

一定せん断流パネル解析を用いた 鋼製橋脚隅角部の疲労設計ガイドライン(案)

目 次

1. 概要	1
2. 一定せん断流パネル解析の基本事項	2
2.1 一定せん断流パネル解析の概要	2
2.2 一定せん断流パネル解析を用いた解析法	2
1) 一定せん断流パネル要素の概念	2
2) 一定せん断流パネル要素の剛性マトリックスの誘導	3
2.3 一定せん断流パネル解析のモデル化	5
3. 鋼製橋脚隅角部の疲労設計への一定せん断流パネル解析の適用	6
3.1 基本的手順	6
3.2 隅角部範囲の設定	7
1) 着目隅角部より荷重(上部工反力)載荷点が十分に離れている場合	7
2) 着目隅角部と荷重載荷点が近い場合	8
3.3 境界条件の設定	8
3.4 要素分割の設定	9
1) 柱形状が角柱の場合の要素分割	9
2) 柱形状が円柱の場合の要素分割	10
3.5 構造詳細のモデル化方法	10
1) 添接板のモデル化	10
2) 垂直補剛材および縦リブのモデル化	11
3) ダイヤフラムのモデル化	11
4) 柱基部のモデル化	11
5) コンクリート充填脚の場合のモデル化	12
6) 特殊な形状の隅角部	12
3.6 荷重(上部工反力)載荷の設定	13

1. 概要

近年、鋼道路橋においては、主げたおよび主げたへの部材の取付け部、鋼製橋脚隅角部などの様々な部材、部位で自動車荷重が原因と考えられる鋼材の疲労損傷の発生が報告されている。現在までの厳しい重交通の実態を考慮すると、将来の疲労損傷の拡大も懸念されることから、平成 13 年 12 月に改訂された「橋・高架の道路等に関する技術基準」（以下、「道路橋示方書」という）においては鋼橋編で鋼橋の設計にあたって疲労の影響を考慮することが明確に規定された。そして道路橋に対する具体の疲労設計手法がとりまとめられ、「鋼道路橋の疲労設計指針 H14.3 (社)日本道路協会」として出版された。現在のところ新設の鋼道路橋については原則としてこれを参考に疲労設計が行われている。

疲労設計では、あらかじめ疲労強度が著しく劣る継手や過去に疲労損傷が報告されている構造の採用を避けるなどの最低限の配慮を行うだけでなく、自動車荷重などの対象とする外力によって照査部位に生じる応力変動の影響を適切に評価して、疲労強度との比較を行うなどによって定量的に照査を行い所要の疲労耐久性を確保していくことが合理的であり望ましい。このとき既知の疲労強度等級との照合による検証が困難な場合でも、発生する応力変動をある程度正確に把握することで、構造詳細をより疲労耐久性に優れるものへ変更することが具体的に可能となるため、疲労耐久性の照査の観点からの着目部位の応力性状を設計段階で把握することは疲労設計において非常に重要である。しかし、鋼製橋脚隅角部のように部材が複雑に構成され、かつ応力性状が複雑となる鋼部材では、疲労設計に用いる設計応力の算出が困難であるだけでなく、着目部位の発生応力を把握しても、それをそのまま適用できる継手強度等級など疲労耐久性照査基準に対する知見が十分でなく一定の概念による照査が困難となっているのが現状である。そのため、実設計においては、供試体による疲労試験や部分的に詳細な FEM 解析による応力性状の把握が行われる場合がある一方で、耐荷力設計結果をもとにした発生応力の概略的な推定に基づいての構造的工夫のみで設計がなされる場合もあり、照査レベルに大きな差異を生む可能性のある状態となっている。また、疲労試験や詳細な FEM 解析による構造決定は、試行錯誤が繰り返し行われる設計の段階で実施することは非効率で不経済な面があることが課題であった。

このような状況を踏まえ、国土技術政策総合研究所道路構造物管理研究室では、鋼製橋脚隅角部の疲労設計にあたって、設計段階であることと詳細なモデルによる解析によっても実構造物の厳密な応力の把握には溶接形状や残留応力など様々な要因から自ずと限界があることに着目し、設計段階として発生応力の推定が経済的かつ一定の精度で可能となる手法の検討を行ってきた。

本ガイドライン（案）は、その成果として一定せん断流パネルを用いた解析手法（以下、「一定せん断流パネル解析」という）を適用した鋼製橋脚隅角部の疲労設計法についてとりまとめたものである。

2. 一定せん断流パネル解析の基本事項

2.1 一定せん断流パネル解析の概要

従来のはりの曲げ理論では Bernoulli-Euler の仮定のもとせん断変形の影響を無視しているため、このせん断変形の影響が大きい部材では精度良く応力を算出することができなくなる。そこで、このせん断変形の影響を考慮する 1 つの手法として一定せん断流パネルと呼ばれる要素を用いた解法がある。この一定せん断流パネル要素とは、せん断応力のみに抵抗する板要素とその外周に曲げにともなう垂直応力のみを負担するはり要素から構成される要素であり、板要素とはり要素の間に図-1 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要素を用いた解析手法（以下、「一定せん断流パネル解析」という）はこの要素を用いて対象部材をモデル化し解析を行う手法であり、図-2 に示すように対象とする板部材を縦横にパネル分割しせん断応力のみに抵抗する板要素に置き換え、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を取り付けてモデル化を行う。なお、本解析手法は航空の分野などでは既に実績もある方法であり、一定せん断流パネル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。ただし、変位法における使用例は少ない。以下に、具体的に一定せん断流パネル解析の概要について記載する。

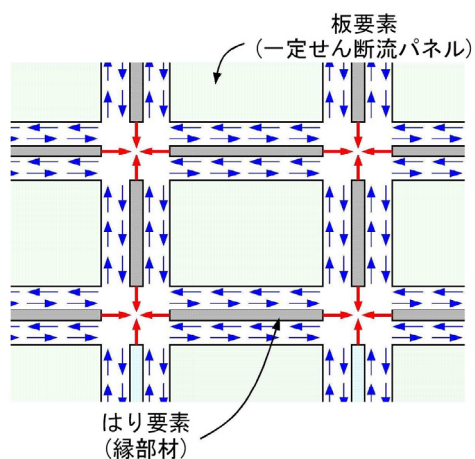


図-1 一定せん断流パネル板のモデル

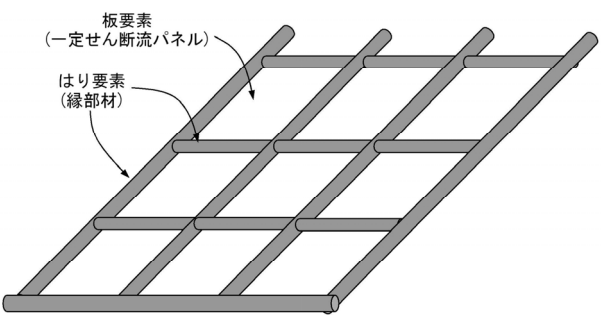


図-2 一定せん断流パネル板のモデル

2.2 一定せん断流パネル解析を用いた解析法

1) 一定せん断流パネル要素の概念

前項に示したように、はり曲げ理論では Bernoulli-Euler の仮定のもとせん断の影響を無視したものであるが、実際のはりには曲げによるせん断が生じる。そのため、このせん断の影響が大きくなると Bernoulli-Euler の仮定が成立しないため、精度良く応力を算出することができなくなる。したがって、このような部材ではせん断の影響を考慮できる手法が必要となる。そこで、このせん断変形の影響を考慮する 1 つの手法として一定せん断流パネルと呼ばれる要素を用いた手法がある。

ここでは、図-3.2.9 のような薄板の片持ちはり为例に考える。この片持ちはりを、図-3.2.10 に示すように曲げのみに抵抗するはり要素とせん断のみに抵抗する板要素によりモデル化を行う。

① 一定せん断流パネルの剛性マトリックス

ここで、長方形で一定の厚さの一定せん断流パネルを考える．一定せん断流パネルに働く力を図-8 に示す．応力法における要素力としてはせん断流 F_1 が使用されるが，変位法においてはせん断流 S_1, S_2, S_3, S_4 が要素力として選ばれる．板の応力とひずみは次のようになる．

$$\sigma_{xy} = F_1/t, \varepsilon_{xy} = F_1/G_t \quad (2)$$

ここで， t は板厚， G はせん断弾性係数である．全変位に対するコンプリメンタリひずみエネルギー U_d^* は，次の式から得られる．

$$U_d^* = \frac{1}{2} \iiint (F_1^2/Gt^2) dx dy dz = (ab/2Gt)/F_1^2 \quad (3)$$

ここで， a, b はパネル寸法を表す．Castigliano の第 2 定理を使うと，パネルの相対変位は次のように与えられる．

$$v = \partial U_d^* / \partial F_1 = (ab/Gt) F_1 = f F_1 \quad (4)$$

ここで， $f = a \cdot b / G \cdot t$ は一定せん断流パネルのたわみ性マトリックスである．せん断流 S_1, S_2, S_3, S_4 に対するつりあい方程式は，式(5)のようになる．

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} S_4 = 0 \quad (5)$$

$\{S_1 \ S_2 \ S_3\}$ の係数の 3×3 のマトリックスの逆マトリックスを前から乗ずると，

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} S_4 = 0 \quad (6)$$

となるので，変位法におけるつり合い関係より，変換マトリックス T を式(5)のように与えられる．

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

また， $N = \begin{bmatrix} T & -1 \end{bmatrix}$ とすれば，たわみ性マトリックスとの関係より一定せん断流パネルに対する剛性マトリックスは式(8)により表される．

$$k = N^T f^{-1} N = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \frac{Gt}{ab} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} = \frac{Gt}{ab} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

② 縁部材の剛性マトリックス

軸力要素に対する要素力の正方向を図-9 に示す．要素における軸力 F は次のように与えられる．

$$F = -\{1 - (x/l)\} F_1 + (x/l) F_2 \quad (9)$$

コンプリメンタリエネルギー U_d^* は，式(10)から得られる．

$$U_d^* = \frac{1}{2} \iint (F^2/EA^2) dx dA + \iint (F/A) \alpha T dx dA \quad (10)$$

ここで， A は断面積， E はヤング率である．式(11)を F_1, F_2 に関して微分すると，

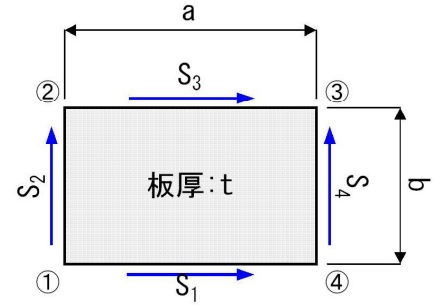


図-8 一定せん断流パネルにおける要素力

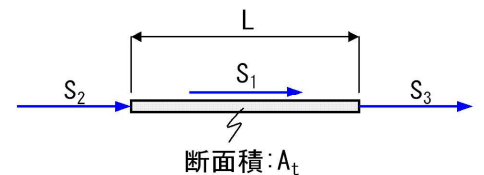


図-9 縁部材の要素力

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{l}{6EA} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} + \frac{\alpha l}{6} \begin{bmatrix} -(2T_1 + T_2) \\ T_1 + 2T_2 \end{bmatrix} = fF + v_r \quad (11)$$

ここで、 $f = \frac{l}{6EA} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}$ は要素のたわみ性である。

図-9 におけるせん断流 S_1 と集中力 S_2, S_3 に対するつりあい方程式は次のように与えられる。

$$S_1 l + S_2 + S_3 = 0$$

$$\Leftrightarrow S_1 + \begin{bmatrix} 1/l & 1/l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

ここで、①と同様に変位法のつり合い関係より、変換マトリックス T 、 N が式(13)のように与えられる。

$$T = \begin{bmatrix} 1/l \\ 1/l \end{bmatrix} \quad N = [T \quad -1] = \begin{bmatrix} 1/l & -1 & 0 \\ 1/l & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

したがって、たわみ性マトリックスとの関係より一定せん断流パネルの縁部材に対する剛性マトリックス、式(14)により表される。

$$k = N^T f^{-1} N = \begin{bmatrix} 1/l & 1/l \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \frac{2AE}{l} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/l & -1 & 0 \\ 1/l & 0 & -1 \end{bmatrix} = \frac{2AE}{l} \begin{bmatrix} 6/l^2 & -3/l & -3/l \\ -3/l & 2 & 1 \\ -3/l & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.3 一定せん断流パネル解析のモデル化

一例として、図-10 のような矩形断面の場合、以下のようなモデル化を行う。

- 矩形断面のフランジとウェブは、板厚 t_f と t_w の一定せん断流パネル要素に置き換える (①, ②)。
- 縁部材③の剛性は、フランジおよびウェブの分担幅分の断面積、フランジ面外の断面 2 次モーメント、ウェブ面外の断面 2 次モーメントを考慮する。
- 縁部材④の剛性は、フランジの分担幅分の断面積とフランジ面外の断面 2 次モーメントの他にリブがある場合はリブの剛性も考慮する。
- 縁部材⑤の剛性は、ウェブの分担幅分の断面積とウェブ面外の断面 2 次モーメントを考慮する。

実際のモデル化は図-11 のように隅角部付近を一定せん断流パネル要素でモデル化し、その他をはり要素でモデル化する。

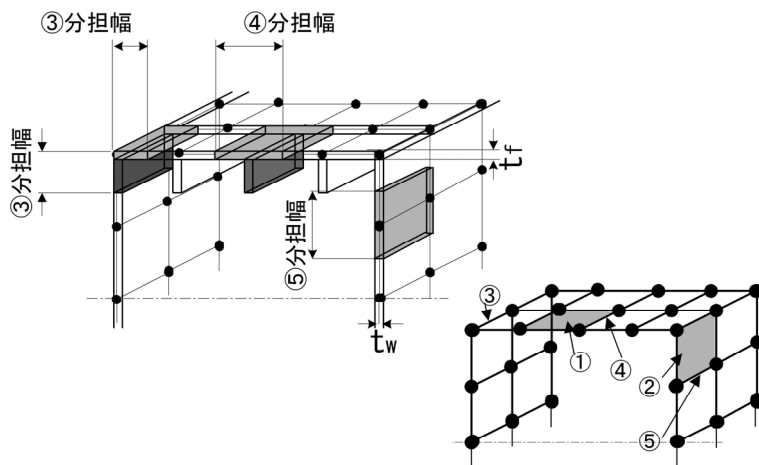


図-10 矩形断面のモデル化

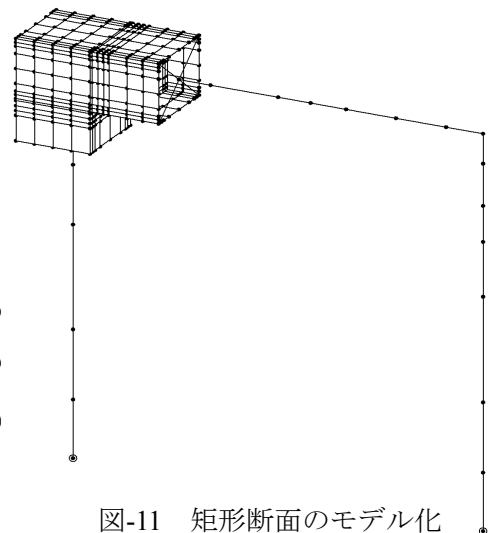


図-11 矩形断面のモデル化

3. 鋼製橋脚隅角部の疲労設計への一定せん断流パネル解析の適用

3.1 基本的手順

2 章までは、一定せん断流パネル解析の概要と矩形断面を例にとり一定せん断流パネル解析を適用する方法を解説した。本章では、実際に鋼製橋脚隅角部の応力解析に一定せん断流パネル解析を適用する方法について解説する。一定せん断流パネル解析は FEM 解析と同様、次のようなステップとなる。

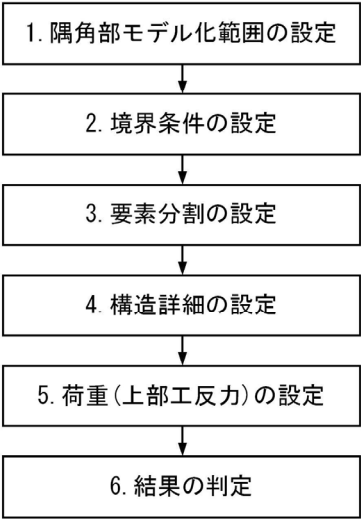


図-12 解析モデル作成手順

各ステップでの検討項目をまとめると表-1 に示すとおりである。これらのモデル化における注意点を明確にすることで、鋼製橋脚隅角部の妥当な応力算出が可能となる。以降に、それぞれの項目についてのモデル化方法を挙げる。

表-1 モデル化における注意点

		モデル化時の注意点
隅角部モデル化範囲の設定		一定せん断流パネル要素区間の設定 ・ 着目隅角部より荷重載荷点が離れている場合 ・ 着目隅角部より荷重載荷点が近い場合 ・ 隣接隅角部同士が近い場合 ・ 柱高が低い場合
境界条件の設定	一定せん断流パネル要素とはり要素の境界	・ はり要素の軸線位置の設定方法
	支点	・ 脚支点位置が梁要素の場合 ・ 脚支点位置が一定せん断流パネル要素の場合
要素分割の設定		・ 角柱の場合 ・ 円柱の場合 ・ 隅角部付近（着目位置）の分割間隔の設定
構造細目のモデル化		・ 添接板（ボルト）のモデル化 ・ 垂直補剛材のモデル化 ・ 縦りブのモデル化 ・ ダイヤフラムのモデル化
荷重の設定		荷重載荷位置のモデル化 ・ 一定せん断流パネル要素区間に載荷する場合 ・ はり要素区間に載荷する場合
その他	中詰コンクリート	・ 充填範囲がはり要素の場合 ・ 充填範囲が（はり要素＋一定せん断流パネル要素）の場合 ・ 充填範囲が一定せん断流パネル要素の場合
	特殊形状	・ はりに段差がある ・ 上下部立体

3.2 隅角部範囲の設定

一定せん断流パネル解析を用いる場合、前述の図-13 のように、一定せん断流パネル要素とはり要素を組み合わせモデル化を行う。実際にモデル化する場合、一定せん断流パネル要素区間をどれぐらい設定するか問題となる。モデル化を行う際には以下のように、「隅角部付近」と「一般部」に分けて定義する。

「隅角部付近」：はり桁高 $H \times 0.2$ 、柱桁高 $L \times 0.2$

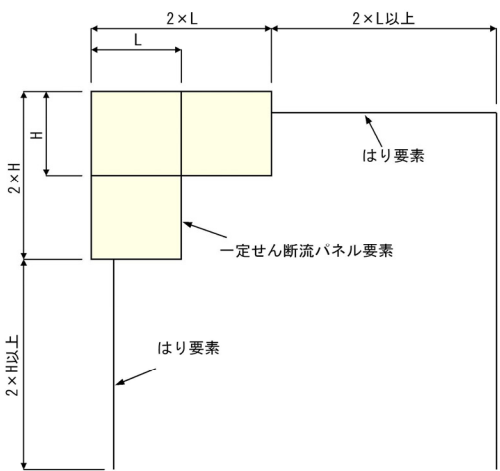
「一般部」：上記以外

以下に、妥当なモデル化範囲を示す。

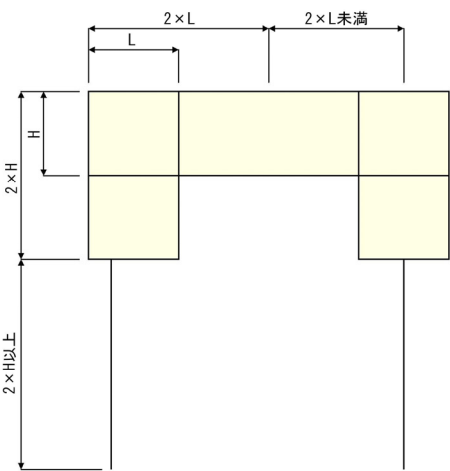
1) 着目隅角部より荷重(上部工反力)載荷点が十分に離れている場合

ここでのポイントは以下のとおり。

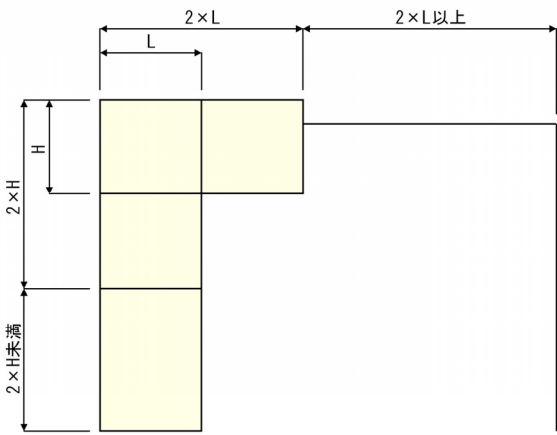
- 橋脚高さ、柱中心間隔が十分な場合は、横はり方向を柱幅の 2 倍以上、柱高さ方向を横はり高さの 2 倍以上とする。(a)
- 柱中心間隔が狭い場合は、横はり全体を一定せん断流パネルモデル範囲とする。(b)
- 横はり高さ低い場合は、柱全体を一定せん断流パネルモデル範囲とする。(c)



a) 橋脚高 $\geq$ 横はり高 $\times 4$
橋脚幅 $\geq$ 柱幅 $\times 4$



b) 橋脚高 $\geq$ 横はり高 $\times 4$
橋脚幅 $\leq$ 柱幅 $\times 4$



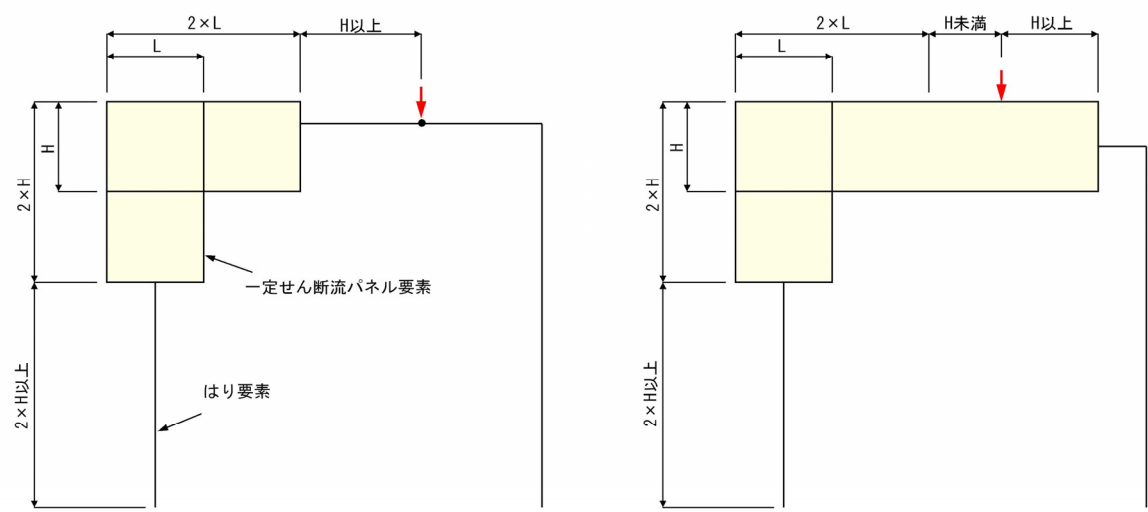
c) 橋脚高 $\leq$ 横はり高 $\times 4$

図-14 隅角部のモデル化範囲

2) 着目隅角部と荷重載荷点が近い場合

ここでのポイントは以下のとおり。

- 隅角部範囲端から上部工反力載荷位置まで十分な距離がある場合は、横はり方向をは柱幅の2倍以上とする．(a)
- 隅角部範囲端から上部工反力載荷位置までが横はりの高さを下回る場合は、上部工反力載荷位置よりさらに横はりの高さまでもモデル化範囲とする．(b)



a) 橋脚高×2+横はり高
≧柱幅～上部工反力位置

a) 橋脚高×2+横はり高
≧柱幅～上部工反力位置

図-15 隅角部のモデル化範囲

3.3 境界条件の設定

「隅角部付近」と「一般部」に分けたモデルの境界条件を設定する．下の囲み部の断面を剛なはり要素で定義した場合、断面の変形が押さえられることになるので注意が必要である．

鋼製橋脚のはり柱断面は、左右腹板の板厚、上下フランジの板厚を同一とするのが一般的であることを考え、長方形断面の中心位置（四隅を対角線で結んだ交点）とする．ただし、上フランジ面が鋼床版デッキ面と同一のような場合で、はりの上下フランジ（上フランジは鋼床版）厚が著しく違う場合は、重心位置とするなどの配慮が必要である．

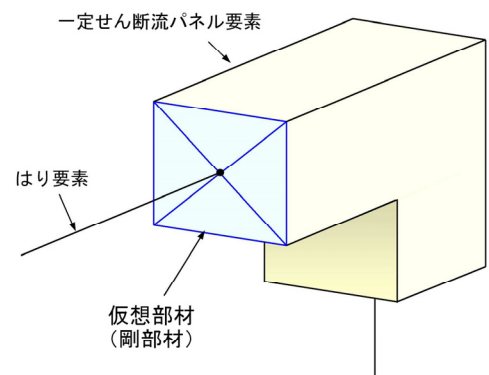


図-16 境界条件の設定

3.4 要素分割の設定

モデル化範囲を設定後は、要素分割を行う。

基本的な分割方法は、縦リブ間隔を最大サイズとして、隅角部コーナー部付近では最小要素サイズ 50mm 程度で分割を行う。

1) 柱形状が矩形断面の場合の要素分割

- 隅角部コーナー部付近（ $0.1H$ ， $0.1L$ ， $0.1D$ の範囲）は、要素サイズ 50mm 程度で等分割する。
- 一般部（ $0.8H$ ， $0.8L$ ， $0.6D$ の範囲）では、断面高（ H ， L ）の $1/4$ 程度以下または縦リブ間隔程度で等分割する。

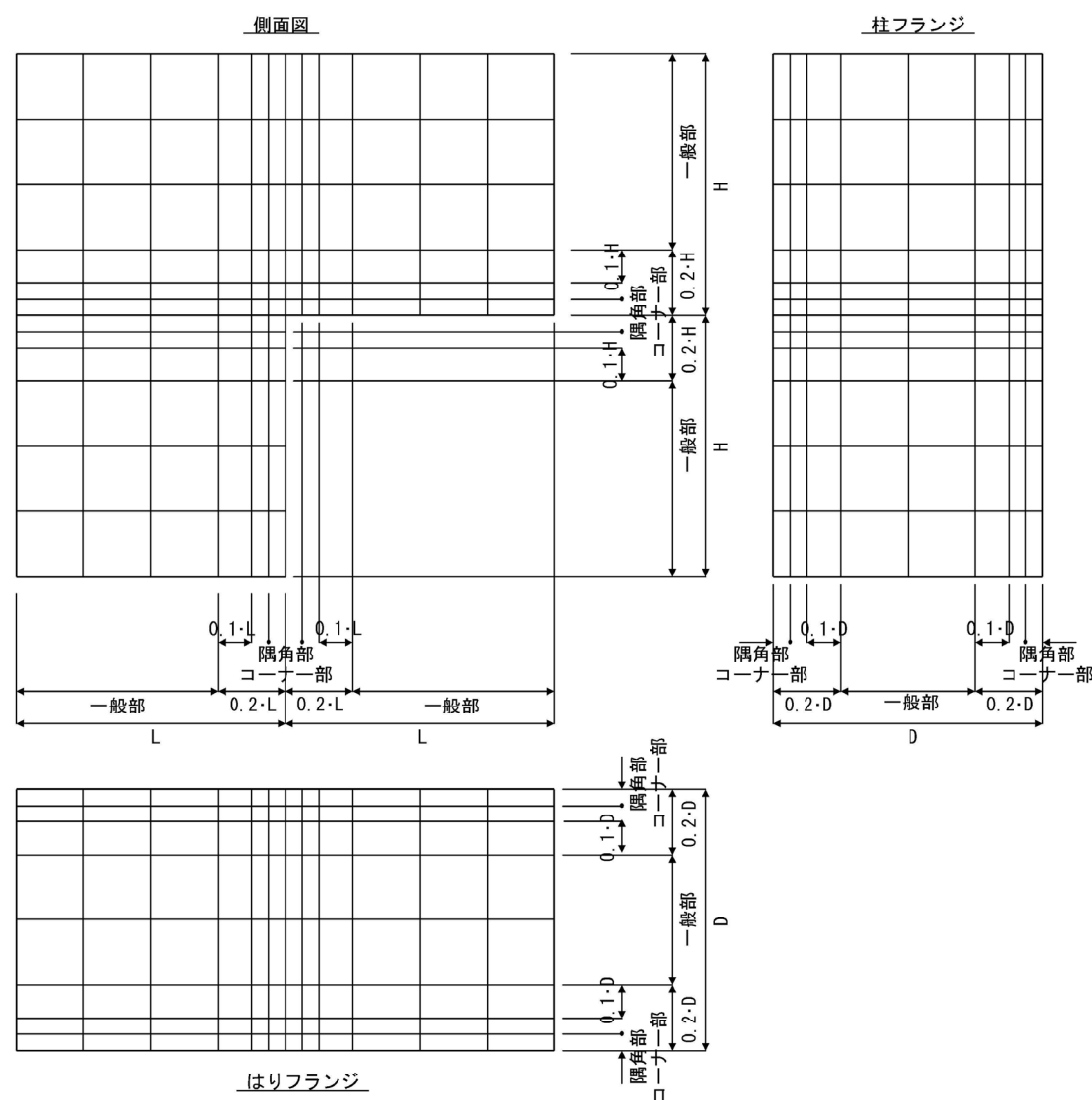


図-17 矩形柱の要素分割概要図

2) 柱形状が円断面の場合の要素分割

- 円柱部の隅角部コーナー付近（30° の範囲）は、要素サイズ 50mm 程度で 8 等分程度に分割する.
- 隅角部付近またはラップ区間の 2 倍の範囲は、要素サイズ 50mm 程度で 8 等分程度に分割する.
- 一般部では、直径（R）の 1/5 程度以下または縦リブ間隔程度で分割する.

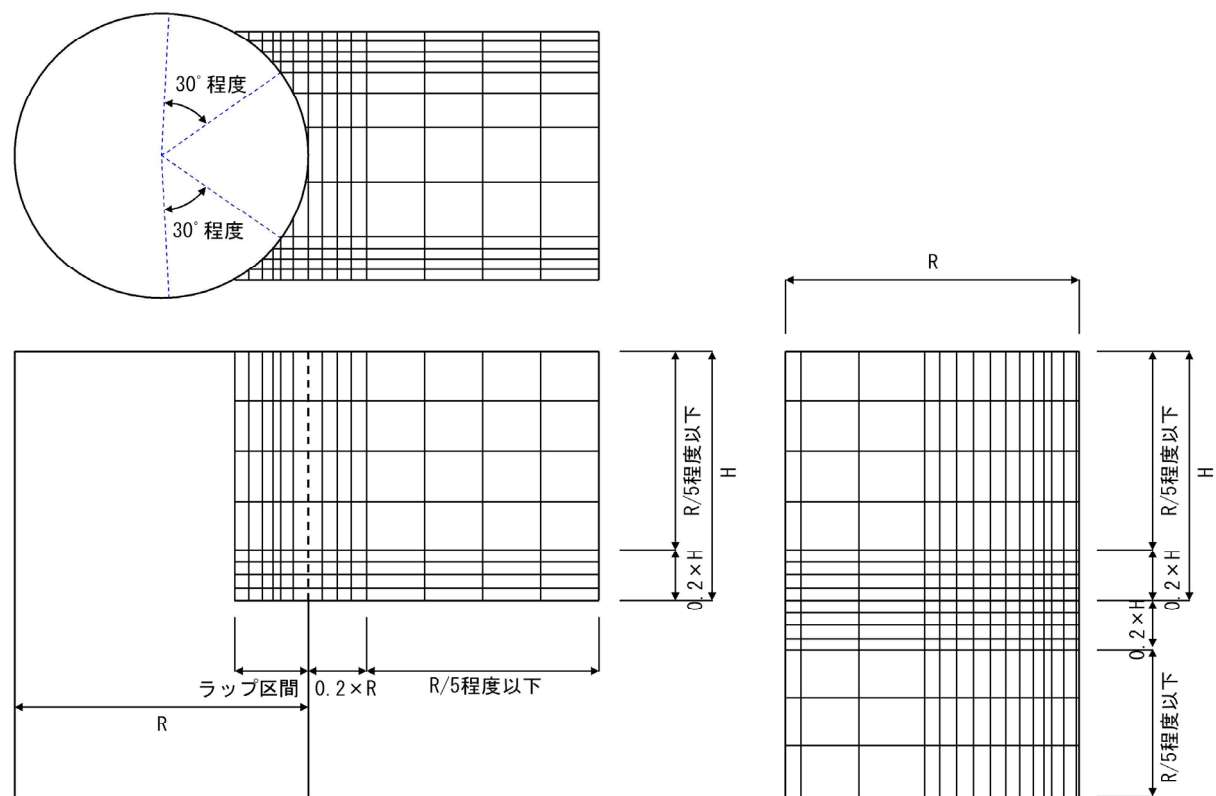


図-18 円柱の要素分割概要図

3.5 構造詳細のモデル化方法

1) 添接板のモデル化

- ボルトは無視する.
- 添接板の部分は、両側添接板の板厚分の断面積，剛性とする.

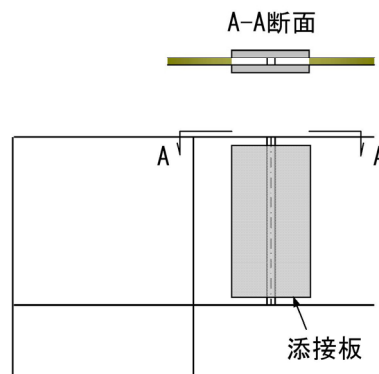


図-19 添接板のモデル化

2) 垂直補剛材および縦リブのモデル化

- 垂直補剛材は全断面を有効とし、腹板縁部材の断面積と剛性に反映する。
- 縦リブは全断面を有効とし、フランジ縁部材の断面積に反映する。

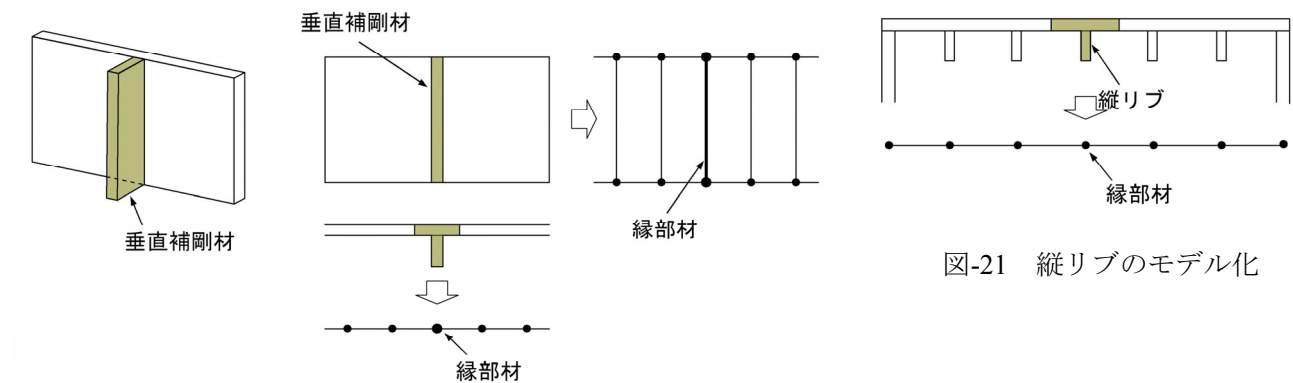


図-20 垂直補剛材のモデル化

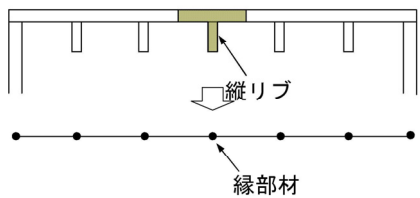


図-21 縦リブのモデル化

3) ダイヤフラムのモデル化

ダイヤフラムのメッシュは縦リブ点を反映し、マンホールによる欠損は考慮してもしなくても隅角部の応力へは影響が少ない。

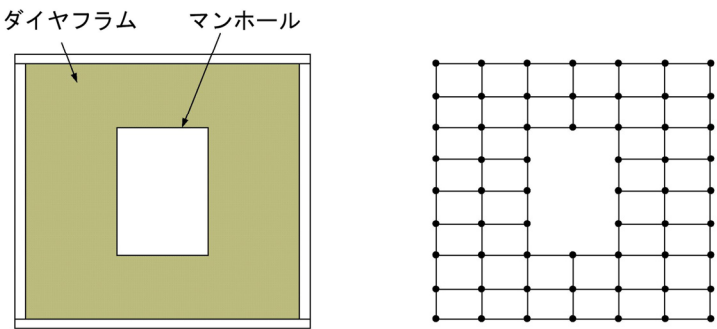


図-22 ダイヤフラムのモデル化

4) 柱基部のモデル化

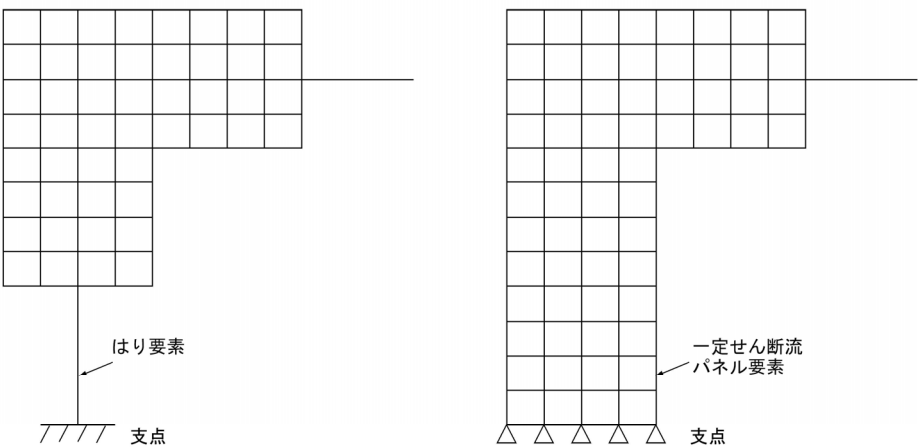


図-23 柱基部のモデル化

5) コンクリート充填脚の場合のモデル化

- はり要素がコンクリート充填の場合，はり要素の剛性，断面積はコンクリート断面（ヤング係数比換算）を含めた値とする．コンクリート充填が一定せん断流パネル要素までかかる場合は，柱にコンクリートの断面諸量と同等のダイヤフラムを入れてモデル化する．
- コンクリート充填が一定せん断流パネル要素までかかる場合は，柱にコンクリートの断面諸量と同等のダイヤフラムを入れてモデル化する．

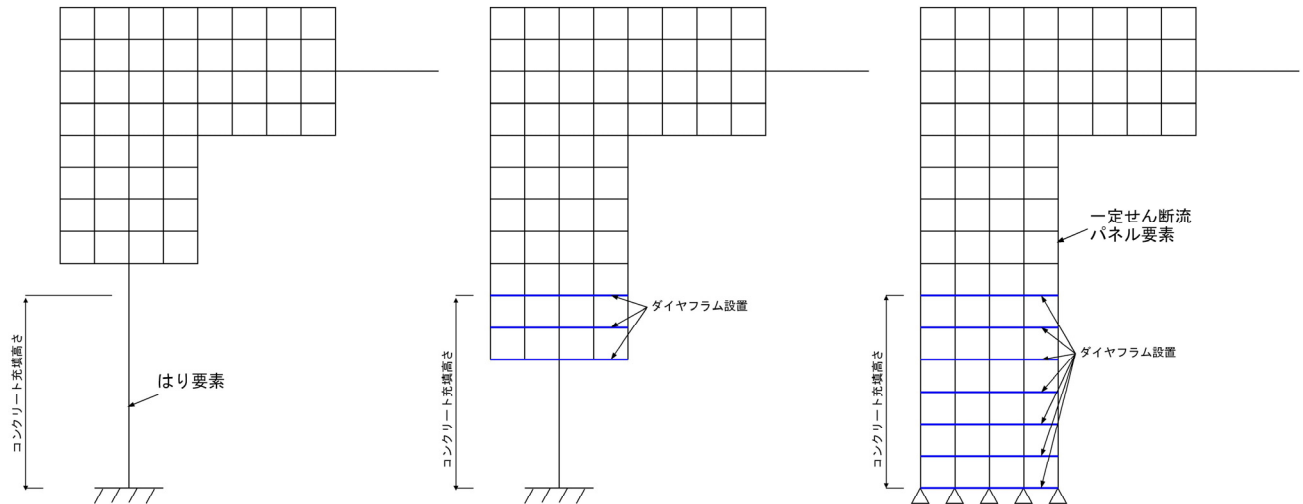


図-24 コンクリート充填部のモデル化

6) 特殊な形状の隅角部

- 図-25 に示すようなはりに段差を有する場合，モデルの作成は一定せん断流パネル要素の範囲や，要素分割方法など前述のものを組み合わせて行う．
- 図-26 に示すような立体橋脚構造の場合，モデルの作成は一定せん断流パネル要素の範囲や，要素分割方法など前述のものを組み合わせて行う．

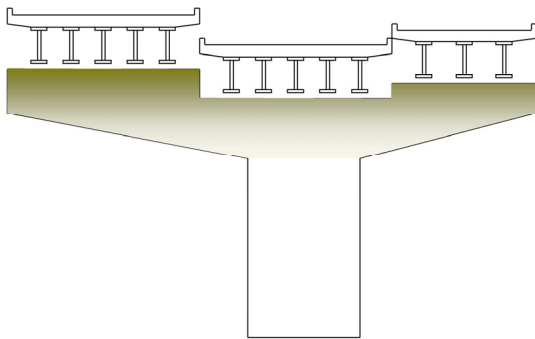


図-25 特殊な隅角部のモデル化

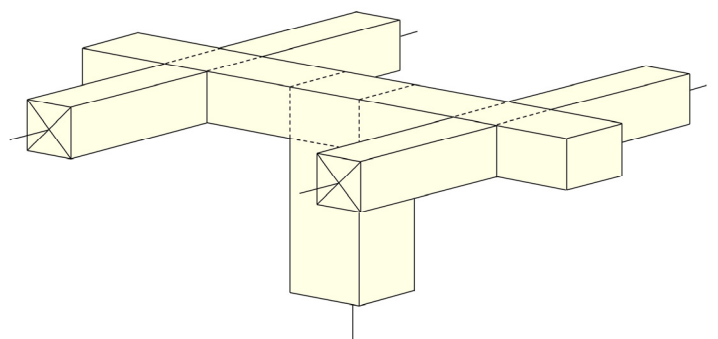
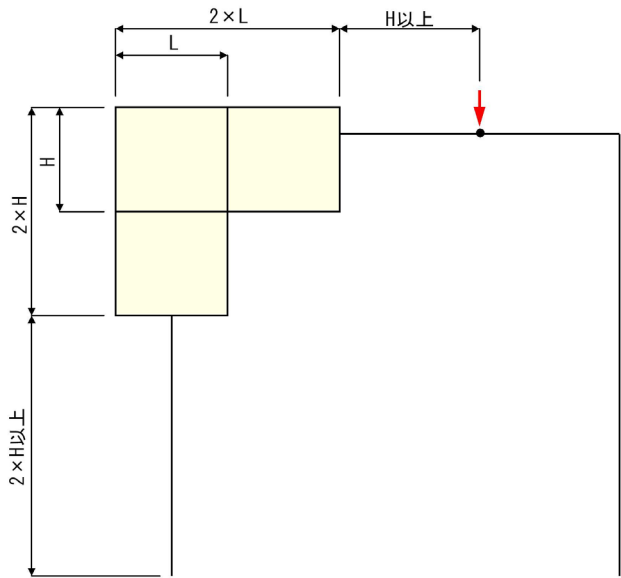


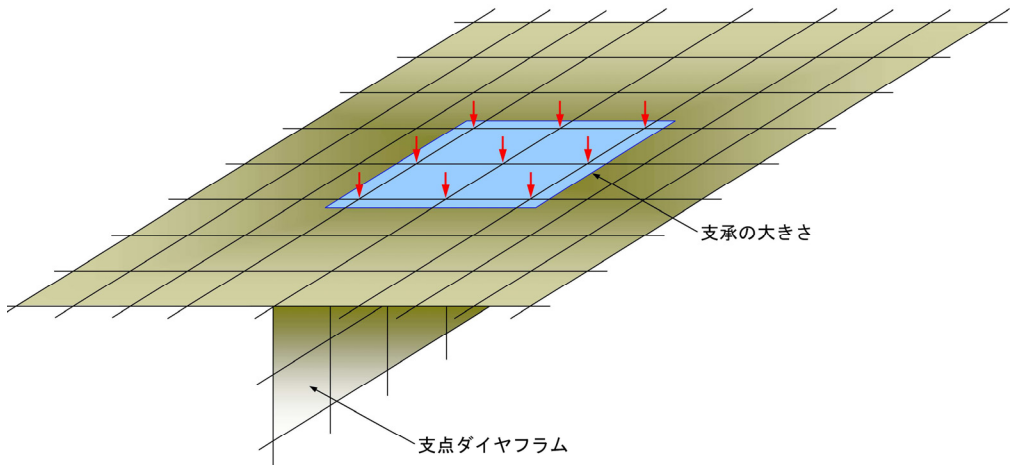
図-26 立体橋脚のモデル化

3.6 荷重(上部工反力) 載荷の設定

- はり部材に載荷する場合，図-27 a) に示すように格点に集中荷重として載荷する．
- 一定せん断流パネル要素に支点がある場合，図-27 b) に示すように支承の大きさ内にある節点に荷重を等分して載荷する．
- 支点上ダイヤフラムの補剛材は，縁部材に断面積を加える．（支点補剛材自体はモデル化しない）



a) はり要素（集中荷重）



b) 一定せん断流パネル要素（等分布載荷）

図-27 荷重載荷点のモデル化