

## 第1章 はじめに

### 1.1 鋼道路橋の設計における解析手法の現状と課題

鋼材は、コンクリートに対して単位体積重量が相対的に大きいものの、構造体を形成する場合には部材の最小厚さを薄くできることから、構造全体としては軽量にすることができやすい。その軽量化の長所を発揮して鋼構造は、一般に薄肉集成部材による骨組構造として形成されることが多い<sup>1.1.1.2)</sup>。

鋼道路橋も主桁、横桁、対傾構、および横構などの細長い部材から構成されている。電算技術が発達する以前より、骨組構造である鋼道路橋の各部材に作用する断面力や変位を算出するために、初等はり理論を基にした格子理論、トラス理論、アーチ理論などの各骨組構造の特徴を踏まえた構造解析理論がそれぞれ用いられてきた。その後、電算技術の発達により、変位法に基づき定式化したマトリックス構造解析を用いることが一般的に行われるようになってきている<sup>1.1~1.3)</sup>。

薄肉集成部材では、圧縮力や曲げモーメントに対して座屈耐荷力の確保が設計・施工上、重要となってくる。座屈耐荷力に対する研究は弾性分岐座屈理論が基になっているが、薄肉集成部材に対する適用については精度に関する課題がある。特に、補剛板の局部座屈および全体座屈への初期不整（初期たわみ、溶接による残留応力）、または荷重の偏心の影響を考慮する必要があるものの、この初期不整は統計量としてのばらつきを有しており、構造ごとに精度よく考慮することは困難である。これらを踏まえて、道路橋の基準である道路橋示方書には、初期不整のほか、荷重の偏心、部材断面内における降伏点のばらつき等の影響を考慮した基準耐荷力曲線が示され、これとの対照により照査が行われている<sup>1.1.1.2)</sup>。

また、道路橋示方書では、材料の機械的性質のばらつきや、道路橋に作用する荷重のばらつき等を踏まえた安全率を考慮して、許容値を設定している。許容値の基である基準耐荷力曲線は、主に実験結果から求められているが、実験で網羅的に計測して統計的に処理できる項目は局所的なひずみや変位、応力、または降伏や破壊が進行している状態の断面諸元ではなく、実験供試体に作用する荷重強度、および代表箇所の変位という部材レベルの項目である。そのため、許容値は、局所的な変形や応力分布を考慮していない試験前の断面形状を用いた公称応力で整理することになる。また、材料レベルの限界状態である降伏、材片レベルの局所的な限界状態である局部座屈、格点間等の範囲の限界状態である部材の座屈、局部座屈と部材座屈の連成座屈、または橋全体の弾性座屈といった様々な損傷範囲の限界状態に対して、応力度レベルとした許容値は共通した指標として実用的である。一方、橋の状態を表す作用力については、主桁や横桁といった細長い部材を格子に組んだ構造解析（以下、「格子解析」という）を用いて算出するが、材料非線形を有しない微小変位理論による線形解析を採用するのが一般的であることから、変形前の橋の断面諸元を用いて算出する公称応力としての作用応力度は、許容応力度と精度の面で整合している<sup>1.1)</sup>。

以上のように、鋼道路橋の設計体系は、初等はり理論に基づく格子解析を前提として、部材の基準耐荷力曲線、安全率、および許容応力度等の規定を公称応力で整理して構築されてきた。その結果、許容応力度設計法は部材に関するいずれの破壊モードに対する照査も公称応力で評価でき、安全余裕を確保するための基準も公称応力と対応させた許容値により明解に規定できる設計法として確立している<sup>1.1)</sup>。

部材単位の設計は以上のように構成されているものの、耐震補強構造や腐食のような耐久性上の損傷事例では、局所変形や2次応力の影響など、必ずしも棒モデルを用いた計算では

設計計算の現状

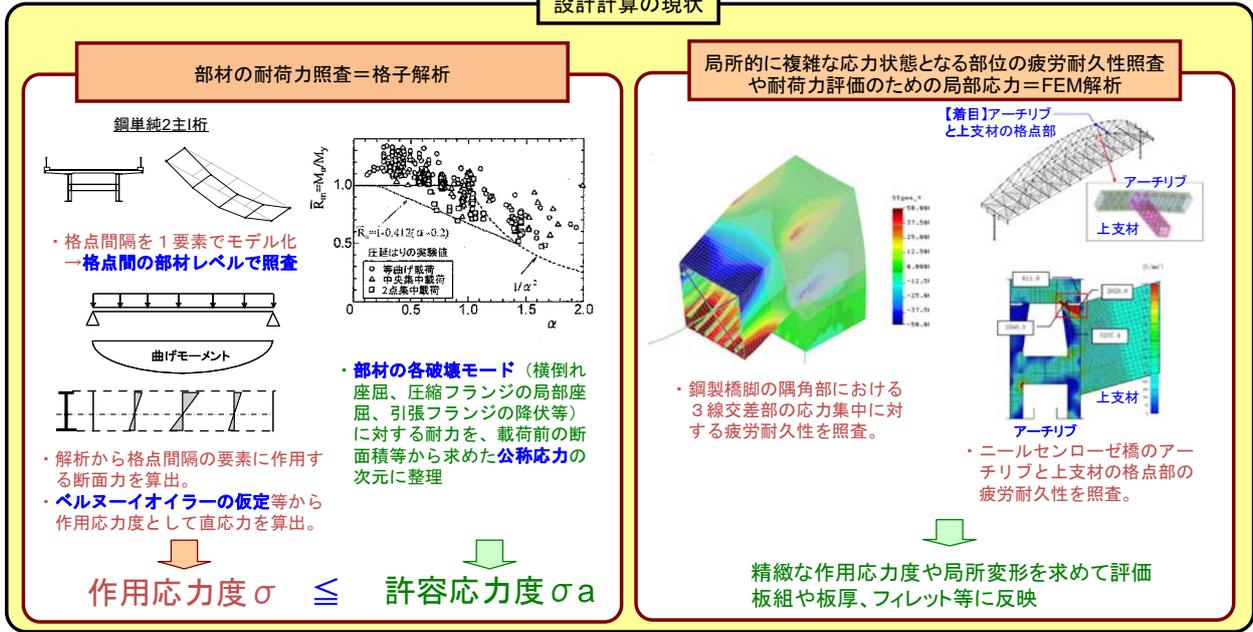


図-1.1 設計計算の現状

得られない応力性状に大きく左右されることも多い<sup>1.4,1.5)</sup>。このような局所的な応力や変形の評価が重要となる場合には、部材各部の応力状態やそれによる構造系の変化の影響の再現について棒モデルを用いた解析から行うことには限界があるため、解析的検討に当たっては連続体としての局所的な挙動が把握可能な高度な計算モデルとして FEM 解析が用いられている<sup>1.6)</sup>。FEM 解析によって得られる鋼橋の作用応力度は、実際の橋に作用する値に近いことが知られている<sup>1.7)</sup>。また、鋼製橋脚における隅角部フランジのせん断遅れの再現、または2次部材の作用応力のような局所的で複雑な作用応力や変形の算出が可能である<sup>1.8~1.10)</sup>。さらに、材料非線形および幾何学的非線形を考慮した解析によって、残留応力や初期たわみを考慮した実構造物の終局耐力と変形能を再現することも可能である。以上のように、FEM 解析は高度な解析手法の一つであり部材の変形や作用応力の状態を詳細に解析できることから、実際の損傷事例に関する原因究明のほか、研究分野における実験結果を補足するパラメトリックな検証などに用いられてきた<sup>1.11)</sup>。以上の格子解析と FEM 解析による設計計算の現状を整理すると図-1.1 のようになる。

2002 年に道路橋示方書が性能規定型の基準に改定<sup>1.1)</sup>されてから、従来の標準的な仕様のみによらない新しい橋梁形式や構造による道路橋の採用が検討される例も多くみられる。設計に用いる解析手法も、図-1.1 で示した格子解析による部材の設計以外に、FEM 解析による局所的な挙動の評価を併用することがより一般的になりつつある。FEM 解析を設計計算の主体とした鋼橋の設計手法を検討した研究には、格子解析結果と FEM 解析結果の比較<sup>1.12~1.14)</sup>、FEM 解析結果から得られた Von-Mises 等価応力と降伏応力の比較<sup>1.8)</sup>、または FEM 解析結果による作用応力から主桁の作用断面力を算出してある限界状態に対応する抵抗断面力と比較した検討等<sup>1.8)</sup>がある。しかし、FEM 解析により算出した作用応力の取り扱い方法や照査方法について考えると、たとえば Von-Mises 等価応力は、材料の3軸状態の応力を純引張りや主せん断を受ける一軸での応力状態に換算するものであり、部材単位での破壊モードと関連づけた応力ではないことから、各橋梁形式の各部材の破壊モードごとに確立された照査方法はなく、今後の課題となっている。また、設計計算ツールが整備されていないことを

原因とするモデルの断面変更に関する繰り返し作業を各要素に対して手作業で行うなどの非効率さ<sup>1.12)</sup>、FEM解析では有効幅員内に載荷される活荷重に対する影響線解析が一般化されていない<sup>1.12)</sup>などが他の課題として挙げられている。以上より、局所的な変形や作用応力の状態を考慮した個別の部材に対する特定の破壊モードの評価について、FEM解析は多くの実績を有するものの、FEM解析を主体とした設計の実績はこれまでにない。また、本州四国連絡橋公団では、鋼構造への適用例とともに、解析モデルに用いる各要素の種類や性質、要素分割の注意点、境界条件や荷重条件の設定に関する注意点、あるいは解析結果の評価に関する着目点などをガイドラインとしてまとめている<sup>1.15)</sup>。しかし、これらはFEM解析の必要性や目的を確認した後への適用であり、どの部位あるいは何の照査にFEM解析を用いた局所的な挙動の評価が必要となるかの判断

基準は示されていない。独立行政法人土木研究所では、桁橋形式の鋼道路橋の設計へのFEM解析の適用に関する検討を行っている<sup>1.16)</sup>。実橋の計測結果、あるいは格子解析結果との比較により、要素分割数や影響線載荷方法の妥当性等の、設計に関する具体的な検討を詳細に行っているものの、実橋の個別の設計において、どのようにFEM解析を行うかという一般化した要領の作成までは至っていない。

従来の格子解析に替えてFEM解析を主体とした設計を行うためには、上記の課題を解決する必要がある。繰り返し作業の非効率さは、詳細設計の前段階である概略設計の精度を上げたり、直橋で支間長が短い単純2主I桁橋のような比較的構造が単純な橋梁形式から採用するなどの対応が考えられる。活荷重の影響線解析の一般化は、レーン載荷と等分布面積載荷とを比較検討した研究<sup>1.17)</sup>もあるが、直橋で支間長が短い単純2主I桁橋のような比較的構造が単純な橋梁形式については、各部材の各限界状態に対して最も不利な荷重載荷状態を想定することが少なくとも不可能ではないと考えられる。最も重要で根本的な課題は、各橋梁形式の各部材の破壊モードごとにFEM解析結果に対する許容値が確立していないことである(図-1.2参照)。FEM解析の結果から得られる応答値は、2次応力の影響等も含まれた局所応力を含み公称応力と異なることから、現行の許容応力度や安全率と単純に比較することができない場合も多い。実際、道路橋示方書に示されている基準耐荷力曲線には初期不整のほか、荷重の偏心、部材断面内における降伏点のばらつき等の影響が考慮されていることから、与えられた荷重条件に対する各部材の状態を算出したFEM解析結果に初期不整などを

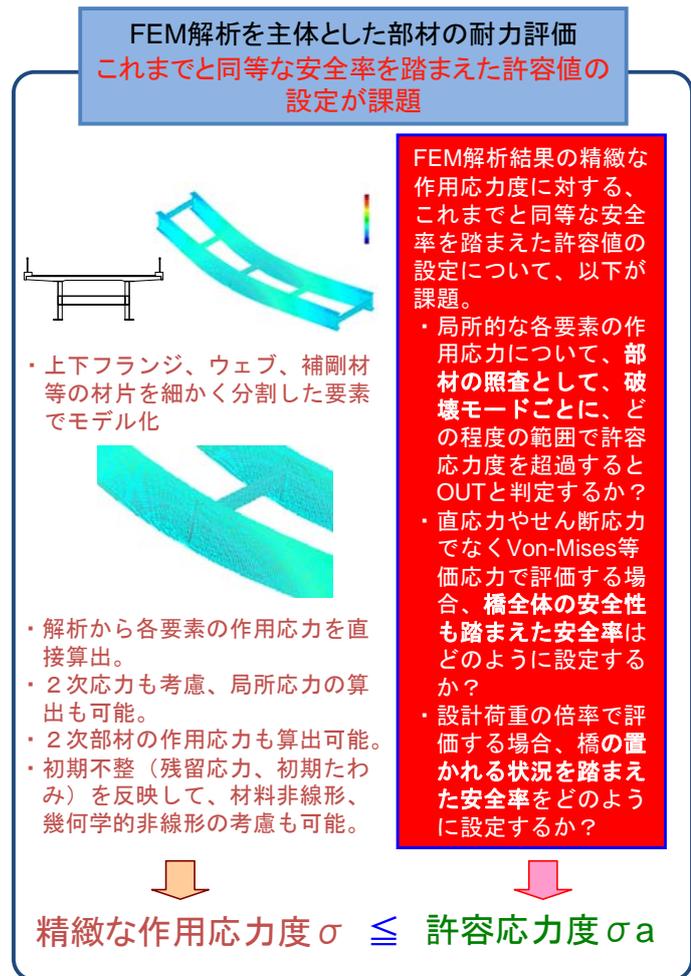


図-1.2 FEM解析を主体とした設計計算の課題

含める場合には、基準耐荷力曲線の見直しのほか、安全率を分解する必要がある。つまり、FEM 解析の結果から橋の安全性を評価できるようになるためには、照査項目、照査方法、評価基準を一体とした評価体系を確立する必要があるということである。ここで、道路橋に求められる要求性能とは、想定すべき橋の置かれる状況[作用]に対して、そうなることの確からしさ[安全率とそれが有する信頼性]を考慮した、想定される橋の状態、または機能[抵抗]のことであることから、[抵抗]側の耐荷力と[作用]側の解析結果の間に、従来の格子解析と同等の[安全率とそれが有する信頼性]を確保する必要がある。

一方、道路橋の設計の合理化・高度化について以上の課題がある中、近年、従来の格子解析と対比が容易で、格子解析では考慮できない局所的な応力状態も FEM 解析と同等に算出できる一定せん断流パネルを用いた解析（以下、「一定せん断流パネル解析」という）による橋の設計手法が用いられ、照査手法が確立されつつある<sup>1.18~1.24</sup>。

それぞれの解析手法の概要については 1.2 節で示すが、一定せん断流パネルとは、せん断応力のみで抵抗する板要素とその外周に曲げに伴う垂直応力のみを負担するはり要素から構成され、板要素とはり要素の間には図-1.3 に示すような内力分布の関係がある。

一定せん断流パネル解析には以下の特徴があることから、FEM 解析と同等な局所応力の算出が可能であり、鋼製橋脚隅角部の疲労設計に関するガイドラインがまとめられている<sup>1.18</sup>。

- ・ 部材軸力が部材間で線形に変化するため、少ない要素分割でも精度よくせん断変形を評価できる。
- ・ せん断遅れの影響を考慮した応力を直接的に算出することができる。
- ・ 縁部材の剛性に板曲げ剛性を考慮することで、板曲げ応力を直接的に算出することができる。

一定せん断流パネル解析によって算出される局所応力については、FEM 解析により得られる局所応力についても同様であるが、比較する許容値および比較手法の確立が課題である。

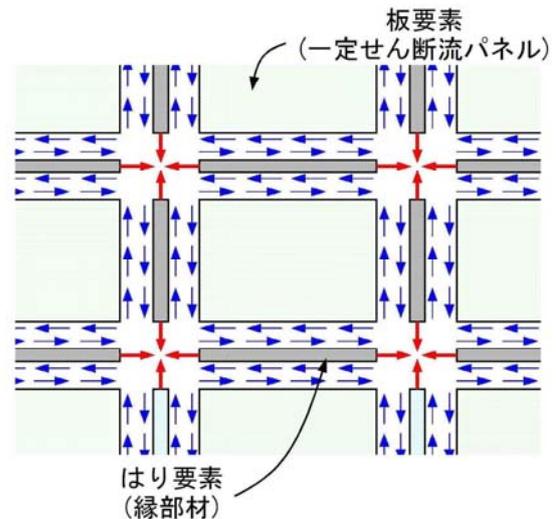


図-1.3 一定せん断流パネルの内力分布<sup>1.18</sup>

## 1.2 解析手法の概要

### 1.2.1 格子解析

格子解析は、主桁や横桁をはり要素でモデル化し、格子状に組んだ解析モデルを用いて、各はり要素に作用する断面力、およびはり要素同士を結合している節点ごとの変位を変位法によって求めるものである。横構や荷重分配に寄与しない対傾構などはモデルに含めない。一般に、主桁や横桁をモデル化するはり要素は、ベルヌーイ・オイラーの仮定が成り立つと仮定し、解析から得られた断面力から、各断面に作用する応力を算出する。

鋼道路橋における格子解析による解析モデルと解析の概要について、表-1.1 に示す。

### 1.2.2 FEM 解析

FEM 解析とは、無限の自由度を持つ連続体を、ある指定された有限個の未知量を含む部分

領域または要素の集合体を用いて近似して応力等を算出する解析手法である。任意の形状の物体を単純な形状・性質の小部分（要素）に分割し、その1つ1つの要素の特性を数式化して近似的に表現し、これらが連続となるようにすべての方程式が成立する解を算出する。その結果、要素各部の応力や各節点の変位を求め、同時に全体としての応力や変形の状態を把握するものである（図-1.4 参照）。FEM 解析では要素分割の細かさと要素にもたせる性質によって解析結果が異なり、特に局所的な応力の変化や微小な変形量を精度よく求めるためには要素分割を細密化する必要があり、それにつれて計算量が増大することとなる<sup>1.18)</sup>。

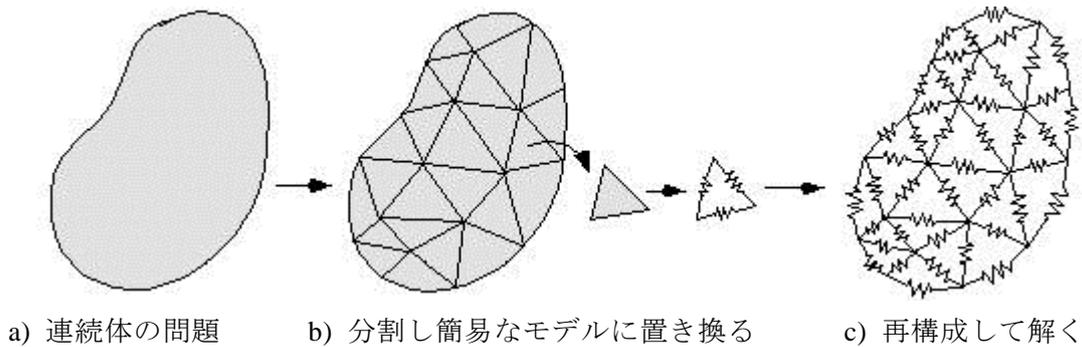
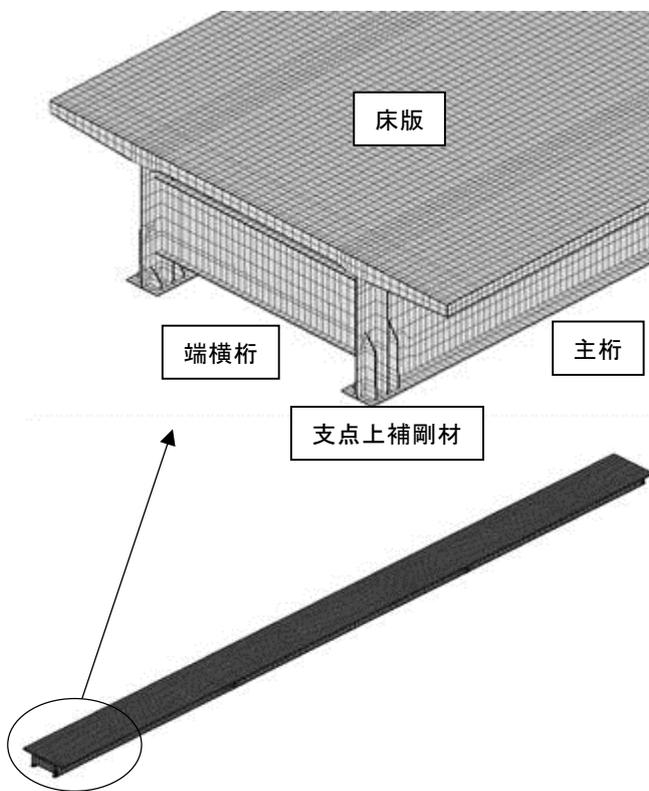


図-1.4 FEM 解析のモデル化の例<sup>1.18)</sup>

解析のアルゴリズムに着目すると、1.2.1 の格子解析も 1.2.3 の一定せん断流パネル解析も FEM 解析の一部である。本研究では、1.1 節で示した鋼道路橋の設計に関する FEM 解析の検討例を参考に、FEM 解析について以下のとおり定義する。



**解析モデルに用いる要素の種類**

鋼部材の材片をシェル要素で、コンクリート系の床版はソリッド要素で、横構のような軸力部材を棒要素でモデル化することを標準とする。

橋全体の挙動溶接ビードやスカラップなどは基本的にモデル化しない。

**荷重**

格子解析や一定せん断流パネル解析と同様に、道路橋の技術基準で規定される荷重を載荷することを基本とする。

**構成則**

材料特性は線形を基本とする。

**注記**

材料の降伏後などの耐荷力を求める必要がある場合には、残留たわみや初期たわみなどの初期不整を考慮し、かつ材料非線形及び幾何学的非線形を考慮した解析を行うこともある。

図-1.5 本研究における鋼道路橋の設計に対して主体的に実施する FEM 解析の定義（鋼単純合成 2 主 1 桁の例）

## 本研究における FEM 解析を主体とした設計の定義

鋼道路橋全体を対象として、各部材を図-1.5 に示すようにモデル化した FEM 解析による各部材の照査、または局所的な変形や応力性状の評価による設計

以下、各解析の比較や考察、および評価については、ここで定義した FEM 解析について述べる。

### 1.2.3 一定せん断流パネルを用いた解析（一定せん断流パネル解析）<sup>1.18)</sup>

一定せん断流パネル解析は、一定せん断流パネルを用いて対象部材をモデル化し、解析を行う手法である。図-1.6 に示すように、対象とする板部材を基本的には直交格子で区切られたパネルに分割し、それをせん断応力のみに対抗する板要素（一定せん断流パネル）に置き換え、その4辺にはその分担幅分の板の断面積をもつはり要素と結合させたモデル化を行う。なお、本解析手法はせん断場理論として航空の分野などの薄板のみ、または薄板と補剛材で構成される構造の解析では既に実績もある方法<sup>1.25)</sup>であり、一定せん断流パネル要素とはり要素間にせん断流という要素力を導入し、このせん断流を未知数として応力法で行われてきたものである。変位法における使用例は少なく、変位法に用いる場合は、文献 1.18) に示されている一定せん断流パネルの剛性マトリックスの誘導が参考になる。以下に文献 1.26) を参考にした計算例を示す。

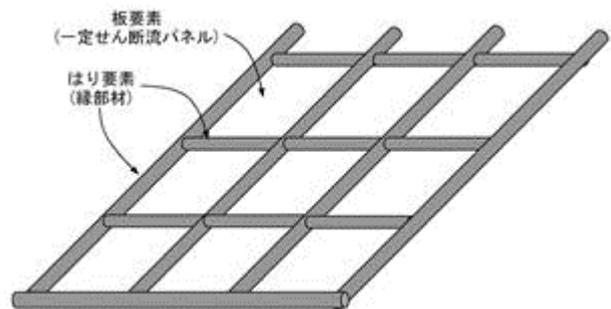


図-1.6 一定せん断流パネルのモデル<sup>1.16)</sup>

## 計算例

一定せん断流パネルの概念を示す例として、図-1.7 に示す薄板の矩形断面の片持ちはりを考える。この片持ちはりを、図-1.8 に示すように軸力のみに対抗するはり要素と、せん断のみに対抗する板要素によりモデル化を行う。

ここで、 $x=x$  の位置で片持ちはりを切断した図-1.9 に示す断面内の力のつり合いを考える。

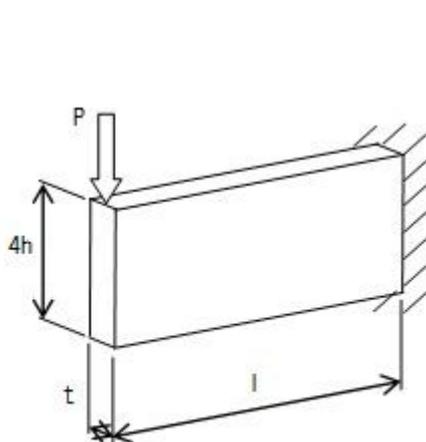


図-1.7 薄板の片持ちはり

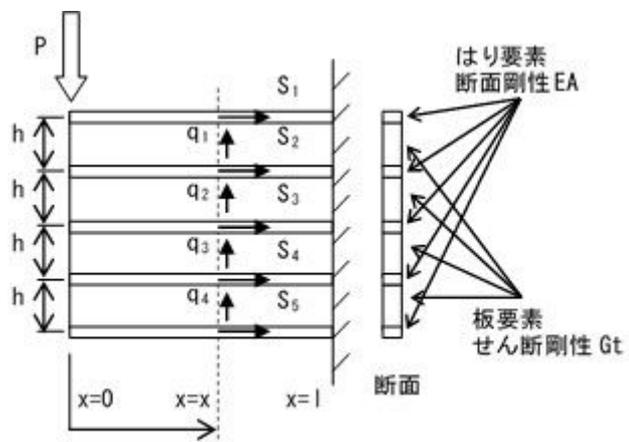


図-1.8 薄板の片持ちはりの解析モデル

上下対称であることから，

$$q_3 = q_2, \quad q_4 = q_1, \quad S_3 = 0, \quad S_4 = -S_2, \quad S_5 = -S_1$$

図-1.9 について上下方向の力のつり合いから，

$$(q_1 + q_2)h = \frac{P}{2} \quad \rightarrow \quad q_2 = \frac{P}{2h} - q_1 \quad (1.1)$$

が導かれる．以降， $q_1$  を不静定量として扱う．また，

$$\frac{dS_1}{dx} = q_1, \quad \frac{dS_2}{dx} = q_2 - q_1 \quad (1.2)$$

が導かれる．これらを積分して  $x=0$  で  $S_1 = S_2 = 0$  の条件より，

$$S_1 = q_1 x, \quad S_2 = \left( \frac{P}{2h} - 2q_1 \right) x \quad (1.3)$$

が得られる．ここで，片持ちはりの上半分についてひずみエネルギーを求める．

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2EA} \int_0^l (S_1^2 + S_2^2) dx + \frac{hl}{2Gt} (q_1^2 + q_2^2) \\ &= \frac{l^3}{6EA} \left[ q_1^2 + \left( \frac{P}{2h} - 2q_1 \right)^2 \right] + \frac{hl}{2Gt} \left[ q_1^2 + \left( \frac{P}{2h} - q_1 \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (1.4)$$

$\partial U / \partial q_1 = 0$  の条件より，

$$q_1 = \frac{2 + 3\alpha}{5 + 6\alpha} \frac{P}{2h} \quad (1.5)$$

ここで，

$$\alpha = \frac{EAh}{Gtl^2} \quad (1.6)$$

を得る．これより，

$$q_2 = \frac{3 + 3\alpha}{5 + 6\alpha} \frac{P}{2h}, \quad S_1 = \frac{2 + 3\alpha}{5 + 6\alpha} \frac{Px}{2h}, \quad S_2 = \frac{1}{5 + 6\alpha} \frac{Px}{2h} \quad (1.7)$$

が求められる．

具体の数値として以下を設定すると，

$$E=2.0 \times 10^5 (\text{N/mm}^2), \quad G=7.7 \times 10^4 (\text{N/mm}^2), \quad t=10 (\text{mm}), \quad h=50 (\text{mm}), \quad A=400 (\text{mm}^2),$$

$$l=1000 (\text{mm}), \quad P=10000 (\text{N})$$

各要素に作用する断面力は，

$$\alpha = 5.19 \times 10^{-3}, \quad q_1 = 40.1 (\text{N/mm}), \quad q_2 = 59.9 (\text{N/mm}), \quad S_1 = 40.1x (\text{N}), \quad S_2 = 19.9x (\text{N})$$

となる．

以上のように，板要素とはり要素により任意に分割し，板要素に生じたせん断応力と等価な軸応力がはり要素に伝達すると考え，せん断の影響を考慮している．この板要素とはり要

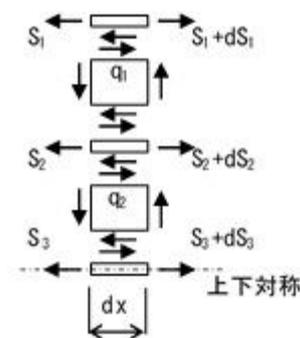


図-1.9 はりの内力分布図

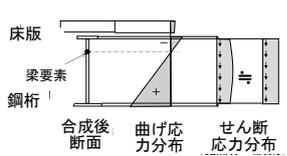
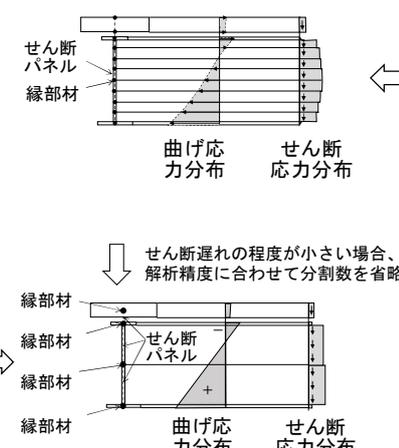
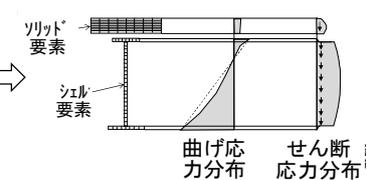
素により構成される要素が一定せん断流パネルである<sup>1.18)</sup>。

一定せん断流パネルを用いた解析では、部材断面内のせん断遅れなどを表現できることから、要素を詳細に分割することで、応力状態の複雑な部位でも FEM 解析と同等な作用応力の算出が可能である。ただし、その解析モデルの詳細さは面的な要素である鋼板の板組形状が対象であり、FEM 解析においてソリッド要素でモデル化する溶接ビードやスカラップなどの立体的な要素は適用対象外となる。

一方で、解析結果から得られるのは、格子解析と同様に各要素に作用する断面力と節点の変位であることから、応力性状が複雑でない部材単独の応力状態については、公称応力として整理することが可能と考えられる。FEM 解析では、立体的なソリッド要素や面的なシェル要素、あるいははり要素など様々な次元の要素を組み合わせる解析モデルの作成、および解析が可能であるものの、解析結果から得られるのは各要素に作用する応力と節点の変位であることから、現行の許容値と比較するための公称応力で整理する作業が別途必要となる。部材に関する公称応力の算出が容易かつ確実であることは、一定せん断流パネル解析の特徴のひとつと考えられる。

鋼道路橋における一定せん断流パネル解析による解析モデルと解析の概要について、表-1.1 に示す。

表-1.1 各解析手法の概要

従来設計（格子解析）	一定せん断流パネル解析による設計	FEM解析による設計
<p>1)ベルヌーイ・オイラーの仮定が成り立つはり要素でモデル化する。</p> <p>2)2次部材はモデル化しない。</p> <p>3)解析結果の作用力は曲げモーメントやせん断力等の断面力である。</p> <p>4)せん断遅れによるフランジの曲げ応力分布（橋軸直角方向）は、曲げ剛性に対して有効幅を用いて考慮する。</p> <p>5)ただし、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、別途検討したり補正したりする必要がある。 例) 奥村・石沢式を用いた隅角部の応力計算<sup>1.26)</sup></p>	<p>1)一般に、せん断応力は一定せん断流パネル、曲げ応力は縁部材の軸力でモデル化する。</p> <p>2)2次部材もモデル化が可能である。</p> <p>3)解析結果の作用力は軸力やせん断流等の断面力である。</p> <p>4)一定せん断流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。</p>	<p>1)一般に、鋼部材の材片をシェル要素で、床版はソリッド要素で、横構のような軸力部材を棒要素でモデル化する。</p> <p>2)2次部材もモデル化が可能である。</p> <p>3)解析結果の作用力は分割した要素ごとの各種応力として算出する。直応力やせん断応力のほか、主応力や相当応力としても算出が可能である。</p> <p>4)部材断面で見た場合、平面保持は成立しない。</p>
		

### 1.3 本研究の目的

本研究では、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、次にそれらの解決策として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整理することで、道路橋の性能評価のための高度な解析を用いた合理的な設計手法を検討することを目的とする。

#### 【1章参考文献】

- 1.1) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.3
- 1.2) 小松定夫 編：鋼構造の補剛設計，森北出版，1982.6
- 1.3) 高島春生：道路橋の横分配実用計算法―前編―，理工学書出版現代社，1965.3
- 1.4) 玉越隆史：近年発生した橋梁の重大損傷の概要，道路 Vol.816，pp.28-32，2009.3
- 1.5) 玉越隆史，大久保雅憲，星野誠，横井芳輝，強瀬義輝：道路橋の定期点検に関する参考資料(2013年版)―橋梁損傷事例写真集―，国土技術政策総合研究所資料，第748号，2013.7
- 1.6) たとえば，三木千壽，菅沼久忠，富澤雅幸，町田文孝：鋼床版箱桁橋のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因，土木学会論文集 No.780/I-70，pp.57-69，2005.1
- 1.7) (公社) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3
- 1.8) 小西拓洋，富澤雅幸，三木千壽：FEMと数値最適化に基づいた鋼橋コスト最小化設計の試み，土木学会論文集 No.717/I-61，pp.23-36，2002.10
- 1.9) 長井正嗣，吉田安晴：合成2主I桁橋の横補剛材をパラメータとした2次応力に関する検討，構造工学論文集 Vol.42A，pp.1061-1072，1996.3
- 1.10) 黒田充紀，長井正嗣，藤野陽三，柄川伸一，川井豊：並列I桁橋の有限要素モデル化に関する検討，構造工学論文集 Vol.42A，pp.1073-1080，1996.3
- 1.11) たとえば，独立行政法人土木研究所：鋼箱形断面圧縮部材の耐荷力に関する検討，土木研究所資料，第4221号，2012.3
- 1.12) 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
- 1.13) 山口栄輝，山本悟，村越潤，高橋実，山下健二：鋼4主I桁橋の設計計算に関する一考察，構造工学論文集 Vol.52A，pp.893-900，2006.3
- 1.14) 中村聖三，田中寿和，高橋和雄：3D-FEMを用いた単純合成I桁橋の設計方法に関する一検討，鋼構造年次論文報告集 第16巻，pp.131-138，2008.11
- 1.15) 本州四国連絡橋公団：鋼上部構造の設計にFEM解析を適用するためのガイドライン(案)，1993.9
- 1.16) 独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ橋梁チーム：鋼桁橋の設計へのFEM解析の適用に関する研究，土木研究所資料，第4047号，2007.4
- 1.17) 土木学会鋼構造委員会：鋼橋設計へのFEMおよび非線形解析の適用に関する改訂小委員会報告書，2012.3
- 1.18) 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―一定せん断流パネルを用いた解析法の検討―，国土技術政策総合研究所資料，第296号，2006.1
- 1.19) 木内耕治，玉越隆史，石尾真理：鋼アーチ橋の疲労設計モデルに関する検討，鋼構造論文集 Vol.15 No.59，pp.1-9，2008.9
- 1.20) 木内耕治，玉越隆史，石尾真理：鋼製橋脚隅角部における一定せん断流パネルを用いた解析法の検討，構造工学論文集 Vol.53A，pp.57-66，2007.3
- 1.21) 大村武馬，下山田孝志，江川定利，玉越隆史：鋼製橋脚隅角部の解析手法の一提案，

構造工学論文集 Vol.51A, pp.23-32, 2005.3

- 1.22) 山本宏, 尾下里治: 連続合成桁中間支点部床版の設計計算における取り扱いに関する検討, 第4回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.7-12, 1999.11
- 1.23) 明橋克良, 熊谷和人, 尾下里治: 一定せん断流パネルを用いた鋼・コンクリート合成桁の解析方法, 構造工学論文集 Vol.43A, pp.1313-1321, 1997.3
- 1.24) 尾下里治, 江川定利: 鋼床版合形式橋梁の解析方法に関する一提案, 土木学会論文集 No.516/VI-27, pp.197-206, 1995.6
- 1.25) 小林繁夫: 航空機構造力学, 丸善株式会社, 1992.9
- 1.26) 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