の項目ごとに、FEM 解析による設計で行う作業を示す。

注 1)　比較表の中の文章に関する凡例

ゴシック：上記検討項目①～③

斜体文字：道示に規定値がない照査項目

注 2)　以下，表中のみスペースに配慮して一定せん断流パネルをせん断パネルと省略して示す．

注 3)　表中の挿入図は一例を示すものであり，計算例によっては節で示した橋梁形式と異なる場合がある．その場合，計算例で示した橋梁形式などを図の名称と合わせて記載する．

例）節は 2.2 立体ラーメン橋であるものの，図は鋼床版箱桁の場合など．
　　図の名称に，（鋼床版箱桁の例）と記載する．

2.1　連続合成Ｉ桁橋

2.1.1　全体フロー

連続合成Ｉ桁橋に関する従来の格子解析を用いた設計フローを**図-2.1.1**に示す．概略設計において主桁本数，主桁間隔，および主桁高さが決まったものと仮定して，本検討では省略するが，まずは床版におけるコンクリート強度，および配筋を設計する．次に，格子解析モデルを作成する．その後，解析結果を用いて主桁の設計を行い，合成桁であることから床版に対して主桁作用と床版作用の重ね合わせの照査を行う．床版による主桁間の荷重分配作用を考慮する場合は，荷重分配作用と床版作用との重ね合わせの照査を行う．さらに，横桁，端横桁，中間対傾構，横構の設計を行い，たわみの照査を行う．

以下，この設計フローに示した順序で橋梁設計の手続きの比較を行う．

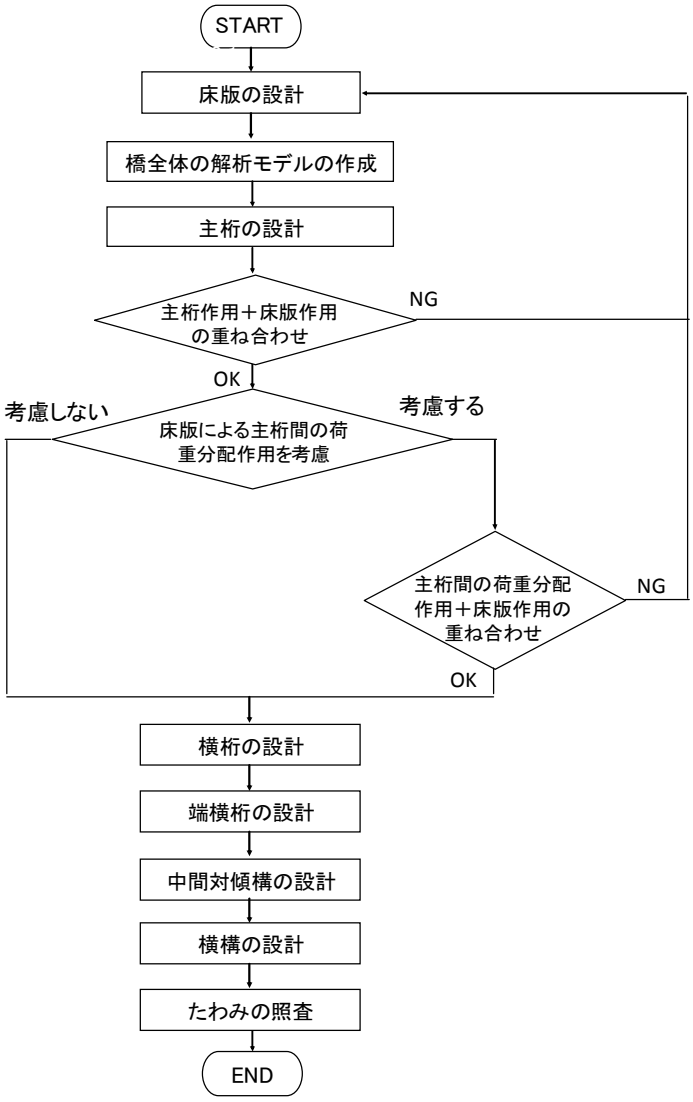


図-2.1.1 連続合成Ｉ桁橋の設計フロー

2.1.2　主桁

設　計　行　為	
設計フロー	項目
設計方針 ・主桁の設計は，**図-2.1.2** の設計フローに従う． ・負曲げモーメントによって床版に引張応力が生じる場合は，コンクリートを無効として橋軸方向鉄筋のみ有効断面とする． ・本報告書では，床版への橋軸方向のプレストレス導入，床版コンクリートの打設順序は考慮しない．	(1) 解析モデルの作成 (2) 仮定断面の決定 (3) 荷重強度の算出 (4) 設計断面力の算出 (5) 床版有効幅の算出 (6) 合成前の設計 　1) 作用応力度の算出 　2) 許容応力度の算出 　3) 応力度の照査 　4) 全体横ねじれ座屈の照査 (7) 完成時の設計 　1) 作用応力度の算出 　2) 許容応力度の算出 　3) 応力度の照査

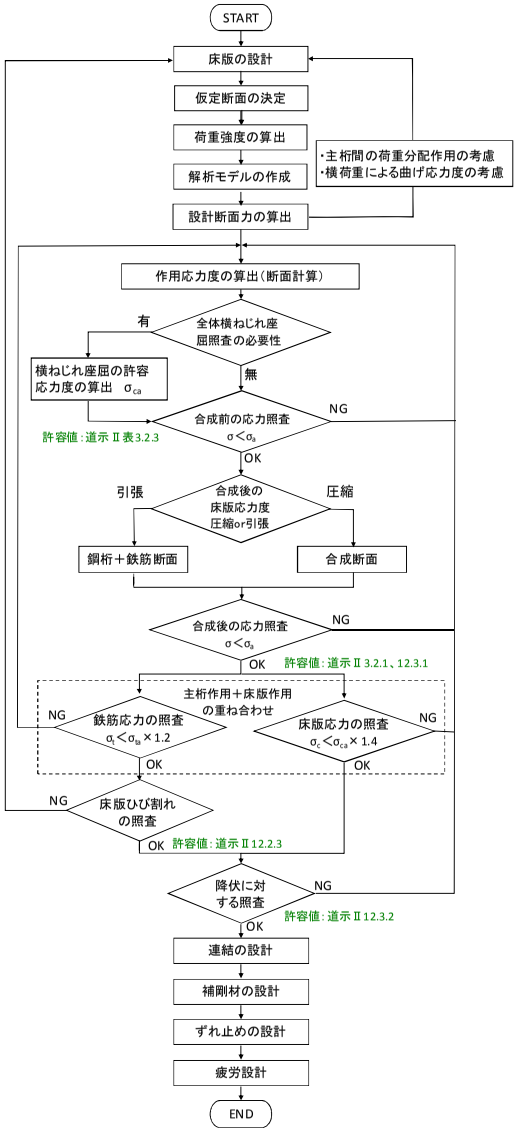
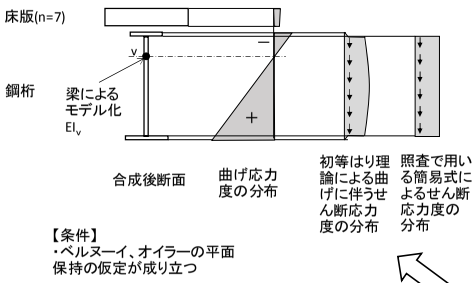


図-2.1.2　主桁の設計フロー

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(1)解析モデルの作成 1)解析モデルの作成と解析の実施	1) 主桁と荷重分配横桁とからなる 2 次部材を含まない平面格子骨組モデルを作成する． 2) 合成前と合成後とで主桁剛度を変える． 3) 合成前と合成後のそれぞれにおける解析モデルに対して荷重を載荷し，各部材をモデル化したはり要素の作用断面力，および節点の変位を算出する． ②横荷重に対しては，別途力学モデルを設定して解析しなければならない．	1) 主桁，床版，横桁，対傾構，横構など全ての構成部材をせん断パネルと骨組部材とで立体的にモデル化した全橋モデルを作成する． 2) 合成前は鋼部材のみ，合成後は床版を付加した解析モデルとする． 3) 合成前と合成後のそれぞれにおける解析モデルに対して荷重を載荷し，各板組形状をモデル化した縁要素や一定せん断流パネル要素の作用断面力，および節点の変位を算出する． ①横荷重に対しても，鉛直荷重と同じ全橋モデルを用いて解析する．	1) 主桁，床版，横桁，対傾構，横構など全ての構成部材をシェル要素，ソリッド要素，棒要素とで立体的にモデル化した全橋モデルを作成する． 2) 合成前は鋼部材のみ，合成後は床版を付加した解析モデルとする． 3) 合成前と合成後のそれぞれにおける解析モデルに対して荷重を載荷し，各板組形状をモデル化したシェル要素やソリッド要素の作用応力度，および節点の変位を算出する． ①横荷重に対しても，鉛直荷重と同じ全橋モデルを用いて解析する．
2)解析に関する構造力学的理論，および特徴	1) 平面保持が成り立つと仮定したはり要素を用いた変位法による解析を行う． 2) 各要素の作用力は，曲げモーメントやせん断力などの断面力である． 3) 支持条件を，節点に各変位の境界条件として（固定，自由）として設定する． 4) せん断応力度分布は，初等はり理論による分布を簡易式（道示Ⅱ11.2.2 式）で照査してよい． 5) せん断遅れによるフランジの曲げ応力分布は，曲げ剛性に対して有効幅を用いて考慮する． 6) 算出した作用断面力を用いて，許容応力度と対比が可能な公称応力としての作用応力度を算出する． ②隅角部のようなせん断遅れが大きい構造に対しては，解析結果と実際の作用応力の乖離が大きいために，別途検討したり補正したりしなければならない． 例）奥村・石沢式を用いた隅角部の応力計算 [2.2)]	1) せん断応力はせん断パネル，曲げ応力は縁部材の軸力でモデル化・解析を行う． 2) 各要素の作用力は，軸力やせん断流などの断面力である． 3) せん断パネルと縁部材を組み合わせた断面の中では，平面保持は成立しない． 4) ただし，せん断遅れが大きくなく，せん断剛性がある程度確保される構造では，応力分布は平面保持を仮定した断面と大きく変わらない結果になる． 5) 支持条件を，節点に各変位の境界条件として（固定，自由）として設定する． 6) 算出した作用断面力を用いて，許容応力度と対比が可能な公称応力としての作用応力度を算出する． ①せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	1) 鋼板で構成される鋼部材の板組形状をシェル要素で，厚みがある版としての床版はソリッド要素で，主に軸力部材として挙動する横構のような部材を棒要素で，それぞれモデル化して解析を行う． 2) 各要素の作用力は応力であり，主応力（最大，最小）や Von-Mises 等価応力の算出が可能である． 3) 部材断面で見た場合，平面保持は成立しない． 4) 支持条件を，節点に各変位の境界条件として（固定，自由）として設定する．ただし，支点部は点ではなく，支承の面積を考慮してモデル化する必要がある． 5) 算出した作用応力度に処理を行って，許容応力度と対比が可能な公称応力としての作用応力度を求める． ③-1 各要素に対して得られる作用応力は，通常は，2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない． ③-3 全橋モデルを用いた FEM 解析から全ての部材・部位の設計を行う場合，連結部や補剛材など従来の骨組解析ではモデル化していなかった部材・部位のモデル化および照査方法を新たに確立する必要がある．

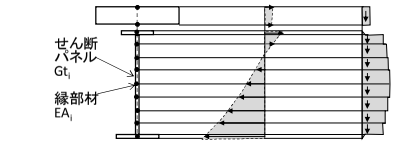


【条件】
・ベルヌーイ、オイラーの平面
保持の仮定が成り立つ

図-2.1.3A　初等はり理論による応力分布

≒

同じ精度の
解析結果を
得ることが
できる



【条件】
・一つのせん断パネルの中で
せん断流は一定
・せん断力にはせん断パネル、
曲げには縁部材の軸力で抵抗
するとしてモデル化、解析する。

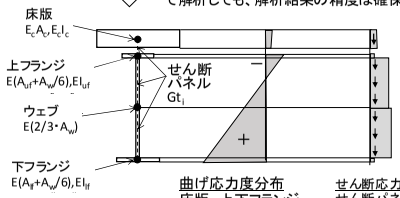
曲げ応力度分布
縁部材の軸力か
ら算出

$$\sigma_i = N_i / A_i$$

せん断応力度分布
せん断パネルのせ
ん断流から算出

$$\tau_i = S_i / t_i$$

・せん断遅れの程度が小さい場合は、いくつ
かのせん断パネルと縁部材を梁要素にまとめ
て解析しても、解析結果の精度は確保できる。



【ウェブのモデル化】
断面積と断面二次モーメント
が等しくなるように上下フラン
ジとウェブ中心位置にウェブ
断面積を振り分ける。

曲げ応力度分布
床版、上下フランジ、
ウェブをそれぞれの
梁要素兼縁部材の曲
げモーメントと軸力か
ら算出

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A_i} + \frac{M_i}{I_i} \cdot y_i$$

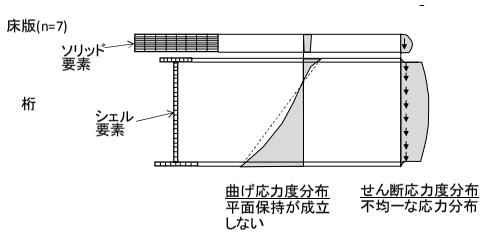
せん断応力度分布
せん断パネルのせん
断流から算出

$$\tau_i = S_i / t_i$$

図-2.1.3B　せん断パネル解析における応力分布

≒

同じ精度の
解析結果を
得ることが
できる



曲げ応力度分布
平面保持が成立
しない

せん断応力度分布
不均一な応力分布

図-2.1.3C　FEM 解析における応力分布

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
3)解析モデルの特徴	・平面格子桁であることから，断面剛度は断面２次モーメントのみとする． ②床版について，活荷重に対する荷重分配作用，横荷重への抵抗部材などを考慮する場合，主桁や横桁と分離した床版の剛性を考慮したモデル化をしなければならない．平面格子モデルでは床版を分離したモデル化を行わず，通常は，別途計算モデルを作成する．	①-1 主桁，横桁以外に床版，対傾構，横構，補剛材など２次部材までをそれぞれ単独でモデル化し，全橋モデルに含めることができる． ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁，横桁以外の部材を独立してモデル化し，各部材の剛性を考慮することができる． ①-3 各部材の要素から，各部材の作用断面力を求めることができる． ①-4 床版による主桁間の荷重分配作用を考慮した設計を行う場合，同じ全橋モデルで床版の剛性を考慮することで解析が可能である． ①-5 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある． 要素分割の例を以下に示す． ・主桁と横桁は，フランジとウェブをそれぞれ一つのはり要素に置き換え，それらをせん断パネルで繋ぎ合わせてモデル化する． ・床版はせん断遅れの影響を考慮するために主桁間を４等分程度に分割する． ・橋軸方向には横桁間を４等分程度で要素分割する．	①-1 主桁，横桁以外に床版，対傾構，横構，補剛材など２次部材までをそれぞれ単独でモデル化し，全橋モデルに含めることができる． ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁，横桁以外の部材を独立してモデル化し，各部材の剛性を考慮することができる． ①-3 各部材の要素から，各部材の作用応力度を求めることができる． ①-4 床版による主桁間の荷重分配作用を考慮した設計を行う場合，同じ全橋モデルで床版の剛性を考慮することで解析が可能である． ①-5 せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある． ③各要素に対して得られる作用応力は２次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある． モデル化に用いる要素の例を以下に示す． ・主桁と横桁はシェル要素，床版はソリッド要素あるいはシェル要素，対傾構と横構は棒要素でモデル化する． ・支点上補剛材，垂直補剛材，水平補剛材などもシェル要素で忠実にモデル化される場合が多い．

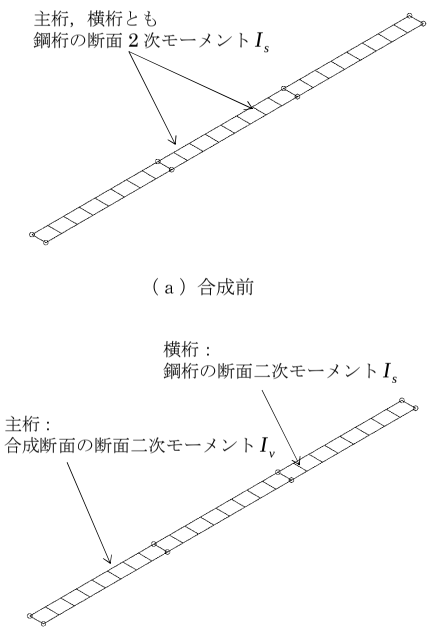


図-2.1.4A　平面格子骨組モデル

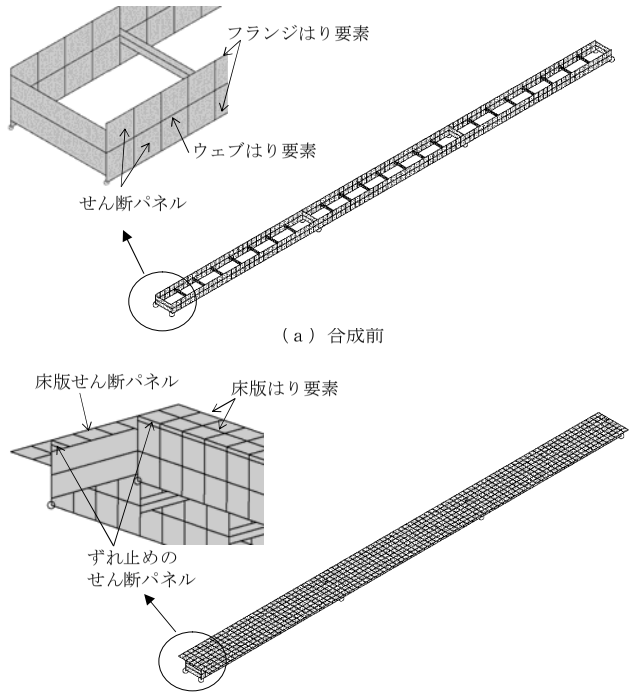


図-2.1.4B　せん断パネル解析モデル

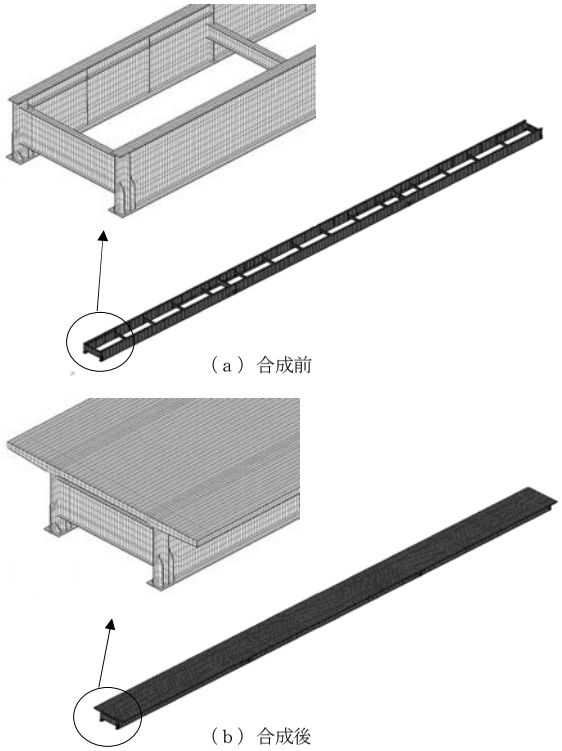


図-2.1.4C　FEM解析モデル

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
解析結果を用いて設計できる項目	平面格子骨組モデルによる解析結果から，主桁と分配横桁までの設計ができる． ②その他の中間横桁，端横桁，中間対傾構，横構の設計には，別途，個別に力学モデルを設定しなければならない．	①せん断パネルモデルによる解析結果によって，主桁から横構までの部材の設計がひとつの解析モデルからの解析結果を用いて行うことが可能になる．	①FEM モデルによる解析結果によって，主桁から横構までの部材の設計がひとつの解析モデルからの解析結果を用いて行うことが可能になる．

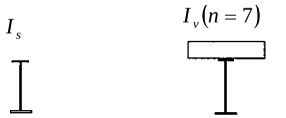
表-2.1.1　各設計手法における解析結果を用いて設計できる項目

設計項目		従来設計（格子解析）		せん断パネル解析		FEM解析	
主桁	断面設計	○		○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
	全体横ねじれ座屈の照査	×	簡易照査式による。	○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理が必要。
	連結の設計	○		○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
	補剛材の設計	○		○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
	ずれ止めの設計（橋軸方向）	○		○		○	
	ずれ止めの設計（橋軸直角方向、曲げ引抜き力）	×	別途解析モデルによる。	△	別途解析モデルは不要だが、許容値がない。	○	
	疲労設計	○		○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
分配横桁	断面設計	○		○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
	連結の設計	○		○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
	補剛材の設計	○		○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
中間横桁 （少数主桁）	断面設計	×	別途簡易な力学モデルによる。	○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
	U形フレーム剛度の照査	×	簡易照査式による。	○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
	連結の設計	×	別途簡易な力学モデルによる。	○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
端横桁	断面設計	×	別途簡易な力学モデルによる。	○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
	連結の設計	×	別途簡易な力学モデルによる。	○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
	補剛材の設計	×	別途簡易な力学モデルによる。	○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
中間対傾構	断面設計	×	別途簡易な力学モデルによる。	○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
	連結の設計	×	別途簡易な力学モデルによる。	○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
横構	断面設計	×	別途簡易な力学モデルによる。	○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
	連結の設計	×	別途簡易な力学モデルによる。	○		△	別途解析モデルは不要だが、解析結果の処理、または許容値の設定が必要。
活荷重たわみと製作キャンバー		○		△	別途解析モデルは不要だが、主桁ウェブのせん断変形も考慮した許容値がない。	△	別途解析モデルは不要だが、主桁ウェブのせん断変形も考慮した許容値がない。
支承他付属物の設計		×	別途簡易な力学モデルによる。	×	別途簡易な力学モデルによる。	×	別途簡易な力学モデルによる。

○：ひとつの橋全体モデルの解析結果を直接用いて設計が可能．許容値有．

×：ひとつの橋全体モデルの解析結果を用いることができず，別途，解析モデル，力学モデル，または照査式を用いる．

△：ひとつの橋全体モデルの解析結果を用いることができるものの，直接は用いることができず，後処理が必要．または，許容値の設定が必要．

<table>
<tr><th>設計行為
項目</th><th colspan="3">設　計　手　法</th></tr>
<tr><th></th><th>従来設計（格子解析）</th><th>せん断パネル解析による設計</th><th>ＦＥＭ解析による設計</th></tr>
<tr>
<td>(2) 仮定断面の決定</td>
<td>1) 仮定断面を決めて，解析モデルにおける各要素の仮定剛度を設定する．
2) 仮定剛度は，曲げ剛性 EI，ねじり剛性 GJ，軸力剛性 EA などである．
3) 合成前と合成後の各有効断面に対して断面剛性を仮定する．
 

（a）合成前　（b）合成後
図-2.1.5A　主桁の仮定剛度

4) 支点上補剛材や横桁取付部の垂直補剛材等の板組形状は，格子解析の中ではモデル化できない．
これらの板組形状については，主桁等の各部材に対する解析モデルで出力される作用断面力を用いて別途，断面計算を行う．

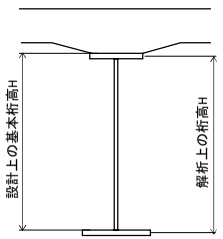
5) 対傾構，横構を鉛直荷重に対する主構造の一部とみなさない場合は，格子解析の中でモデル化しない．</td>
<td>1) 仮定断面を決めて，解析モデルにおける各要素の仮定剛度を設定する．
2) 仮定剛度は，縁部材は軸力剛性 EA，曲げ剛性 EI，ねじり剛性 GJ，せん断パネルはせん断剛性 G t などである．
（a）合成前
・鋼桁の桁高さ H と，フランジとウェブの仮定した板幅と板厚から各板要素の断面定数(A, J, I_x, I_y)を仮定する．
 

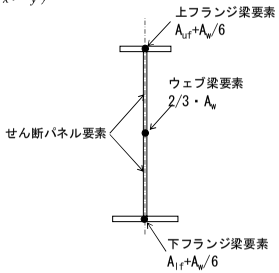
図-2.1.5B　鋼桁の桁高さ H の設定方法
 

図-2.1.6B　鋼桁を構成する板要素の断面定数

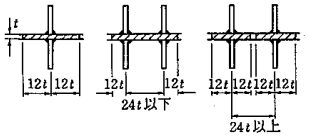
・支点上補剛材と横桁取付部の垂直補剛材は，主桁ウェブの有効断面を含めた柱断面を想定して，断面定数(A, J, I_x, I_y)を仮定する．
 

図-2.1.7B　荷重集中点の有効断面の例 [2.1)]
・対傾構，横構などの軸力部材は，軸力剛性 EA を仮定する．

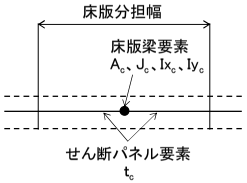
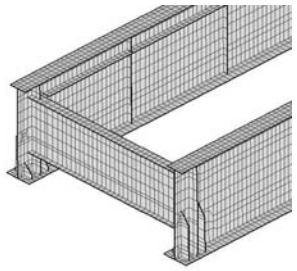
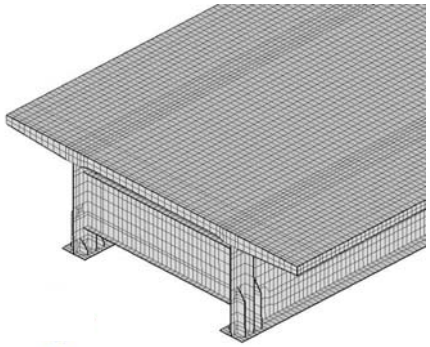
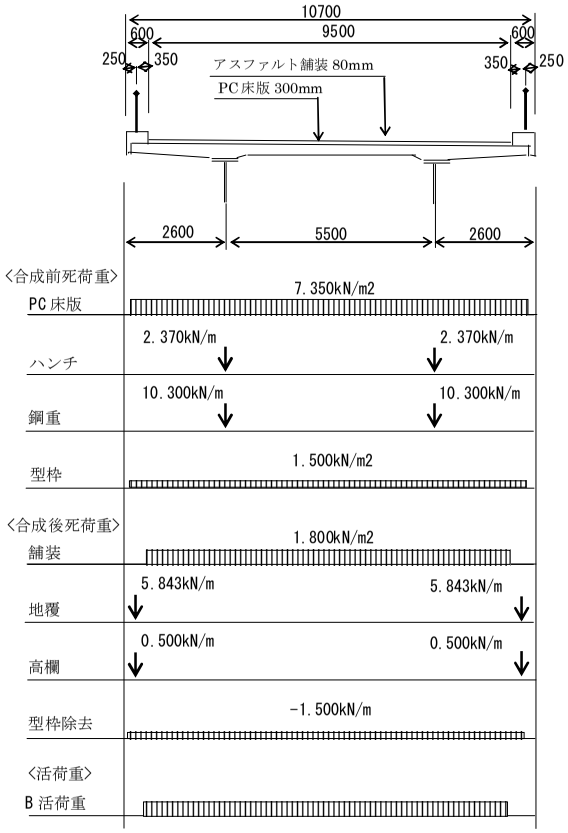
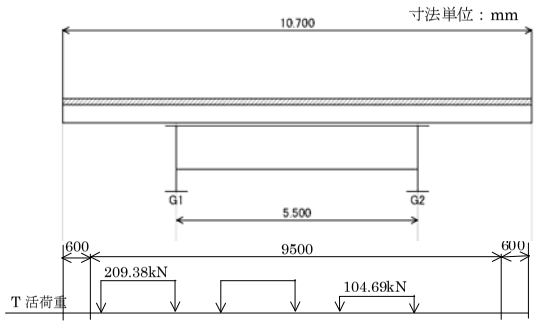
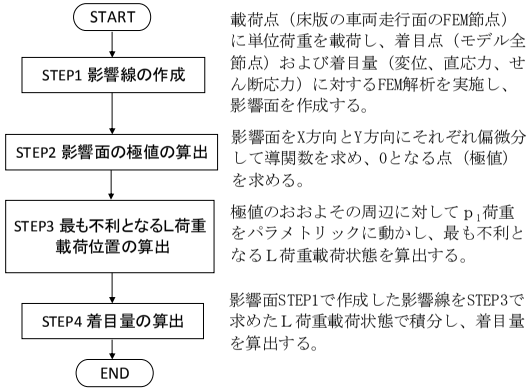
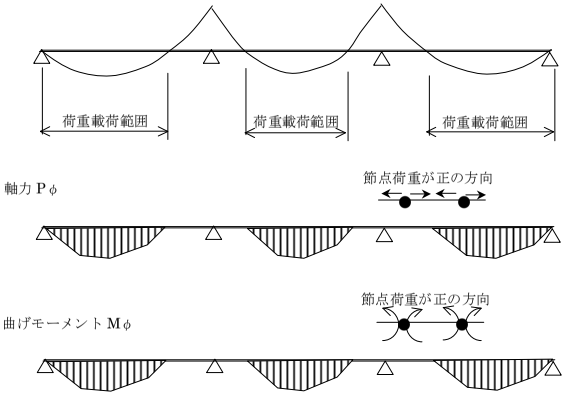
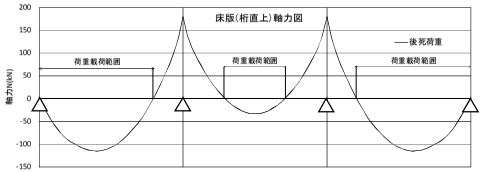
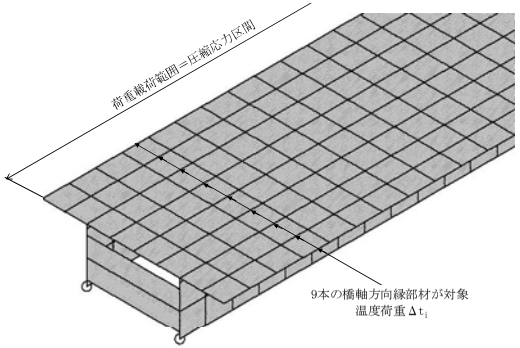
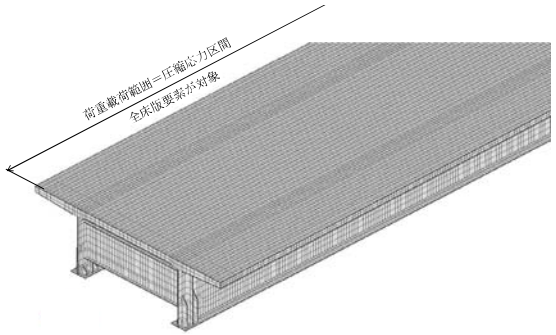
（b）合成後
・床版を分割したはり要素の断面定数(A, J, I_x, I_y)を設定する．
 

図-2.1.8B　床版分担幅のはり要素の断面定数</td>
<td>1) 仮定断面を決めて，解析モデルにおける各要素の仮定剛度を設定する．
2) 仮定剛度は，シェル要素は板厚 t，ソリッド要素はヤング率 E，棒要素は軸力剛性 EA などである．

（a）合成前
・鋼桁を構成する全ての板要素の板幅と板厚を仮定したシェル要素として要素分割する．
・主桁，横桁の主要部材
・支点上補剛材，垂直補剛材，水平補剛材
・ソールプレートなど
・対傾構，横構などの軸力部材は，断面積を仮定する．
 
図-2.1.5C　シェル要素による鋼桁の要素分割の例

（b）合成後
・床版の厚さを設定してシェル要素あるいはソリッド要素として要素分割する．
 
図-2.1.6C　ソリッド要素による床版の要素分割の例</td>
</tr>
</table>

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(3)荷重強度の算出と載荷 1)横断面形状 2)合成前死荷重 3)合成後死荷重 4)活荷重	1) 設計荷重強度を解析モデルにおける荷重条件として設定する． 2) 荷重条件は，集中荷重，線分布荷重，面分布荷重などに設定される． 3) 活荷重は有効幅員の中で影響線載荷を行う． ①通常は，各部材にとって最も不利な状況を活荷重の影響線載荷から求めることができる．  図-2.1.9A　横断面形状と荷重強度の例	1) 設計荷重強度を解析モデルにおける荷重条件として設定する． 2) 荷重条件は，集中荷重，線分布荷重，面分布荷重などに設定される． 3) 活荷重は有効幅員の中で影響線載荷を行う． 4) 床版要素に荷重を直接載荷しない． 5) ただし，床版を打ち下ろした端横桁の設計には活荷重としてＴ荷重を床版上に影響線載荷して端横桁の断面力を算出する．死荷重についても，全死荷重を床版上に載荷して端横桁の断面力を算出する． ①通常は，各部材にとって最も不利な状況を活荷重の影響線載荷から求めることができる．  図-2.1.9B　端横桁設計の活荷重の例	1) 設計荷重強度を解析モデルにおける荷重条件として設定する． 2) 荷重条件は，集中荷重，線分布荷重，面分布荷重などに設定される． 3) 活荷重は，着目要素の着目応力が最も厳しい状態を想定して固定載荷を行う． ②活荷重の載荷は，載荷ケースの選定方法を確立する必要がある．実際には次のような方法を採用する．[2.3] （方法１）格子解析を別途実施して，その影響線から活荷重の載荷範囲を設定して，活荷重を FEM モデルに固定載荷する． （方法２）FEM モデルの車両走行面の FEM 節点に単位荷重を載荷して着目量（変位，直応力，せん断応力）に対する影響面を作成し，その分布形状が極値となる範囲を積分計算して着目量を算出する．  図-2.1.9C　FEM 解析における活荷重の影響線載荷フロー

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
5)クリープ	1) 床版と鋼桁を一体化した合成断面を 1 本のはり要素でモデル化することから，主桁をモデル化したはり要素に軸力 P_ϕ と曲げモーメント M_ϕ をクリープによる荷重として載荷する． 2) 後死荷重などにより床版コンクリートに持続的に作用する圧縮力 N_c に対して，塑性ひずみが増加する影響をクリープ係数 ϕ_1 により評価して，合成断面に作用する軸力 P_ϕ と曲げモーメント M_ϕ を次式で求める．この時，クリープ係数は $\phi_1 = 2.0$（ヤング係数比は n=14）とする． $P_\phi = N_c \cdot \dfrac{2\times\phi_1}{2+\phi_1}$ $M_\phi = P_\phi \cdot d_{vc}$ ここに，N_c：床版に作用する圧縮力の合計 d_{vc}：合成断面中立軸から床版中心までの距離 3) 後死荷重による曲げモーメントが正となる範囲の主桁部材に軸方向荷重 P_ϕ とモーメント荷重 M_ϕ を載荷して不静定断面力を算出する．  図-2.1.10A　クリープの荷重載荷範囲の例 ②実態は床版コンクリートに生じるクリープ現象であるものの，格子解析では床版と鋼桁を一体化した合成桁断面をモデル化したはり要素で構成し，クリープの影響を合成桁断面はりに対して構造力学的に等価な不静定曲げモーメントに置換して載荷する．	1) クリープを床版の収縮としてモデル化する．具体的には解析コードの機能として収縮を直接入力できないことが多く，同じ内力として載荷できる温度荷重に置換する． 2) 床版と鋼桁を分けてモデル化することから，床版の要素にのみクリープによる荷重を載荷する． 3) 床版と鋼桁との温度差による軸力 P_1 とクリープによる作用軸力 P_ϕ とを等しいとすると，クリープの影響を温度差に換算した場合の温度荷重 Δt が次のように求められる． $P_1 = \dfrac{E_s \cdot \varepsilon_t \cdot A_c}{n_1} = \dfrac{E_s \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot A_c}{n_1} = P_\phi = N_c$ $\Delta t = \dfrac{n_1 \cdot N_c}{E_s \cdot \alpha \cdot A_c} = \dfrac{14\times N_c}{2\times10^8 \times 12\times10^{-6} \times A_c} = 0.005833\times\dfrac{N_c}{A_c}$ ここに，$n_1 = n(1+\phi_1/2) = 7\times(1+2/2) = 14$ E_s：鋼のヤング係数 α：鋼の線膨張係数 A_c：床版コンクリートの断面積  図-2.1.10B　クリープの荷重載荷範囲の例  図-2.1.11B　クリープの荷重載荷対象部材の例 ②クリープ現象による床版コンクリート部材長縮小の影響を床版の要素に，構造力学的に等価な温度荷重として載荷する．	1) クリープを床版の収縮としてモデル化する．具体的には解析コードの機能として収縮を直接入力できないことが多く，同じ内力として載荷できる温度荷重に置換する． 2) 床版と鋼桁を分けてモデル化することから，床版の要素にのみクリープによる荷重を載荷する． 3) 後死荷重によって床版コンクリートに生じる圧縮応力度 σ_{ci} から，せん断パネル解析と同様な要領で温度荷重 Δt_i を求めて床版コンクリートに載荷する． $\Delta t_i = \dfrac{n_{1i} \cdot \sigma_{ci}}{E_s \cdot \alpha} = \dfrac{14\times\sigma_{ci}}{2\times10^8 \times 12\times10^{-6}} = 0.005833\times\sigma_{ci}$  図-2.1.10C　クリープの荷重載荷対象部材の例 ②クリープ現象による床版コンクリート部材長縮小の影響を床版の要素に，構造力学的に等価な温度荷重として載荷する．

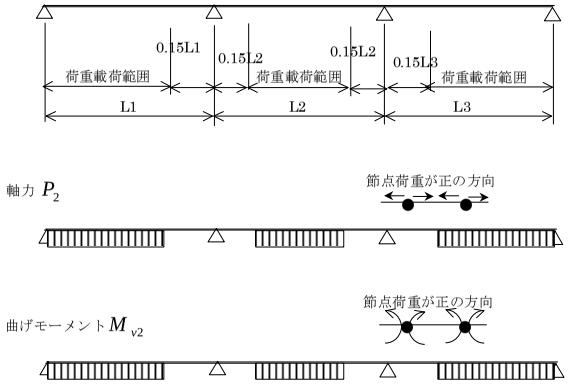
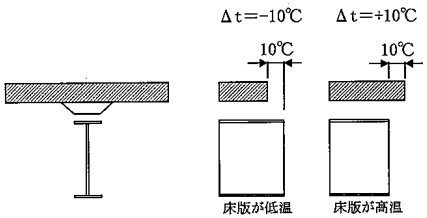
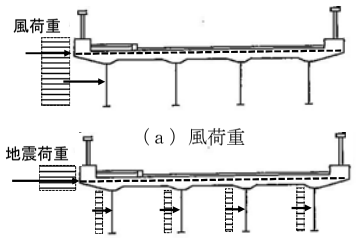
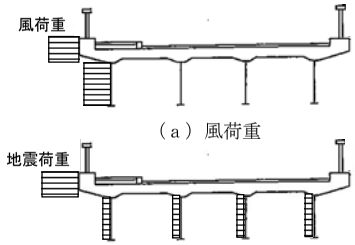
<table>
<tr><th>設計行為
項目</th><th colspan="3">設　計　手　法</th></tr>
<tr><th></th><th>従来設計（格子解析）</th><th>せん断パネル解析による設計</th><th>ＦＥＭ解析による設計</th></tr>
<tr>
<td>6)乾燥収縮</td>
<td>1)　床版と鋼桁を一体化した合成断面を 1 本のはり要素でモデル化することから，主桁をモデル化したはり要素に軸力 P_2 と曲げモーメント M_{v2} を乾燥収縮による荷重として載荷する．
2)　床版コンクリートの最終収縮度を $\varepsilon_s = 20\times10^{-5}$ として，すると次式で求める．この時，クリープ係数は $\phi_2 = 4.0$（ヤング係数比は n=21）とする．
$P_2 = E_{c2}\cdot\varepsilon_s\cdot A_c$
$M_{v2} = P_2\cdot d_{vc2}$
ここに，A_c：コンクリート床版断面積
d_{vc2}：合成断面中立軸から床版中心までの距離
$E_{c2} = E_s/21$
3)　乾燥収縮の影響を考慮する範囲は，中間支点付近の負の曲げモーメントが発生する範囲を除いた区間とする．（下図は負の曲げモーメント範囲を 0.15L と仮定した例）
 

図-2.1.12A　乾燥収縮の荷重載荷範囲の例
②実態は床版コンクリートに生じる乾燥収縮現象であるものの，格子解析では床版と鋼桁を一体化した合成桁断面をモデル化したはり要素で構成し，乾燥収縮の影響を合成桁断面はりに対して構造力学的に等価な不静定曲げモーメントに置換して載荷する．</td>
<td>1)　乾燥収縮を床版の収縮としてモデル化する．具体的には解析コードの機能として収縮を直接入力できないことが多く，同じ内力として載荷できる温度荷重に置換する．
2)　床版と鋼桁を分けてモデル化することから，床版の要素にのみ乾燥収縮による荷重を載荷する．
3)　床版コンクリートの最終収縮度を $\varepsilon_s = 20\times10^{-5}$ とすると，温度差によるひずみ
$\varepsilon_t = \alpha\cdot\Delta t = 12\times10^{-6}\times\Delta t$
との関係から，乾燥収縮を温度差に換算した場合の載荷温度 Δt は，次のようになる．
$\varepsilon_s = \varepsilon_t$
$\Delta t = \dfrac{20\times10^{-5}}{12\times10^{-6}} = 16.7℃$
4)　載荷範囲は，クリープと同様に後死荷重による曲げモーメントが正となる範囲とする．
②乾燥収縮現象による床版コンクリート部材長縮小の影響を床版の要素に，構造力学的に等価な温度荷重として載荷する．</td>
<td>1)　乾燥収縮を床版の収縮としてモデル化する．具体的には解析コードの機能として収縮を直接入力できないことが多く，同じ内力として載荷できる温度荷重に置換する．
2)　床版と鋼桁を分けてモデル化することから，床版の要素にのみ乾燥収縮による荷重を載荷する．
3)　せん断パネル解析と同様の要領で乾燥収縮の影響を温度差（16.7℃）に換算して，床版要素に載荷する．
4)　載荷範囲は，クリープと同様に後死荷重による曲げモーメントが正となる範囲とする．
②乾燥収縮現象による床版コンクリート部材長縮小の影響を床版の要素に，構造力学的に等価な温度荷重として載荷する．</td>
</tr>
</table>

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
7)温度差	1) 床版と鋼桁を一体化した合成断面を 1 本のはり要素でモデル化することから，主桁をモデル化したはり要素に軸力 P_1 と曲げモーメント M_1 を温度差による荷重として載荷する． 2) 床版コンクリートと鋼桁との温度差 Δt を±10 度として，合成断面に作用する軸力 P_1 と曲げモーメント M_1 を次式で求める． $P_1 = \dfrac{E_s \times \varepsilon_t \times A_c}{n}$ $M_1 = P_1 \cdot d_{vc}$ ここに，A_c：コンクリート床版断面積 ε_t：温度差によるひずみ（$= \alpha \times \Delta t$） α：コンクリートの線膨張係数(=12×10⁻⁶) d_{vc}：合成断面中立軸から床版中心までの距離 E_s：鋼のヤング係数 n：ヤング係数比(=7) 3) 床版コンクリートが引張応力状態となる領域においては，ひび割れが発生する可能性があることから，温度差による応力は発生しないとし，残りの範囲に軸方向荷重 P_1 とモーメント荷重 M_1 を載荷して不静定断面力を算出する．  図-2.1.13A　温度差の概念図 ②実態は床版コンクリートと鋼桁間に生じる温度差により両者にひずみ差が生じる現象であるものの，格子解析では床版と鋼桁を一体化した合成桁断面をモデル化したはり要素で構成し，温度差の影響を合成桁断面はりに対して構造力学的に等価な不静定曲げモーメントに置換して載荷する．	1) 温度差を床版の温度荷重として載荷する． 2) 床版と鋼桁を分けてモデル化することから，床版の要素にのみ温度差による荷重を載荷する． 3) 床版コンクリートと鋼桁との温度差 Δt を±10 度として直接載荷する． 4) 載荷範囲は，床版コンクリートが引張応力状態となる領域においては，ひび割れが発生する可能性があることから，温度差による応力は発生しないとし，残りの範囲を載荷範囲とする． ②床版コンクリートと鋼桁間に生じる温度差現象による床版コンクリート部材の伸縮の影響を床版の要素に，構造力学的に等価な温度荷重として載荷する．	1) 同左． 2) 同左 3) せん断パネル解析と同様の要領で乾燥収縮の影響を温度差（16.7℃）に換算して，床版要素に載荷する． 4) 同左． ②床版コンクリートと鋼桁間に生じる温度差現象による床版コンクリート部材の伸縮の影響を床版の要素に，構造力学的に等価な温度荷重として載荷する．

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
8)風荷重 9)地震荷重	1)　主荷重に対する解析で用いた解析モデルとは別に，中間横桁，中間対傾構，横構それぞれの部材に個別の力学モデルを設定する． 2)　各力学モデルに横荷重を直接載荷する． ②-1 上部構造全体で横力に抵抗する力学モデルが必要であるものの，通常は，格子解析モデルには載荷しないことから，横力への抵抗部材である中間横桁，中間対傾構，横構のそれぞれについて，個別の力学モデルを設定しなければならない． ②-2 全橋モデルにおいて，高さ方向に形成される中間対傾構や主桁の重心と異なる高さに設置される横構を別途モデル化しなければならない．	1)　主荷重に対する解析と同じ全橋モデルに横荷重を直接載荷する． 2)　載荷方法は，床版および主桁のはり要素に，風荷重と地震荷重をそれぞれ分担する線荷重に置換えて載荷することとする．  （a）風荷重 （b）地震荷重 図-2.1.14B　横荷重の載荷方法 （図は 4 主Ｉ桁の例） ①-1 上部構造全体で横力に抵抗する力学モデルが必要であり，主荷重に対する解析と同じ全橋モデルを用いることができる． （主桁，横桁以外に床版，横構，補剛材など 2 次部材までをそれぞれ単独でモデル化し，全橋モデルに含める） ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，横力に抵抗する部材である対傾構や横構および床版をモデル化することができる．	1)　主荷重に対する解析と同じ全橋モデルに横荷重を直接載荷する． 2)　載荷方法は，床版および主桁の各要素に，風荷重と地震荷重をそれぞれ分担する面荷重に置換えて載荷することとする．  （a）風荷重 （b）地震荷重 図-2.1.14C　横荷重の載荷方法 （図は 4 主Ｉ桁の例） ①-1 上部構造全体で横力に抵抗する力学モデルが必要であり，主荷重に対する解析と同じ全橋モデルを用いることができる． （主桁，横桁以外に床版，横構，補剛材など 2 次部材までをそれぞれ単独でモデル化し，全橋モデルに含める） ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，横力に抵抗する部材である対傾構や横構および床版をモデル化することができる．

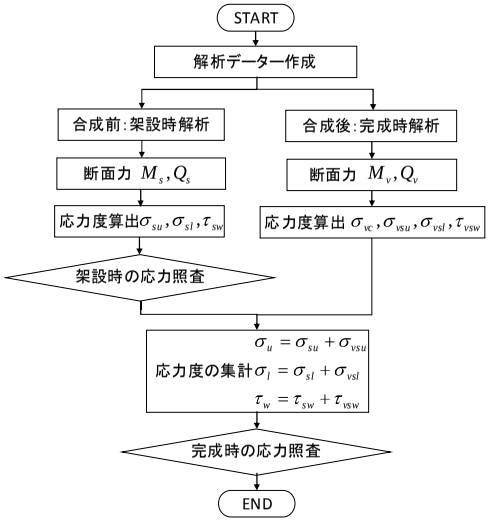
<table>
<tr><th>設計行為
項目</th><th colspan="3">設　計　手　法</th></tr>
<tr><th></th><th>従来設計（格子解析）</th><th>せん断パネル解析による設計</th><th>ＦＥＭ解析による設計</th></tr>
<tr><td>(4)設計断面力の算出</td>
<td>1）合成前と合成後の各要素における曲げモーメントやせん断力などの作用断面力を算出，整理する．
2）合成前は鋼桁，合成後は合成断面としての作用断面力を整理する．
 

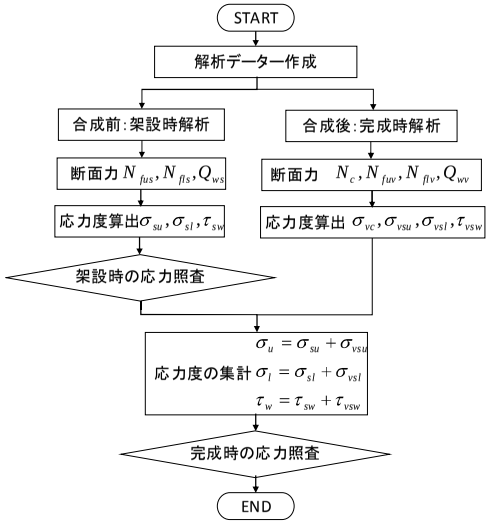
図-2.1.15A　断面力と応力度算出フロー
ここで，M_s, Q_s ：合成前の曲げモーメント，せん断力
M_v, Q_v ：合成後の曲げモーメント，せん断力
$\sigma_{su}, \sigma_{sl}, \tau_{sw}$ ：合成前の上下フランジ応力度とウェブせん断応力度
$\sigma_{vc}, \sigma_{vsu}, \sigma_{vsl}, \tau_{vsw}$ ：合成後の床版，上下フランジ応力度とウェブせん断応力度
$\sigma_u, \sigma_l, \tau_w$ ：合成前後合計の上下フランジ応力度とウェブせん断応力度</td>
<td>1）合成前と合成後の各要素における軸力，曲げモーメント，せん断力などの作用断面力を算出，整理する．
2）合成前は鋼桁，合成後は鋼桁のほかに床版の作用断面力をそれぞれ整理する．
 

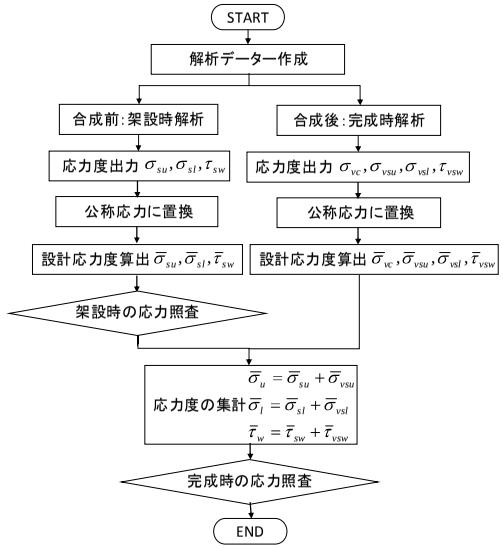
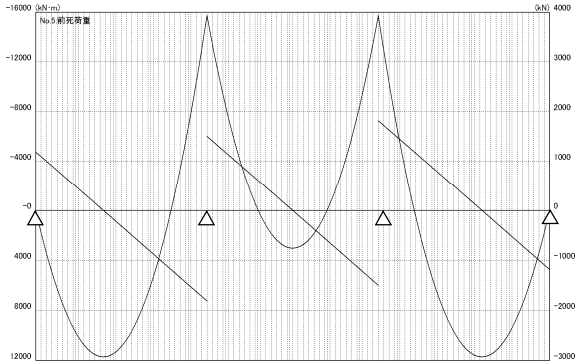
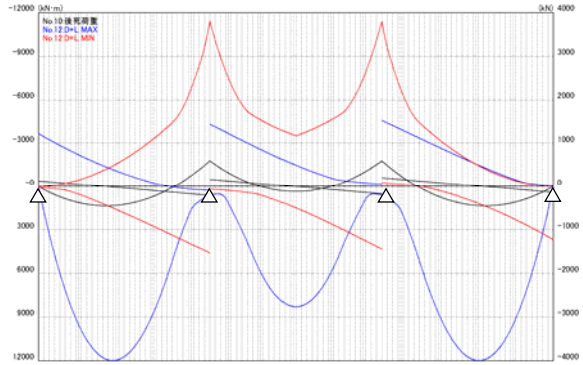
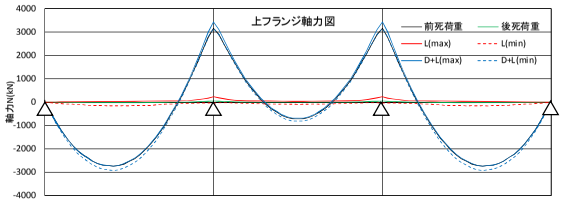
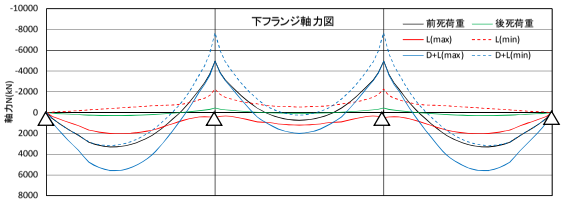
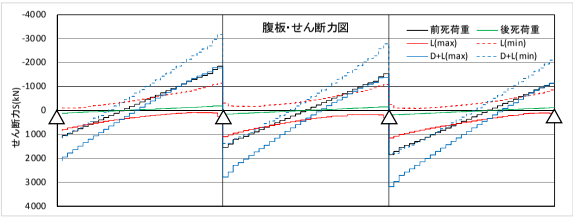
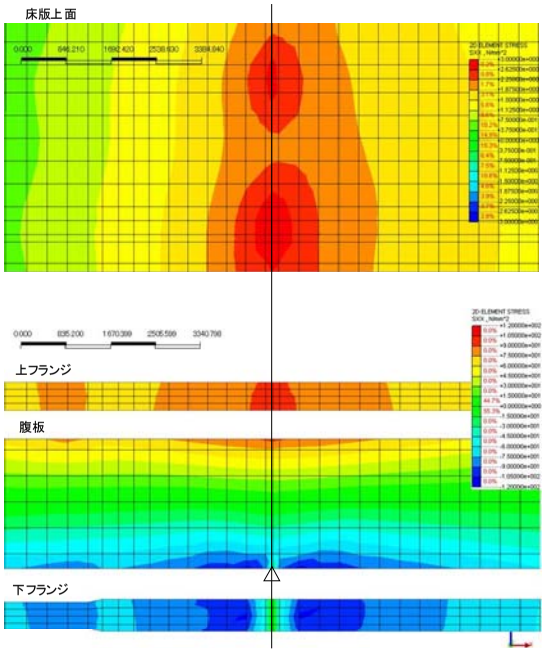
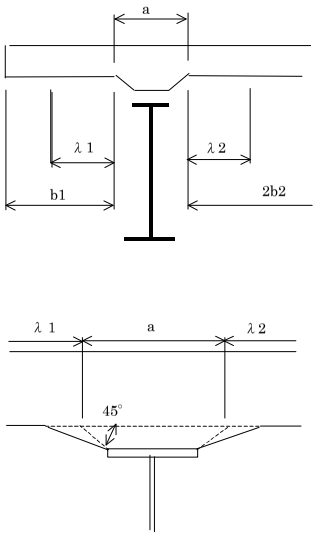
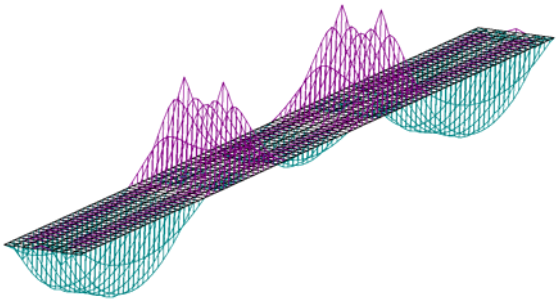
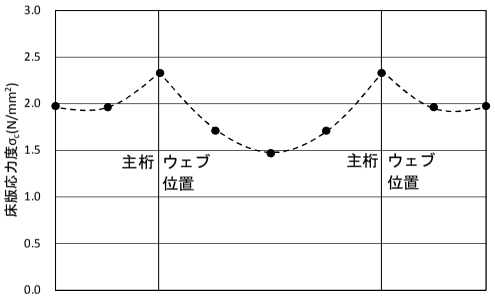
図-2.1.15B　断面力と応力度算出フロー
ここで，N_{fus}, N_{fls}, Q_{ws} ：合成前の上下フランジ軸力とウェブせん断力
$N_c, N_{fuv}, N_{flv}, Q_{wv}$ ：合成後の床版，上下フランジ軸力とウェブせん断力
ほかは同左．</td>
<td>1）合成前と合成後の各要素における作用応力を直接算出，整理する．
2）合成前は鋼桁，合成後は鋼桁のほかに床版の作用断面力をそれぞれ整理する．
3）フランジ，ウェブなどの材片ごとに各要素の作用応力を処理して公称応力に置換する．
 

図-2.1.15C　断面力と応力度算出フロー
ここで，記号は同左．
上にバーの付いた応力度は，置換した公称応力を示す．</td></tr>
</table>

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
1)断面力図	 （ａ）合成前  （ｂ）合成後 図-2.1.16A　作用断面力図の例 ①許容応力度と対比するために，通常は，公称応力としての作用応力を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができる．	 （ａ）上フランジ軸力図  （ｂ）下フランジ軸力図  （ｃ）ウェブせん断力図 図-2.1.16B　部材要素ごとの断面力図の例 ①-1 許容応力度と対比するために，公称応力としての作用応力を算出できる縁要素の作用断面力を解析から得ることができる． ①-2 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	 図-2.1.16C　FEM 解析によるコンター図の例（中間支点部の主桁） ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(5) 床版有効幅の算出	1) 床版の有効幅は，鋼桁と床版との合成断面に参入できる床版の幅であり，下図のλとａとを合わせた長さである．λは，床版の長さｂおよび支間長Ｌを用いて，道示Ⅱ.11.3.5の規定により算出する．  図-2.1.17A　床版の有効幅のλとａの取り方 ①実態で生じるせん断遅れによる応力分布を直接再現してはいないものの，通常は，設計上安全側に評価できるとみなせる有効幅の概念によりせん断遅れを考慮する．	1) 有効幅の算出は行わずに，2.1.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する．  図-2.1.17B　床版はり部材の軸力図の解析の例  図-2.1.18B　中間支点上床版の軸力方向応力度の例(D+L_{max}時) ①-1 実態で生じるせん断遅れによる応力分布を直接再現できる．そのため，有効幅を設定する必要がない． ①-2 全橋モデルは，床版を橋軸直角方向に複数の要素に分割できる． ①-3 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	1) 有効幅の算出は行わずに，2.1.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する． ①-1 実態で生じるせん断遅れによる応力分布を直接再現できる．そのため，有効幅を設定する必要がない． ①-2 全橋モデルは，床版を橋軸直角方向に複数の要素に分割できる． ①-3 せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．

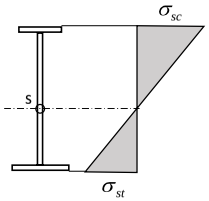
<table>
<tr><th>設計行為
項目</th><th colspan="3">設　計　手　法</th></tr>
<tr><th></th><th>従来設計（格子解析）</th><th>せん断パネル解析による設計</th><th>ＦＥＭ解析による設計</th></tr>
<tr><td>(6) 合成前の設計</td><td colspan="3">合成前の構造系と荷重条件で設計する．
・構造系：鋼桁のみで抵抗し，特殊な架設工法による場合は架設系での全体横ねじれ座屈の照査などを行う．
・荷重　：合成前死荷重と架設時の短期荷重（床版型枠，架設機材など）を考慮する．</td></tr>
<tr><td>1) 作用応力度の算出
2) 許容応力度の算出
3) 応力度の照査</td><td>1)曲げモーメントによる垂直応力度は，平面保持が成り立つとして（道示Ⅱ11.2.1）式により算出する．
2)せん断応力度は，せん断力の大部分がウェブで受け持たれ，ウェブ内にほぼ均一に分布するとして（道示Ⅱ11.2.2）式により算出する．
$\sigma_{sc} = -\frac{M_s}{I_s} \cdot y_{sc} \le 1.25 \cdot \sigma_{ca}$
$\sigma_{st} = \frac{M_s}{I_s} \cdot y_{st} \le 1.25 \cdot \sigma_{ta}$
$\tau = \frac{S}{A_w} \le 1.25 \cdot \tau_a$
 

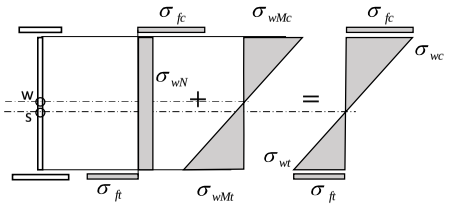
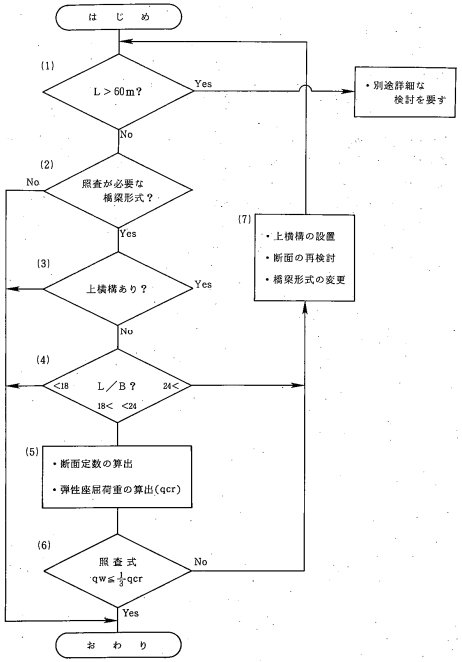
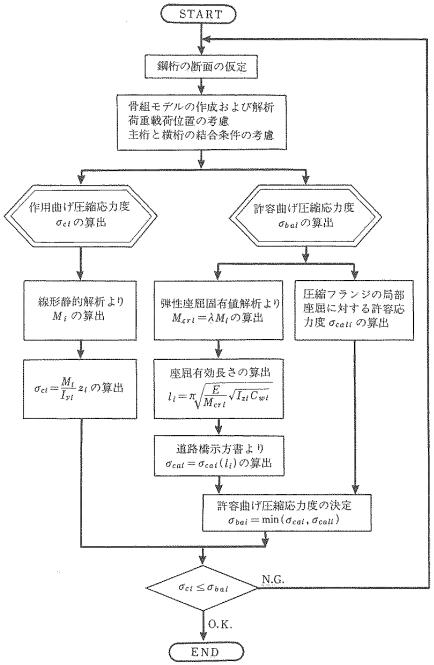
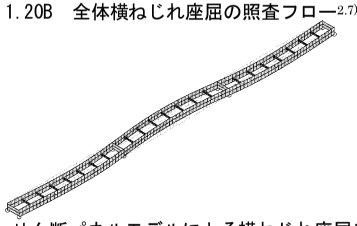
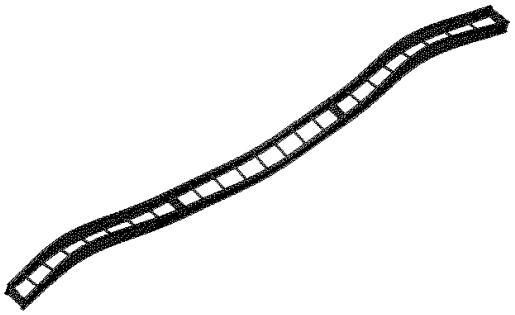
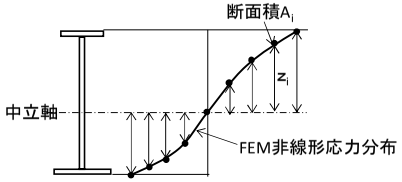
図-2.1.19A　鋼桁断面の曲げ応力度分布
ここで，σ_{sc}：曲げ圧縮応力度
σ_{st}：曲げ引張応力度
M_s：前死荷重による曲げモーメント
I_s：鋼桁断面の断面２次モーメント
y_{sc}、y_{st}：鋼桁断面の重心位置からの引張・圧縮縁距離
σ_{ca}、σ_{ta} 許容曲げ圧縮，引張応力度
τ：せん断応力度　　S：前死荷重によるせん断力
A_w：ウェブの断面積　　τ_a：許容せん断応力度
3)鋼桁断面の曲げ応力度とせん断応力度を，施工時の 25%割増した許容応力度に対して照査する．
①許容応力度と対比するために，通常は，公称応力としての作用応力を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができる．</td><td>1)フランジの応力度は，作用軸力とフランジ断面積から算出する．
$\sigma_f = \frac{N_f}{A_f} \le 1.25 \cdot \sigma_{ca} \quad or \le 1.25 \cdot \sigma_{ta}$
2)ウェブの垂直応力度は，軸力と曲げモーメントから次式で算出する．せん断応力度は従来設計と同様に算出する．
$\sigma_w = \sigma_{wN} + \sigma_{wM} = \frac{N_w}{A_w} + \frac{M_w}{I_w} \cdot y_{wi} \le 1.25 \cdot \sigma_{ca} \quad or \le 1.25 \cdot \sigma_{ta}$
$\tau = \frac{S}{A_w} \le 1.25 \cdot \tau_a$
 

図-2.1.19B　鋼桁板要素の垂直応力度分布
ここで，N_f：前死荷重によるフランジ軸力
A_f、A_w：フランジ，ウェブの断面積
N_w：前死荷重によるウェブ軸力
M_w：前死荷重によるウェブ曲げモーメント
I_w：ウェブの断面２次モーメント
y_{wi}：ウェブの重心位置からの引張・圧縮縁距離
σ_{ca}、σ_{ta} 許容曲げ圧縮，引張応力度
τ：せん断応力度　S：前死荷重によるウェブのせん断力
τ_a：許容せん断応力度
3)鋼桁の板要素ごとに曲げ応力度とせん断応力度を，施工時の 25%割増した許容応力度に対して照査する．
①-1 許容応力度と対比するために，公称応力としての作用応力を算出できる縁要素の作用断面力を解析から得ることができる．
①-2 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．</td><td>1) 各要素の作用応力をフランジやウェブごとに処理して公称応力 σ_s，τ に置換する．
$\sigma_s \le 1.25 \cdot \sigma_{ca} \quad or \le 1.25 \cdot \sigma_{ta}$
$\tau \le 1.25 \cdot \tau_a$
2)施工時の 25%割増した許容応力度に対して照査する．
③-1 各要素に対して得られる作用応力は２次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある．
③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．

許容値がないことに対する対応
③-1 各要素に対して得られる作用応力は２次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．
③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない．</td></tr>
<tr><td>許容値
（規格値）</td><td>道示Ⅱ表 3.2.3
道示の適用範囲の橋梁に対して，道示どおりの作用応力度の算出を行うため，道示の許容応力度を用いることができる．</td><td>道示Ⅱ表 3.2.3
柱の有効座屈長と同様な考え方を用いてせん断パネルモデルの線形座屈解析によって得られる弾性座屈軸力からフランジの固定点間距離を算出して，道示の基準耐荷力曲線（表-3.2.3（b））を適用して許容曲げ圧縮応力度を求める．</td><td></td></tr>
</table>

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
4)全体横ねじれ座屈の照査	図-2.1.2 に示した主桁の設計フローの中で全体横ねじれ座屈照査の必要性が「有」となった場合に，以下の照査を行う． 照査は鋼道路橋設計便覧 2.5)を参考にでき，照査フローは下図 2.6) のようであり，留意事項は以下のとおりである． ・下横構が設けられること． ・L/B＞18 の場合は弾性座屈解析を行い，安全率 3 を確保する． ・L/B＞24 の場合は上横構を設置するなど構造変更をする．  図-2.1.20A　全体横ねじれ座屈の照査フローと許容応力度 2.6) ①下横構がある場合の適用範囲となる． ②下横構がない場合，別途検討をしなければならない．	全体横ねじれ座屈照査のフロー2.7)を図-2.1.20B に示す．  図-2.1.20B　全体横ねじれ座屈の照査フロー2.7)  図-2.1.21B　せん断パネルモデルによる横ねじれ座屈モードの例 ①-1 下横構の有無に関わらず適用が可能である． ①-2 全橋モデルは，主桁のフランジ，ウェブをそれぞれモデル化することから，主桁のそりねじり剛度を考慮でき，弾性座屈モーメントの算出が可能となる． ①-3 局部座屈の影響を受けない支間の座屈モードの抽出方法を確立する必要がある．	全体横ねじれ座屈照査は，せん断パネル解析と同様である．  図-2.1.20C　FEM モデルによる横ねじれ座屈モードの例  要素軸力　$N_i=\sigma_i\times A_i$ 曲げモーメント　$M=\sum N_i\times z_i$ 図-2.1.21C　FEM 結果から曲げモーメントの算出方法 ①-1 下横構の有無に関わらず適用が可能である． ①-2 全橋モデルは，主桁のフランジ，ウェブをそれぞれモデル化することから，主桁のそりねじり剛度を考慮でき，弾性座屈モーメントの算出が可能となる． ①-3 局部座屈の影響を受けない支間の座屈モードの抽出方法を確立する必要がある．

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(7)完成時の設計 1)作用応力度の算出	1) 各荷重に対する床版コンクリートの作用応力は**表-2.1.2A**，鋼桁および鉄筋の作用応力は**表-2.1.3A**に算出方法をそれぞれ示す． 2) 床版は荷重ごとにヤング係数比を変え，また引張応力が作用する場合は鉄筋断面に置き換えた合成断面で作用応力度を算出する．	軸力と曲げモーメントによる作用応力度を足し合わせて各荷重に対する応力度を算出する． ①-1 全橋長にわたって床版コンクリートを有効としてモデル化するため，床版コンクリートに引張応力度が作用する場合は，コンクリートを有効とした合成断面の断面係数と，鋼桁＋鉄筋断面の断面係数との比率により解析結果の応力度を補正しなければならない． ①-2 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	フランジやウェブごとに処理して公称応力に置換する． ①-1 床版コンクリートに引張応力度が作用する場合は，鉄筋断面を直接置換せずにコンクリートとする． ①-2 せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．

表-2.1.2A　床版コンクリートの作用応力度の算出方法

着目荷重	適用区間	応力度算出式	ヤング係数比
後死荷重 活荷重	全区間	$-1/n \cdot M_v \cdot y_v/I_v$	n=7
クリープ	後死荷重による曲げモーメントが正の範囲	$-1/n1 \cdot \{P_\phi/A_{v1}+(M_\phi+M_x) \cdot y_{v1}/I_{v1}\}+E_{c1} \cdot \sigma_c \cdot \phi_1/E_c$	n1=14
	後死荷重による曲げモーメントが負の範囲	$-1/n1 \cdot M_x \cdot y_{v1}/I_{v1}$	
乾燥収縮	中間支点付近以外	$-1/n2 \cdot \{P_2/A_{v2}+(M_{v2}+M_x) \cdot y_{v2}/I_{v2}\}+E_{c2} \cdot \varepsilon_s$	n2=21
	中間支点付近（0.15L）	$-1/n2 \cdot M_x \cdot y_{v2}/I_{v2}$	
温度差	全区間	$-1/n \cdot \{P_1/A_v+(M_u+M_x) \cdot y_v/I_v\}+E_c \cdot \varepsilon_t$	n=7

クリープによる応力度は、後死荷重による曲げモーメントが負の場合、不静定曲げモーメント M_x による応力のみ生じる。
コンクリートの乾燥収縮は全範囲にわたり生じる現象ではあるが、中間支点付近はひび割れを考慮しているため、その箇所でのコンクリート収縮による応力は生じず、不静定曲げモーメント M_x による応力のみ生じる。

M_v　：後死荷重、活荷重による曲げモーメント
M_ϕ　：クリープによる静定曲げモーメント
M_{v2}　：乾燥収縮による静定曲げモーメント
M_u　：温度差による静定曲げモーメント
M_x　：クリープ、乾燥収縮，温度差による不静定曲げモーメント
P_ϕ　：クリープによる軸力
P_1　：温度差による軸力
P_2　：乾燥収縮による軸力
y_v, A_v, I_v　：n＝7 断面の重心位置からの距離、断面積，断面二次モーメント
y_{v1}, A_{v1}, I_{v1}　：n_1＝14 断面の重心位置からの距離、断面積，断面二次モーメント
y_{v2}, A_{v2}, I_{v2}　：n_2＝21 断面の重心位置からの距離、断面積，断面二次モーメント
E_c　：n＝7 のコンクリートのヤング係数
E_{c1}　：n_1＝14 のコンクリートのヤング係数
E_{c2}　：n_2＝21 のコンクリートのヤング係数
σ_c　：後死荷重による床版コンクリートの応力度
ϕ_1　：クリープ係数＝2.0
ε_s　：乾燥収縮による最終収縮度＝20×10^{-5}
ε_t　：温度差によるひずみ量＝$\alpha\times\Delta t=12\times10^{-5}$

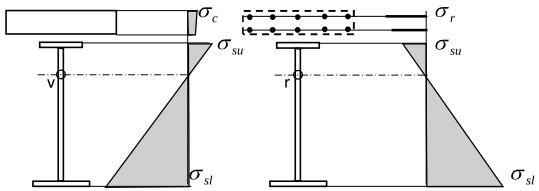
①許容応力度と対比するために，通常は，公称応力としての作用応力を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができる．

表-2.1.3A　鋼桁および鉄筋の作用応力度の算出方法

着目荷重	床版の応力状態		鉄筋	鋼桁 σ	鋼桁 τ
後死荷重 活荷重	圧縮		—	$-M_v \cdot y_v/I_v$	S_v/A_w
	引張		$-M_x \cdot y_r/I_r$	$-M_v \cdot y_r/I_r$	
クリープ	圧縮	後死荷重による曲げモーメントが正の範囲	—	$-P_\phi/A_{v1}-(M_\phi+M_x) \cdot y_{v1}/I_{v1}$	S_x/A_w
		後死荷重による曲げモーメントが負の範囲	—	$-M_x \cdot y_{v1}/I_{v1}$	
	引張		$-M_x \cdot y_r/I_r$	$-M_x \cdot y_r/I_r$	
乾燥収縮	圧縮	中間支点付近以外	—	$-P_2/A_{v2}-(M_{v2}+M_x) \cdot y_{v2}/I_{v2}$	S_x/A_w
		中間支点付近（0.15L）	—	$-M_x \cdot y_{v2}/I_{v2}$	
	引張		$-M_x \cdot y_r/I_r$	$-M_x \cdot y_r/I_r$	
温度差	圧縮		—	$-P_1/A_v-(M_u+M_x) \cdot y_v/I_v$	S_x/A_w
	引張		$-M_x \cdot y_r/I_r$	$-M_x \cdot y_r/I_r$	

・床版の応力状態とは、荷重の組み合わせによる床版コンクリート応力度のことを示しており、各荷重ケースでの床版応力度とは異なる。
・表中の M_x はクリープ、乾燥収縮、温度差による不静定曲げモーメントを表す。S_x はそれによるせん断力を表す。

M_s　：前死荷重による曲げモーメント
S_s　：前死荷重によるせん断力
S_v　：後死荷重および活荷重によるせん断力
S_x　：クリープ、乾燥収縮、温度差の不静定曲げモーメントによるせん断力
y_s, I_s　：鋼桁断面の重心位置からの距離、断面二次モーメント
y_r, I_r　：鋼桁＋鉄筋断面の重心位置からの距離、断面二次モーメント
A_w　：鋼桁腹板の断面積



（正曲げの範囲）　（負曲げの範囲）

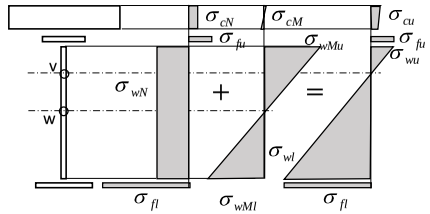
図-2.1.22A　合成断面の曲げ応力度分布

・フランジの応力度 $\sigma_f=\dfrac{N_f}{A_f}$（板厚が厚い場合は板曲げ応力も加算）

・ウェブ，床版，鉄筋の応力度

$$\sigma_i=\sigma_{iN}+\sigma_{iM}=\frac{N_i}{A_i}+\frac{M_i}{I_i}\cdot y_i$$

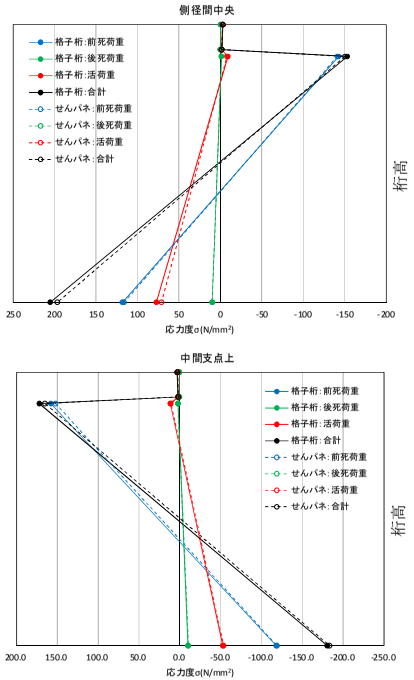
$$\tau=\frac{S}{A_w}$$



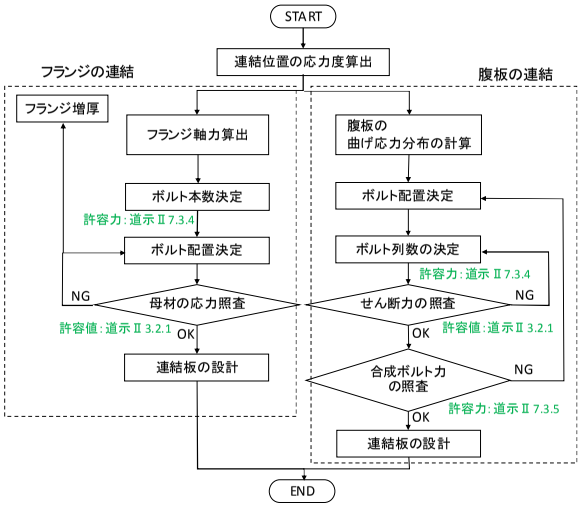
軸力N分　曲げﾓｰﾒﾝﾄM分　合計

図-2.1.22B　合成断面の垂直応力度分布

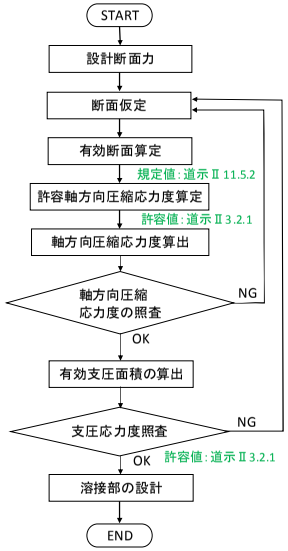
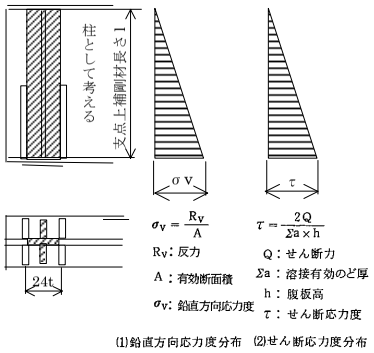
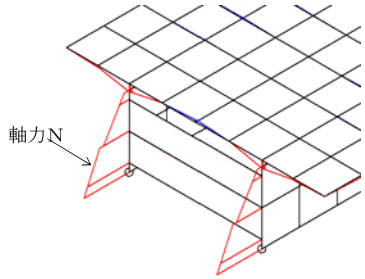
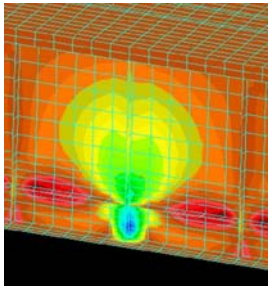
ここで，N_f：フランジ軸力
A_f、A_i：フランジ，ウェブ他の断面積
N_i：ウェブ他の軸力
M_i：ウェブ他の曲げモーメント
I_i：ウェブ他の断面２次モーメント
y_i：ウェブ他の重心位置からの引張・圧縮縁距離
S：ウェブのせん断力

設計行為	設　計　手　法		
項目	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
2)許容応力度の算出 3)応力度の照査	荷重ケースの作用応力度を組み合わせて，割増した許容応力度に対して照査する． 表-2.1.4A　基本荷重ケースと組み合わせ荷重ケース 基本荷重ケース：①合成前死荷重／②合成後死荷重／③活荷重／④クリープの影響／⑤乾燥収縮の影響／⑥温度差の影響／⑦床版コンクリートの床版作用による応力度 組み合わせ荷重ケース：(1)合成前死荷重による施工時鋼桁断面の照査 ①／(2)クリープと乾燥収縮の影響を除く主荷重状態の照査 ①＋②+③／(3)主荷重状態の照査 ①+②+③+④+⑤／(4)主荷重と温度差を組み合わせた状態の照査 ①+②+③+④+⑤+⑥／(5)降伏に対する安全度の照査 ①x1.3+②x1.3+③x2+④+⑤+⑥／(6)床版の主桁作用と床版作用との重ね合わせの照査 ①+②+③+④+⑤+⑦ 表-2.1.5A　許容応力度の割増係数一覧 荷重ケース／床版：コンクリート：－／鉄筋：－／鋼桁：上縁：1.25／下縁：1.25 合成前死荷重による施工時鋼桁断面の照査：－／－／1.25／1.25 クリープと乾燥収縮の影響を除く主荷重状態の照査：1.00／1.00／1.00／1.00 主荷重状態の照査：1.00／1.00／圧縮:1.15 引張:1.00／1.00 主荷重と温度差を組み合わせた状態の照査：1.15／1.00／圧縮:1.30 引張:1.15／1.15 降伏に対する安全度の照査：1.00／1.00／1.00／1.00 床版の主桁作用と床版作用との重ね合わせの照査：1.40／1.20／－／－	荷重ケースの作用応力度を組み合わせて，割増した許容応力度に対して照査する． 許容応力度と作用応力度を対比するには，従来設計と同様に公称応力である必要がある．参考として，死荷重と活荷重に関するせん断パネル解析による解析結果について，従来設計による場合と比較した例を図-2.1.23B に示す．両設計法による作用応力度はほぼ一致する．  図-2.1.23B　床版と鋼桁断面の応力度分布	荷重ケースの作用応力度を組み合わせて，割増した許容応力度に対して照査する． *許容値がないことに対する対応* ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない．
許容値 （規格値）	道示Ⅱ3.2.1，12.2.3，12.3.1，12.3.2 道示の適用範囲の鋼橋に対して，公称応力としての作用応力度を道示どおりに算出するため，道示の許容応力度を用いて良い．	道示Ⅱ3.2.1，12.2.3，12.3.1，12.3.2 図-2.1.23B に示すように，従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため，道示の許容応力度を用いて良い．	

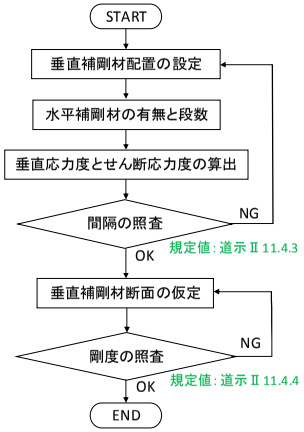
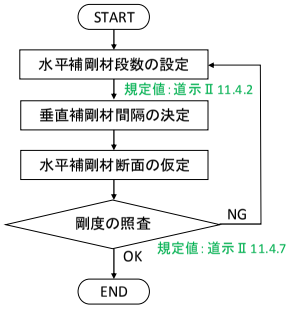
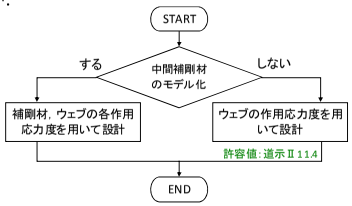
2.1.3　連結

設計行為		設　計　手　法		
設計フロー	項目	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
 図-2.1.24　連結の設計フロー	(1)連結位置の応力度算出 (2)フランジの連結 1)フランジ軸力算出 2)ボルト本数決定 3)ボルト配置決定 4)母材の応力照査 5)連結板の設計 (3)ウェブの連結 1)ウェブの曲げ応力分布の計算 2)ボルト配置決定 3)ボルト列数の決定 4)せん断力の照査 5)合成ボルト力の照査 6)連結板の設計	道示Ⅱ3.2.3，7.3 の各規定によって設計する． ①通常は，連結部の設計を行うための連結部断面の作用断面力を直接算出する．	道示Ⅱ3.2.3，7.3 の各規定によって設計する． ①通常は，連結部の設計を行うための連結部断面の作用断面力を直接算出する．	1)　連結部の各要素の作用応力を，フランジ軸力，ウェブの曲げモーメントおよびせん断力に変換する． 2)　後は，従来設計と同じ． ③-1 各要素の作用応力は 2 次応力も含んだ局所応力であることから，連結部の設計を行うために連結部断面の作用断面力に置換する処理をしなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある． ③-2 連結部の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．
	許容値（規格値）	道示Ⅱ7.3 道示における規格値の対象箇所に対して，道示どおりの作用応力度の算出を行うため，道示の許容応力度を用いて良い．	道示Ⅱ7.3 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため，道示の許容応力度を用いて良い．	*許容値がないことに対する対応* ③-1 各要素の作用応力は 2 次応力も含んだ局所応力であることから，連結部の設計を行うために連結部断面の作用断面力に置換する処理を行わなければならない． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない．

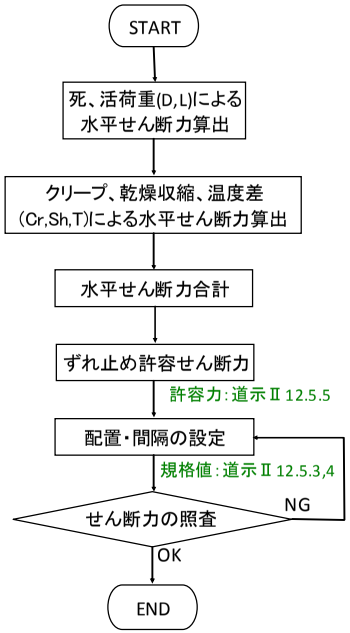
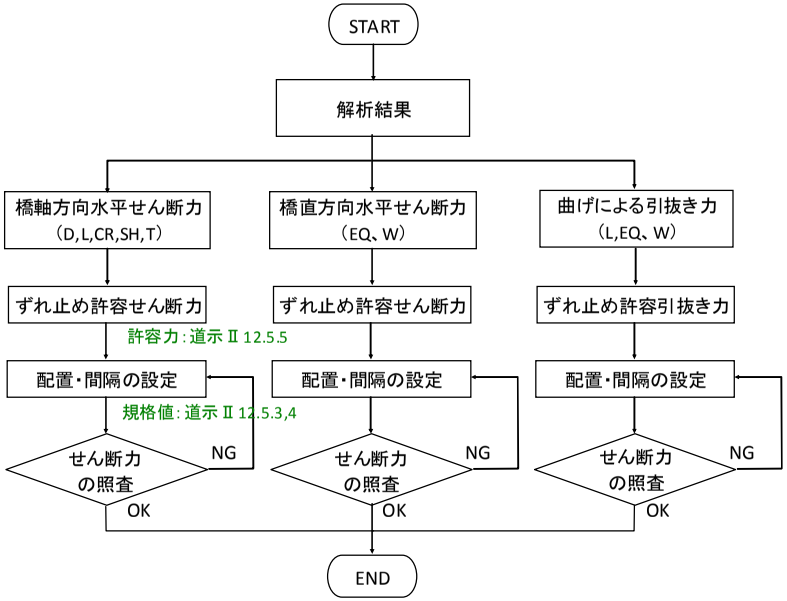
2.1.4　支点上補剛材

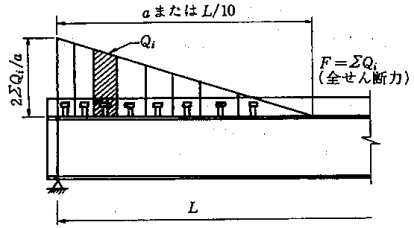
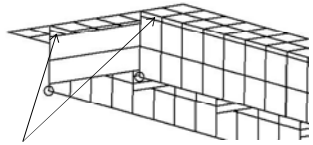
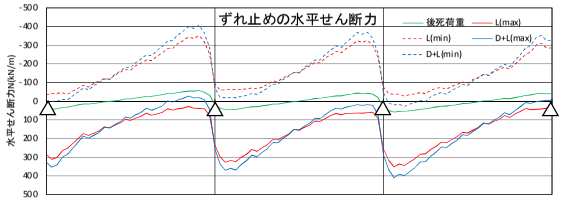
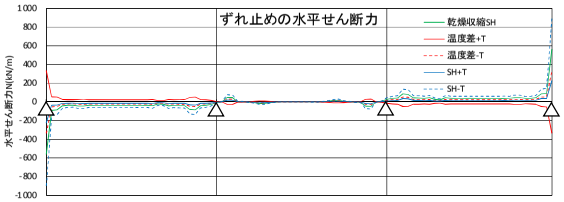
設　計　行　為			設　計　手　法		
設計フロー	項目		従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
 図-2.1.25　支点上補剛材の設計フロー	(1)設計断面力の算出 (2)断面の仮定 (3)有効断面の算出 (4)軸方向圧縮応力度の算出 (5)許容軸方向圧縮応力度の算出 (6)軸方向圧縮応力度の照査 (7)有効支圧面積の算出 (8)支圧応力度の算出 (9)許容支圧応力度の算出 (10)支圧応力度の照査 (11)溶接部の設計		道示Ⅱ11.5の各規定によって設計する． 支点反力が下図の様に鉛直方向に三角形分布すると仮定して，支点上補剛材とウェブとからなる有効断面の柱が座屈および支圧に対して安全であることを照査する．  図-2.1.26A　支点上補剛材の応力分布図 ①実態で生じる支点上補剛材の応力分布を直接再現してはいないものの，通常は，設計上安全側に評価できるとみなせる応力分布を仮定する．	道示Ⅱ11.5の各規定によって設計する．  図-2.1.26B　支点上鉛直部材の軸力の解析の例 ①-1 設計上安全側に評価できるとみなせる従来設計と同様な応力分布を算出できる． ①-2 従来設計と同様な応力分布となるための要素分割手法を確立する必要がある．	1)　支点上補剛材および主桁ウェブの各要素の作用応力を，支点反力に変換する． 2)　後は，従来設計と同じ．  図-2.1.26C　支点付近の鉛直方向応力度の例 （中間支点部） ③-1 実態と整合した応力分布となるためには，支承，ソールプレート，下フランジなどを正確にモデル化しなければならない． ③-2 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある． ③-3 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．
		許容値 （規格値）	道示Ⅱ3.2.1，11.5.2 道示における規格値の対象箇所に対して，道示どおりの作用応力度の算出を行うため，道示の許容応力度を用いて良い．	道示Ⅱ3.2.1，11.5.2 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため，道示の許容応力度を用いて良い．	*許容値がないことに対する対応* ③-1 各要素の作用応力は 2 次応力も含んだ局所応力であることから，支点上補剛材の設計を行うための処理を行わなければならない． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない．

2.1.5　中間垂直補剛材，水平補剛材

設　計　行　為		設　計　手　法		
設計フロー	項目	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
 図-2.1.27　中間垂直補剛材の設計フロー	(1) 補剛材配置の設定	道示Ⅱ11.4.3, 11.4.6 の各規定によって設定する．	道示Ⅱ11.4.3, 11.4.6 の各規定によって設定する．	道示Ⅱ11.4.3, 11.4.6 の各規定によって設定する．
	(2) 水平補剛材の有無と段数の決定	道示Ⅱ11.4.2 の規定によって決定する．	道示Ⅱ11.4.2 の各規定によって設定する．	道示Ⅱ11.4.2 の各規定によって設定する．
	(3) 垂直応力度とせん断応力度の算出	補剛材位置での作用応力度を算出する．	補剛材位置での作用応力度を算出する．	補剛材位置での作用応力度を算出する．
	(4) 間隔の照査	道示Ⅱ11.4.3 の規定によって照査する．	道示Ⅱ11.4.3 の規定によって照査する．	③モデル化，許容値，および照査方法を確立する必要がある．
	(5) 補剛材断面の仮定	道示Ⅱ4.2.3，11.4.4 の規定により仮定する．	道示Ⅱ4.2.3，11.4.4 の規定により仮定する．	道示Ⅱ4.2.3，11.4.4 の規定により仮定する．
	(6) 剛度の照査	道示Ⅱ11.4.4，11.4.7 の規定により照査する．	道示Ⅱ11.4.4，11.4.7 の規定により照査する．	③モデル化，許容値，および照査方法を確立する必要がある．
	許容値（規格値）	道示Ⅱ11.4.2，11.4.3，11.4.4，11.4.7 道示における規格値の対象箇所に対して，道示どおりの作用応力度の算出を行うため，道示の規格値を用いて良い．	道示Ⅱ11.4.2，11.4.3，11.4.4，11.4.7 道示における規格値の対象箇所に対して，道示どおりの作用応力度の算出を行うため，道示の規格値を用いて良い．	*許容値がないことに対する対応* ③-1 各要素の作用応力は 2 次応力も含んだ局所応力であることから，中間補剛材の設計を行うための処理を行わなければならない． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない．
 図-2.1.28　水平補剛材の設計フロー	（補剛材のモデル化について）	主桁をはり要素でモデル化するので，補剛材は解析において考慮されない．	補剛材をモデル化せずに，主桁ウェブの作用応力から補剛材の設計を行う． ただし，垂直補剛材は実構造に合せてモデル化し，配置することも可能である．補剛材の標準的な配置（格点間を 4 等分）に合せて橋軸方向に要素分割し，垂直補剛材を縁部材として配置すればよい．  図-2.1.29B　補剛材のモデル化考慮 ③補剛材をモデル化して要素の作用応力を評価して設計する場合，従来構造と同等な安全率を踏まえた許容値を設定しなければならない．	補剛材をモデル化せずに，主桁ウェブの作用応力から補剛材の設計を行う． ただし，垂直補剛材は実構造に合せてモデル化し，配置することも可能である．補剛材の標準的な配置（格点間を 4 等分）に合せて橋軸方向に要素分割し，垂直補剛材を縁部材として配置すればよい．主桁の耐荷力を幾何学的非線形，および材料非線形を考慮した弾塑性有限変位解析によって算出する場合は，垂直補剛材および水平補剛材を実構造に合わせてモデル化する必要がある． ③補剛材をモデル化して要素の作用応力を評価して設計する場合，従来構造と同等な安全率を踏まえた許容値を設定しなければならない．

2.1.6　ずれ止めの設計

設　計　行　為	
設計フロー	項目
 図-2.1.30　橋軸方向水平せん断力に対するずれ止めの設計フロー  図-2.1.31　橋直方向水平せん断力と曲げ引抜き力を考慮した場合のずれ止めの設計フロー	(1) 作用力の算出 1) 橋軸方向水平せん断力 2) 橋直方向水平せん断力 3) 曲げによる引抜き力 (2) ずれ止めの許容力の算出 1) 橋軸方向許容せん断力 2) 橋直方向許容せん断力 3) 許容引抜き力 (3) 配置・間隔の設定 (4) せん断力の照査

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(1) 作用力の算出 1) 橋軸方向せん断力	1) 後死荷重と活荷重による水平せん断力を次式から算出する． $H_p = \dfrac{G \cdot S_v}{I_v}$　ここで，G：床版の断面一次モーメント S_v：垂直せん断力 I_v：合成断面の断面二次モーメント 2) 乾燥収縮と温度差による水平せん断力は，床版の自由端部の下図の範囲に負担させる．  ここに，a　：主桁間隔 L　：単純桁の場合　L：支間長 連続桁の場合　L：支間長の合計 図-2.1.32A　乾燥収縮と温度差による水平せん断力の分布形状 [2.1)] ①実態で生じるずれ止めの応力分布を直接再現してはいないものの，通常は，設計上安全側に評価できるとみなせる応力分布を仮定する．	ずれ止め部分に配置したせん断パネルのせん断流を単位長さ当りの水平せん断力として算出する．  ずれ止め部分の せん断パネルのせん断流＝水平せん断力 H_p 図-2.1.32B　ずれ止め部分のせん断パネ  図-2.1.33B　後死荷重と活荷重による水平せん断力の解析結果の例  図-2.1.34B　乾燥収縮と温度差による水平せん断力の解析結果の例 ①-1 ずれ止め部分に配置したせん断パネルのせん断流から，設計上安全側に評価できるとみなせる従来設計と同様な応力分布を直接算出できる． ①-2 従来設計と同様な応力分布となるための要素分割手法を確立する必要がある．	ずれ止め部分に配置したバネ要素の橋軸方向水平反力を要素配置間隔長さ当りの水平せん断力として算出する． ①せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある． ③各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある．

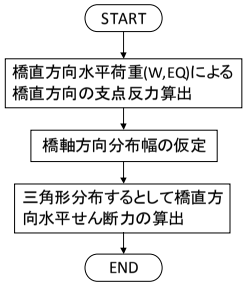
<table>
<tr><th rowspan="2">設計行為
項目</th><th colspan="3">設　計　手　法</th></tr>
<tr><th>従来設計（格子解析）</th><th>せん断パネル解析による設計</th><th>ＦＥＭ解析による設計</th></tr>
<tr><td>2)
橋直方向せん断力</td><td>主構造の解析モデルとは別の解析モデルを作成して個別に検討する．
 

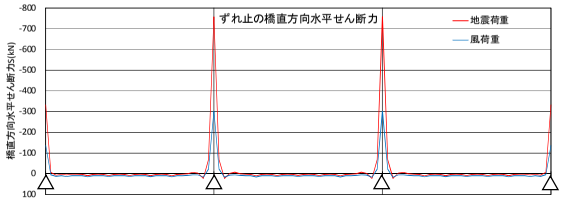
図-2.1.35A　橋直方向せん断力の算出フロー
②橋軸直角方向のずれ止めを設計する場合，主桁や横桁と床版を分離してずれ止めのモデル化をしなければならない．通常は，平面格子モデルでは床版を分離したモデル化を行わず，別途計算モデルを作成する．</td><td>ずれ止め部分に配置した縁部材に作用するせん断力を要素配置間隔当りの水平せん断力として算出する．
 

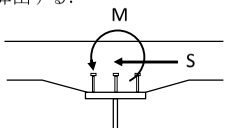
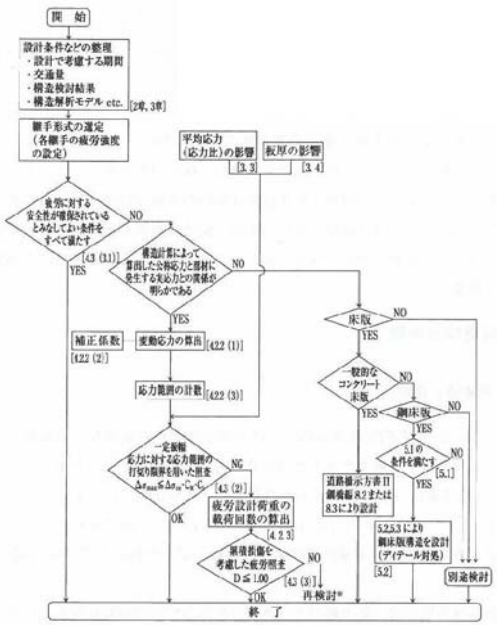
図-2.1.35B　横荷重によってずれ止め要素に生じる橋直方向水平せん断力図の例
①-1 ずれ止め部分に配置した縁部材のせん断力の解析結果から直接，橋直方向水平せん断力を得ることができる．
①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁や横桁と独立した床版，およびずれ止めをモデル化することができる．
①-3 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．</td><td>ずれ止め部分に配置したバネ要素の橋直方向水平反力を要素配置間隔長さ当りの水平せん断力として算出する．
①-1 ずれ止め部分に配置したバネ要素のせん断力の解析結果から直接，橋直方向水平せん断力を得ることができる．
①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁や横桁と独立した床版，およびずれ止めをモデル化することができる．
①-3 せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．
③各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある．</td></tr>
<tr><td>3)
曲げ引き抜き力</td><td>主構造の解析モデルとは別の解析モデルを作成して個別に検討する．
②曲げ引き抜き力についてずれ止めの設計する場合，主桁や横桁と床版を分離してずれ止めのモデル化をしなければならない．通常は，平面格子モデルでは床版を分離したモデル化を行わず，別途計算モデルを作成する．</td><td>ずれ止め部分に配置した縁部材に作用する曲げモーメントから曲げ引き抜き力を算出する．
 

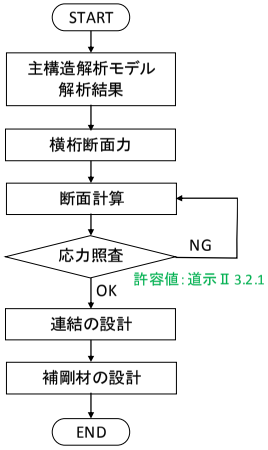
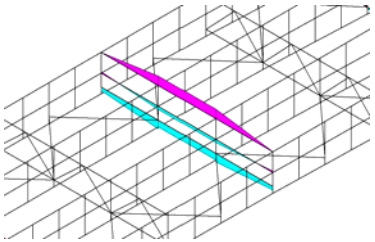
図-2.1.36B　横荷重によってずれ止めに作用する力
①-1 ずれ止め部分に配置した縁部材の曲げモーメントの解析結果から直接，曲げ引き抜き力を得ることができる．
①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁や横桁と独立した床版，およびずれ止めをモデル化することができる．
①-3 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．</td><td>ずれ止め部分に配置したバネ要素の鉛直反力から曲げ引き抜き力を算出する．
①-1 ずれ止め部分に配置したバネ要素の曲げモーメントの解析結果から直接，曲げ引き抜き力を得ることができる．
①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁や横桁と独立した床版，およびずれ止めをモデル化することができる．
①-3 せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．
③各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある．</td></tr>
</table>

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(2) ずれ止めの許容せん断力の算出			
1) 橋軸方向せん断力	道示Ⅱ.12.5.5 道示における規格値の対象箇所に対して，道示どおりの作用応力度の算出を行うため，道示の許容応力度を用いて良い.	道示Ⅱ.12.5.5 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため，道示の許容応力度を用いて良い.	*許容値がないことに対する対応* ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない. ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない.
2) 橋直方向せん断力	*許容値がないことに対する対応* ③橋直角方向せん断力について設計する場合，一定の安全率を踏まえた許容値を設定しなければならない.	*許容値がないことに対する対応* ③橋直角方向せん断力について設計する場合，一定の安全率を踏まえた許容値を設定しなければならない.	*許容値がないことに対する対応* ③橋直角方向せん断力について設計する場合，一定の安全率を踏まえた許容値を設定しなければならない.
3) 曲げ引き抜き力	*許容値がないことに対する対応* ③曲げ引き抜き力について設計する場合，一定の安全率を踏まえた許容値を設定しなければならない.	*許容値がないことに対する対応* ③曲げ引き抜き力について設計する場合，一定の安全率を踏まえた許容値を設定しなければならない.	*許容値がないことに対する対応* ③曲げ引き抜き力について設計する場合，一定の安全率を踏まえた許容値を設定しなければならない.
(3) 配置・間隔の設定（規格値）			
1) 橋軸方向せん断力に対して	道示Ⅱ15.5.3，12.5.4 道示における規格値の対象箇所に対して，道示どおりの作用応力度の算出を行うため，道示の規格値を用いて良い.	道示Ⅱ15.5.3，12.5.4 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため，道示の許容応力度を用いて良い.	*規格値がないことに対する対応* ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない. ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した規格値を設定しなければならない.
2) 橋直方向せん断力に対して	*規格値がないことに対する対応* ③橋直角方向せん断力について設計する場合，一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない.	*規格値がないことに対する対応* ③橋直角方向せん断力について設計する場合，一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない.	*規格値がないことに対する対応* ③橋直角方向せん断力について設計する場合，一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない.
3) 曲げ引き抜き力に対して	*規格値がないことに対する対応* ③曲げ引き抜き力について設計する場合，一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない.	*規格値がないことに対する対応* ③曲げ引き抜き力について設計する場合，一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない.	*規格値がないことに対する対応* ③曲げ引き抜き力について設計する場合，一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない.

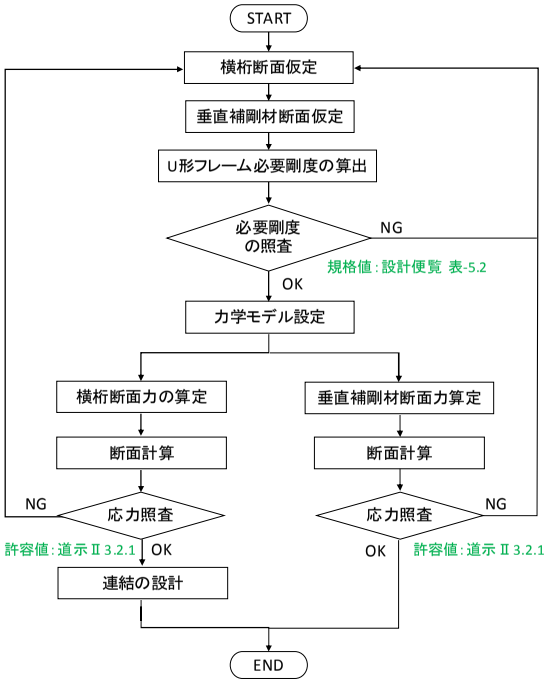
2.1.7　疲労設計

設　計　行　為		設　計　手　法		
設計フロー	項目	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
 図-2.1.37　疲労設計フロー[2.8)]	(1)疲労照査条件の設定 (2)応力範囲の算出 (3)継手の許容応力範囲の算出 (4)簡便な疲労照査 (5)詳細な疲労照査	・作業は，図-2.1.37 のとおり． ・道示Ⅱ5.3，6 章，鋼橋の疲労設計指針の各規定によって設計する． ・T 荷重をレーン載荷して着目箇所の応力範囲を算出する． ①許容応力度と対比するために，通常は，公称応力としての作用応力を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができる． ・コンクリート床版を有する鋼Ｉ桁を格子解析する場合の構造解析係数 γ_a=0.8 を適用する．ただし，少数主桁の場合は γ_a=1.0 とする[2.8)]．	・作業は，図-2.1.37 のとおり． ・道示Ⅱ5.3，6 章，鋼橋の疲労設計指針の各規定によって設計する． ・T 荷重をレーン載荷して着目箇所の応力範囲を算出する． ①-1 許容応力度と対比するために，通常は，公称応力としての作用応力を算出できる縁要素の作用断面力を解析から得ることができる． ①-2 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある． ・コンクリート床版を有する鋼Ｉ桁を骨組解析する場合の構造解析係数 γ_a=0.8 を適用する．ただし，少数主桁の場合は γ_a=1.0 とする[2.8)]．	1) 応力集中箇所の作用応力を処理して公称応力に変換する． 2) 後は，従来設計と同じ． ③各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある． ・コンクリート床版を有する鋼Ｉ桁を三次元 FEM 解析する場合の構造解析係数 γ_a=1.0 を適用する[2.8)]．
	許容値 （規格値）	道示Ⅱ5.3 と 6 章，および鋼道路橋の疲労設計指針[2.8)] 道示における規格値の対象箇所に対して，道示どおりの応力範囲の算出を行うため，道示の許容値を用いて良い．	道示Ⅱ5.3 と 6 章，および鋼道路橋の疲労設計指針[2.8)] 道示における規格値の対象箇所に対して，道示どおりの応力範囲の算出を行うため，道示の許容値を用いて良い．	*許容値がないことに対する対応* ③各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．

2.1.8　荷重分配横桁

設　計　行　為		設　計　手　法		
設計フロー	項目	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
設計方針 ・荷重分配効果で主桁間の相対たわみを少なくし，床版への悪影響を避ける． ・分配横桁は構造解析モデルに含めて解析して荷重分配作用を担わせる．  図-2.1.38　荷重分配横桁の設計フロー	(1)設計断面力の算出	各要素における曲げモーメントやせん断力などの作用断面力を算出，整理する． ①許容応力度と対比するために，通常は，公称応力としての作用応力を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができる．	各要素における曲げモーメントやせん断力などの作用断面力を算出，整理する．  図-2.1.39B　荷重分配横桁軸力の解析の例 （4 主Ⅰ桁の例） ①-1 許容応力度と対比するために，通常は，公称応力としての作用応力を算出できる縁要素の作用断面力を解析から得ることができる． ①-2 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	各要素における作用応力を直接算出，整理する． ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．
	(2)作用応力度の算出 (3)許容応力度の算出 (4)応力度の照査	1)　平面保持を仮定したはり断面の断面計算により作用応力度を算出する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．	1)　フランジやウェブごとの作用応力度を算出する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．	1)　各要素の作用応力度を処理して公称応力に置換する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．
	許容値 （規格値）	道示Ⅱ3.2.1 道示における規格値の対象箇所に対して，道示どおりの作用応力度の算出を行うため，道示の許容応力度を用いて良い．	道示Ⅱ3.2.1 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため，道示の許容応力度を用いて良い．	*許容値がないことに対する対応* ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない．
	(5)連結の計算 (6)補剛材の設計	主桁と同じ	主桁と同じ	主桁と同じ

2.1.9　中間横桁（少数主桁橋のみ）

設　計　行　為	
設計フロー	項目
設計方針 ・中間横桁は構造解析に含めて解析して荷重分配作用を担わせる. ・中間横桁取付部の垂直補剛材は，下フランジが圧縮の場合の固定点になりうるだけの剛性を確保する.  図-2.1.40　中間横桁の設計フロー	(1) U 形フレーム剛度の照査 1)U 形フレーム剛度の算出 2)U 形フレーム必要剛度の算出 (2)断面力の算出 (3)作用応力度の算出 (4) 許容応力度の算出 (5)応力度の照査 (6)連結の計算

<table>
<tr><th>設計行為
項目</th><th colspan="3">設　計　手　法</th></tr>
<tr><th></th><th>従来設計（格子解析）</th><th>せん断パネル解析による設計</th><th>ＦＥＭ解析による設計</th></tr>
<tr>
<td>(1) U形フレーム剛度の照査

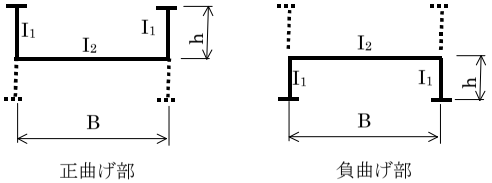
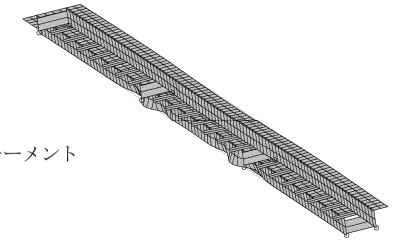
注）道示では，少数主桁橋の中間横桁について，U形フレーム剛度の照査式が規定されていない．ここでは，鋼道路橋設計便覧を参考に，計算例を示す．</td>
<td>1) ポニートラスの圧縮弦材の座屈照査式を応用した下式によってU形フレームの必要剛度C'を確保する．
$C = \dfrac{6EI_1I_2}{h^2(3BI_1+2hI_2)} \geq C'$
$C' = \alpha \cdot \dfrac{\nu N}{\ell}$
ν：座屈安全率(=2.0)
N：フランジの圧縮軸力
ℓ：U形フレームの間隔
α：鋼道路橋設計便覧の表-5.2 の値 2.5)
 

図-2.1.41A　横桁と垂直補剛材からなるU形フレーム

②横力に対して中間横桁を設計する場合，主桁や横桁と床版を分離したモデル化しなければならない．通常は，平面格子モデルでは床版を分離したモデル化を行わず，別途計算モデルを作成する．</td>
<td>1) 従来設計法でU形フレームの必要剛度を確保する．
2) 図-2.1.42B に従い，弾性座屈解析によって圧縮フランジの固定点間距離ℓ_eを算出する．
3) 主桁の作用応力度と許容応力度を対比して照査する．

$\ell_e = \sqrt{\dfrac{EI}{\lambda N_c}}$
E：ヤング係数
I：フランジの面外曲げモーメント
λ：弾性座屈固有値
N_c：フランジの圧縮軸力
 
図-2.1.41B　合成後モデルの弾性座屈モードの例

①-1 U形フレーム剛度と圧縮フランジの固定点間距離との関係を弾性座屈解析によって求めることができる．
①-2 全橋モデルは，主桁のフランジ，ウェブをそれぞれモデル化することから，主桁のそりねじり剛度を考慮でき，弾性座屈解析が可能となる．
①-3 格点間の座屈モードが抽出できる解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．</td>
<td>1) 従来設計法でU形フレームの必要剛度を確保する．
2) 弾性座屈解析によって圧縮フランジの固定点間距離ℓ_eを算出する．
3) 各要素の作用応力度を処理して公称応力に置換する．
4) 主桁の作用応力度と許容応力度を対比して照査する．

①-1 U形フレーム剛度と圧縮フランジの固定点間距離との関係を弾性座屈解析によって求めることができる．
①-2 全橋モデルは，主桁のフランジ，ウェブをそれぞれモデル化することから，主桁のそりねじり剛度を考慮でき，弾性座屈解析が可能となる．
①-3 格点間の座屈モードが抽出できる解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．</td>
</tr>
</table>

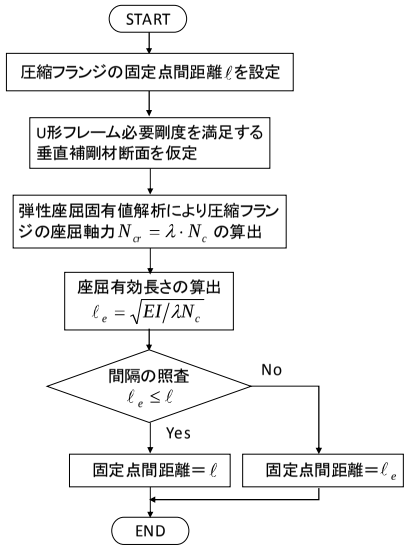
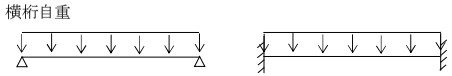
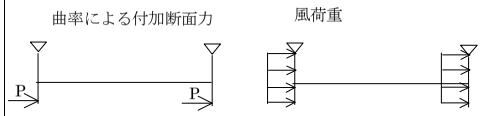
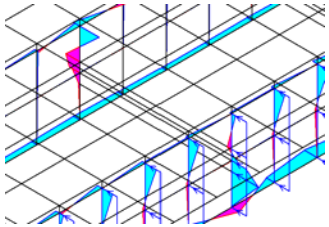
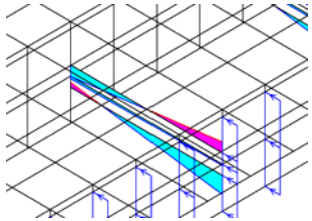
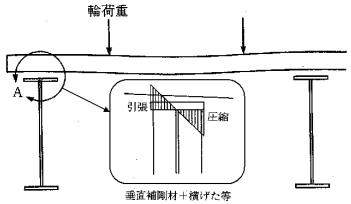
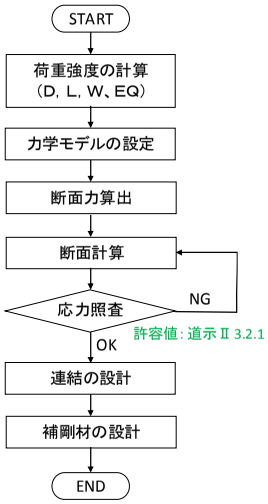
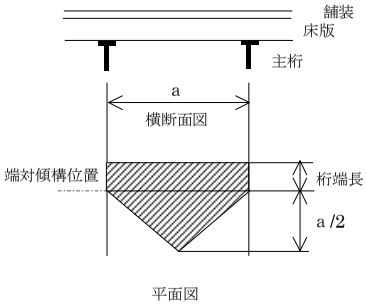
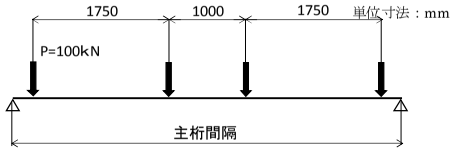
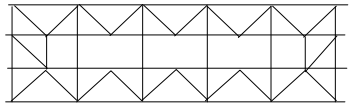
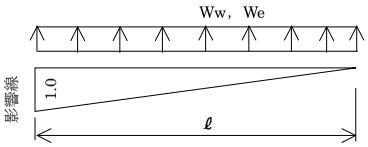


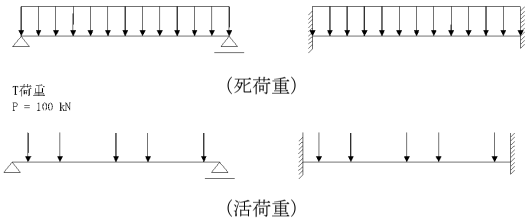
図-2.1.42B　U 形フレーム剛度の照査フロー

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(2) 断面力の算出	1)　2 主桁橋の中間横桁は，全橋モデルとは別途以下のような荷重に対する力学モデルを設定する． 2)　横桁の要素から断面力を算出する．  図-2.1.43A　横桁自重に対する力学モデル  図-2.1.44A　横力に対する力学モデル ②横力に対して中間横桁を設計する場合，主桁や横桁と床版を分離してモデル化しなければならない．通常は，平面格子モデルでは床版を分離したモデル化を行わず，別途計算モデルを作成する．	1)　全橋モデルにおける横桁の要素から，各板組形状の作用断面力を算出する．  図-2.1.43B　垂直補剛材曲げモーメントの解析の例  図-2.1.44B　中間横桁フランジ軸力の解析の例 なお，右図に示すように，床版上に輪荷重を直接載荷する場合，床版の曲げ変形に起因する格点部の垂直補剛材と主桁上フランジ上の接合部の応力状態も算出できる．  図-2.1.45B　床版による輪荷重の分配の影響の例 [2.9)] ①-1 横桁および格点部の垂直補剛材をモデル化した要素から直接，作用断面力を得ることができる． ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁や横桁と独立した床版，および格点部の垂直補剛材をモデル化することができる． ①-3 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	1)　各要素における作用応力を直接算出，整理する． ①-1 横桁および格点部の垂直補剛材をモデル化した要素から直接，作用断面力を得ることができる． ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁や横桁と独立した床版，および格点部の垂直補剛材をモデル化することができる． ①-3 せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある． ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．
(3) 作用応力度の算出 (4) 許容応力度の算出 (5) 応力度の照査	1)　Ｉ断面の断面計算により作用応力度を算出する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．	1)　フランジやウェブごとの作用応力度を算出する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．	1)　各要素の作用応力度を処理して公称応力に置換する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．
許容値 （規格値）	道示Ⅱ3.2.1 道示における規格値の対象箇所に対して，道示どおりの作用応力度の算出を行うため，道示の許容応力度を用いて良い．	道示Ⅱ3.2.1 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため，道示の許容応力度を用いて良い．	*許容値がないことに対する対応* ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない．
(6) 連結の計算	主桁と同じ	主桁と同じ	主桁と同じ

2.1.10　端横桁（端対傾構）

設　計　行　為	
設計フロー	項目
設計方針 ・端横桁（対傾構）は，主桁の位置および形状を保持し，ねじれ変形を拘束させる． ・主桁に作用する水平荷重，ねじりモーメントに抵抗するとともに，円滑に支承に伝達させる． ・橋端部の床版は増厚して端横桁（対傾構）に打下ろすため，分担面積分の死荷重と直上に載る T 荷重を支持できるように設計する．  図-2.1.46　端横桁の設計フロー	(1)荷重強度の計算 　1)鉛直荷重 　2)水平荷重 (2)断面力の算出 (3)作用応力度の算出 (4)許容応力度の算出 (5)応力度の照査 (6)連結の設計 (7)補剛材の設計

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(1)荷重強度の計算 1)鉛直荷重	1）　死荷重は下図のように分担面積を仮定して載荷する．  図-2.1.47A　端横桁（対傾構）の死荷重分担面積の例 2）　活荷重（T荷重）は端横桁（端対傾構）の直上に載荷する．  図-2.1.48A　活荷重（T 荷重）の載荷図の例	1）　全橋モデルに直接荷重を載荷する． 2）　活荷重は，橋面全体に影響線載荷する．	1）　全橋モデルに直接荷重を載荷する． 2）　活荷重は，橋面全体に影響線載荷する．
2)水平荷重	1）　水平力の分担は，風荷重に対しては 2 組の横桁で，地震荷重に対しては全横桁で均等に受け持たせる．  $P_w = \frac{1}{2} W_w A$ $P_e = \frac{1}{(n-1)} W_e A$  W_w　：風荷重強度 W_e　：地震荷重強度 n　：主桁本数 A　：影響面積 ＝ℓ／2 図-2.1.49A　水平荷重の分担方法	1）　全橋モデルに直接荷重を載荷する． 2）　風荷重は，端横桁の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる． 3）　地震荷重は，橋長にわたって載荷する．	1）　全橋モデルに直接荷重を載荷する． 2）　風荷重は，端横桁の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる． 3）　地震荷重は，橋長にわたって載荷する．

<table>
<tr><th>設計行為
項目</th><th colspan="3">設　計　手　法</th></tr>
<tr><th></th><th>従来設計（格子解析）</th><th>せん断パネル解析による設計</th><th>ＦＥＭ解析による設計</th></tr>
<tr>
<td>(2) 断面力の算出</td>
<td>1) 端横桁は，全橋モデルとは別途以下のような荷重に対する力学モデルを設定する．
2) 鉛直荷重は，1 組の横桁（対傾構）の支持条件を単純支持と固定支持との 2 通りを考えて断面力を算出する．
 

（死荷重）
（活荷重）
図-2.1.50A　鉛直荷重に対する力学モデル

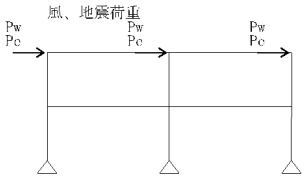
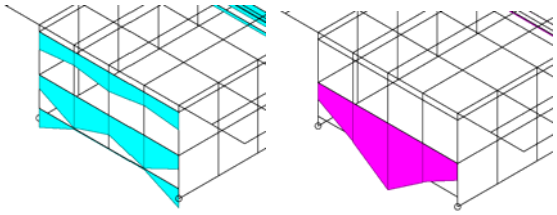
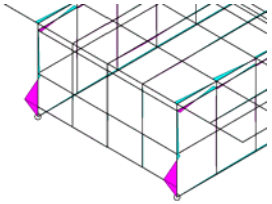
3) 水平荷重は，下図の平面フレームの床版位置に載荷して断面力を算出する．
 

図-2.1.51A　水平荷重に対する力学モデル

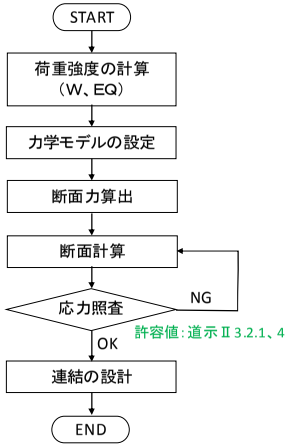
②端横桁を設計する場合，支点位置の高さ方向のモデル化をしなければならない．通常は，平面格子モデルでは高さ方向のモデル化を行わず，別途計算モデルを作成する．</td>
<td>1) 全橋モデルにおける端横桁の要素から，各板組形状の作用断面力を算出する．
 
（最大軸力図）　（最大曲げモーメント図）
図-2.1.50B　活荷重に対する解析の例
 
（支点上垂直補剛材の面外曲げモーメント）
図-2.1.51B　地震荷重に対する解析の例

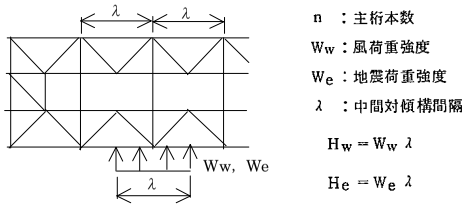
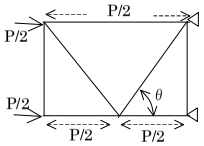
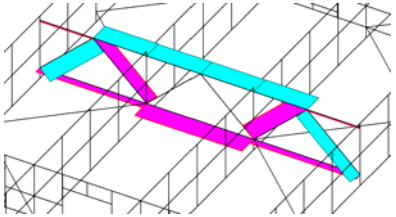
①-1 端横桁の要素の解析結果から直接，作用断面力を得ることができる．
①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，支点位置の高さ方向にモデル化することができる．
①-3 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．</td>
<td>1) 各要素における作用応力を直接算出，整理する．

①-1 端横桁の要素の解析結果から直接，作用断面力を得ることができる．
①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，支点位置の高さ方向にモデル化することができる．
①-3 せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．
③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある．
③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．</td>
</tr>
</table>

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(3) 作用応力度の算出 (4) 許容応力度の算出 (5) 応力度の照査	1)　Ｉ断面の断面計算により作用応力度を算出する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．	1)　フランジやウェブごとの作用応力度を算出する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．	1)　各要素の作用応力度を処理して公称応力に置換する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．
許容値 （規格値）	道示Ⅱ3.2.1 道示における規格値の対象箇所に対して，道示どおりの作用応力度の算出を行うため，道示の許容応力度を用いて良い．	道示Ⅱ3.2.1 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため，道示の許容応力度を用いて良い．	*許容値がないことに対する対応* ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない．
(6) 連結の設計	主桁と同じ	主桁と同じ	主桁と同じ
(7) 補剛材の設計	主桁と同じ	主桁と同じ	主桁と同じ

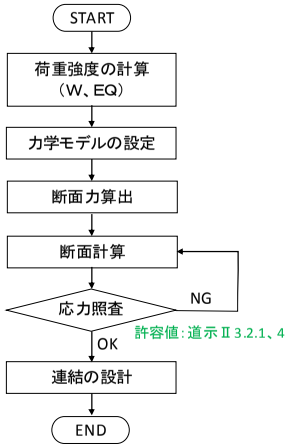
2.1.11　中間対傾構

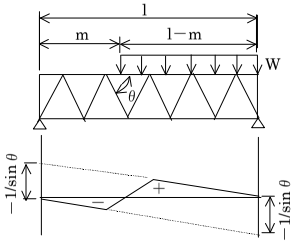
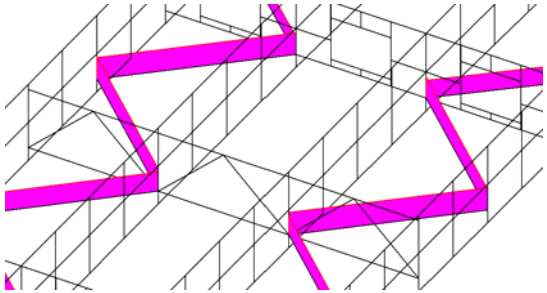
設　計　行　為	
設計フロー	項目
設計方針 ・主桁の横倒れ座屈を防止する． ・主桁間の相対変位を制限し，床版の付加曲げモーメントを軽減するとともに，荷重分配作用に寄与させる． ・横荷重に対して主桁，横構および中間対傾構からなる平面トラス系を形成して，横荷重に抵抗させる． ・架設時の主桁の位置決め材，および形状保持の役割を果たす．  図-2.1.52　中間対傾構の設計フロー	(1)荷重強度の計算 (2)断面力の算出 (3)作用応力度の算出 (4)許容応力度の算出 (5)応力度の照査 (6)連結の設計

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(1)荷重強度の算出	1)　横荷重は下図のように分担面積を仮定して載荷する．  図-2.1.53A　中間対傾構に作用する荷重	1)　全橋モデルに直接荷重を載荷する． 2)　風荷重は，対傾構の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる． 3)　地震荷重は，橋長にわたって載荷する．	1)　全橋モデルに直接荷重を載荷する． 2)　風荷重は，対傾構の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる． 3)　地震荷重は，橋長にわたって載荷する．
(2)断面力の算出	1)　対傾構は，全橋モデルとは別途以下のような荷重に対する力学モデルを設定する． 2)　各部材の作用断面力を算出する．  $P_w = \frac{1}{2} H_w$ $P_e = \frac{1}{(n-1)} H_e$ 図-2.1.54A　中間対傾構の力学モデル ②対傾構を設計する場合，格点位置の高さ方向にモデル化しなければならない．通常は，平面格子モデルでは高さ方向のモデル化を行わず，別途計算モデルを作成する．	1)　全橋モデルにおける対傾構の要素から，各板組形状の作用断面力を算出する．  図-2.1.54B　中間対傾構軸力の解析の例 （4 主Ｉ桁の例） ①-1 対傾構の要素の解析結果から直接，作用断面力を得ることができる． ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，格点位置の高さ方向にモデル化することができる． ①-3 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	1)　各要素における作用応力を直接算出，整理する． ①-1 対傾構の要素の解析結果から直接，作用断面力を得ることができる． ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，格点位置の高さ方向にモデル化することができる． ①-3 せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある． ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(3) 作用応力度の算出 (4) 許容応力度の算出 (5) 応力度の照査	1)　軸力部材の軸力から作用応力度を算出する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．	1)　各板組形状の作用応力度を算出する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．	1)　各要素の作用応力度を処理して公称応力に置換する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．
許容値 （規格値）	道示Ⅱ3.2.1，4.1.5，4.5，4.6 道示における規格値の対象箇所に対して，道示どおりの作用応力度の算出を行うため，道示の許容応力度を用いて良い．	道示Ⅱ3.2.1，4.1.5，4.5，4.6 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため，道示の許容応力度を用いて良い． 鉛直荷重に対する荷重分配効果も考慮する場合，主要部材として設計する．	*許容値がないことに対する対応* ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない．
(6) 連結の設計	各部材の軸力から必要ボルト本数を決定する．	各部材の軸力から必要ボルト本数を決定する．	1)　各部材の各要素の作用応力を，軸力に変換する． 2)　各部材の軸力から必要ボルト本数を決定する．

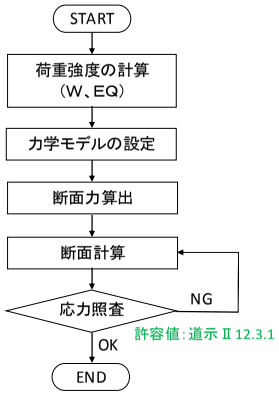
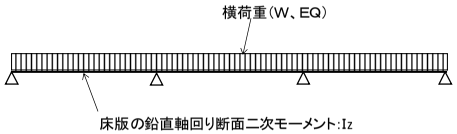
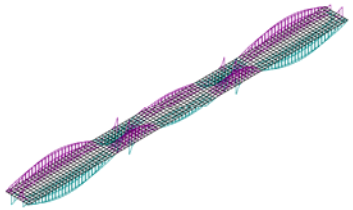
2.1.12　横構

設　計　行　為	
設計フロー	項目
設計方針 ・地震荷重，風荷重などの水平荷重を支点まで伝達させる． ・主桁，床版と一体になり準箱桁を形成し，橋全体のねじり剛性を高める． ・架設時の位置決め材および形状保持の役割を果たす． ・支間全長にわたり配置し，３主桁以上の場合は２列以上の横構を配置する．  図-2.1.55　横構の設計フロー	(1)荷重強度の計算 (2)断面力の算出 (3)作用応力度の算出 (4)許容応力度の算出 (5)応力度の照査 (6)連結の設計

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(1)荷重強度の計算 1)風荷重 2)地震荷重	1) 風荷重は，床版が風荷重の 1/2 を分担するとして，下横構には全風荷重の 1/2 を分担させ，風上側の横構がその全風荷重を分担するように設計する． 2) 地震荷重は，床版が地震荷重の 1/2 を分担するとして，下横構には全地震荷重の 1/2 を分担させる．地震荷重は全面に分布して加わると考えることができるので，２列の下横構がそれぞれ全下横構荷重の 1/2 を負担するとして設計する．	1) 全橋モデルに直接荷重を載荷する． 2) 風荷重は，横構の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる． 3) 地震荷重は，橋長にわたって載荷する．	1) 全橋モデルに直接荷重を載荷する． 2) 風荷重は，横構の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる． 3) 地震荷重は，橋長にわたって載荷する．
(2)断面力の算出 1)トラス部材力の影響線 2)横構部材力	1) 横構は，全橋モデルとは別途以下のような荷重に対する力学モデルを設定する． 2) 各部材の作用断面力を算出する．  図-2.1.56A　横構の力学モデル ②横構を設計する場合，断面内の高さ方向にモデル化しなければならない．通常，平面格子モデルでは高さ方向のモデル化を行わず，別途計算モデルを作成する．	1) 全橋モデルにおける横構の要素から，各板組形状の作用断面力を算出する．  図-2.1.56B　横構軸力の解析の例 （4 主 I 桁の例） ①-1 横構の要素の解析結果から直接，作用断面力を得ることができる． ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，格点位置の高さ方向にモデル化することができる． ①-3 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	1) 各要素における作用応力を直接算出，整理する． ①-1 横構の要素の解析結果から直接，作用断面力を得ることができる． ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，格点位置の高さ方向にモデル化することができる． ①-3 せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある． ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(3) 作用応力度の算出 (4) 許容応力度の算出 (5) 応力度の照査	1)　軸力部材の軸力から作用応力度を算出する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．	1)　各板組形状の作用応力度を算出する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．	1)　各要素の作用応力度を処理して公称応力に置換する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．
許容値 （規格値）	道示Ⅱ3.2.1，4.1.5，4.5，4.6 道示における規格値の対象箇所に対して，道示どおりの作用応力度の算出を行うため，道示の許容応力度を用いて良い．	道示Ⅱ3.2.1，4.1.5，4.5，4.6 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため，道示の許容応力度を用いて良い． 鉛直荷重に対する荷重分配効果も考慮するため，主要部材として設計する．	*許容値がないことに対する対応* ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない．
(6) 連結の設計	横構の軸力から必要ボルト本数を決定する．	横構の軸力から必要ボルト本数を決定する．	1)　横構の各要素の作用応力を，軸力に変換する． 2)　横構の軸力から必要ボルト本数を決定する．

2.1.13　床版の横荷重に対する照査

設　計　行　為		設　計　手　法		
設計フロー	項目	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
設計方針 ・風荷重や地震荷重によって床版が橋軸直角方向に曲げられることによって生じる床版の曲げ応力度を照査する．  図-2.1.57　床版の横荷重に対する設計フロー	(1)荷重強度の計算 1)風荷重 2)地震荷重	1)　風荷重は，床版が風荷重の1/2 を分担するとして計算する．横構が無い場合は全荷重を分担させる． 2)　地震荷重は，床版が地震荷重の1/2 を分担するとして計算する．横構が無い場合は全荷重を分担させる．	1)　全橋モデルに直接荷重を載荷する． 2)　風荷重は，端横桁の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる． 3)　地震荷重は，橋長にわたって載荷する．	1)　全橋モデルに直接荷重を載荷する． 2)　風荷重は，端横桁の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる． 3)　地震荷重は，橋長にわたって載荷する．
	(2)断面力の算出	1)　床版は，全橋モデルとは別途以下のような荷重に対する力学モデルを設定する． 2)　各部材の作用断面力を算出する．  図-2.1.58A　横荷重に対する力学モデル ②床版の横荷重に抵抗する設計をする場合，主桁や横桁と床版を分離したモデル化をしなければならない．通常は，平面格子モデルでは床版を分離したモデル化を行わず，別途計算モデルを作成する．	1)　全橋モデルにおける床版の要素から，各部位の作用断面力を算出する．  図-2.1.58B　地震荷重による床版はり要素の軸力図 ①-1 床版の要素の解析結果から直接，作用断面力を得ることができる． ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁や横桁と独立した床版をモデル化することができる． ①-3 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	1)　各要素における作用応力を直接算出，整理する． ①-1 床版の要素の解析結果から直接，作用断面力を得ることができる． ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁や横桁と独立した床版をモデル化することができる． ①-3 せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある． ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．

設　計　行　為		設　計　手　法		
設計フロー	項目	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
	⑶作用応力度の算出 ⑷許容応力度の算出 ⑸応力度の照査	1)　床版の鉛直軸回りの断面係数に対して作用応力度を算出する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．	1)　各部位の作用応力度を算出する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．	1)　各要素の作用応力度を処理して公称応力に置換する． 2)　作用応力度と許容応力度を対比して照査する．
	許容値 （規格値）	*許容値がないことに対する対応* 現状では，道示Ⅱ12.3.1 における床版のコンクリートおよび鉄筋の許容応力度で照査する案が考えられる．	*許容値がないことに対する対応* 現状では，道示Ⅱ12.3.1 における床版のコンクリートおよび鉄筋の許容応力度で照査する案が考えられる．	*許容値がないことに対する対応* ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない．

2.1.14　たわみ

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(1) 仮定剛度と実剛度の比較	主構造部材の仮定剛度（断面２次モーメント）と実剛度との差が5～10%以内であることを照査する[2.5)].	主構造部材の仮定剛度（断面 2 次モーメント）と実剛度との差が 5～10%以内であることを照査する[2.5)]. 主構造部材の板要素の仮定剛度（断面積と断面２次モーメント）と実剛度も 5～10%以内であることを照査することも考えられる. *規格値がないことに対する対応* ③部材としての剛度を別途算出しなければならない．また，板要素の剛度の規格値を確立する必要がある.	主構造部材の仮定剛度（断面２次モーメント）と実剛度との差が5～10%以内であることを照査する[2.5)]. 主構造部材の板要素の仮定剛度（断面積と断面２次モーメント）と実剛度も 5～10%以内であることを照査することも考えられる. *規格値がないことに対する対応* ③解析結果の応力度によって設計することになるので，仮定剛度（板厚，板幅）と実剛度は一致させる必要がある.
(2) 仮定鋼重と実鋼重の比較	鋼自重の誤差は 5%以下が望ましい[2.5)].	鋼自重の誤差は 5%以下が望ましい[2.5)].	鋼自重の誤差は 5%以下が望ましい[2.5)].
(3) 活荷重たわみの照査	活荷重による最大たわみ量を影響線解析により算出し，道示Ⅱ2.3 の許容値以下であることを照査する.	・活荷重による最大たわみ量を影響線解析により算出し，道示Ⅱ2.3 の許容値以下であることを照査する. ・主桁のせん断変形によるたわみも考慮されるため，格子解析より値が大きくなる. *許容値がないことに対する対応* ③せん断変形も考慮した許容値の設定をしなければならない．現状では，道示Ⅱ2.3 の許容値で照査する案が考えられる.	・平面格子骨組モデルで活荷重たわみの影響線を予め算出し，活荷重たわみが最大になる載荷範囲を決定して，活荷重を固定載荷する．その結果が道示Ⅱ.2.3 の許容値以下であることを照査する. ・主桁のせん断変形によるたわみも考慮されるため，格子解析より値が大きくなる. *許容値がないことに対する対応* ③せん断変形も考慮した許容値の設定をしなければならない．現状では，道示Ⅱ2.3 の許容値で照査する案が考えられる.
(4) 製作キャンバーの設定	仮定剛度と実剛度との差を補正した上で，主桁に死荷重，乾燥収縮，クリープ等によるたわみに対する製作キャンバーを設定する.	・仮定剛度と実剛度との差を補正した上で，主桁に死荷重，乾燥収縮，クリープ等によるたわみに対する製作キャンバーを設定する. ・主桁のせん断変形によるたわみも考慮されるため，格子解析より値が大きくなる.	・仮定剛度と実剛度との差を補正した上で，主桁に死荷重，乾燥収縮，クリープ等によるたわみに対する製作キャンバーを設定する. ・主桁のせん断変形によるたわみも考慮されるため，格子解析より値が大きくなる.

2.2　立体ラーメン橋

2.2.1　全体フロー

2.1 節の連続合成 I 桁橋と同様に，立体ラーメン橋についても従来の格子解析による設計フローを基本として，各解析手法を用いた橋梁設計の手続きを比較する．

立体ラーメン橋に関する従来の格子解析を用いた設計フローを図-2.2.1 に示す．立体ラーメン橋は，概略設計において主桁と橋脚の配置，および外形寸法が決まったものと仮定して，まずは鋼床版の床版作用の設計を行う．次に，格子解析モデルを作成し，仮定断面，荷重強度を設定し，解析結果から設計断面力を抽出する．その後，主桁を設計し，主桁の一部として機能する鋼床版については，主桁作用と床版作用の重ね合わせの照査を行う．さらに,橋脚一般部（柱，梁）の設計を行い，その後，隅角部の設計を行う．なお，立体ラーメン橋にも連続合成 I 桁橋と同様に横桁等の部材が存在するが，2.1 節と同様な部材に関する橋梁設計の手続きの比較は本節では省略した．

以下，この設計フローに示した順序で橋梁設計の手続きの比較を行う．

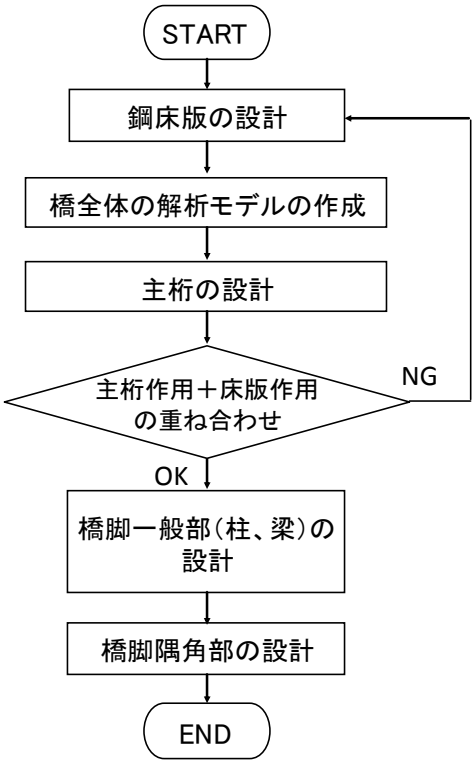


図-2.2.1 立体ラーメン橋の設計フロー

2.2.2　構造解析

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(1) 解析モデルの作成 1) 解析モデルの作成と解析の実施	1) 主桁と橋脚とからなる立体骨組モデルを作成する． 2) 立体骨組モデルに荷重を載荷し，各部材をモデル化したはり要素の作用断面力，および節点の変位を算出する． 3) 橋脚隅角部は，立体骨組解析結果の断面力を用いて，奥村・石沢式 2.2)によって応力計算を行う． 4) 床版としての鋼床版は，別途力学モデルを設定して解析する． ②ダイアフラムや橋脚隅角部の作用応力に対しては，別途力学モデルを設定して解析しなければならない．	1) 主桁，鋼床版，橋脚，ダイアフラムなど全ての構成部材をせん断パネルと骨組部材とで立体的にモデル化した全橋モデルを作成する． 2) 全橋モデルに対して荷重を載荷し，各材片をモデル化した縁要素や一定せん断流パネル要素の作用断面力，および節点の変位を算出する． 3) 床版としての鋼床版は，別途力学モデルを設定して解析する． ①ダイアフラムや橋脚隅角部の作用応力に対しても，鉛直荷重と同じ全橋モデルを用いて解析する．	1) 主桁，鋼床版，橋脚，ダイアフラムなど全ての構成部材をシェル要素，ソリッド要素，棒要素とで立体的にモデル化した全橋モデルを作成する． 2) 全橋モデルに対して荷重を載荷し，各材片をモデル化したシェル要素やソリッド要素の作用応力度，および節点の変位を算出する． 3) 床版としての鋼床版は，別途力学モデルを設定して解析する． ①ダイアフラムや橋脚隅角部の作用応力に対しても，鉛直荷重と同じ全橋モデルを用いて解析する．
2) 解析に関する構造力学的理論，および特徴	1) 平面保持が成り立つはり要素を用いた変位法による解析を行う． 2) 各要素の作用力は，軸力，曲げモーメント，ねじりモーメント，せん断力などの断面力である． 3) 支持条件を，節点に各変位の境界条件として（固定，自由）として設定する． 4) せん断応力度分布は，初等はり理論による分布を簡易式（道示Ⅱ11.2.2 式）で照査してよい． 5) せん断遅れによるフランジの曲げ応力分布は，曲げ剛性に対して有効幅を用いて考慮する． 6) 算出した作用断面力を用いて，許容応力度と対比が可能な公称応力としての作用応力度を算出する． ②隅角部のようなせん断遅れが大きい構造に対しては，解析結果と実際の作用応力の乖離が大きいために，別途検討したり補正したりしなければならない． 例）奥村・石沢式を用いた隅角部の応力計算 2.2)	1) せん断応力はせん断パネル，曲げ応力は縁部材の軸力でモデル化・解析を行う． 2) 各要素の作用力は，軸力やせん断流などの断面力である． 3) せん断パネルと縁部材を組み合わせた断面の中では，平面保持は成立しない． 4) ただし，せん断遅れが大きくなく，せん断剛性がある程度確保される構造では，応力分布は平面保持を仮定した断面と大きく変わらない結果になる． 5) 支持条件を，節点に各変位の境界条件として（固定，自由）として設定する． 6) 算出した作用断面力を用いて，許容応力度と対比が可能な公称応力としての作用応力度を算出する． ①せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	1) 鋼板で構成される鋼部材の材片をシェル要素で，厚みがある版としての床版はソリッド要素で，主に軸力部材として挙動する横構のような部材を棒要素で，それぞれモデル化して解析を行う． 2) 各要素の作用力は応力であり，主応力（最大，最小）や Von-Mises 等価応力の算出が可能である． 3) 部材断面で見た場合，平面保持は成立しない． 4) 支持条件を，節点に各変位の境界条件として（固定，自由）として設定する．ただし，支点部は点ではなく，支承の面積を考慮してモデル化する必要がある． 5) 算出した作用応力度には 2 次応力も含まれており，許容応力度と対比するために平均化処理を行って公称応力としての作用応力度を求める． ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない． ③-3 全橋モデルを用いた FEM 解析から全ての部材・部位の設計を行う場合，連結部や補剛材など従来の骨組解析ではモデル化していなかった部材・部位のモデル化および照査方法を新たに確立する必要がある．

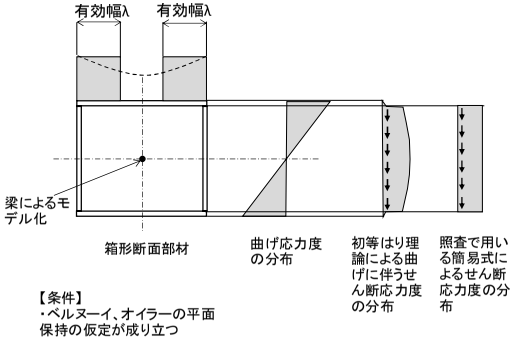


図-2.2.2A　初等はり理論による応力分布

≒

同じ精度の解析結果を得ることができる

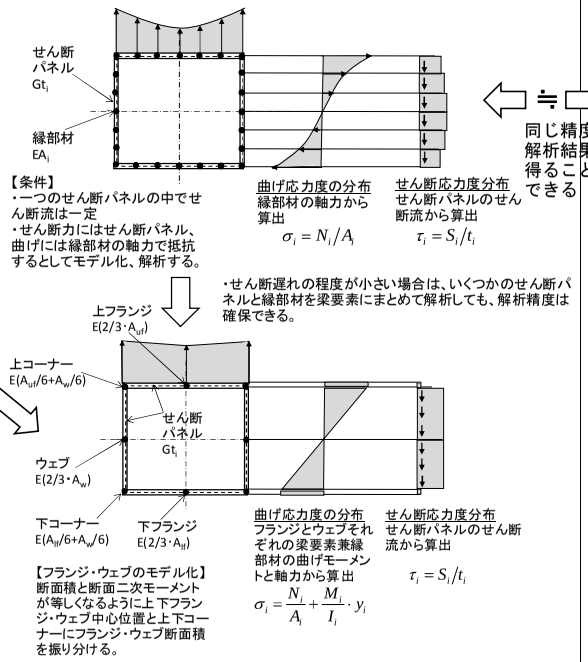


図-2.2.2B　せん断パネル解析における応力分布

≒

同じ精度の解析結果を得ることができる

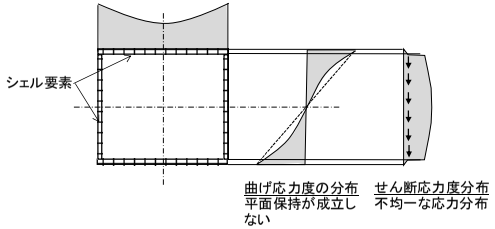


図-2.2.2C　FEMにおける応力分布

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
3)解析モデルの特徴	・主桁および橋脚を 3 次元はり要素でモデル化して解析する． ①地震時の非線形動的解析を行うことができる． ②隅角部のようなせん断遅れが大きい構造に対しては，解析結果と実際の作用応力の乖離が大きいために，別途検討したり補正したりしなければならない．	①-1 全橋モデルは，橋脚隅角部を柱軸の直角方向に，または梁軸の直角方向に複数の要素に分割できる． ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁内のダイアフラム，横リブ，支点上補剛材などをモデル化できる． ①-3 各部材の要素から，各部材の作用断面力を求めることができる． ①-4 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある． ②解析コードの制約上，通常は，地震時の動的解析は弾性範囲に限られることが多い． 要素分割の例を以下に示す． ・主桁，鋼床版，橋脚，ダイアフラムなど全ての構成部材をせん断パネルと骨組部材とで立体的にモデル化して解析する． ・主桁および橋脚の一般部は簡略化した要素分割とし，橋脚隅角部は文献 2.4)に従ってモデル化する．	①-1 全橋モデルは，橋脚隅角部を柱軸の直角方向に，または梁軸の直角方向に複数の要素に分割できる． ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁内のダイアフラム，横リブ，支点上補剛材などをモデル化できる． ①-3 各部材の要素から，各部材の作用断面力を求めることができる． ①-4 せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある． ②解析コードの制約上，通常は，地震時の動的解析は弾性範囲に限られることが多い． ③各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある． モデル化に用いる要素の例を以下に示す． ・詳細な応力状態を求めようとする部分をシェル要素，またはソリッド要素を用いて立体的にモデル化し，それ以外の部分は 3 次元はり要素でモデル化する．

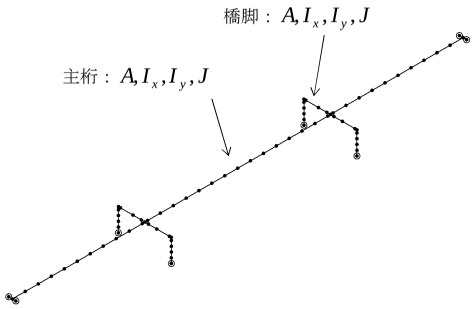


図-2.2.3A　立体骨組解析モデル

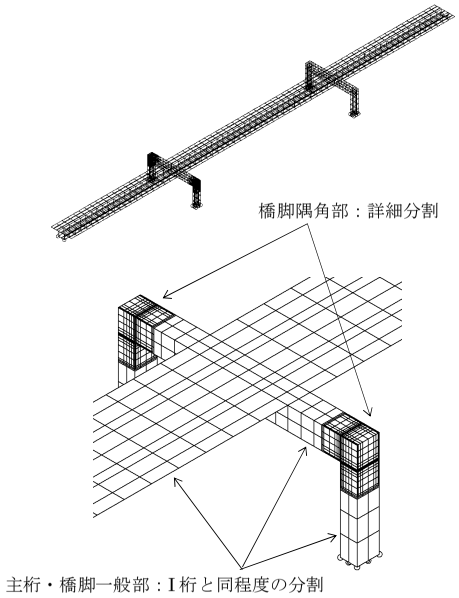


図-2.2.3B　せん断パネル解析モデル

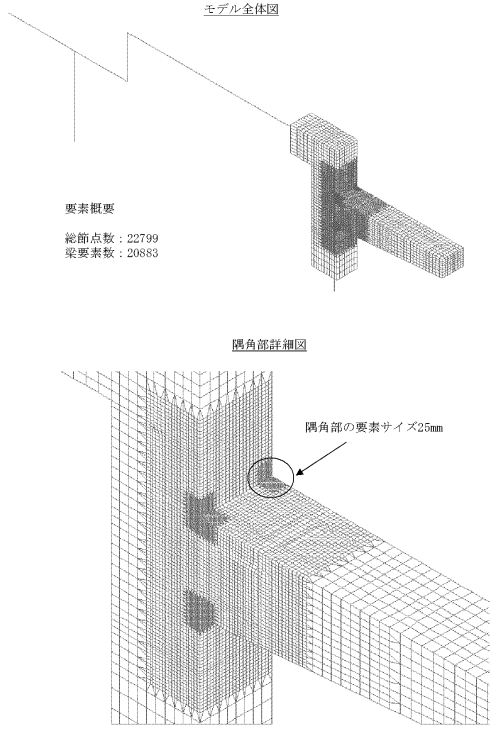
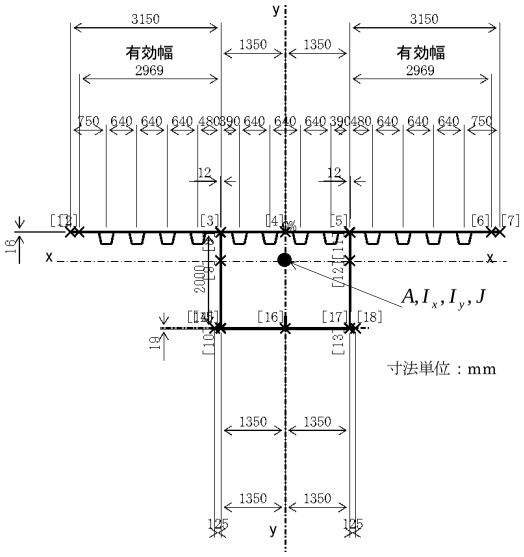


図-2.2.3C　FEM 解析モデル
（門型鋼製橋脚の例）

<table>
<tr><th>設計行為
項目</th><th colspan="3">設　計　手　法</th></tr>
<tr><th></th><th>従来設計（立体骨組解析）</th><th>せん断パネル解析による設計</th><th>ＦＥＭ解析による設計</th></tr>
<tr><td>(2)仮定剛度の決定
1)主桁</td>
<td>1)　仮定断面を決めて，解析モデルにおける各要素の仮定剛度を設定する．
2)　仮定剛度は，曲げ剛性 EI，ねじり剛性 GJ，軸力剛性 EA などである．

モデル化の例を以下に示す．
・鋼床版および下フランジの有効幅を考慮した箱桁の断面計算を行い，図心位置で１本の３次元はり要素(A, J, I_x, I_y)に置換える．

断面諸量
全体　面内　面外
断面積　A (cm2)　3026.1　2968.2　3026.1
重心位置　ex (cm)　0.0　0.0　0.0
ey (cm)　141.0　139.8　141.0
断面2次ﾓｰﾒﾝﾄ　Ix (cm4)　20844986　20633872　20844986
Iy (cm4)　137699091　126435725　137699091
ねじり定数　J (cm4)　18589092

図-2.2.4A　箱断面桁の断面計算の例</td>
<td>1)　仮定断面を決めて，解析モデルにおける各要素の仮定剛度を設定する．
2)　仮定剛度は，縁部材は軸力剛性 EA，曲げ剛性 EI，ねじり剛性 GJ，せん断パネルはせん断剛性 G t などである．
3)　各はり要素の断面定数(A, J, I_x, I_y)とせん断パネルのせん断剛性 G t を仮定する．
4)　横リブ，支点上補剛材などの部材は，各はり要素の断面定数(A, J, I_x, I_y)を計算した上で，縁部材としてモデル化する．

要素分割の例を以下に示す．
・箱断面部分のフランジとウェブは，全幅有効の場合，それぞれの材片を１本のはり要素でモデル化する．デッキプレートの張出し部は，せん断遅れの影響を考慮するために３分割する．
・縦リブは，それぞれの母材の分担幅分を母材中心位置に偏心させて取り付ける．
・ダイアフラムは１要素のせん断パネルでモデル化する．

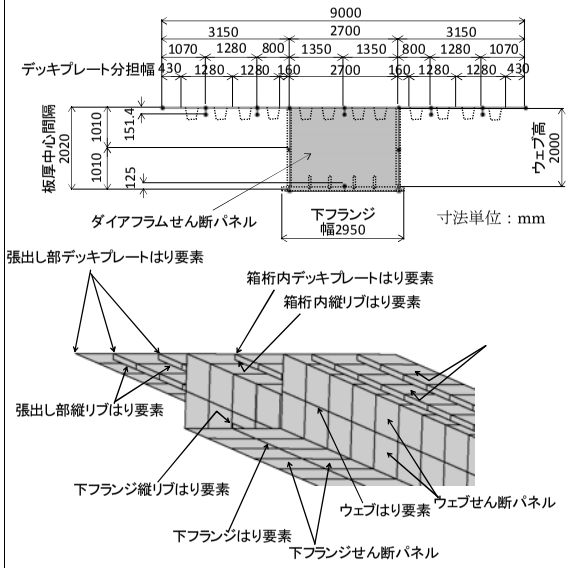
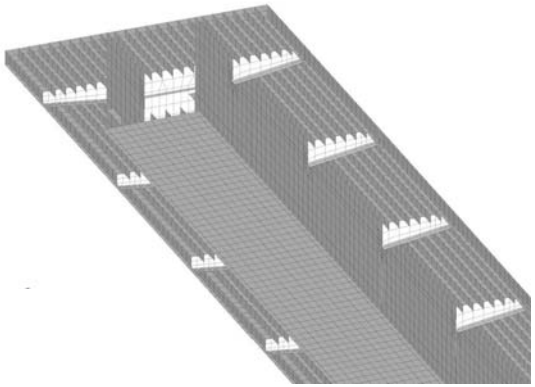
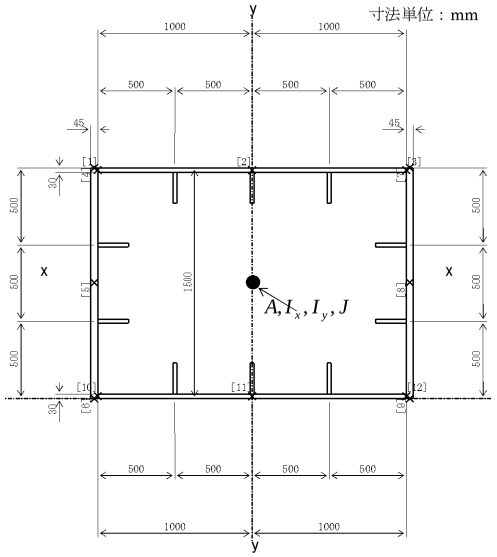
 

図-2.2.4B　箱断面桁の要素分割の例</td>
<td>1)　仮定断面を決めて，解析モデルにおける各要素の仮定剛度を設定する．
2)　仮定剛度は，シェル要素は板厚 t，ソリッド要素はヤング率 E，棒要素は軸力剛性 EA などである．

 
図-2.2.4C　シェル要素による箱断面桁の要素分割の例</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th>設計行為
項目</th><th colspan="3">設　計　手　法</th></tr>
<tr><th></th><th>従来設計（立体骨組解析）</th><th>せん断パネル解析による設計</th><th>ＦＥＭ解析による設計</th></tr>
<tr><td>2)橋脚一般部</td>
<td>モデル化の例を以下に示す．
・有効幅を考慮した箱断面の断面計算を行った上で，図心位置で１本の３次元はり要素(A, J, I_x, I_y)に置換える．
 

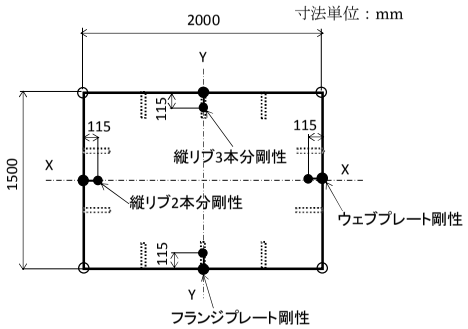
断面諸量
<table>
<tr><th></th><th></th><th>全体</th><th>面内</th><th>面外</th></tr>
<tr><td>断面積</td><td>A (cm2)</td><td>3050.0</td><td>3050.0</td><td>3050.0</td></tr>
<tr><td>重心位置</td><td>ex (cm)</td><td>0.0</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr>
<tr><td></td><td>ey (cm)</td><td>75.0</td><td>75.0</td><td>75.0</td></tr>
<tr><td>断面2次ﾓｰﾒﾝﾄ</td><td>Ix (cm4)</td><td>10303154</td><td>10303154</td><td>10303154</td></tr>
<tr><td></td><td>Iy (cm4)</td><td>20243435</td><td>20243435</td><td>20243435</td></tr>
<tr><td>ねじり定数</td><td>J (cm4)</td><td>18081993</td><td></td><td></td></tr>
</table>
図-2.2.5A　箱断面部材の断面計算の例</td>
<td>要素分割の例を以下に示す．
・箱断面部分のフランジとウェブは，全幅有効の場合，それぞれ部材を１本のはり要素でモデル化する．
・縦リブは，それぞれの母材に取り付く全本数分を一つに代表させた上で，母材中心位置に偏心させて取り付ける．
・ダイアフラムは１要素のせん断パネルでモデル化する．
 

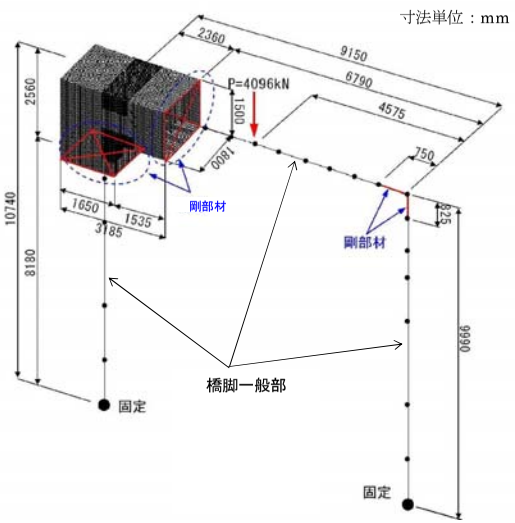
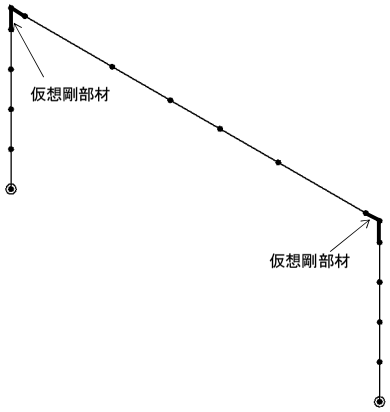
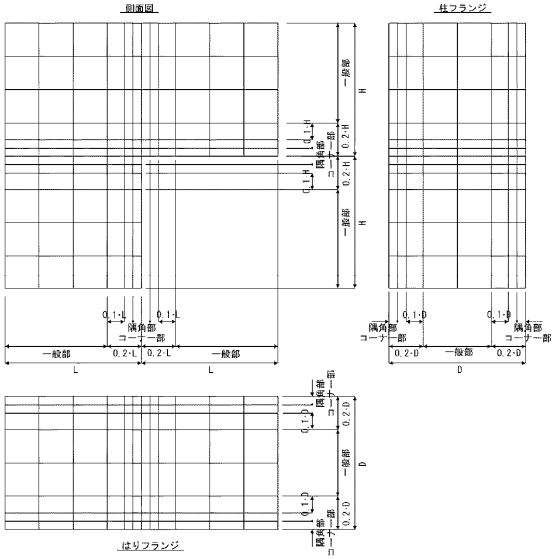
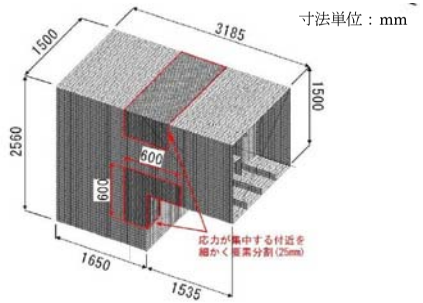
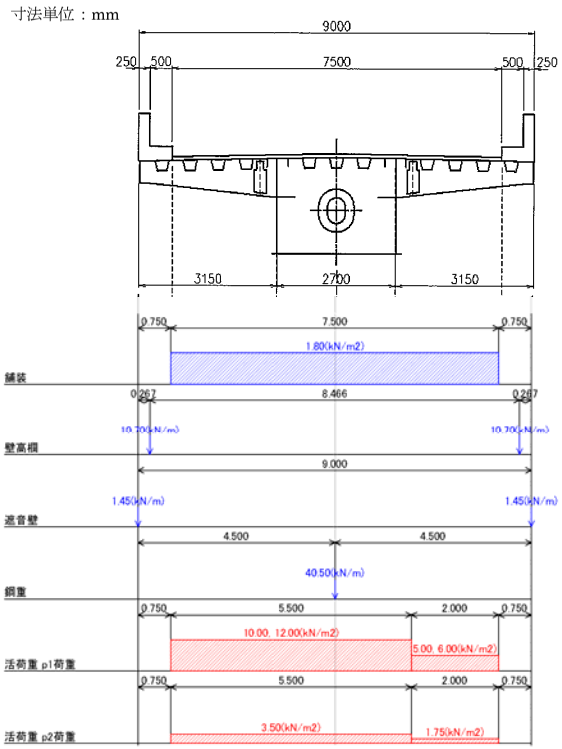
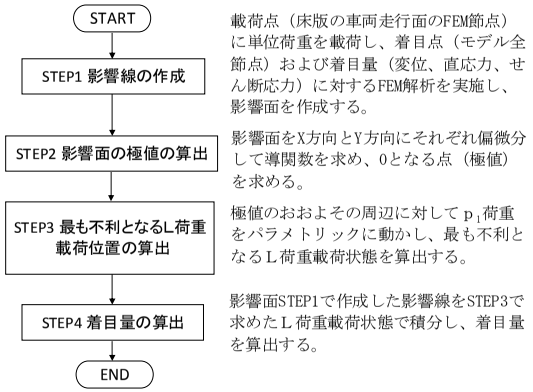
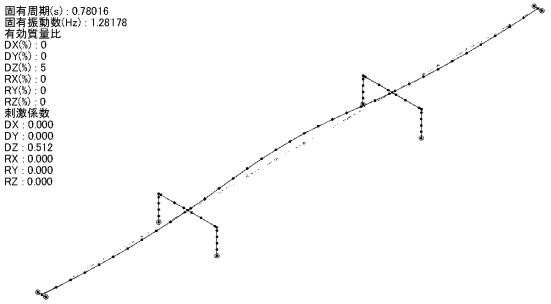
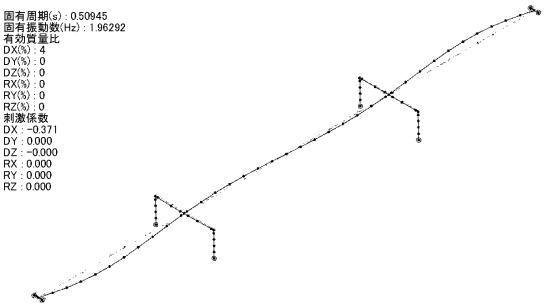
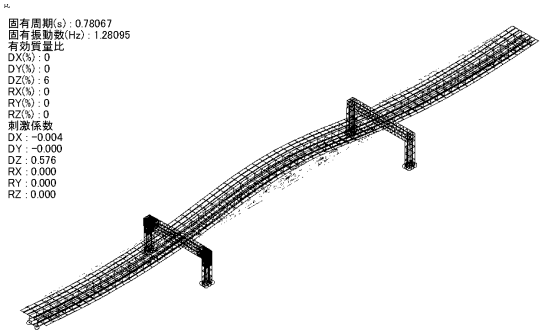
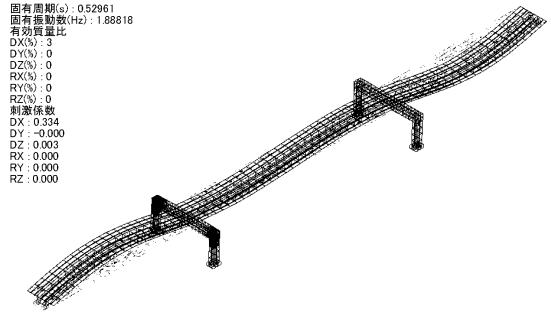
図-2.2.5B　箱断面部材の要素分割の例</td>
<td>モデル化の例を以下に示す．
・主桁の局所応力を解析しない場合は，従来設計と同様に箱断面桁を図心位置で１本の３次元はり要素(A, J, I_x, I_y)に置換える場合がある．
 

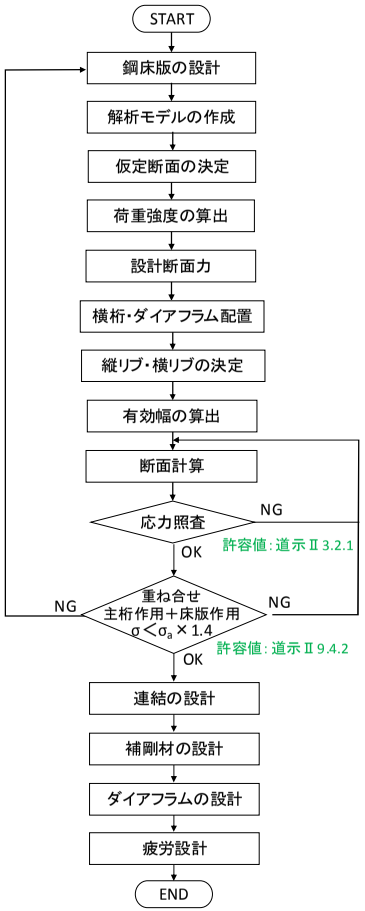
図-2.2.5C　FEM 解析における橋脚の解析モデルの例
（門型鋼製橋脚の例）</td></tr>
</table>

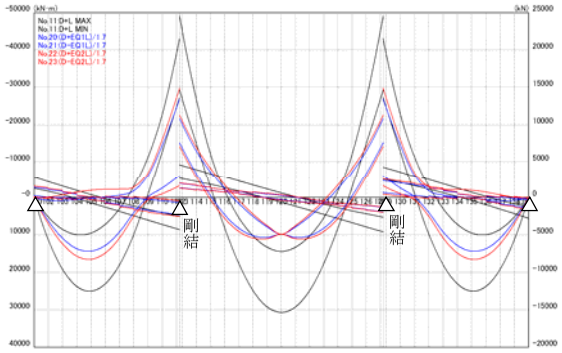
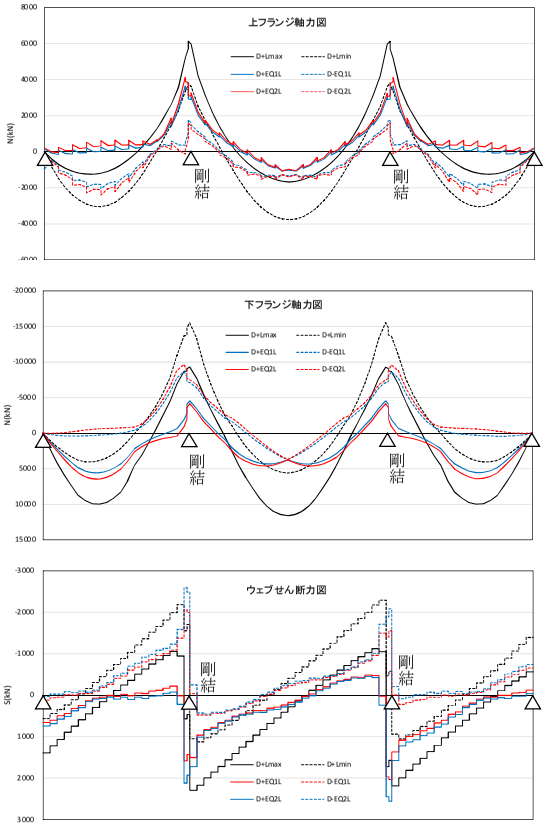
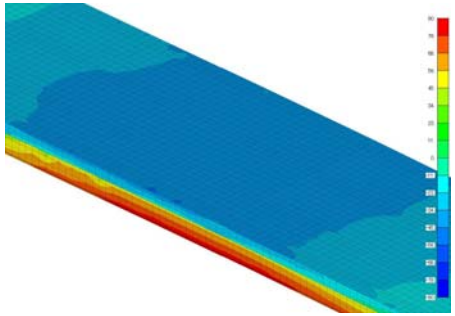
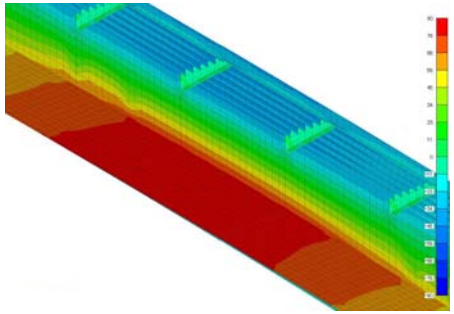
設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
3)橋脚隅角部	モデル化の例を以下に示す. ・隅角部の剛度は，仮想剛部材とする.  図-2.2.6A　隅角部の断面剛度	要素分割の例を以下に示す. ・文献 2.4)に従って要素分割する. ・母材の板厚を仮定し，縁部材の分担幅と板厚から断面積を計算する. ・縦リブは，母材の縁部材に断面積を加算する.  図-2.2.6B　橋脚隅角部の要素分割の例 [2.4]	モデル化の例を以下に示す. ・着目する隅角部のフランジ，ウェブ，縦リブおよびダイアフラムをシェル要素により仮定した板幅と板厚でモデル化する. ・応力集中が予測される部位は密な要素分割とする.  図-2.2.6C　隅角部の要素分割の例

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(3) 荷重強度の算出 1) 横断面形状 2) 死荷重 3) 活荷重	1)設計荷重強度を，解析モデルにおける荷重条件として設定する． 2)荷重条件は，集中荷重，線分布荷重，面分布荷重などに設定される． 3)活荷重は有効幅員の中で影響線載荷を行う．  図-2.2.7A　主桁の横断面形状と荷重強度の例 ①通常は，部材にとって最も不利な状況を活荷重の影響線載荷から求めることができる．	1)設計荷重強度を，解析モデルにおける荷重条件として設定する． 2)荷重条件は，集中荷重，線分布荷重，面分布荷重などに設定される． 3)活荷重は有効幅員の中で影響線載荷を行う． ①通常は，各部材にとって最も不利な状況を活荷重の影響線載荷から求めることができる．	1) 設計荷重強度を解析モデルにおける荷重条件として設定する． 2) 荷重条件は，集中荷重，線分布荷重，面分布荷重などに設定される． 3) 活荷重は，着目要素の着目応力が最も厳しい状態を想定して固定載荷を行う．  図-2.1.7C　FEM 解析における活荷重の影響線載荷フロー ②活荷重の載荷は，載荷ケースの選定方法を確立する必要がある．実際には次のような方法が採用する．[2.3)] （方法１）格子解析を別途実施して，その影響線から活荷重の載荷範囲を設定して，活荷重を FEM モデルに固定載荷する． （方法２）FEM モデルの車両走行面の FEM 節点に単位荷重を載荷して着目量（変位，直応力，せん断応力）に対する影響面を作成し，その分布形状が極値となる範囲を積分計算して着目量を算出する．

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(4) 固有値解析	・地震時の動的解析を行うために，固有値解析を実施する． ・固有値解析条件は以下のとおりとする． 計算手法：CQC 法 比例減衰タイプ：ひずみエネルギー比例減衰 固有値解析：サブスペース法 モード次数：有効質量の 90%以上を目安とすることが多い．  図-2.2.8A　１次振動モードの例  図-2.2.9A　２次振動モードの例 ①通常は，材片の局部モードを除いた部材単位以上のモードのみを抽出できる．	・地震時の動的解析を行うために，固有値解析を実施する． ・固有値解析条件は以下のとおりとする． 計算手法：CQC 法 比例減衰タイプ：ひずみエネルギー比例減衰 固有値解析：サブスペース法 モード次数：有効質量の 90%以上を目安とすることが多い．  図-2.2.8B　１次振動モードの例  図-2.2.9B　２次振動モードの例 ①材片の局部モードを除いた部材単位以上のモードが抽出できる解析手法を確立する必要がある．	・地震時の動的解析を行うために，固有値解析を実施する． ・固有値解析条件は以下のとおりとする． 計算手法：CQC 法 比例減衰タイプ：ひずみエネルギー比例減衰 固有値解析：サブスペース法 モード次数：有効質量の 90%以上を目安とすることが多い． ①材片の局部モードを除いた部材単位以上のモードが抽出できる解析手法を確立する必要がある．

2.2.3　主桁

設　計　行　為	
設計フロー	項目
設計方針 ・鋼床版箱桁の設計は，下図の設計フローに従う． ・鋼床版と上フランジ縦リブについては，主桁作用と床版作用の重ね合わせの照査を行う．  図-2.2.10　主桁の設計フロー	(1) 設計断面力の算出 (2) 床版およびフランジの有効幅の算出 (3) 作用応力度の算出 (4) 許容応力度の算出 (5) 応力度の照査 (6) 主桁作用と床版作用の重ね合わせの照査 (7) ダイアフラムの設計

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(1)設計断面力の算出 1)断面力図	1)　各要素における曲げモーメントやせん断力などの作用断面力を算出，整理する．  図-2.2.11A　主桁の断面力図の例 ①許容応力度と対比するために，通常は，公称応力としての作用応力を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができる．	1)　各要素における軸力，曲げモーメント，せん断力などの作用断面力を算出，整理する． 2)　部材を構成する部材要素（上下フランジ，ウェブ）ごとに整理する．  図-2.2.11B　主桁部材要素の断面力図の例 ①-1 許容応力度と対比するために，公称応力としての作用応力を算出できる縁要素の作用断面力を解析から得ることができる． ①-2 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	1)　各要素における作用応力度を直接算出，整理する．  (a)　デッキプレートの橋軸方向垂直応力度  (b)　下フランジ，ウェブの橋軸方向垂直応力度 図-2.2.11C　FEM 解析による箱桁橋の応力分布図の例 （鋼床版箱桁の例） ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．

<table>
<tr><th>設計行為
項目</th><th colspan="3">設　計　手　法</th></tr>
<tr><th></th><th>従来設計（立体骨組解析）</th><th>せん断パネル解析による設計</th><th>ＦＥＭ解析による設計</th></tr>
<tr><td>(2) 床版およびフランジの有効幅の算出</td><td>1)　床版および箱断面のフランジの有効幅を道示Ⅱ.11.3.5 の規定により算出する.
2)　主桁の等価支間長は道示Ⅱ.表-11.3.1 に従う.

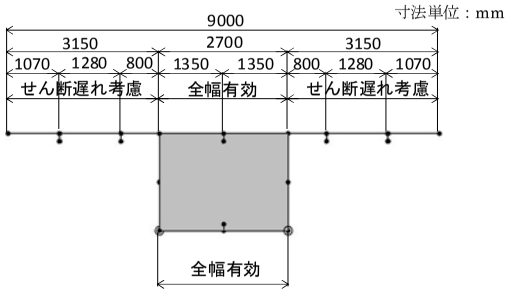
①実態で生じるせん断遅れによる応力分布を直接再現してはいないものの，通常は，設計上安全側に評価できるとみなせる有効幅の概念によりせん断遅れを考慮する.</td><td>1)　有効幅の算出は行わずに，2.2.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する.
 

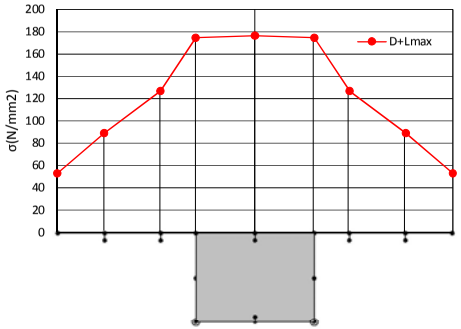
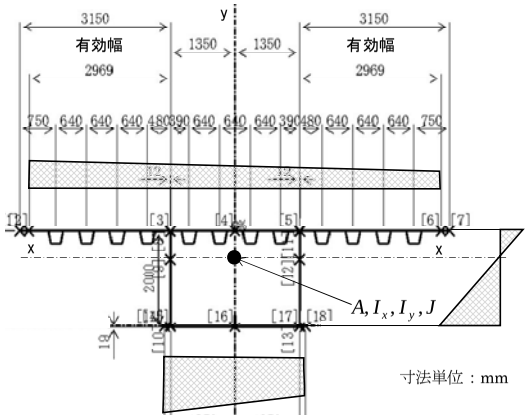
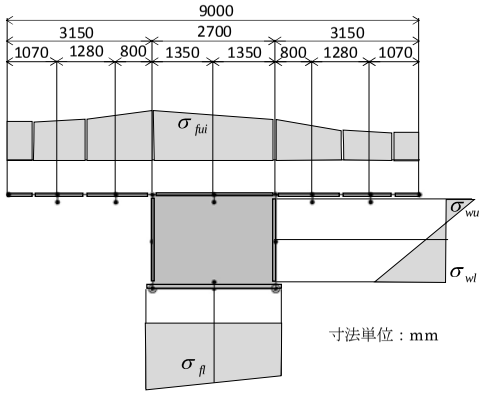
図-2.2.12B　せん断遅れの影響を考慮した主桁の要素分割の例
 

図-2.2.13B　橋脚横はり結合部の鋼床版応力度の例

①-1 せん断遅れが顕著に現れるフランジは，せん断遅れを適切に再現できる程度にフランジを分割してモデル化することで，有効幅を設定する必要がない.
①-2 橋脚横はりと鋼床版とが一体となったせん断遅れが大きい箇所の鋼床版の応力状態が精度良く解析できる.
①-3 全橋モデルは，床版やフランジを橋軸直角方向に複数の要素に分割できる.
①-4 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある.</td><td>1)　有効幅の算出は行わずに，2.2.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する.

①-1 せん断遅れが顕著に現れるフランジは，せん断遅れを適切に再現できる程度にフランジを分割してモデル化することで，有効幅を設定する必要がない.
①-2 橋脚横はりと鋼床版とが一体となったせん断遅れが大きい箇所の鋼床版の応力状態が精度良く解析できる.
①-3 全橋モデルは，床版やフランジを橋軸直角方向に複数の要素に分割できる.
①-4 せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある.</td></tr>
</table>

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(3)作用応力度の算出	1）軸力による垂直応力度は，全断面有効として算出する． 2）曲げモーメントによる垂直応力度は，平面保持が成り立つとして二軸方向の曲げに対して（道示Ⅱ11.2.1）式により算出する．この時の断面二次モーメントはフランジの有効幅を考慮したものとする． 3）せん断応力度は，せん断の大部分がウェブで受け持たれ，ウェブ内にほぼ均一に分布するとして（道示Ⅱ11.2.2）式により算出する． $\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M_x}{I_x} \cdot y \pm \frac{M_y}{I_y} \cdot x$　　$\tau = \frac{S_x}{A_{wx}} + \frac{S_y}{A_{wy}} + \frac{T}{2Ft}$ ここで，σ ：垂直応力度 N ：軸力 M_x, M_y ：x 軸・y 軸回りの曲げモーメント A ：断面積 I_x, I_y ：x 軸・y 軸回りの断面二次モーメント x, y ： x 方向・y 方向縁端距離 τ ：せん断応力度 S_x, S_y ：x 方向・y 方向のせん断力 T ：ねじりモーメント A_{wx}, A_{wy} ：x 方向・y 方向ウェブの断面積 F ：閉断面面積　　t ：板厚  図-2.2.14A　箱断面桁と垂直応力度 ①許容応力度と対比するために，通常は，公称応力としての作用応力を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができる．	1）要素ごとの軸力と曲げモーメントから垂直応力度を算出する． 2）要素ごとのせん断力からせん断応力度を算出する． $\sigma_i = \sigma_{iN} + \sigma_{iM} = \frac{N_i}{A_i} + \frac{M_i}{I_i} \cdot y_i$ $\tau_i = \frac{S_i}{t_i}$  図-2.2.14B　箱断面桁を構成する板要素の垂直応力度 ここで，N_i ：板要素の軸力 t_i ：せん断パネル要素の板厚 M_i ：板要素の曲げモーメント I_i ：板要素の断面二次モーメント y_i ：板要素の重心位置からの縁端距離 S_i ：せん断パネル要素のせん断流 ①-1 許容応力度と対比するために，公称応力としての作用応力を算出できる縁要素の作用断面力を解析から得ることができる． ①-2 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	1）各要素の作用応力をフランジやウェブごとに平均化して公称応力に置換する． ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(4) 許容応力度の算出 (5) 応力度の照査	道示Ⅱ3.2.1 より箱形断面の許容曲げ圧縮応力度は，許容軸方向圧縮応力度の上限値となるので，局部座屈に対する許容応力度がこの値よりも小さい場合は，局部座屈に対する許容応力度が許容曲げ圧縮応力度となる． $\sigma_{ca} = \sigma_{cal}$ ここに，σ_{ca} ：許容曲げ圧縮応力度 σ_{cal} ：板の局部座屈に対する許容応力度	道示Ⅱ3.2.1 より箱形断面の許容曲げ圧縮応力度は，許容軸方向圧縮応力度の上限値となるので，局部座屈に対する許容応力度がこの値よりも小さい場合は，局部座屈に対する許容応力度が許容曲げ圧縮応力度となる． $\sigma_{ca} = \sigma_{cal}$ ここに，σ_{ca} ：許容曲げ圧縮応力度 σ_{cal} ：板の局部座屈に対する許容応力度	道示Ⅱ3.2.1 より箱形断面の許容曲げ圧縮応力度は，許容軸方向圧縮応力度の上限値となるので，局部座屈に対する許容応力度がこの値よりも小さい場合は，局部座屈に対する許容応力度が許容曲げ圧縮応力度となる． $\sigma_{ca} = \sigma_{cal}$ ここに，σ_{ca} ：許容曲げ圧縮応力度 σ_{cal} ：板の局部座屈に対する許容応力度
(6) 主桁作用と床版作用の重ね合わせの照査	鋼床版が主桁の一部として作用するので，主桁作用による応力度と床版作用による応力度を同時に考慮した場合の照査を行う．この時，道示 3.2.3 に規定する許容値を 40%割増できる．	鋼床版が主桁の一部として作用するので，主桁作用による応力度と床版作用による応力度を同時に考慮した場合の照査を行う．この時，道示 3.2.3 に規定する許容値を 40%割増できる．	鋼床版が主桁の一部として作用するので，主桁作用による応力度と床版作用による応力度を同時に考慮した場合の照査を行う．この時，道示 3.2.3 に規定する許容値を 40%割増できる．
許容値 （規格値）	道示Ⅱ3.2.1，4.2.2～4.2.4，9.4.2 道示の適用範囲の橋梁に対して，道示どおりの作用応力度の算出を行うため，道示の許容応力度を用いて良い．	道示Ⅱ3.2.1，4.2.2～4.2.4，9.4.2 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため，道示の許容応力度を用いて良い．	*許容値がないことに対する対応* ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない．

設計行為 項目	設　計　手　法 従来設計（立体骨組解析）とせん断パネル解析
（比較検討） 主桁と橋脚の応力度	（１）主桁応力度 主桁の上下フランジの作用応力度について，骨組解析とせん断パネル解析結果を比較して図-2.2.15～17 に示す．荷重ケースとしては，死荷重および断面決定要因となる活荷重に着目した．全体にせん断パネル解析結果がわずかに小さいが，両者は良く一致する．小さくなる理由は，フランジ断面を箱幅中央に集中させて配置するが，それとウェブとを繋ぐせん断パネル板厚をフランジ厚とするために，この間でせん断変形するためである． （２）橋脚応力度 橋脚柱の作用応力度について，骨組解析とせん断パネル解析結果を比較して，図-2.2.18～20 に示す．荷重ケースとしては，死荷重と断面決定要因となるタイプⅡ地震時に着目した． せん断パネル解析結果は，隅角部手前までの作用応力度を示しており，断面のコーナー部と板の中心点の８点について比較する．骨組解析結果とせん断パネル解析結果の番号は断面力の符号の関係で必ずしも対応できていないが，全体として両者の値にはある程度の整合が見られる． ①せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．

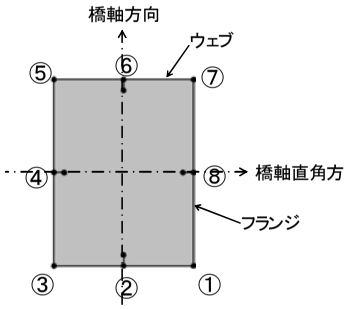


図-2.2.21　脚柱断面と板要素番号

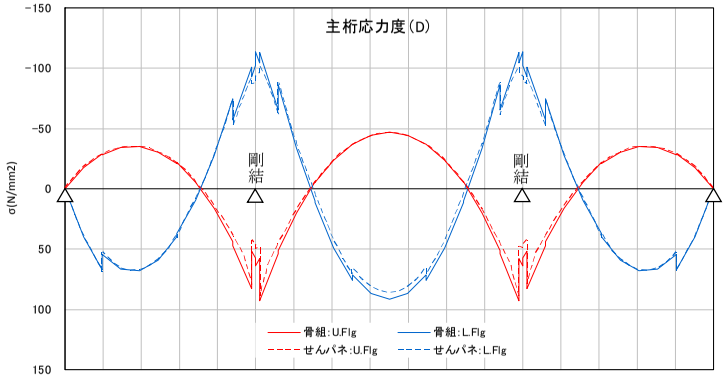


図-2.2.15　主桁の死荷重による応力度の例

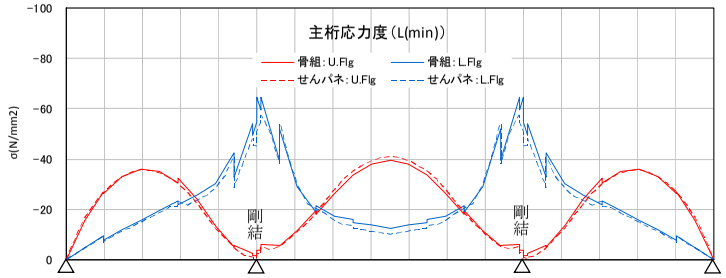


図-2.2.16　主桁の活荷重による最小応力度の例

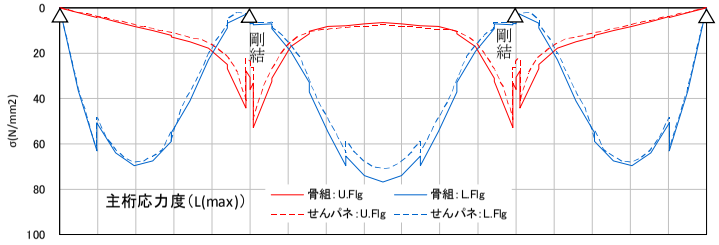


図-2.2.17　主桁の活荷重による最大応力度の例

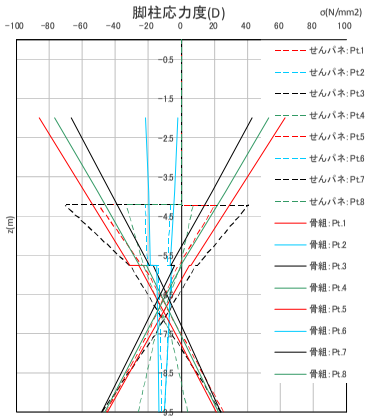


図-2.2.18 脚柱の死荷重による応力度の例
（鋼製橋脚柱部１本の例）

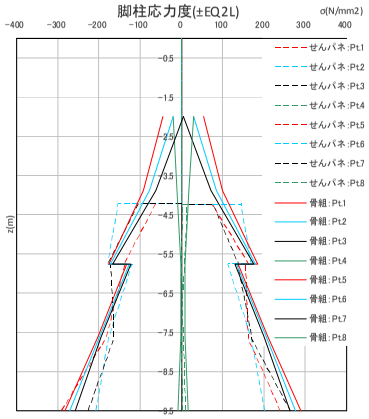


図-2.2.19 脚柱の地震時（EQ2L）による応力度の例
（鋼製橋脚柱部１本の例）

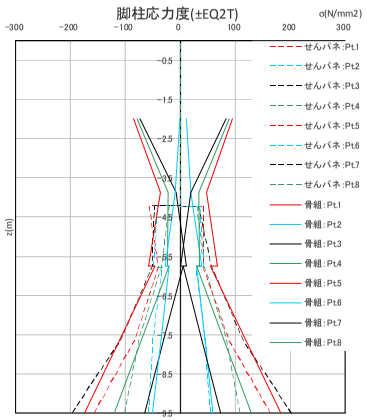


図-2.2.20 脚柱の地震時（EQ2T）による応力度の例
（鋼製橋脚柱部１本の例）

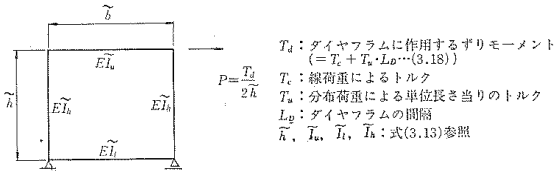
<table>
<tr><th>設計行為
項目</th><th colspan="3">設　計　手　法</th></tr>
<tr><th></th><th>従来設計（立体骨組解析）</th><th>せん断パネル解析による設計</th><th>ＦＥＭ解析による設計</th></tr>
<tr>
<td>(7) ダイアフラムの設計</td>
<td>・鋼道路橋設計便覧[2.4]に従って，ダイアフラムの必要剛性を確保した上で，ダイアフラムの応力度照査を行う．
1)ダイアフラムの必要剛性
$K \geq K_{req}$
$K = 4G \cdot A \cdot t_D$ ：充腹板方式のダイアフラムの剛性
$K_{req} = 20\dfrac{EI_{DW}}{L_D^{\ 3}}$ ：ダイアフラムの必要剛性
G ：鋼のせん断弾性係数
A ：閉断面部の板厚中心線で囲まれる部分の面積
t_D ：ダイアフラムの板厚
L_D ：ダイアフラムの間隔
I_{DW} ：箱桁の断面変形に対するずり定数（便覧(3.9)式）
E ：鋼のヤング係数
2)中間ダイアフラムの応力照査
・充腹板方式の場合は，ダイアフラムに作用するねじりモーメント T_d によって生じる次式のせん断応力度に対して照査する．
$$\tau = \frac{T_d}{2A \cdot t_D} \leq \tau_a$$
・ラーメン方式の場合は，下図の計算モデルで照査する．
 

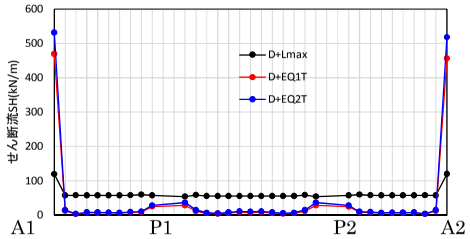
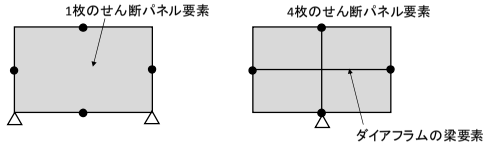
図-2.2.22A　ラーメン方式ダイアフラムの計算モデル[2.5]
3)支点上ダイアフラムの応力照査
支承直上の支圧応力度，支点上補剛材を含めた鉛直方向応力度，はりとして作用する曲げモーメントおよびせん断力に対する照査を行う．
②ダイアフラムを設計する場合，支点位置の高さ方向にモデル化しなければならない．通常は，平面格子モデルでは高さ方向のモデル化を行わず，別途計算モデルを作成する．</td>
<td>①-1 解析モデルで仮定したダイアフラム配置と剛性（板厚）に対して，ダイアフラムに作用するせん断流と，主桁のそり応力が含まれた形で主桁部材断面力が得られる．
①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁内のダイアフラムをモデル化できる．
①-3 ダイアフラムの要素から，ダイアフラム単独のせん断力を直接求めることができる．
①-4 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．
1)中間ダイアフラムの応力照査
・充腹板方式の場合は，ダイアフラムに作用するせん断流から直接せん断応力度を算出して照査する．
$$\tau = \frac{SH}{t_D} \leq \tau_a$$
 

図-2.2.22B　ダイアフラムのせん断流
（図-2.2.23B(a)のように１枚でモデルした鋼床版箱桁部のダイアフラム）
・ラーメン方式の場合は，矩形ラーメンの骨組をせん断パネルモデルに組み込んで解析して断面力を直接求める．これより，ラーメン部材の応力度を照査する．
3)支点上ダイアフラムの応力照査
・１枚のせん断パネルによる簡略化したモデル化による場合は，全体系の上記せん断流の解析結果＋従来設計の応力照査を行う．
・支点がダイアフラムの中間にある場合などは，ダイアフラムの断面力が算出できるように要素分割した上で，その結果を用いて応力照査を行う．</td>
<td>①-1 解析モデルで仮定したダイアフラム配置と剛性（板厚）に対して，ダイアフラムに作用するせん断流と，主桁のそり応力が含まれた形で主桁部材断面力が得られる．
①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁内のダイアフラムをモデル化できる．
①-3 ダイアフラムの要素から，ダイアフラム単独のせん断力を直接求めることができる．
①-4 せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．
③-1 各要素に対して得られる作用応力は２次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある．
③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．
 

(a)ウェブ上で支持される場合　(b)中間に支点がある場合
図-2.2.23B　支点上ダイアフラムの要素分割

許容値がないことに対する対応
③-1 各要素に対して得られる作用応力は２次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．
③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない．</td>
</tr>
<tr><td>許容値
（規格値）</td><td>鋼道路橋設計便覧 3.3.4</td><td>鋼道路橋設計便覧 3.3.4</td><td></td></tr>
</table>

設計行為 項目	設　計　手　法 せん断パネル解析による設計
（参考資料） 断面変形によるそり応力度の検証	ダイアフラムを含む箱断面桁のせん断パネル解析で，箱桁の断面変形によるそり応力度が正しく求められるかを確認する．文献 2.10)の単純支持箱桁にずり荷重を載荷して，Beam アナロジーとブロック有限要素法との結果を比較した計算例に対して，せん断パネル解析結果を比較する． 計算例は**図-2.2.25**（文献 2.10）の Fig.5）に示す単純支持された矩形箱桁にずり荷重を載荷したもので，中間ダイアフラムの板厚は 0.1cm と 1.0cm の 2 種類となる．これに対してせん断パネルモデルは，右図のようにフランジとウェブをそれぞれ 1 枚の板要素で置き換えた解析モデルで，ダイアフラムは 8 節点のせん断パネル 1 要素でモデル化する．ダイアフラムのせん断パネルの板厚は実板厚とするが，フランジとウェブの板厚は実際より大きくする．これは，Beam アナロジーでは外板のせん断変形の影響を無視するので，それと合せるためである． 箱桁コーナー部でのそり応力度の分布図を**図-2.2.26，27**（文献 2.10）の Fig.7，8）に示すが，せん断パネルモデルによる解析結果は，論文で解析された結果とよく整合する．

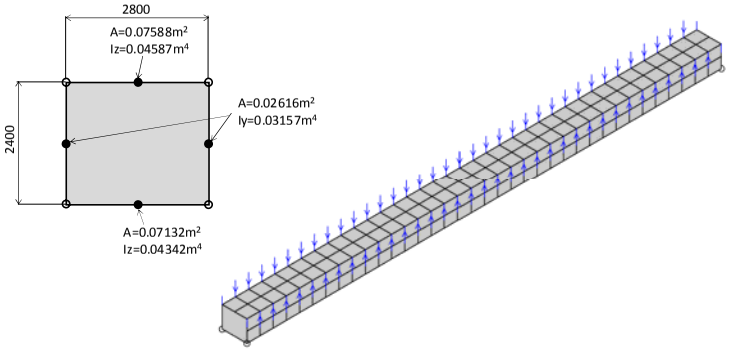


図-2.2.24B　箱桁のみをモデル化したせん断パネルモデル

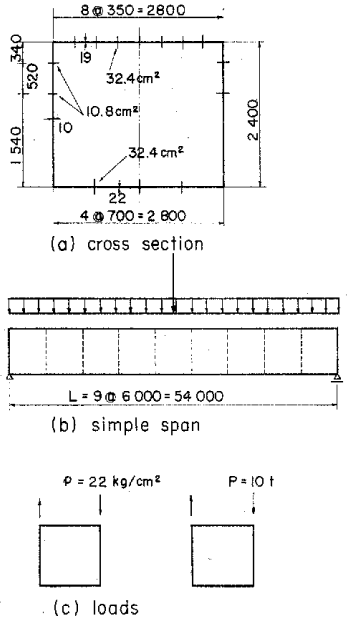


Fig. 5　Model Girder (Type 1)

図-2.2.25B 断面変形によるそり応力度を算出する箱桁 [2.9)]

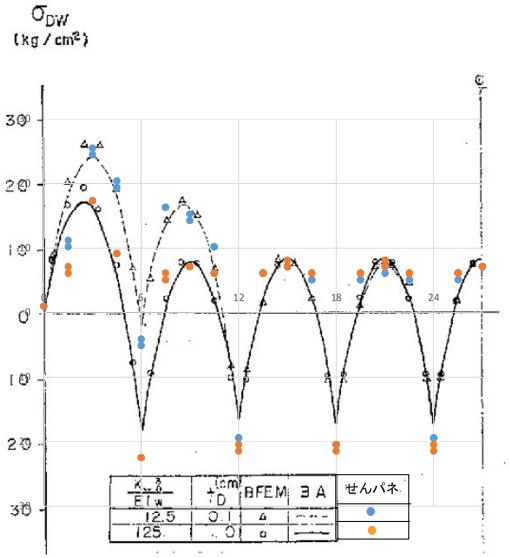


Fig. 7　Comparison between BA and BFEM Solutions (Type 1, uniform load)

図-2.2.26B そり応力度の算出例（その１）[2.9)]

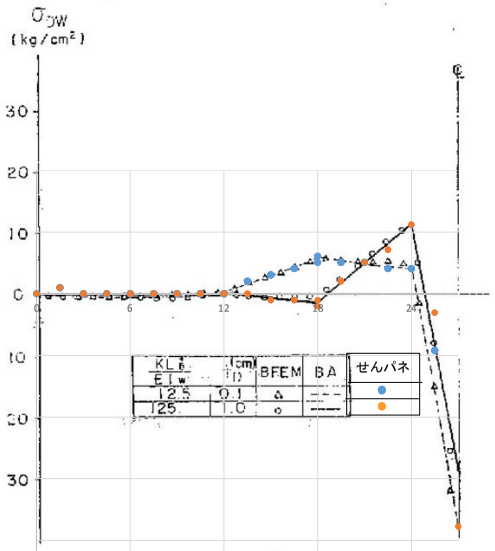


Fig. 8　Comparison between BA and BFEM Solutions (Type 1, concentrated load)

図-2.2.27B そり応力度の算出例（その２）[2.9)]

2.2.4　橋脚

設　計　行　為	
設計フロー	項目
設計方針 ・橋脚の設計は，下図の設計フローに従う． ・隅角部は，せん断遅れの影響を考慮して断面設計を行う． ・レベル２地震動に対しても同様に解析し，断面照査を行う．	(1)設計断面力の算出 (2)一般部の設計 1) 有効座屈長の決定 2) 有効幅の算出 3) 作用応力度の算出 4) 許容応力度の算出 5) 応力度の照査 (3) 隅角部の設計 1) 作用応力度の算出 2) 許容応力度の算出 3) 応力度の照査

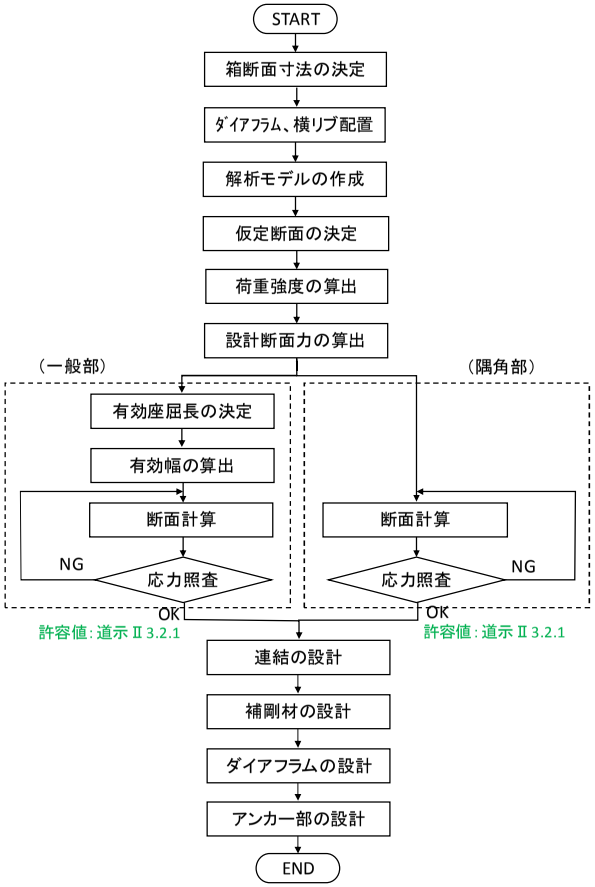
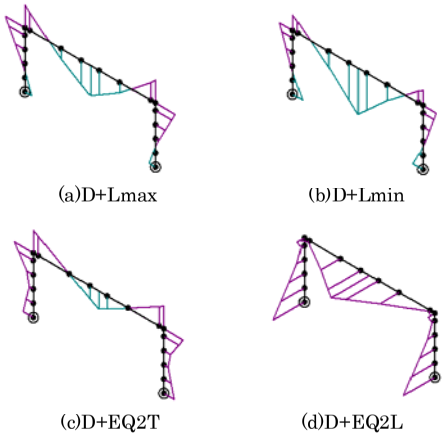
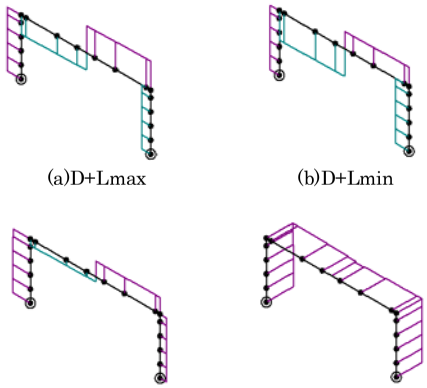
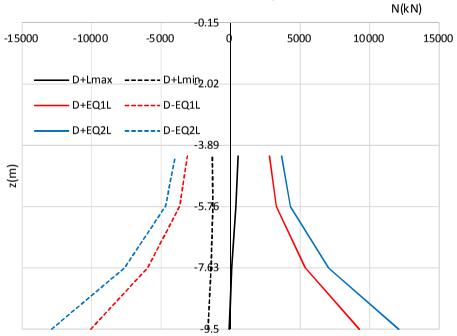
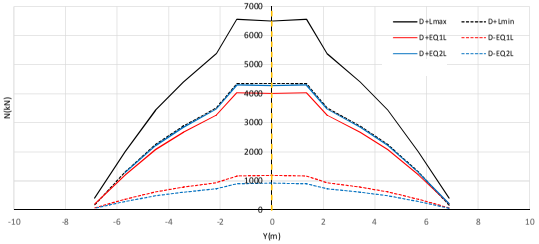
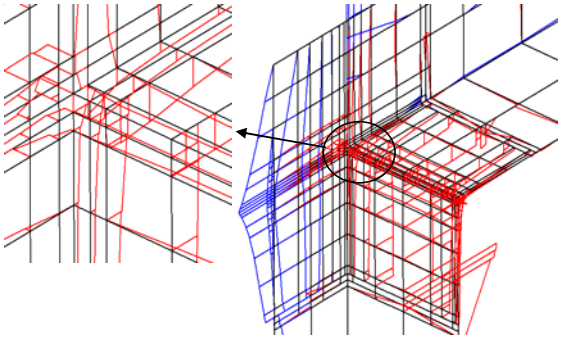
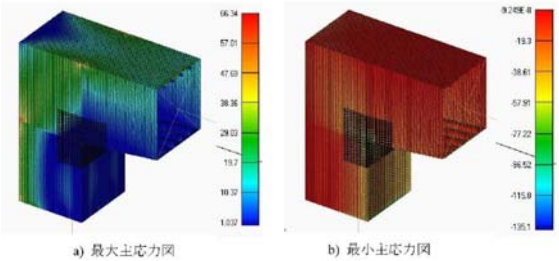
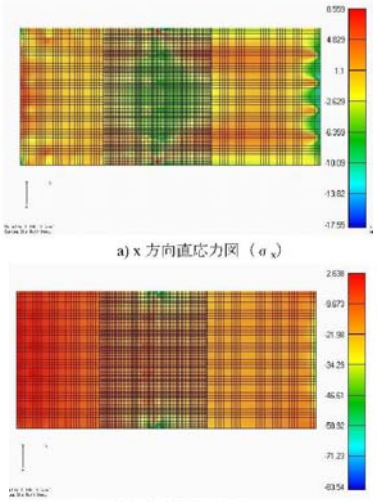
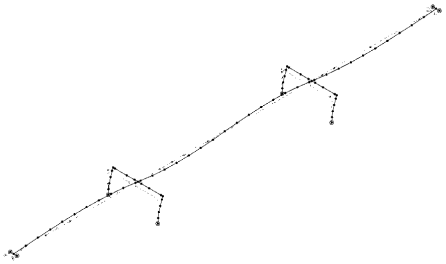
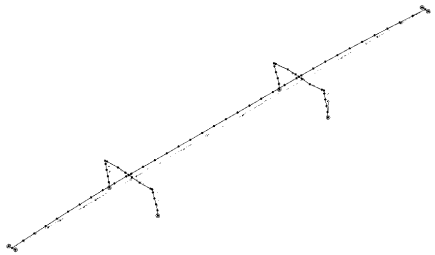
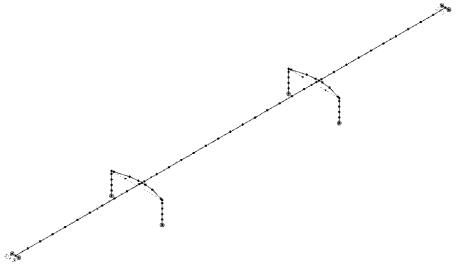
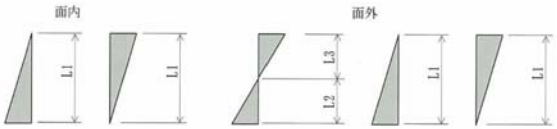
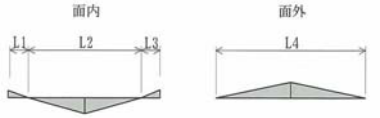


図-2.2.28　橋脚の設計フロー

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(1)設計断面力の算出 1)断面力図	1)　各要素における曲げモーメントやせん断力などの作用断面力を算出，整理する．  (a)D+Lmax　(b)D+Lmin (c)D+EQ2T　(d)D+EQ2L 図-2.2.29A　橋脚の曲げモーメント図の例  (a)D+Lmax　(b)D+Lmin (c)D+EQ2T　(d)D+EQ2L 図-2.2.30A　橋脚のせん断力図の例	1)　各要素における軸力，曲げモーメント，せん断力などの作用断面力を算出，整理する． 2)　部材を構成する部材要素（フランジ，ウェブ）ごとに整理する．  図-2.2.29B　鋼製橋脚柱部ウェブの軸力図の例  図-2.2.30B　鋼製橋脚横はり下フランジの軸力図の例  図-2.2.31B　　隅角部縁部材の軸力図の例(D+Lmax)	1)　各要素における作用応力度を直接算出，整理する．  a) 最大主応力図　b) 最小主応力図 図-2.2.29C　　隅角部主応力度のコンター図の例  a) x 方向直応力図（σ_x） b) y 方向直応力図（σ_y） 図-2.2.30C　隅角部はり下フランジの垂直応力度コンター図の例

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(2)一般部の設計 1)有効座屈長の決定	1)　脚柱の有効座屈長は，道示Ⅱ16.5.2に従い，橋軸方向はL_{Le}＝２H，橋軸直角方向はL_{Te}＝1.5Hとする． なお，道示Ⅱ16.5.2では，構造全体系の弾性固有値解析を行って有効座屈長を算出してもよいとされている．  図-2.2.32A　1次モード・脚柱面外座屈の例  図-2.2.33A　5次モード・脚柱面内座屈の例  図-2.2.34A　8次モード・横はり面外座屈の例 ①通常は，材片の局部モードを除いた部材単位以上のモードのみを抽出できる．	1)　脚柱の有効座屈長は，道示Ⅱ16.5.2に従い，橋軸方向はL_{Le}＝２H，橋軸直角方向はL_{Te}＝1.5Hとする． なお，道示Ⅱ16.5.2では，構造全体系の弾性固有値解析を行って有効座屈長を算出してもよいとされている． ①材片の局部モードを除いた部材単位以上のモードの抽出手法を確立する必要がある．	1)　脚柱の有効座屈長は，道示Ⅱ16.5.2に従い，橋軸方向はL_{Le}＝２H，橋軸直角方向はL_{Te}＝1.5Hとする． なお，道示Ⅱ16.5.2では，構造全体系の弾性固有値解析を行って有効座屈長を算出してもよいとされている． ①材片の局部モードを除いた部材単位以上のモードの抽出手法を確立する必要がある．

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
2) 有効幅の算出	1)　箱断面のフランジの有効幅を道示Ⅱ.11.3.5 の規定により算出する. 2)　橋脚の等価支間長は下図のように曲げモーメントの分布形状から決定する.  (a)脚柱の曲げモーメント形状  (b)横はりの曲げモーメント形状 図-2.2.35A　橋脚の曲げモーメント形状と等価支間長 ①実態で生じるせん断遅れによる応力分布を直接再現してはいないものの，通常は，設計上安全側に評価できるとみなせる有効幅の概念によりせん断遅れを考慮する.	1)　有効幅の算出は行わずに，2.2.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する. ①-1 せん断遅れが顕著に現れるフランジは，せん断遅れを適切に再現できる程度にフランジを分割してモデル化することで，有効幅を設定する必要がない. ①-2 橋脚横はりと鋼床版とが一体となったせん断遅れが大きい箇所の鋼床版の応力状態が精度良く解析できる. ①-3 全橋モデルは，床版やフランジを橋軸直角方向に複数の要素に分割できる. ①-4 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある.	1)　有効幅の算出は行わずに，2.2.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する. ①-1 せん断遅れが顕著に現れるフランジは，せん断遅れを適切に再現できる程度にフランジを分割してモデル化することで，有効幅を設定する必要がない. ①-2 橋脚横はりと鋼床版とが一体となったせん断遅れが大きい箇所の鋼床版の応力状態が精度良く解析できる. ①-3 全橋モデルは，床版やフランジを橋軸直角方向に複数の要素に分割できる. ①-4 せん断遅れ等の解析結果について，実態と整合した精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある.

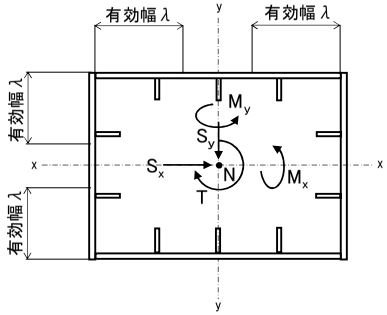
<table>
<tr><th>設計行為
項目</th><th colspan="3">設　計　手　法</th></tr>
<tr><th></th><th>従来設計（立体骨組解析）</th><th>せん断パネル解析による設計</th><th>ＦＥＭ解析による設計</th></tr>
<tr>
<td>3) 作用応力度の算出</td>
<td>1) 軸力による垂直応力度は，全断面有効として算出する．
2) 曲げモーメントによる垂直応力度は，平面保持が成り立つとして二軸方向の曲げに対して（道示Ⅱ11.2.1）式により算出する．この時の断面二次モーメントはフランジの有効幅を考慮したものとする．
3) せん断応力度は，せん断の大部分がウェブで受け持たれ，ウェブ内にほぼ均一に分布するとして（道示Ⅱ11.2.2）式により算出する．
$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M_x}{I_x} \cdot y \pm \frac{M_y}{I_y} \cdot x$$
$$\tau = \frac{S_x}{A_{wx}} + \frac{S_y}{A_{wy}} + \frac{T}{2Ft}$$
ここで，σ ：垂直応力度
N ：軸力
M_x, M_y ：x 軸・y 軸回りの曲げモーメント
A ：断面積
I_x, I_y ：x 軸・y 軸回りの断面二次モーメント
x, y ： x 方向・y 方向縁端距離
τ ：せん断応力度
S_x, S_y ：x 方向・y 方向のせん断力
T ：ねじりモーメント
A_{wx}, A_{wy} ：x 方向・y 方向ウェブの断面積
F ：閉断面面積
t ：板厚
 

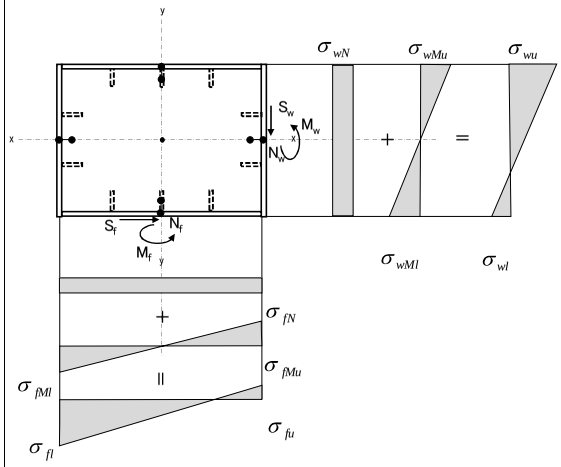
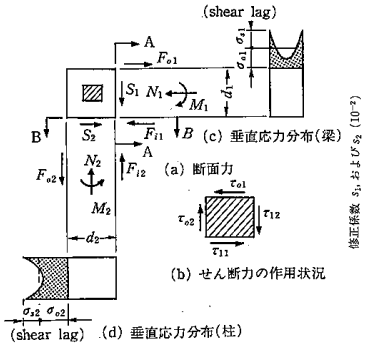
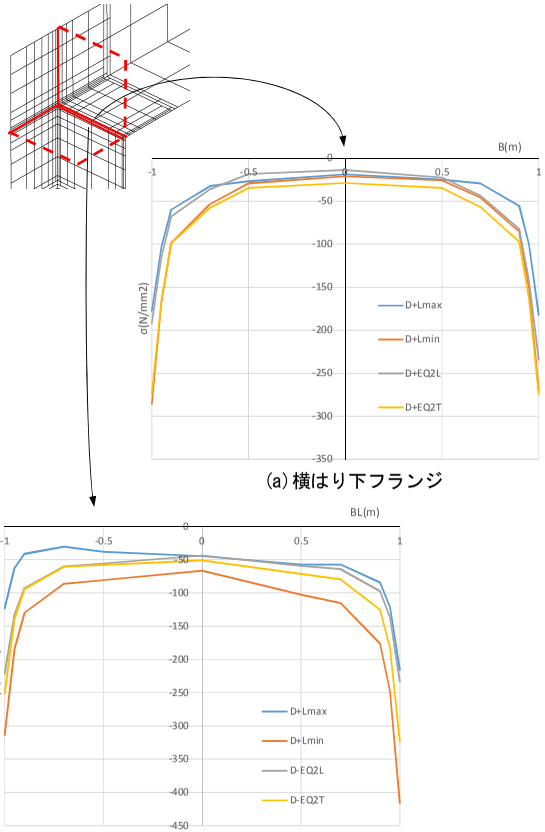
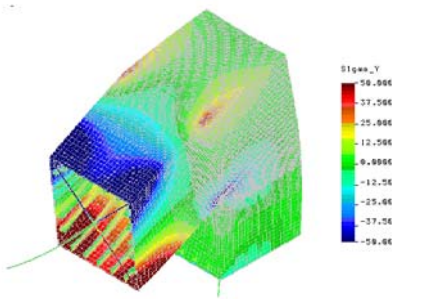
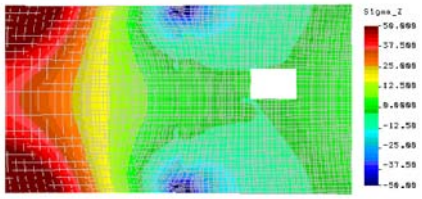
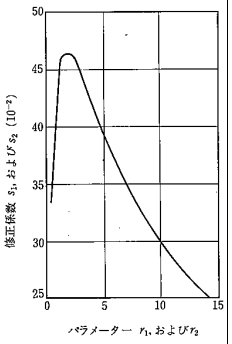
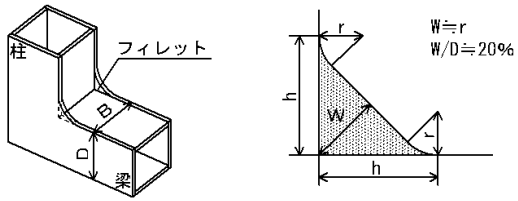
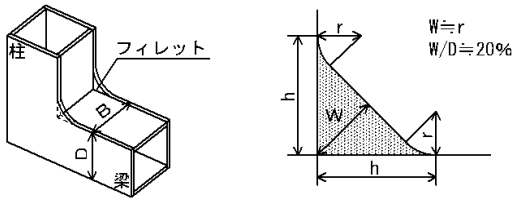
図-2.2.36A　橋脚断面と断面力
①許容応力度と対比するために，通常は，公称応力としての作用応力を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができる．</td>
<td>1) 要素ごとの軸力と曲げモーメントから垂直応力度を算出する．
2) 要素ごとのせん断力からせん断応力度を直接算出する．
$$\sigma_i = \sigma_{iN} + \sigma_{iM} = \frac{N_i}{A_i} + \frac{M_i}{I_i} \cdot y_i$$
$$\tau = \frac{S_i}{A_i}$$
 

図-2.2.36B　橋脚断面を構成する板要素の垂直応力度
ここで，N_i ：板要素の軸力
A_i ：板要素の断面積
M_i ：板要素の曲げモーメント
I_i ：板要素の断面二次モーメント
y_i ：板要素の重心位置からの縁端距離
S_i ：板要素のせん断力
①-1 許容応力度と対比するために，公称応力としての作用応力を算出できる縁要素の作用断面力を解析から得ることができる．
①-2 せん断遅れ等の解析結果について，公称応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．</td>
<td>1) 各要素の作用応力をフランジやウェブごとに平均化して公称応力に置換する．
③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない．また，公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある．
③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．</td>
</tr>
</table>

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
4)許容応力度の算出 5)応力度の照査	許容軸方向引張応力度および許容軸方向圧縮応力度は道示Ⅱ3.2.1による．許容軸方向圧縮応力度は，局部座屈を考慮しない柱としての許容軸方向圧縮応力度と部材を構成する板の局部座屈に対する許容応力度から算出する． $\sigma_{ca} = \sigma_{cag} \cdot \sigma_{cal} / \sigma_{ca0}$ ここに，σ_{ca}：許容軸方向圧縮応力度 σ_{cag}：局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度で，柱断面の有効座屈長と断面二次半径から求める． σ_{cal}：板の局部座屈に対する許容応力度 σ_{ca0}：許容軸方向圧縮応力度の上限値	許容軸方向引張応力度および許容軸方向圧縮応力度は道示Ⅱ3.2.1による．許容軸方向圧縮応力度は，局部座屈を考慮しない柱としての許容軸方向圧縮応力度と部材を構成する板の局部座屈に対する許容応力度から算出する． $\sigma_{ca} = \sigma_{cag} \cdot \sigma_{cal} / \sigma_{ca0}$ ここに，σ_{ca}：許容軸方向圧縮応力度 σ_{cag}：局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度で，柱断面の有効座屈長と断面二次半径から求める． σ_{cal}：板の局部座屈に対する許容応力度 σ_{ca0}：許容軸方向圧縮応力度の上限値	許容軸方向引張応力度および許容軸方向圧縮応力度は道示Ⅱ3.2.1による．許容軸方向圧縮応力度は，局部座屈を考慮しない柱としての許容軸方向圧縮応力度と部材を構成する板の局部座屈に対する許容応力度から算出する． $\sigma_{ca} = \sigma_{cag} \cdot \sigma_{cal} / \sigma_{ca0}$ ここに，σ_{ca}：許容軸方向圧縮応力度 σ_{cag}：局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度で，柱断面の有効座屈長と断面二次半径から求める． σ_{cal}：板の局部座屈に対する許容応力度 σ_{ca0}：許容軸方向圧縮応力度の上限値
許容値 （規格値）	道示Ⅱ3.2.1，4.2.2～4.2.4 道示の適用範囲の橋梁に対して，道示どおりの作用応力度の算出を行うため，道示の許容応力度を用いて良い．	道示Ⅱ3.2.1，4.2.2～4.2.4 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため，道示の許容応力度を用いて良い．	*許容値がないことに対する対応* ③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため，許容応力度と対比するための処理を行わなければならない． ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない．

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
(3)　隅角部の設計 1) 作用応力度の算出	1) 奥村・石沢式 2.2)を用いて隅角部のシェアラグによる応力度を計算する． 2) 隅角部に作用する設計断面力は，立体骨組モデルの解析結果による． ・軸力と曲げモーメントによる垂直応力度 $\sigma_{o1}=\frac{M_1}{W_1}-\frac{N_1}{A_1},\quad \sigma_{i1}=\frac{M_1}{W_1}+\frac{N_1}{A_1}$ $\sigma_{o2}=\frac{M_2}{W_2}-\frac{N_2}{A_2},\quad \sigma_{i2}=\frac{M_2}{W_2}+\frac{N_2}{A_2}$ ここで，A_1, A_2 ：はりあるいは柱の断面積 W_1, W_2 ：はりあるいは柱の断面係数 ・シェアラグによる応力度 $\sigma_{s1}=\frac{F_{i2}}{A_{w1}}\cdot\frac{b}{d_1}\cdot s_1,\quad \sigma_{s2}=\frac{F_{i1}}{A_{w2}}\cdot\frac{b}{d_2}\cdot s_2$ ただし，修正係数 s_1, s_2 は，次のパラメータ r_1, r_2 に関する図表から求める． $r_1=\frac{6A_{f1}}{A_{w1}},\quad r_2=\frac{6A_{f2}}{A_{w2}}$ ここで，A_{f1}, A_{f2} ：はりと柱のフランジ断面積（平均値） A_{w1}, A_{w2} ：はりと柱のウェブ断面積 b ：ウェブ間隔  図-2.2.37A　隅角部に作用する断面力と応力度 2.2)	1) 要素ごとの軸力と曲げモーメントから垂直応力度を算出する． 2) 要素ごとのせん断力からせん断応力度を直接算出する． $\sigma_i=\frac{N_i}{A_i}$ $\tau_i=\frac{SH_i}{t_i}$ ここで，N_i ：縁部材の軸力 A_i ：縁部材の断面積 SH_i ：せん断パネルのせん断流 t_i ：せん断パネルの板厚  (a) 横はり下フランジ (b) 脚柱内側フランジ 図-2.2.37B　隅角部フランジの垂直応力度分布の例	1) 各要素の作用応力をフランジやウェブごとに平均化して公称応力に置換する．  (a) 隅角部の変形と垂直応力度  (b) 横はり下フランジの垂直応力度 図-2.2.37C　隅角部の FEM 解析結果のコンター図の例
	 図-2.2.38A 修正係数 s_1, s_2 を求めるための図表 2.2)		

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭ解析による設計
2)許容応力度の算出 3)応力度の照査	1）隅角部の許容応力度について，道示に具体的な値は示されていないが，都市高速道路会社の設計基準が準用される．これによると，垂直応力度については道示Ⅱ3.2.1 をそのまま適用し，せん断応力度については垂直応力度の許容値を基準に次のように規定される． 首都高速道路会社：$\tau_a \leq 0.45\sigma_a$ [2.11)] 阪神高速道路会社：$\tau_a \leq 0.52\sigma_a$ [2.12)] また，曲げとせん断の合成応力度の照査式は，割増 1.2 を考慮していない． $\left(\frac{\sigma}{\sigma_a}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_a}\right)^2 \leq 1.0$ ③奥村・石沢式[2.2)]の算出仮定は，はり断面は左右対称ではり長さにわたって一定，荷重はウェブの上下縁に作用しその方向はウェブに平行で断面において左右対称など，ラーメン面内の作用力だけを考慮したもので，断面が左右非対称や，ラーメン面外荷重（ねじり，面外曲げ）は考慮されていないため，適用範囲が限定的である．	1）従来設計と同様に許容応力度を算出する．  図-2.2.39B　フィレット構造と形状[2.11)] ①-1 隅角部コーナー部のウェブにフィレットを設けずに解析すると，従来設計のせん断遅れ以上の大きな応力値となる．一方，フィレットを設けた解析を行うと小さくなる． ①-2 上図の形状のフィレットを設けることが都市高速道路会社の設計基準に規定されており，道示Ⅱ16.10 にも解説があるので，実構造にはフィレットが設けられることになる． ①-3 解析においてフィレットをどのように取り扱うか，また，フィレットを設けた場合も，フィレット縁端に高い応力集中が生じることが予想されるので，これに対する許容応力度をどのように設定するかが課題である[2.13)]．	1）従来設計と同様に許容応力度を算出する．  図-2.2.39B　フィレット構造と形状[2.11)] ①-1 隅角部コーナー部のウェブにフィレットを設けずに解析すると，従来設計のせん断遅れ以上の大きな応力値となる．一方，フィレットを設けた解析を行うと小さくなる． ①-2 上図の形状のフィレットを設けることが都市高速道路会社の設計基準に規定されており，道示Ⅱ16.10 にも解説があるので，実構造にはフィレットが設けられることになる． ①-3 解析においてフィレットをどのように取り扱うか，また，フィレットを設けた場合も，フィレット縁端に高い応力集中が生じることが予想されるので，これに対する許容応力度をどのように設定するかが課題である[2.13)]．
許容値 （規格値）	道示Ⅱ3.2.1，4.2.2～4.2.4 道示に具体的な値は示されていないが，高速道路会社等の規定を準用する．これらの規定に示されたとおりの作用応力度の算出を行うため，許容応力度の適用は可能である． *フィレット部の許容値がないことに対する対応* ③フィレット部について設計する場合，一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない．	*フィレット部の許容値がないことに対する対応* ③フィレット部について設計する場合，一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない．	*フィレット部の許容値がないことに対する対応* ③フィレット部について設計する場合，一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない．

2.3　格子解析では局所的な応力性状の把握ができないと考えられる構造

2.3.1　構造の種類

従来の格子解析では局所的な応力性状の把握ができないと考えられる構造として，以下の照査項目の検討を行う．

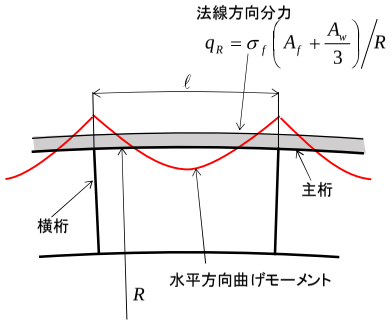
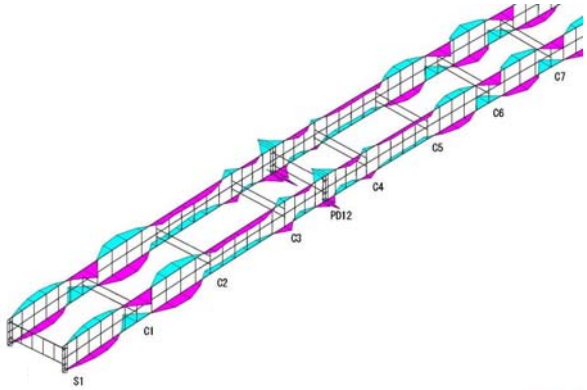
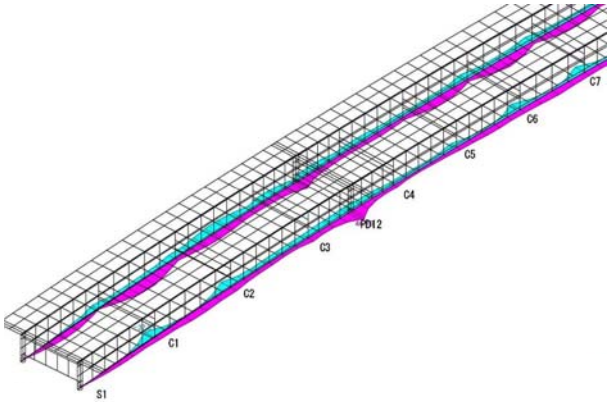
・曲線少数 I 桁橋：主桁フランジの曲率による 2 次応力度

・曲線細幅箱桁橋：主桁フランジの曲率と断面変形による 2 次応力度
　　中間ダイアフラムのせん断応力度

・方杖ラーメン橋：隅角部の作用応力度

・単弦ローゼ橋：アーチリブと補剛桁間の隅角部における作用応力度

2.3.2　曲線少数Ｉ桁橋：主桁フランジの曲率による２次応力度

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭによる設計
1)作用応力度の算出 ・フランジの曲率による２次応力度	・主桁フランジの曲率による２次応力度は，次の近似式[2.5,2.14]によって算出する． $\sigma_2 = \pm 0.106 \dfrac{\sigma_f}{RW_f}\left(A_f + \dfrac{A_w}{3}\right)\ell^2$ ここに， σ_f ：着目フランジの曲げ応力度 R ：主桁の曲率半径 A_f ：着目フランジの断面積 A_w ：中立軸より着目フランジまでのウェブの断面積 W_f ：着目フランジの断面係数 ℓ ：着目フランジの固定点間距離  図-2.3.1A　フランジの曲率による２次応力 ① 通常は，作用応力度を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができる．	・主桁フランジ縁部材の作用軸力から，２次応力度を考慮した曲げ応力度を直接算出する．  （ａ）前死荷重  （ｂ）後死荷重＋活荷重(max,min) 図-2.3.1B　主桁フランジの水平曲げモーメント図の例 ①-1 作用応力度を算出できる縁要素の作用断面力を解析から直接得ることができる． ①-2 せん断遅れ等の解析結果について，応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	・主桁フランジ要素の応力度には，曲率による２次応力度を考慮した曲げ応力度を直接算出する． ①-1 作用応力度を解析から直接得ることができる． ①-2 せん断遅れ等の解析結果について，応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある． ③ 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．

設計行為 項目	設　計　手　法 従来設計（格子解析）とせん断パネル解析
（比較検討） 曲率による２次応力	格子解析結果を用いてフランジの曲率によって生じる２次応力を算出した結果と，せん断パネルモデルによってフランジの水平曲げモーメントから直接付加応力を算出した結果を荷重段階ごとに比較して下図に示す．着目点は，G1 桁の曲率半径内側のフランジ縁である． 1）合成後の上フランジは，床版で固定されるので２次応力は生じない． 2）近似式による結果とせん断パネル解析結果とは，２次応力度の分布形状に整合が見られる． 3）近似式で算出した値の方が大きい．近似式の係数を本来の無限連続桁の係数に置換えた結果を合成前死荷重のみ参考に示すと，赤丸のようになりせん断パネル解析結果と良く一致する[2.14]． 4）本計算例では，２次応力の値は合成前の上フランジで±20N/mm² 程度，下フランジで±10N/mm² 以下，合成後の下フランジでは±10N/mm² 程度を示した． （計算例:３径間連続合成少数Ｉ桁橋，支間長 34.4m+49.0m+34.4m，総幅員 11.32m，平面線形 R=700m，斜角 90 度）

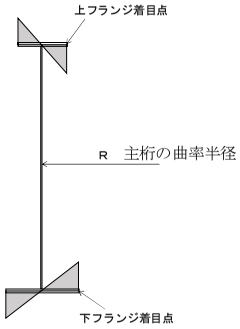
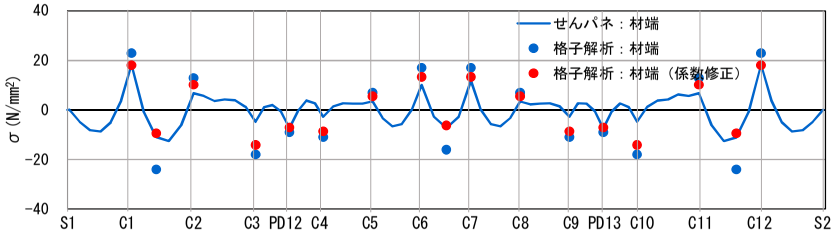
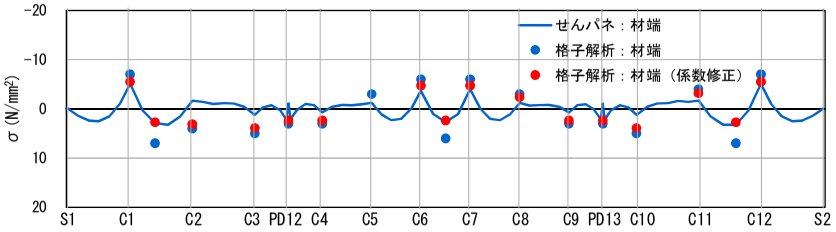


図-2.3.2　２次応力度の分布形状と着目点



（上フランジ）



（下フランジ）

図-2.3.3　合成前死荷重 D1 による G1 桁フランジの曲率２次応力度分布図の例

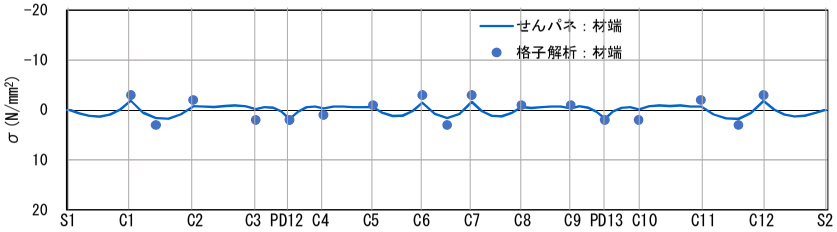


図-2.3.4　合成後死荷重 D2 による G1 下フランジの曲率２次応力度分布図の例

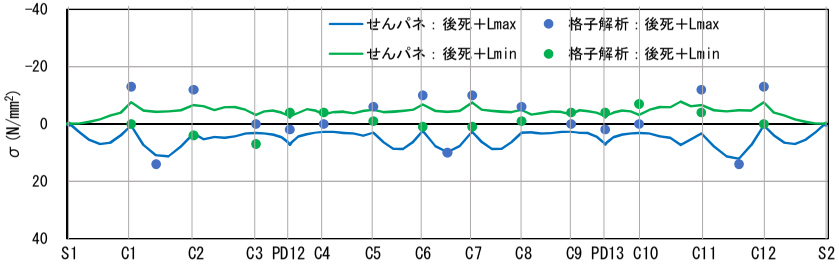


図-2.3.5　合成後死活荷重（D2+L）による G1 下フランジの曲率２次応力度分布図の例

設計行為 項目	設　計　手　法 従来設計（格子解析）とせん断パネル解析
（比較検討） 主桁応力度	合成前後の主桁フランジ応力度を，せん断パネル解析結果と格子解析結果とで比較して下図に示す．なお，解析法の比較を行うのが目的であることから，合成後の中間支点部で床版に引張応力が発生する点については，これを考慮せずに床版コンクリートを有効とした合成桁として応力計算を行っている．これらの結果より，次のことがいえる． 1）両解析結果の主桁フランジ応力度はよく一致している． 2）ランジの曲率による 2 次応力度は一次応力度に対して比較的小さく，近似算出式による 2 次応力度が実際よりも大きめの値を与えている影響は少ないと考えられる． 3）せん断パネル解析から，フランジの曲率による 2 次応力度も正確に算出することができると考えられる．

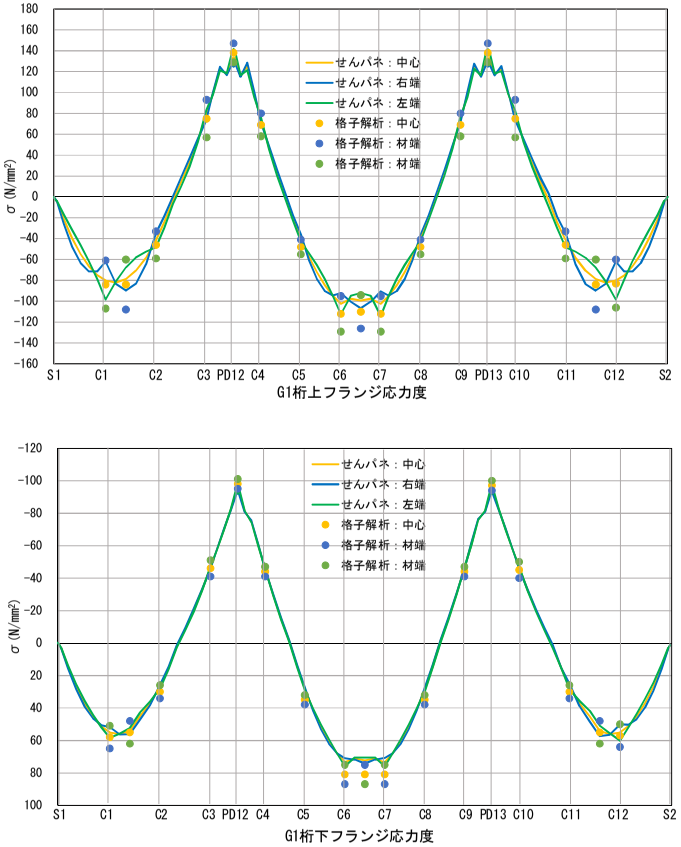


図-2.3.6　合成前死荷重 D1 による主桁フランジの応力度分布図の例

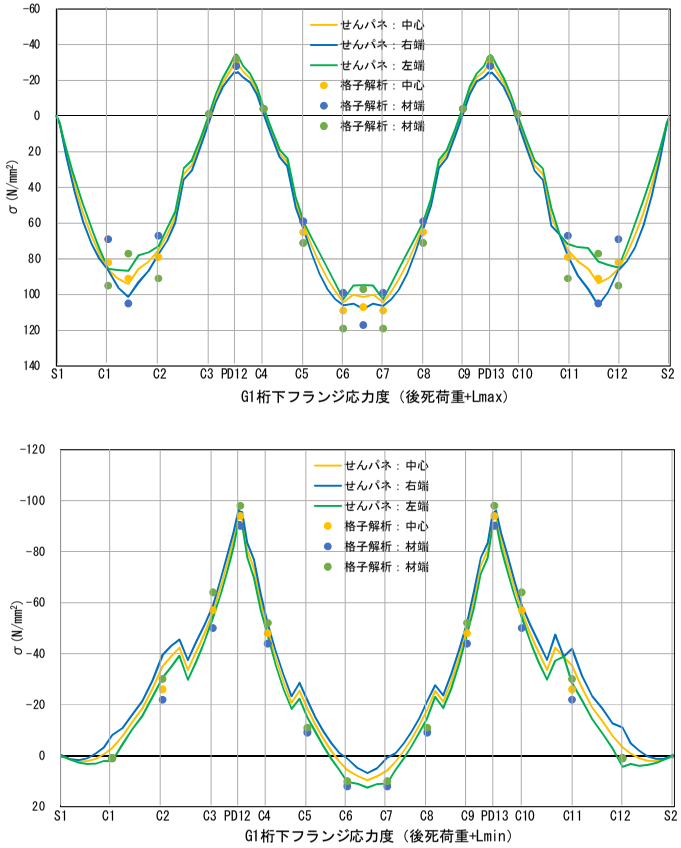
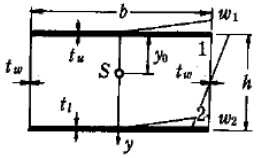
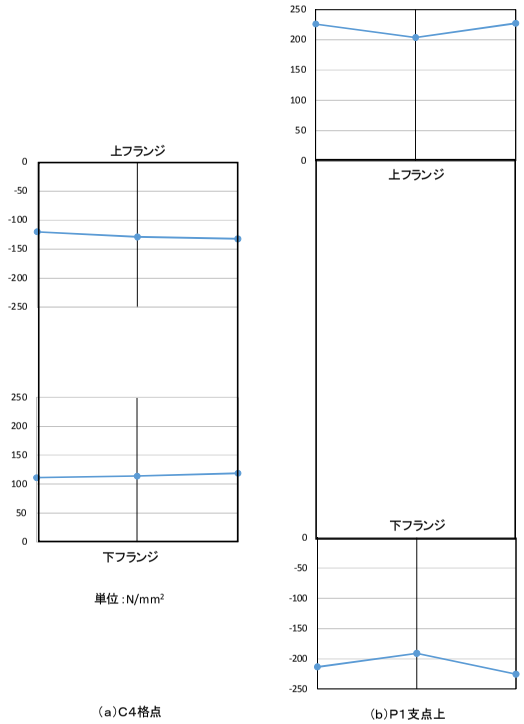
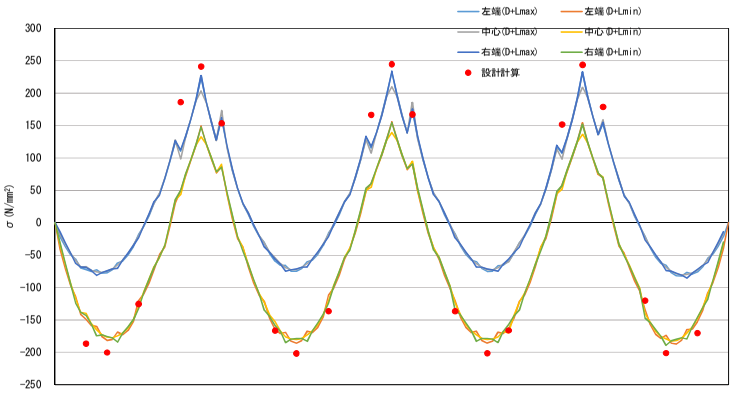


図-2.3.7　合成後死活荷重(D2+L)による主桁フランジの応力度分布図の例

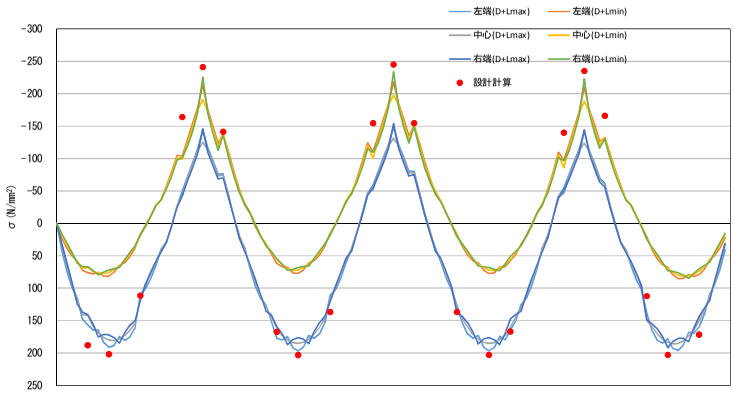
2.3.3　曲線細幅箱桁橋：主桁フランジの曲率と断面変形による２次応力度

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	FEM による設計
1)作用応力度の算出 ・フランジの曲率と断面変形による２次応力度	・主桁フランジの曲率による２次応力度は，曲げねじり理論から一般的に，次式を用いてそり応力度として算出する． $\sigma_w = \frac{M_w}{C_w}\omega$　　ここで，σ_w：そり応力度 M_w:そりねじりモーメント C_w:そりねじり定数 ω：そり関数  $w_1 = -\Delta w \cdot \frac{\beta_l+3}{\beta_u+\beta_l+6}$　$\beta_u = \frac{bt_u}{ht_w}$　$C_w = \frac{ht_w}{3}[w_1^2(2+\beta_u) + 2w_1w_2 + w_2^2(2+\beta_l)]$ $w_2 = \Delta w \cdot \frac{\beta_u+3}{\beta_u+\beta_l+6}$　$\beta_l = \frac{bt_l}{ht_w}$ $\Delta w = \frac{bh}{2} - \Psi\frac{h}{t_w}$　$\epsilon = 2\frac{t_ut_l}{t_w^2}$ せん断中心の位置 $\Psi = bt_w \cdot \frac{\epsilon}{\beta_u+\beta_l+\epsilon}$　$y_0 = \frac{2w_1}{b} + \frac{\Psi}{t_u}$ 図-2.3.8A　箱断面のそり関数とそりねじり定数[2.15]	・主桁フランジ縁部材の作用軸力から，２次応力度を考慮した曲げ応力度を直接算出する．  図-2.3.8B　主桁フランジの応力度分布の例 ①-1 作用応力度を算出できる縁要素の作用断面力を解析から直接得ることができる． ①-2 せん断遅れ等の解析結果について，応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	・主桁フランジ要素の応力度には，曲率による２次応力度を考慮した曲げ応力度を直接算出する． ①-1 作用応力度を解析から直接得ることができる． ①-2 せん断遅れ等の解析結果について，応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある． ③ 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．

設計行為 項目	設　計　手　法 従来設計（格子解析）とせん断パネル解析
（比較検討） 主桁応力度	常時荷重（D+L)に対する主桁フランジの作用応力度について，せん断パネル解析結果と格子解析結果を比較して下図に示す．せん断パネル解析については，床版剛性を考慮したものと存在を無視したものを対比した．これらの結果より，次のことがいえる． 1）両解析結果は多少のばらつきがあるものの，比較的整合しているとみなすことができる． 2）せん断パネル解析において，床版剛性を考慮したものと存在を無視したものとでは，ほとんど差がない結果となった． 3）フランジの２次応力度を把握するためにせん断パネル解析では，フランジ中心位置（1 次応力度）と材端位置（1 次応力度と 2 次応力度の和）での応力度を示した．その結果，1 次応力度に対して 2 次応力度の値は比較的小さい． 4）中間支点上では，せん断パネル解析のフランジ中心位置での作用応力度が材端位置よりも小さい．これは，フランジのせん断遅れの影響と考えられる．

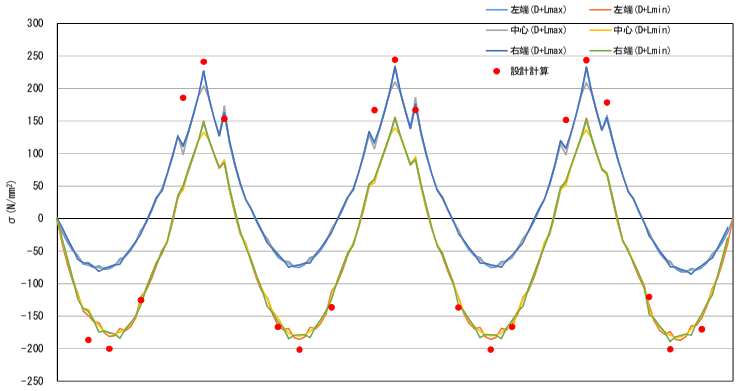


G1桁：上フランジ

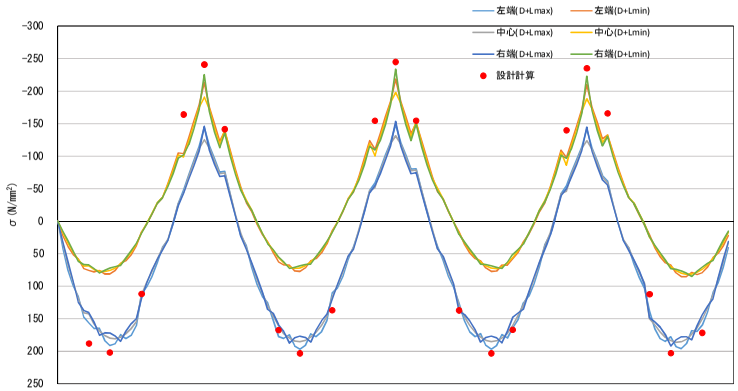


G1桁：下フランジ

図-2.3.9　床版剛性を考慮した G1 桁フランジの応力分布図の例



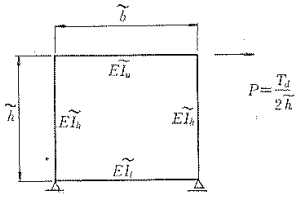
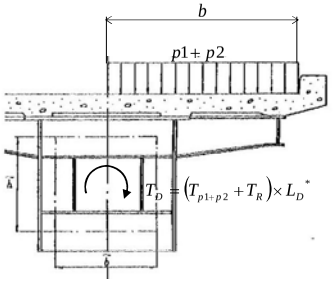
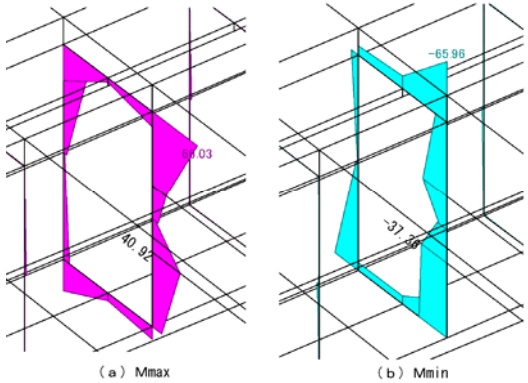
G1桁：上フランジ



G1桁：下フランジ

図-2.3.10　床版を無視した G1 桁フランジの応力分布図の例

2.3.4　曲線細幅箱桁橋：中間ダイアフラムのせん断応力度

設計行為項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭによる設計
1）せん断応力度の算出	・中間ダイアフラムの作用せん断応力度について，充腹板方式の場合は，ダイアフラムに作用するねじりモーメントT_Dから次式により算出する[2.5]． $\tau = \dfrac{T_d}{2A \cdot t_D} \leq \tau_a$ ・ラーメン方式の場合は，下図の計算モデルから算出する[2.5]．  T_d：ダイヤフラムに作用するずりモーメント（$=T_c+T_u \cdot L_D$…(3.18)） T_c：線荷重によるトルク T_u：分布荷重による単位長さ当りのトルク L_D：ダイヤフラムの間隔 $\tilde{h}$，$\tilde{I}_u$，$\tilde{I}_l$，$\tilde{I}_h$：式(3.13)参照 図-2.3.11A　ラーメン方式ダイアフラムの計算モデル[2.5] ② ダイアフラムを設計する場合，支点位置の高さ方向にモデル化しなければならない．通常は，平面格子モデルでは高さ方向のモデル化を行わず，別途計算モデルを作成する． ・ダイアフラムに作用するずりモーメントは，下図のように主桁に最大のトルクを発生させるように活荷重を載荷した状態に対して次式で算出する．曲線橋の場合は，着目点での死荷重及び活荷重による主桁曲げモーメントの曲率半径によるずりモーメントを加算する． $T_D = (T_{p1+p2} + T_R) \times L_D^*$ ここに，$T_{p1+p2} = (p1+p2) \times b^2/2$　　$T_R = M_{D+L}/R$ L_D^*：ダイアフラムの実間隔（m）　$p1, p2$：L荷重の等分布荷重（kN/m²） b：L荷重の載荷幅（m）　　R：着目点での主桁曲率半径（m） M_{D+L}：着目点での死・活荷重による主桁曲げモーメント（kN･m）  図-2.3.12A　ずりモーメント算出荷重とラーメン方式の設計モデルの例[2.5]	・充腹板方式の場合は，ダイアフラムに作用するせん断流から直接せん断応力度を算出して照査する． $\tau = \dfrac{SH}{t_D} \leq \tau_a$ ここに，τ：作用せん断応力 SH：ダイアフラムに作用するせん断流 t_D：ダイアフラムの板厚 τ_a：許容せん断応力度 ・ラーメン方式の場合は，矩形ラーメンの骨組をせん断パネルモデルに組み込んで解析して断面力を直接求める．これより，ラーメン部材の応力度を照査する．  （a）Mmax　（b）Mmin 図-2.3.11B ラーメン方式ダイアフラムの曲げモーメント図の例 ①-1 解析モデルで仮定したダイアフラム配置と剛性（板厚）に対して，ダイアフラムに作用するせん断流と，主桁のそり応力が含まれた形で主桁部材断面力が得られる． ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁内のダイアフラムをモデル化できる． ①-3 ダイアフラムの要素から，ダイアフラム単独のせん断力を直接求めることができる． ①-4 せん断遅れ等の解析結果について，応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	・ダイアフラムの要素の作用せん断応力度を直接算出する． ①-1 解析モデルで仮定したダイアフラム配置と剛性（板厚）に対して，ダイアフラムに作用するせん断流と，主桁のそり応力が含まれた形で主桁部材断面力が得られる． ①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため，主桁内のダイアフラムをモデル化できる． ①-3 ダイアフラムの要素から，ダイアフラム単独のせん断力を直接求めることができる． ①-4 せん断遅れ等の解析結果について，応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある． ③ 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．

2.3.5　方杖ラーメン橋：隅角部の作用応力度

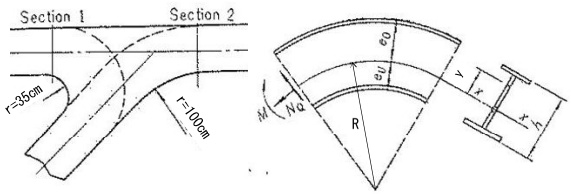
<table>
<tr><th>設計行為
項目</th><th colspan="3">設　計　手　法</th></tr>
<tr><th></th><th>従来設計（立体骨組解析）</th><th>せん断パネル解析による設計</th><th>FEM による設計</th></tr>
<tr>
<td>1) 隅角部の作用応力度の算出</td>
<td>1) フランジを湾曲させた隅角部の断面設計方法として，Bleich の近似式 2.16,2.17)を適用する．
2) 隅角部を下図のような湾曲した 2 つの部材に仮定し，それぞれ個別に応力計算を行う．
 

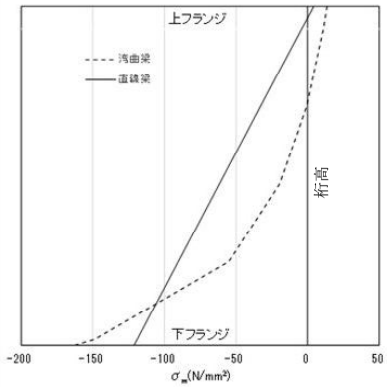
図-2.3.13A　Bleich の近似式に対する仮定 2.16,2.17)
上図の断面に M,N,Q なる外力が作用した時の中立軸より y なる距離における軸方向応力度は次式で算出される．
$\sigma_m = \frac{N}{A} - \frac{M}{RA} - \frac{My}{z} \cdot \frac{y}{R+y}$
ここに，　$z = R^2 \sum RB \log \frac{R+y_1}{R+y_2} - f = R^3 \sum B \log \frac{w_1}{w_2} - AR^2$
A：断面積，R：部材重心軸の曲率半径，B：フランジ幅
 

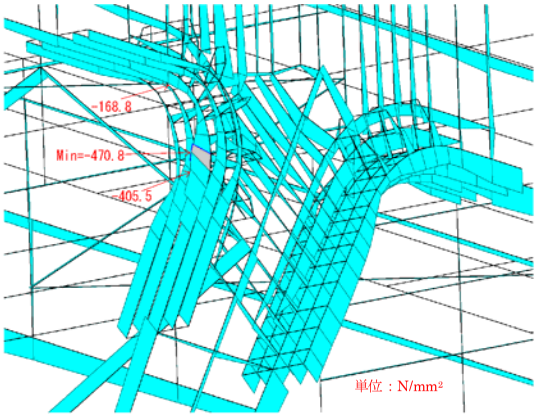
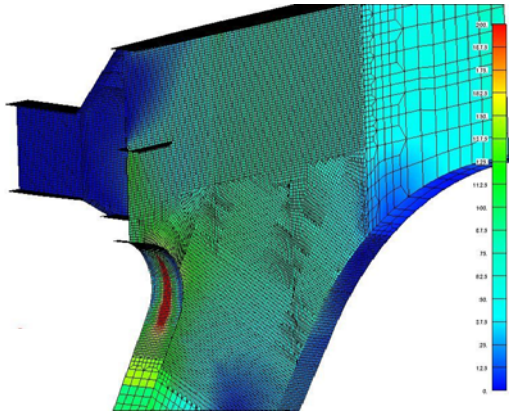
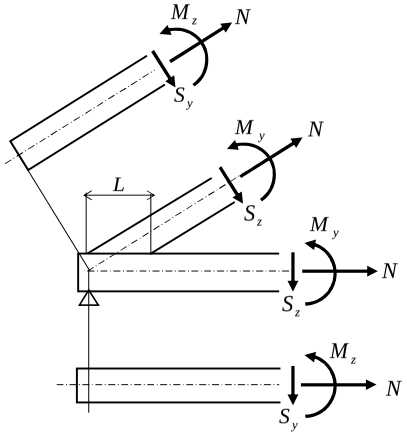
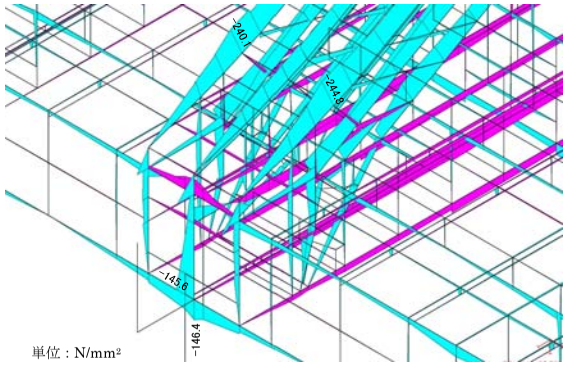
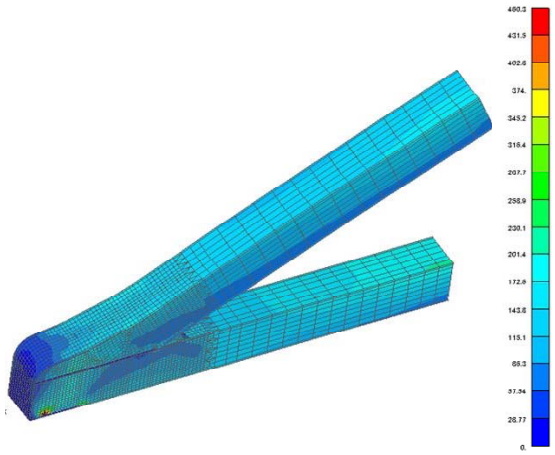
図-2.3.14A　湾曲部材の応力分布の例</td>
<td>1) 垂直応力度は縁部材の軸力から直接算出する．
2) せん断応力度は，せん断パネルのせん断流から直接算出する．
$\sigma_i = \frac{N_i}{A_i}$　　ここで，N_i：縁部材の軸力
A_i：縁部材の断面積
$\tau_i = \frac{SH_i}{t_i}$　　SH_i：せん断パネルのせん断流
t_i：せん断パネルの板厚
 

図-2.3.13B　隅角部の作用応力度の例
①-1 作用応力度を算出できる縁要素の作用断面力を解析から得ることができる．
①-2 せん断遅れ等の解析結果について，応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．</td>
<td>1) 各要素の作用応力度を直接算出する．
 
図-2.3.13C　隅角部の FEM 解析によるコンター図の例
①-1 作用応力度を解析から直接得ることができる．
①-2 せん断遅れ等の解析結果について，応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．
③ 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．</td>
</tr>
</table>

2.3.6　単弦ローゼ橋：アーチリブと補剛桁間の隅角部における作用応力度

設計行為 項目	設　計　手　法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	ＦＥＭによる設計
1）隅角部の作用応力度の算出 注）道示では，単弦ローゼ橋における隅角部について，照査式が規定されていない．ここでは，実績を参考に，計算例を示す．	1）端部の断面決定に当たっては，アーチリブと主桁のフランジが連続していないことから力の伝達はウェブプレートによって分担されると仮定して，アーチリブと主桁各々の断面力に対して応力度を算出して照査する． 応力度の算出式は次の通りである． $\sigma = \frac{N}{2h_w t_w} \pm \frac{3M_y}{h_w{}^2 t_w} \pm \frac{M_z}{h_w b t_w}$ $\tau = \frac{S_z}{2h_w t_w}$ ここに，h_w：ウェブ高，t_w：ウェブ厚，b：ウェブ間隔 2）アーチリブと主桁との接合面に生じるせん断応力度も照査する． $\tau_H = \frac{N_G}{2Lt_w}$ ここに，N_G：主桁の最大軸力，L：アーチリブと主桁の接合長  図-2.3.15A　アーチリブ端部の断面力	1）垂直応力度は縁部材の軸力から直接算出する． 2）せん断応力度は，せん断パネルのせん断流から直接算出する． $\sigma_i = \frac{N_i}{A_i}$　　ここで，N_i：縁部材の軸力 A_i：縁部材の断面積 $\tau_i = \frac{SH_i}{t_i}$　　SH_i：せん断パネルのせん断流 t_i：せん断パネルの板厚  図-2.3.15B　端部縁部材の応力図の例 ①-1 作用応力を算出できる縁要素の作用断面力を解析から得ることができる． ①-2 せん断遅れ等の解析結果について，応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある．	1）各要素の作用応力度を直接算出する．  図-2.3.15C　隅角部の FEM 解析によるコンター図の例 ①-1 作用応力度を解析から直接得ることができる． ①-2 せん断遅れ等の解析結果について，応力の精度を確保するため，せん断遅れの程度や構造特性に対して，解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある． ③ 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合，初期不整（初期たわみ，残留応力），幾何学的非線形，材料的非線形を考慮する必要がある．特に，初期不整については，各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない．

2.4　考察

本章では従来の格子解析を主体とした橋梁設計の各手続きに関する課題，あるいは精度向上や一連の設計行為全体の合理化の観点からの検討余地を整理し，一方で，一定せん断流パネル解析，あるいはFEM解析をそれぞれ主体とした設計手法における橋梁設計の各手続きを，従来の設計手法と同様の視点で比較できるように整理して相互の特徴や異同の比較を行った．その結果，以下のことが明らかとなった．

■格子解析を用いた従来設計について

・ 第1章でも記述したとおり，格子解析でモデル化した主桁や横桁など解析結果から直接断面力を得られる部材は，公称応力として算出した作用応力が必ずしも実際の橋の状態を正確に再現するわけではないものの，同じ公称応力として許容応力度と対比することで，部材ごとには人為的要素に左右されにくく安定的に一定の安全率を確保した設計が行いやすい．

・ 主桁や横桁をモデル化するはり要素は，解析モデル上は部材軸方向の1次元しか有せず，各部材を組み合わせた格子解析も平面的な2次元しか有しないため,以下の課題があることがわかった．

　●高さ方向に形成される中間対傾構や主桁の重心と異なる高さに設置される床版，あるいは横構を直接モデル化できない．床版と主桁を接合するずれ止めも同様に直接モデル化できない．少数主桁橋の格点部におけるU形フレームも同様である．

　●格子解析において棒要素1本でモデル化された箱桁の内部に設置されるダイアフラムについて，作用するせん断力を直接算出して設計することができない．

　●棒要素1本でモデル化された主桁の支点部は，主桁の重心位置で支持されるため，端横桁の挙動を正確に解析できない．

　●一般に，棒要素で考慮できる断面力は6成分であり，I桁橋の横ねじれ座屈を解析するために必要なそりねじりを考慮した解析はできない．

つまり，主桁や横桁など，従来設計において格子解析で棒要素を用いてモデル化する部材以外の部材を直接モデル化することができない．そのため，格子解析で直接モデル化できない対傾構や横構は別途簡易な力学モデルを用いて作用断面力を算出する，あるいは全体横ねじれ座屈の照査のように別途項目ごとに照査の作業が必要となる．このことは，技術者のちがいによって設計成果の大きな差異につながり最終的に得られる橋の性能が安定的に保証されないリスクとなる．鋼製橋脚の隅角部における奥村・石沢の方法[2.2)]のように別途簡易式を適用するとしても，その適用が制限される適用範囲が存在することから，設計の合理化・高度化等に資する新たな知見の導入促進には課題となる．なお，格子解析と異なる簡易な力学モデル，あるいは簡易式を用いる場合も，格子解析による部材の設計と同様に，算出する作用応力は必ずしも実際の橋の状態を正確に再現していない場合があるものの，同じ公称応力として許容応力度と対比することで，一定の安全率を確保することが前提である．

■格子解析を用いた従来設計の課題に対して一定せん断流パネル解析あるいはFEM解析を主体として設計に導入することについて

・ 格子解析を用いた従来設計では，別途簡易な力学モデル，あるいは簡易式を用いる必要があった設計項目について，一定せん断流パネル解析あるいはFEM解析では全橋モデルで直接各部材の作用断面力，あるいは作用応力度を算出し，設計することができる．これは，全橋モデルが立体的

で高さ方向にも要素を配置できるからである．そのため，各部材あるいは部位における実際の橋の状態を従来設計と同等以上の精度で再現できることから，以下の設計が全橋モデルを用いて可能となった．

●中間対傾構や横構などの横力に抵抗する２次部材

●主桁間の荷重分配作用，あるいは横力に抵抗する場合の床版の設計

●橋軸方向のせん断力のほかに，床版が横力に抵抗する場合の橋軸直角方向のせん断力，あるいは曲げ引き抜き力に抵抗するずれ止め

●少数主桁橋の格点部におけるU形フレーム

●箱桁の内部に設置されるダイアフラム

●I桁橋のそりねじりを考慮した横ねじれ座屈

・ 合成桁において，床版と鋼桁を分離してモデル化できることから，床版コンクリートのクリープ，乾燥収縮，床版と鋼桁の温度差などの荷重を，従来設計のように合成断面をモデル化した１本はりに作用する曲げモーメントや軸力などの力学的な作用に置換することなく，実際の橋の場合と同じ床版に載荷することが可能となった．

・ また，床版などの各部材，あるいは部材を構成する鋼板を部材軸直角方向に複数の要素を用いてモデル化できることから、せん断遅れを直接解析することが可能である．これにより，一般的な桁橋におけるフランジも，立体ラーメンにおける橋脚横はりと鋼床版とが一体となった剛結部，あるいは橋脚隅角部のようなせん断遅れが大きい部位もせん断遅れによる実際の応力分布を直接算出可能となり，有効幅という設計上の架空の概念を用いることが不要となった．

・ 道示に具体的な数値で許容値が示されていない設計項目については，実際の橋の状態をより高精度に再現することが可能になったとしても，対比する許容値，および許容値と対比するために作用応力を公称応力として整理するなどの設計計算手法の確立が必要となる．これらが確立していない場合は，解析結果を個別に判断する必要がある．

・ なお，本検討では格子解析を用いた従来設計における各設計手続きを基本として横並び比較したために，一定せん断流パネル解析あるいはFEM解析によって新たに可能となる設計項目は示されていない．しかし，上記のように全橋モデルが立体的となり２次部材を板組形状まで直接モデル化し，実際の橋の状態をより高精度に定量的に再現することで，今までは必ずしも定量的ではなく設計者の経験や試行錯誤によって決定されていた以下のような設計項目を，設計者の技量によらず定量的に設計できる可能性が考えられる．

●アーチリブと支材の格点部など複雑な応力が作用するものの橋脚隅角部のように複雑な作用応力を算出する簡易式が確立されていない部位の耐荷力設計あるいは疲労設計（**図-2.4.1**参照）

●アーチ橋の垂直材と補剛桁の格点部など疲労等級が明確な継手構造であるものの疲労設計用の公称応力の算出が格子解析では困難だった部位の疲労設計　（**図-2.4.2**参照）

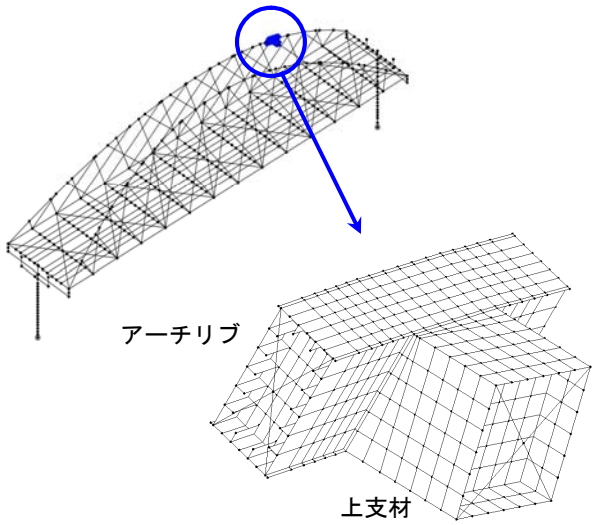


図-2.4.1 アーチリブと上支材の格点部

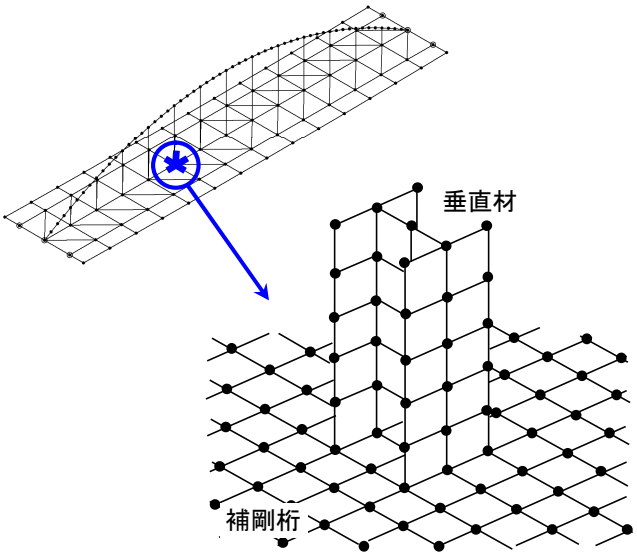


図-2.4.2 アーチ橋の垂直材と補剛桁の格点部

■一定せん断流パネル解析あるいは FEM 解析を用いて鋼道路橋の設計を行う実現可能性について

- 従来の格子解析結果を用いて直接設計できる主桁や横桁などの各部材単独の設計について，一定せん断流パネル解析では従来の格子解析と同様に公称応力としての作用応力を算出できることから，道示に規定された許容応力度との対比により設計が可能である．
- 主桁や横桁などの部材単独の設計については，一定せん断流パネル解析を用いる場合，道示による安全率を確保した設計が可能である．一方で，要素分割の要領によって解析結果にある程度のばらつきが生じる．そこで，道示で求められる設計の品質を確保するためには，求められる解析精度を確実に確保するための解析モデル作成の要領を各橋梁形式の部材ごとに確立する必要がある．このような解析モデルの作成については，一定せん断流パネル解析では算出される断面力から得られる作用応力は，第 1 章で定義した FEM 解析における Von-Mises 等価応力や主応力と異なり，従来の格子解析と同じ 1 方向の直応力あるいはせん断応力であることから，FEM 解析より一定せん断流パネル解析の方が要領として確立しやすいといえる．なお，解析モデル作成の要領が確立されていない中で一定せん断流パネル解析を行う場合は，例えば，主桁や横桁などの部材の設計においては従来の格子解析と同程度の精度が確保されることを確認の上，解析を行うなどの対応が考えられる．
- 活荷重の影響線載荷について，一定せん断流パネル解析では格子解析と同様に行うことができるが，FEM 解析では第 1 章で記述したとおり，一般化されていない．これも理論上は可能であるものの，上記の道示に規定された許容応力度と対比できる作用応力度の平均化と同様に，具体的な作業要領の確立は今後の課題である．
- FEM 解析では，第 1 章でも記述したとおり部材単独の設計における許容応力度が道示に規定されていないことから，より実際の橋の状態に近い局部応力や局部変形を算出できるものの，従来の設計と同等の安全率を確保した設計手法が確立していないことが大きな課題である．逆に，FEM 解析から得られた局部応力や局部変形から公称応力を求める処理を行って，道示に規定された許容応力度と比較する方法も考えられる．明確な制約や不可能となる根拠はなく理論上は可能であり，FEM 解析による高精度な解析結果を直接設計に用いることができれば，これまでよりも高度で合理的な設計が可能になることは明らかである．しかし，FEM 解析結果を実務設計においてど

のように用いて，道示に規定された安全率をどのように確保するか，あるいは確保されていることを定量的かつ統一的な尺度で示し得るのかといった研究は少なく，設計項目ごとの作業要領の確立が課題として残されている．

【2 章参考文献】

2.1) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.3

2.2) 奥村敏恵，石沢成夫 : 薄板構造ラーメン隅角部の応力計算について，土木学会論文集 第 153 号，pp.1-18，1968.5

2.3）村越潤，高橋実，吉岡勉，野中哲也，加藤修：FEM 解析を用いた鋼多主桁橋の設計合理化の検討，鋼構造論文集 Vol.11 No.43，pp.131-145，2004.9

2.4) 玉越隆史，中洲啓太，石尾真理，木内耕治：道路橋の鋼製橋脚隅角部の疲労設計法に関する研究ー一定せん断流パネルを用いた解析法の検討ー，国土技術政策総合研究所資料，第 296 号，2006.1

2.5) （社）日本道路協会：鋼道路橋設計便覧，1980.8

2.6) 建設省土木研究所：プレートガーダー側道橋の全体横倒れ座屈に関する検討（その１），土木研究所資料 第 1795 号，1982.2

2.7) （社）土木学会 鋼構造委員会：鋼構造架設設計施工指針[2012 年版]，2012.5

2.8) （社）日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3

2.9) （社）日本道路協会：鋼橋の疲労，1997.5

2.10) 坂井藤一，長井正嗣：鋼箱桁橋の中間ダイアフラム設計法に関する一試案，土木学会論文報告集 第 261 号，pp.21-34，1977.5

2.11) 首都高速道路株式会社：橋梁構造物設計施工要領，2008.7

2.12) 阪神高速道路株式会社：設計基準 第 2 部 構造物設計基準（橋梁編），2011.11

2.13) 美島雄士，小野潔，田川陽一，西村宣男：鋼製ラーメン橋脚隅角部におけるフィレット構造の限界状態と性能照査法に関する研究，土木学会論文集 A1，Vol.69 No.2，pp.206-221，2013.5

2.14) 小松定夫：曲線並列桁橋の実用計算式，土木学会論文集 第 93 号，pp.1-9，1963.5

2.15) （社）日本橋梁建設協会：’11 デザインデータブック，p.293，2011.4

2.16) Bleich,F.（池部宗薫他訳）：鉄骨構造，第 1 巻，p.691，1936.9，コロナ社

2.17) 宮本潔，上野建昭，小林啓明 : 中央道日吉川橋（鋼方杖ラーメン橋）の設計，橋梁と基礎 1972-5，pp.18-21，1972.5