

付録 2

一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル（案）

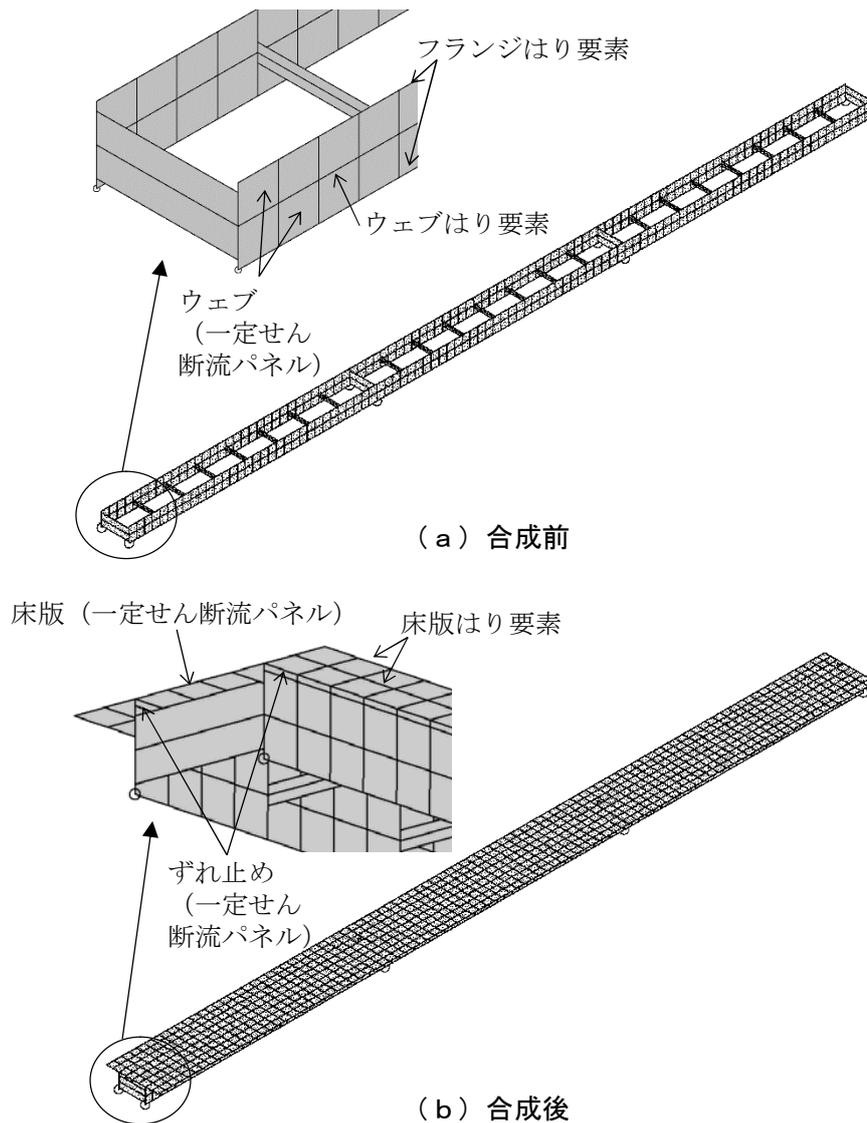
付録2 一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル（案）

「付録1 一定せん断流パネルを用いた解析による鋼道路橋の設計マニュアル（案）」では、連続合成I桁橋、連続鋼床版箱桁橋、および鋼製橋脚の3形式を対象として、一定せん断流パネル解析を主体とした設計フローを示した。ここで、提案した新しい設計フローでは、部材の設計において、道示に規定されている許容応力度と対比できる精度の作用応力度を算出できる解析モデルを前提としている。また、2次部材や局所的な応力集中を考慮した作用応力度を算出する場合は、評価が可能な詳細モデルを前提としている。これらについて、それぞれの橋梁形式における標準的な橋梁を想定した、モデル作成要領の目安、および留意点を基本としてここに整理した。

付録 2.1 連続合成 I 桁橋

(1) 概要

- ①主桁, 床版, 横桁, 対傾構, 横構など全ての構成部材を一定せん断流パネルと骨組部材とで, 全橋を立体的にモデル化する.
- 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して, 各系の荷重に対する解析を行う.
- ③横荷重も同解析モデルで解析する.



付図-2.1 連続合成 I 桁橋の一定せん断流パネル解析モデルの例

(2) モデル化

1) 床版

a) モデル化要領

床版を橋軸方向と橋軸直角方向のはり要素（縁部材）で格子状にモデル化して軸方向力と曲げモーメントを受け持たせ、格子の間に一定せん断流パネルを設置してせん断剛性を受け持たせることを基本とする。

b) 要素分割

i) 橋軸直角方向

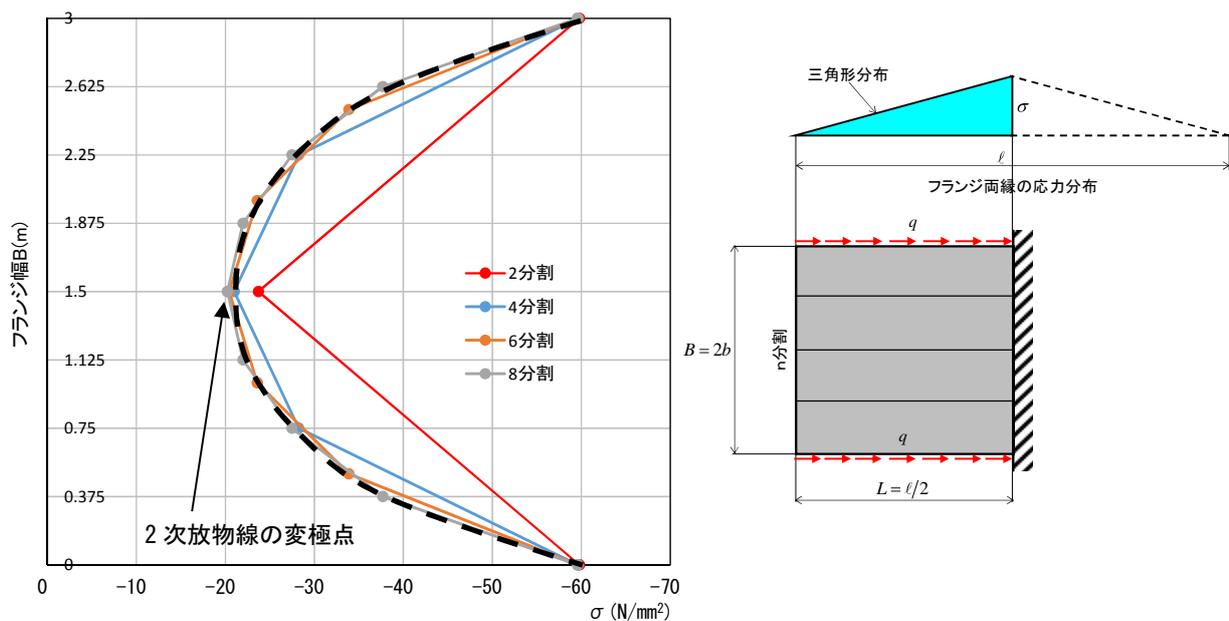
【目的】

合成桁における床版のせん断遅れによる有効幅を評価できるように分割する。

【分割例】

桁橋の場合、合成桁の床版や鋼床版桁の鋼床版デッキのせん断遅れによる曲げ応力分布は、二次元弾性問題として Airy の応力関数を用い、また面内変位をそれによって表現することにより算出することができる^{付2.1)}。ただし、そこで得られる厳密解はかなり煩雑であることから、鋼床版桁のデッキプレート内の曲げ応力分布が2次放物線で近似できるという Reissner の仮定が、小松らや中井らによって実験あるいは解析によって確認されている^{付2.2,付2.3)}。

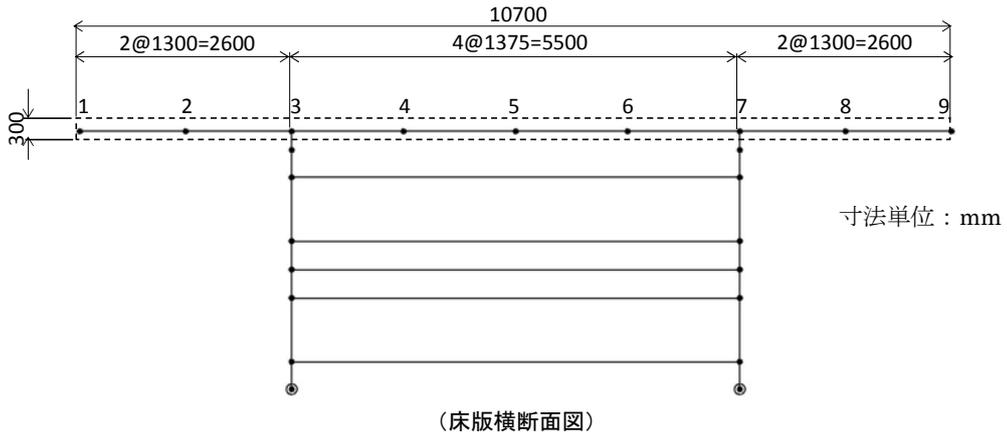
ここで、合成桁橋の床版を想定した、片持ちりの両縁に三角形分布で軸方向荷重を作用させた簡易モデルによる、床版の分割数をパラメータとした曲げ応力分布の計算結果を下図に示す。これより、床版縁（主桁直上を想定）と、曲げ応力分布の変極点である床版幅中央との間を2分割以上とする場合、せん断遅れを再現できることがわかる。



付図-2.2 要素分割数を変化させた場合の床版の曲げ応力分布の計算例

つまり、桁橋の場合、橋軸直角方向の分割は主桁間を4分割以上、張出し部を2分割以上とすることを参考にできる。

また、道路橋示方書^{付2.4)}（以下、「道示」という）の有効幅を用いて算出する従来設計と、作用応力度や主桁のたわみが同等程度となることで要素分割の妥当性を確認することができる。



付図-2.3 床版の要素分割の例（橋軸直角方向）

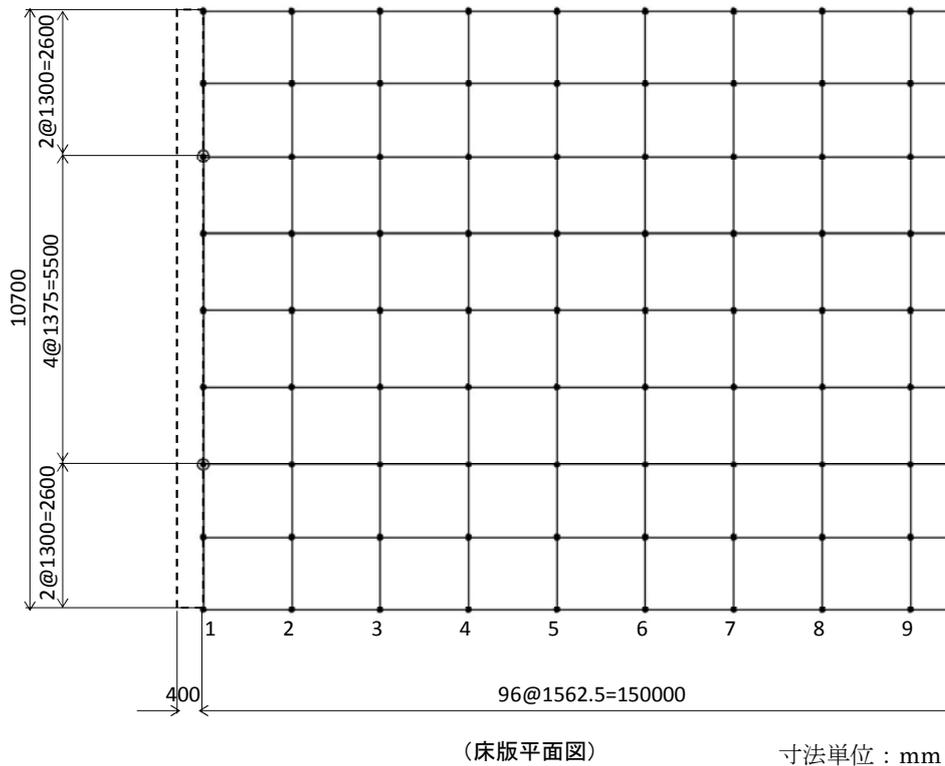
ii) 橋軸方向

【目的】

主桁作用の曲げモーメント分布により床版に作用する曲げ応力を評価できるように分割する。

【分割例】

橋軸方向の分割は、主桁の要素分割に合わせることを基本とする。

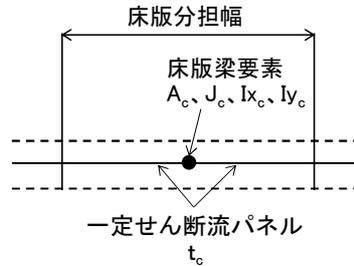


付図-2.4 床版の要素分割の例（橋軸方向）

c) 部材剛度

橋軸方向縁部材の剛度は、床版分担幅の矩形断面の断面定数 $(A_c, J_c, I_{xc}, I_{yc})$ とする。橋軸直角方向縁部材の剛度も同じであるが、鉛直軸回りの断面二次モーメント I_{zc} については一定せん断流パネルのせん断変形を拘束しないように値を小さくすることを基本とする。例を下表に示す。

床版の一定せん断流パネル剛度としては、厚さ t_c のみとなる。



付図-2.5 床版要素の分担幅

付表-2.1 床版縁部材の断面定数の例

方向	番号	分担幅B(m)	A(m ²)	J(m ⁴)	I _y (m ⁴)	I _z (m ⁴)
橋軸方向	1.9	0.6500	0.195000	0.00417920	0.00146250	0.00686563
	2.8	1.3000	0.390000	0.01000655	0.00292500	0.05492500
	3.7	1.3375	0.401250	0.01034363	0.00300938	0.05981655
	4~6	1.3750	0.412500	0.01068075	0.00309375	0.06499023
橋直方向	1	1.1813	0.354375	0.00893939	0.00265781	0.00000100
	2~	1.5625	0.468750	0.01236673	0.00351563	0.00000100

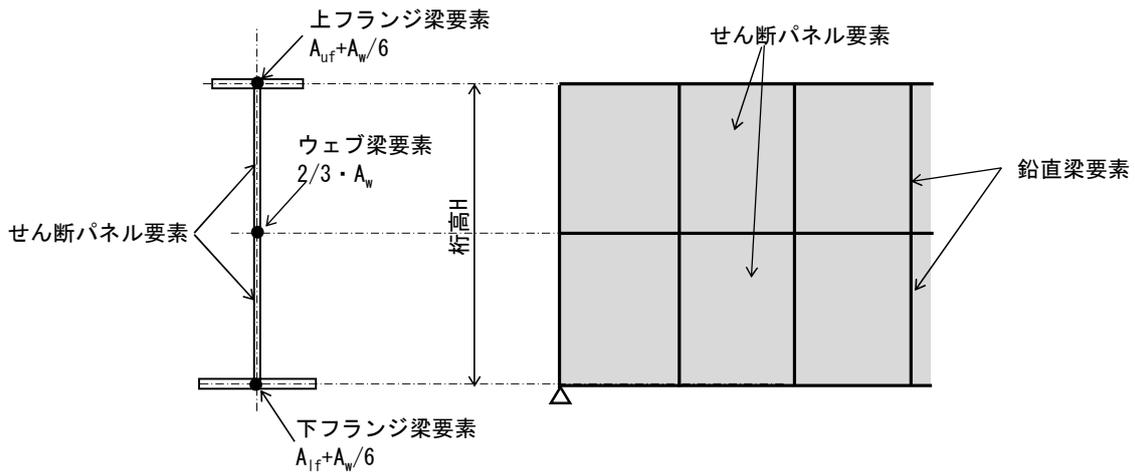
2) 主桁

a) モデル化要領

主桁断面は、上下フランジとウェブをそれぞれ一つのはり要素（縁部材）に置き換え、鉛直方向にこれらを結ぶはり要素（縁部材）とで格子構造を形成することを参考にできる。この格子構造を縁部材として一定せん断流パネルを格子の間に設置して主桁をモデル化することを基本とする。

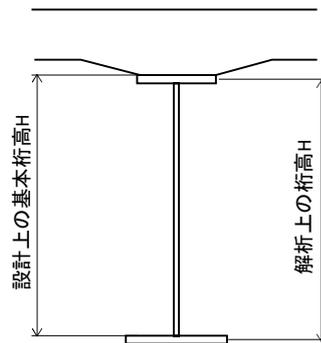
一例として、上下フランジに $A_w/6$ 、ウェブ中心に $2/3 \cdot A_w$ とする場合、断面積および断面二次モーメントは理論値と一致する。ウェブの断面二次モーメントを下式に示す。

$$I_w = 2 \times \frac{A_w}{6} \times \left(\frac{h_w}{2} \right)^2 = \frac{A_w h_w^2}{12} = \frac{t_w h_w^3}{12} \quad \text{ここで、} h_w : \text{ウェブ高, } t_w : \text{ウェブ厚}$$



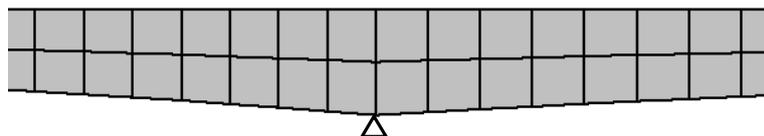
付図-2.6 主桁のモデル化の例

各要素の図心は板幅および板厚の中心となるので、解析上の桁高さ H が解析モデルの断面剛性と実際の主桁の断面剛性とが極力等しくなるように設定することを参考にできる。具体的には、ガイドライン型設計^{付 2.5)}における主桁の板厚構成が上フランジ上面と下フランジ上面の高さを一定としてフランジ板厚変化を下逃げとしているので、解析モデルの桁高さ H を実際のウェブ高さとは関係なくこの値に設定することを基本とする。



付図-2.7 主桁の板厚構成と解析上の桁高 H

主桁高さが変化する場合は、一定せん断流パネルの台形要素を用いることで実際の形状に合わせて再現することを基本とする。



付図-2.8 主桁高さが変化する場合のモデル化の例

【分割例】

主桁に関する曲げモーメントに伴うせん断応力度の断面内の分布は、薄肉断面のほりであることから、せん断流理論によって厳密な値が得られることが知られている^{付2.4)}。しかし、一般の鋼桁では、曲げモーメントに伴うせん断力の大部分がウェブで受け持たれ、しかもこれはウェブ内にほぼ均一に分布すると考えてもせん断流理論との誤差が少ない^{付2.4)}。

ここで、鋼I桁のウェブを細分割したときの各縁部材の断面積の割り振り方を下図に示す。これより、各分割方法におけるウェブの断面二次モーメントを計算すると次のようになる。

・ 2分割調整割 $I_w = 2 \times \frac{A_w}{6} \times \left(\frac{h}{2}\right)^2 = \frac{t_w h^3}{12}$: ウェブの理論式の値と等価

・ 2分割均等割 $I_w = 2 \times \frac{A_w}{4} \times \left(\frac{h}{2}\right)^2 = \frac{t_w h^3}{8}$

・ 4分割均等割 $I_w = 2 \times \frac{A_w}{8} \times \left(\frac{h}{2}\right)^2 + 2 \times \frac{A_w}{4} \times \left(\frac{h}{4}\right)^2 = \frac{3t_w h^3}{32}$

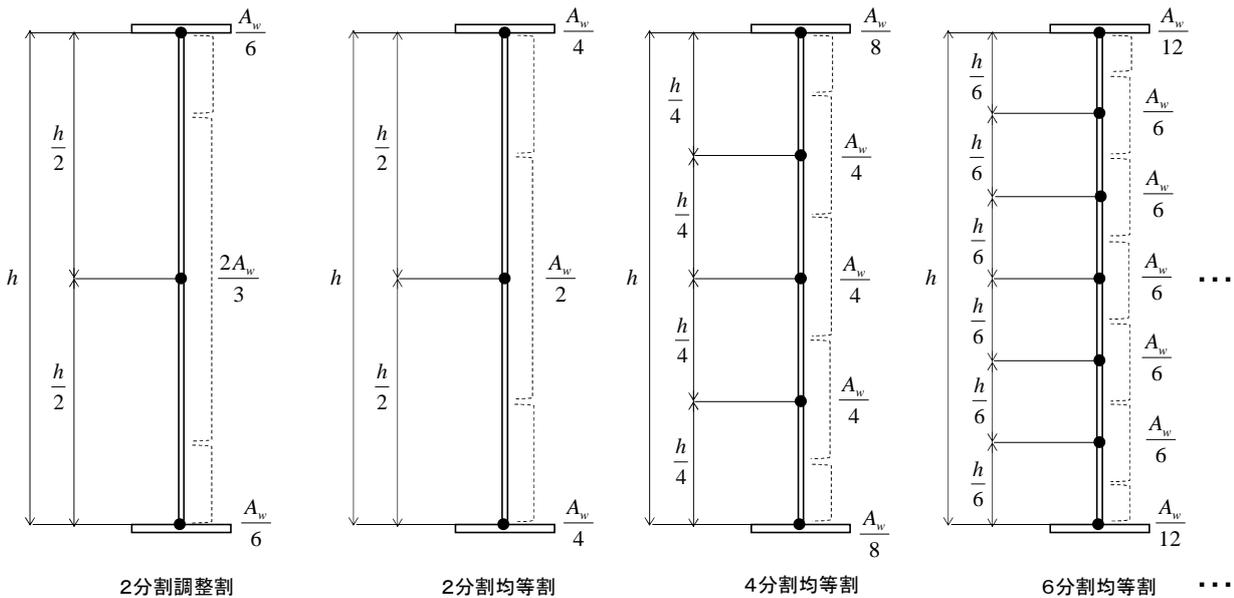
・ 6分割均等割 $I_w = 2 \times \frac{A_w}{12} \times \left(\frac{h}{2}\right)^2 + 2 \times \frac{A_w}{6} \times \left(\frac{h}{3}\right)^2 + 2 \times \frac{A_w}{6} \times \left(\frac{h}{6}\right)^2 = \frac{57t_w h^3}{648}$

・ 8分割均等割

$$I_w = 2 \times \frac{A_w}{16} \times \left(\frac{h}{2}\right)^2 + 2 \times \frac{A_w}{8} \times \left(\frac{3h}{8}\right)^2 + 2 \times \frac{A_w}{8} \times \left(\frac{h}{4}\right)^2 + 2 \times \frac{A_w}{8} \times \left(\frac{h}{8}\right)^2 = \frac{11t_w h^3}{128}$$

・ 10分割均等割

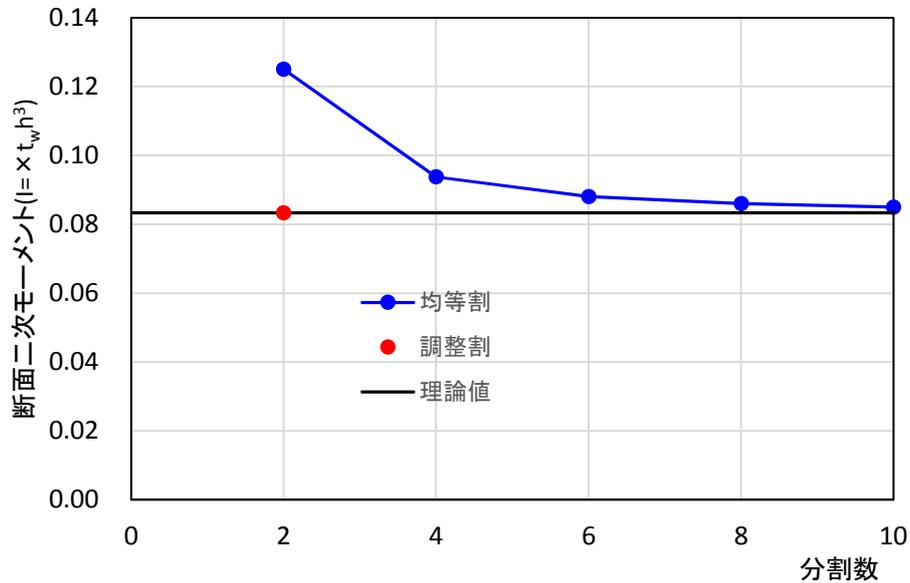
同様に計算すると、 $I_w = \frac{17t_w h^3}{200}$



付図-2.10 ウェブの分割方法の例

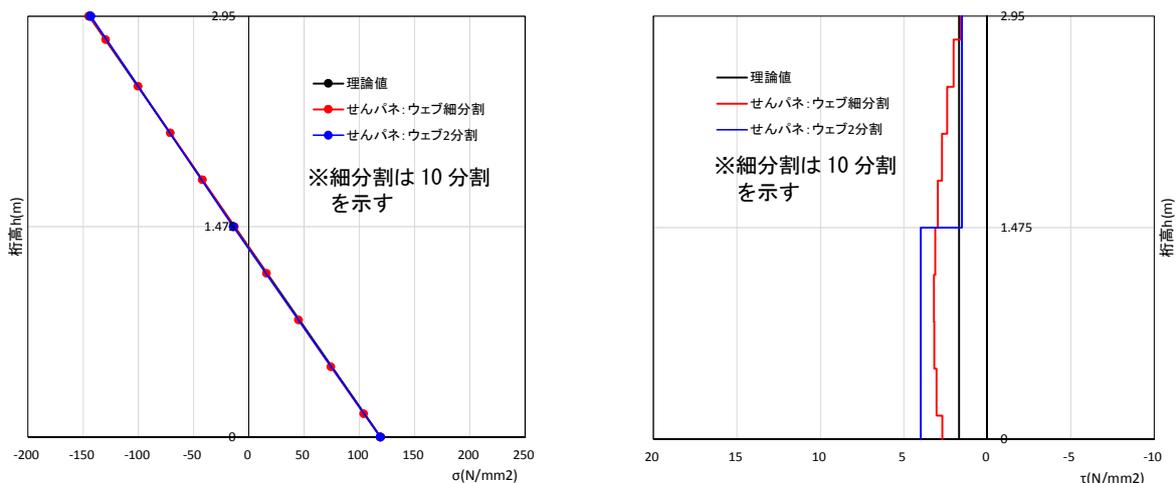
ウェブの分割数ごとに、断面二次モーメントの計算式の値をプロットすると下図のようになる。ウェブを4分割以上とする場合、誤差は10%程度以下に収束していくことがわかる。

I断面や箱断面などの一般的な鋼桁を対象とする場合、付図-2.6のように、2分割で断面積を調整して断面積および断面二次モーメントを理論値に合わせることもできる。



付図-2.11 ウェブの分割数と断面二次モーメントの関係

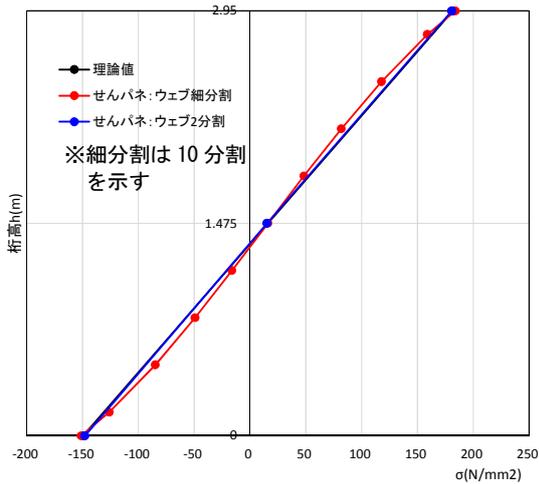
また、連続鋼I桁の支間中央と中間支点部を対象に、ウェブの要素分割数をパラメータとした主桁ウェブの曲げ応力、およびせん断応力の分布を下図に示す。これより、曲げ応力度の分布は、いずれの分割数でも理論値とほぼ一致していることがわかる。せん断応力度の分布は、要素分割を細分化する場合、せん断流理論による厳密解に近づくと考えられるが、各要素から得られるせん断応力を平均化すると、ウェブ内に均一に分布すると仮定した理論値とほぼ同じ値を示すことがわかる。



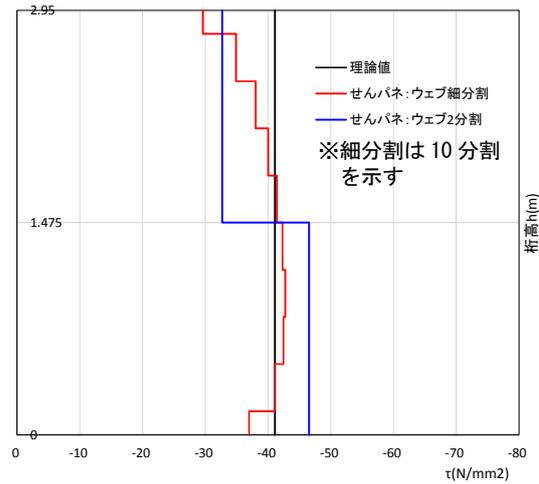
(a) ウェブの曲げ応力度分布

(b) ウェブのせん断応力度分布

付図-2.12 主桁ウェブの分割数と応力分布（支間中央部）



(a) ウェブの曲げ応力度分布



(b) ウェブのせん断応力度分布

付図-2.13 主桁ウェブの分割数と応力分布（中間支点部）

c) 部材剛度

橋軸方向縁部材となるフランジとウェブの剛度は、各板要素の断面定数 (A_c, J_c, I_{xc}, I_{yc}) とする。実際の断面変化に合わせて断面を変化させることを基本とする。例を下表に示す。

上フランジ材質	SM490Y							
上フランジ断面	750x25	750x26	750x26	750x23	750x29	750x23	750x23	750x23
上フランジ断面長	11719	10937	10938	10937	10938	9375	9375	10937
下フランジ材質	SM490Y							
下フランジ断面	750x28	750x38	750x38	750x32	800x50	750x36	750x23	750x23
下フランジ断面長	11719	10937	10938	10937	10938	9375	9375	10937
ウェブ材質	SM490Y				SM490Y	SM490Y		
ウェブ断面	15				20	15		
横桁間隔	6250	6250	6250	6250	6250	6250	6250	6250
支間長	50000				50000			

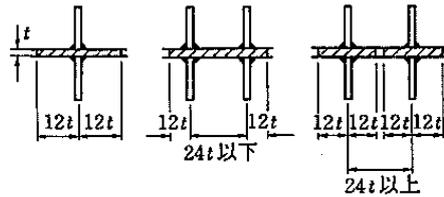
付図-2.14 主桁の断面構成図の例

付表-2.2 主桁の板要素の断面定数の例

板要素	B(mm)	t(mm)	$A(m^2)$	$J(m^4)$	$I_x(m^4)$	$I_y(m^4)$
上フランジ	750	25	0.018750	0.00000391	0.00000098	0.00087891
	750	26	0.019500	0.00000439	0.00000110	0.00091406
	750	23	0.017250	0.00000304	0.00000076	0.00080859
	750	29	0.021750	0.00000610	0.00000152	0.00101953
	750	23	0.017250	0.00000304	0.00000076	0.00080859
ウェブ	2950	15	0.044250	0.00000332	0.03209047	0.00000083
	2950	20	0.059000	0.00000787	0.04278729	0.00000197
下フランジ	750	28	0.021000	0.00000549	0.00000137	0.00098438
	750	38	0.028500	0.00001372	0.00000343	0.00133594
	750	32	0.024000	0.00000819	0.00000205	0.00112500
	800	50	0.040000	0.00003333	0.00000833	0.00213333
	750	36	0.027000	0.00001166	0.00000292	0.00126563
	750	23	0.017250	0.00000304	0.00000076	0.00080859

支点上と対傾構や横桁取付部の鉛直方向縁部材の剛度は、垂直補剛材と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) を設定する。ウェブ面内の断面二次モーメント I_y については一定せん断流パネルのせん断変形を拘束しないように値を小さく(例えば 0.000001m^4)することを基本とする。

ウェブの一定せん断流パネル剛度としては、厚さ t_w のみとなる。これをウェブ厚とすることを基本とする。



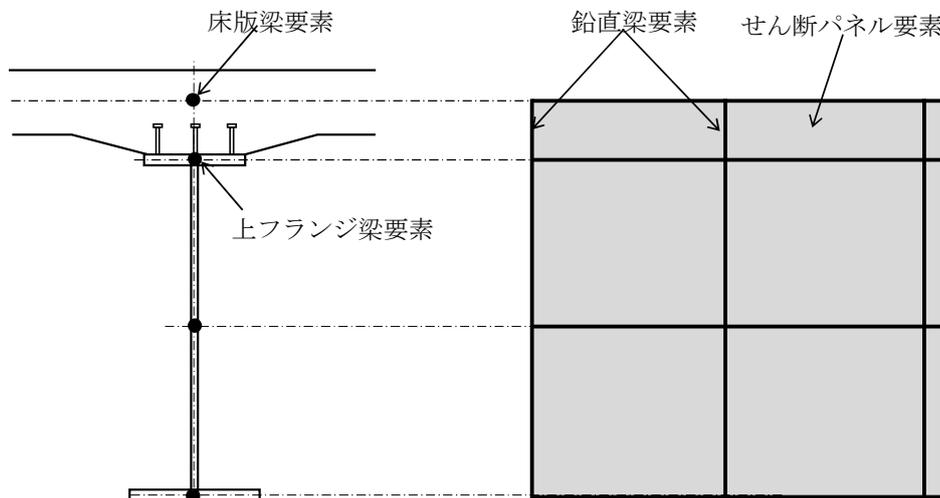
付図-2.15 鉛直方向縁部材の有効断面^{付2.4)}

3) ずれ止め

a) モデル化要領

床版はり要素と上フランジはり要素との間に鉛直はり要素を配置して、これらを縁部材とする一定せん断流パネルを組み込むことを基本とする。

ずれ止めの橋軸方向せん断力は、一定せん断流パネルのせん断流から算出するが、橋軸直角方向のせん断力と曲げモーメントは鉛直はり要素の断面力から求める。



付図-2.16 ずれ止めのモデル化の例

b) 要素分割

【目的】

合成桁においてずれ止めに作用する水平せん断力の分布を評価できるように分割する。

【分割例】

ずれ止めに作用する水平せん断力は、主桁に作用する鉛直方向のせん断力に比例するため、主桁および床版の橋軸方向の要素分割に合わせることを参考にできる。

c) 部材剛度

ずれ止めの橋軸方向バネ定数と一定せん断流パネルのせん断剛性を合わせた一定せん断流パネルの厚さとするを基本とする。なお、完全合成桁として設計する場合、せん断剛性 $G \cdot t$ を大きくする。

鉛直はり部材の剛度は、橋軸直角方向のせん断力と曲げモーメントを算出するために、ウェブ面外の断面二次モーメント I_x は大きくし、ウェブ面内の断面二次モーメント I_y については一定せん断流パネルのせん断変形を拘束しないように値を小さく(例えば 0.000001m^4) することを基本とする。

4) 横桁

a) モデル化要領

横桁についても主桁と同様に上下フランジとウェブの3つの板要素を縁部材として、一定せん断流パネルを組み込んでモデル化することを基本とする。

b) 要素分割

【目的】

横桁の曲げモーメント分布による曲げ応力、およびせん断力によるせん断応力を評価できるように分割する。

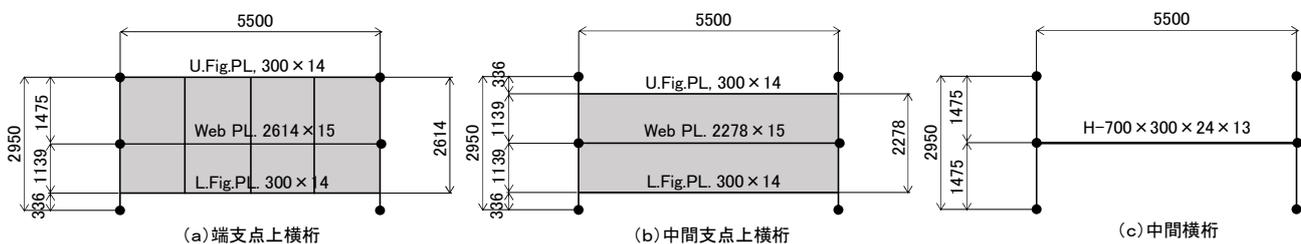
【分割例】

横桁の中間点に荷重が載らない場合、横桁に作用する断面力は格点部における主桁から伝達される断面力のみとなるため、主桁間で要素を分割する必要はない。

端横桁で床版が打ち下ろされて荷重が中間点に載る場合、床版の要素分割に合わせて分割することを参考にできる。

少数主桁橋のように、中間横桁が形鋼で形成された小断面はり部材の場合は、はり要素でモデル化できる場合もある。

これらの例を、主桁との取り付け位置関係も含めて下図に示す。



寸法単位：mm

付図-2.17 横桁のモデル化の例

c) 部材剛度

主桁と同様に、フランジとウェブの板要素の断面定数 (A, J, I_x, I_y) を設定し、一定せん断流パネルの板厚は実際のウェブ厚とするを基本とする。

5) 中間対傾構

a) モデル化要領

対傾構部材の断面積と断面二次モーメントを考慮したはり要素で対傾構のトラス構造をモデル化し、主桁との取り付け位置関係についても実際と合わせることを基本とする。

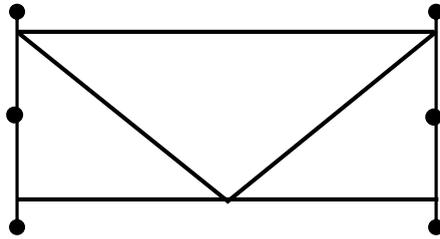
b) 要素分割

【目的】

中間対傾構の弦材および斜材に作用する断面力を評価できるように分割する。

【分割例】

対傾構部材ははり要素なので、中間に荷重が載らない場合は、一部材一要素とすることを参考にできる。



付図-2.18 中間対傾構のモデル化の例

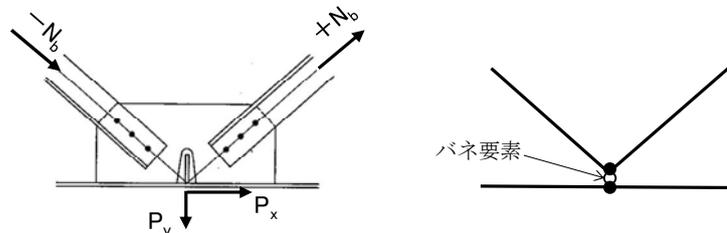
c) 部材剛度

各弦材には形鋼を用いることが多いが、その断面定数(A, J, I_x, I_y)を設定することを基本とする。

6) 横構

a) モデル化要領

横構部材の断面積と断面二次モーメントを考慮したはり要素で実際の配置に合わせてモデル化することを基本とする。主桁に取り付く部分のガセットプレートについては、一定せん断流パネルを組み込んでモデル化することを基本とする。ただし、構造や作用応力が複雑にならない場合は、下図のように、主桁軸方向の作用力 P_x と、その直角方向の作用力 P_y を算出することに着目して、横構のはり要素と主桁ウェブの結合点をバネ要素で単純化することを参考にできる。



付図-2.19 横構ガセットプレート部のバネ要素

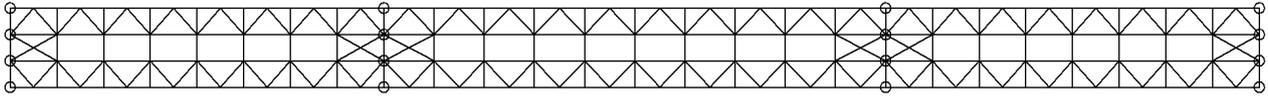
b) 要素分割

【目的】

横構に作用する断面力を評価できるように分割する。

【分割例】

横構部材ははり要素なので、中間に荷重が載らない場合は、一部材一要素とすることを参考にできる。



付図-2.20 横構のモデル化の例

c) 部材剛度

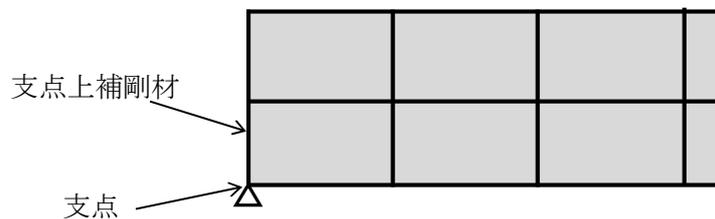
横構には形鋼を用いることが多く、その断面定数(A, J, I_x, I_y)を設定することを基本とする。

ガセットプレートに一定せん断流パネルを用いる場合は実板厚の剛性とするが、バネ要素を用いる場合はバネ定数を6成分とも剛 (10^{12} kN/m) とすることを参考にできる。

7) 支点

a) モデル化要領

支点上補剛材の直下で、格子桁モデルと同様に支持条件を与えることを基本とする。



付図-2.21 支点のモデル化の例

(3) 荷重

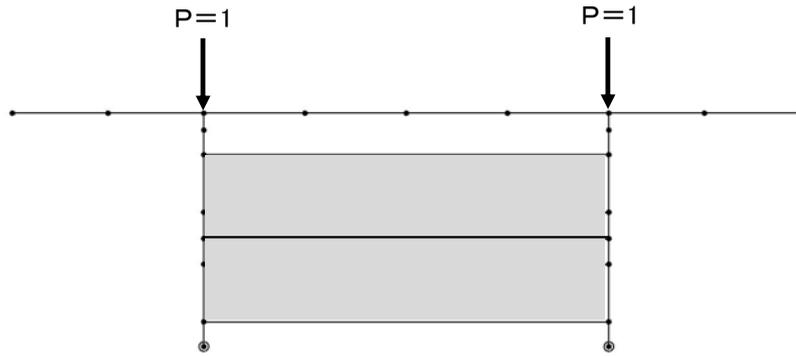
1) 鉛直荷重

a) 死荷重

合成前死荷重と合成後死荷重を、それぞれの解析モデルに載荷することを基本とする。

従来設計と同様に、主構造による荷重分配効果のみを考慮する場合、床版上に載荷される荷重についても、直接に床版要素に載荷するのではなく、主桁上フランジを載荷点として作成した影響線を用いて各荷重に対する着目量(変位, 断面力)を算出する。

一方、床版による荷重分配効果も考慮する場合、床版の橋軸方向縁部材を載荷点として作成した影響線を用いて計算することを基本とする。



付図-2.22 影響線作成のための単位荷重載荷点の例

b) 活荷重

i) L 荷重

B 活荷重 L 荷重は，主桁上フランジ上に影響線載荷することを基本とする．つまり，主桁上フランジに単位荷重を載荷して作成した影響線を用いて，着目量（変位，断面力）が最大・最小となるように有効幅員の中で移動させた載荷状態に対して影響線体積を積分して着目量を算出する．

ii) 疲労照査の T 荷重

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．

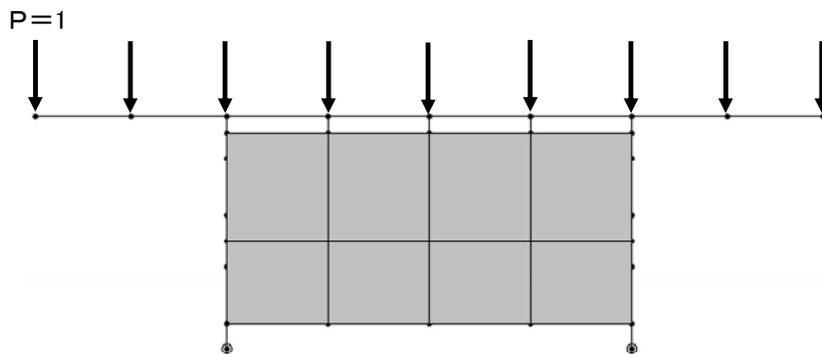
従来設計と同様に，主構造による荷重分配効果のみを考慮する場合，主桁上フランジを載荷点として作成した影響線を用いて計算することを基本とする．

一方，床版による荷重分配効果も考慮する場合，床版の橋軸方向縁部材を載荷点として作成した影響線を用いて計算することを基本とする．

iii) 端横桁設計の T 荷重

床版を打ち下ろした端横桁の設計には，B 活荷重 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ことを基本とする．つまり，床版の橋軸方向縁部材を載荷点として作成した影響線を用いて T 荷重に対する着目量の最大・最小値を算出する．

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．



付図-2.23 端横桁設計の T 荷重の影響線作成のための単位荷重載荷点の例

2) クリープ

後死荷重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，クリープによる作用軸力

を、温度荷重に換算して床版部材に直接載荷することを基本とする。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。

$$P_1 = \frac{E_s \cdot \varepsilon_t \cdot A_c}{n_1} = \frac{E_s \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot A_c}{n_1} = P_\phi = N_c$$

$$\Delta t = \frac{n_1 \cdot N_c}{E_s \cdot \alpha \cdot A_c} = \frac{14 \times N_c}{2 \times 10^8 \times 12 \times 10^{-6} \times A_c} = 0.005833 \times \frac{N_c}{A_c}$$

ここに、 $n_1 = n(1 + \phi_1/2) = 7 \times (1 + 2/2) = 14$

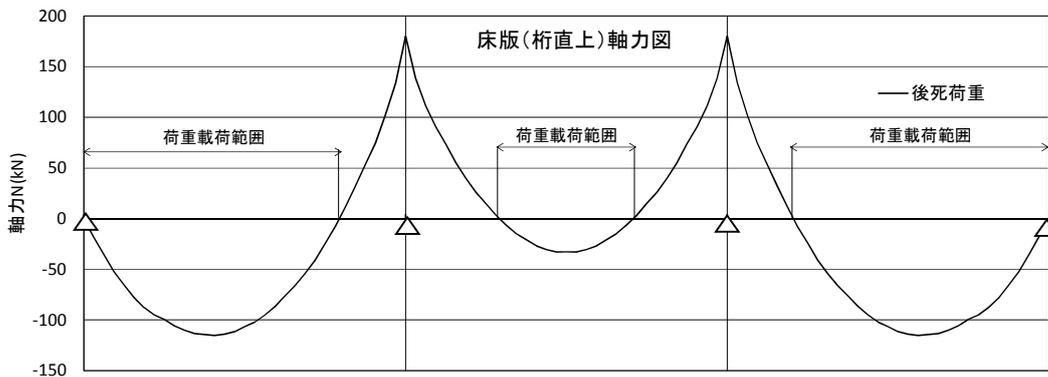
E_s : 鋼のヤング係数

α : 鋼の線膨張係数

A_c : 床版コンクリートの断面積

後死荷重による曲げモーメントが正となる範囲に載荷する。

解析モデルのヤング係数比は $n=14$ で計算する。



付図-2.24 クリープの荷重載荷範囲の例

3) 乾燥収縮

床版コンクリートの乾燥収縮による作用力を、温度荷重に換算して床版部材に直接載荷することを基本とする。床版コンクリートの最終収縮度を $\varepsilon_s = 20 \times 10^{-5}$ とすると、温度差によるひずみ

$$\varepsilon_t = \alpha \cdot \Delta t = 12 \times 10^{-6} \times \Delta t$$

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。

$$\varepsilon_s = \varepsilon_t$$

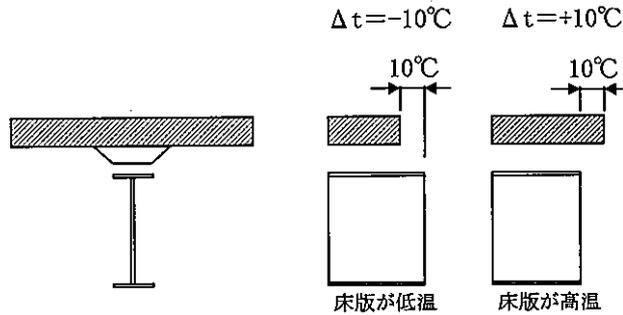
$$\Delta t = \frac{20 \times 10^{-5}}{12 \times 10^{-6}} = 16.7^\circ\text{C}$$

乾燥収縮の影響を考慮する範囲は、後死荷重によって中間支点付近の床版に引張軸力が発生する範囲を除いた区間とする。解析モデルのヤング係数比は $n=21$ で計算する。

4) 温度差

床版コンクリートと鋼桁との温度差は ± 10 度として、床版部材に直接温度差荷重 ± 10 度を載荷することを基本とする。

床版コンクリートが引張応力状態となる領域における取り扱いについては、クリープ、乾燥収縮と整合をとって、後死荷重による曲げモーメントが正となる範囲には温度差による応力は発生しないとして温度差荷重を載荷しない。



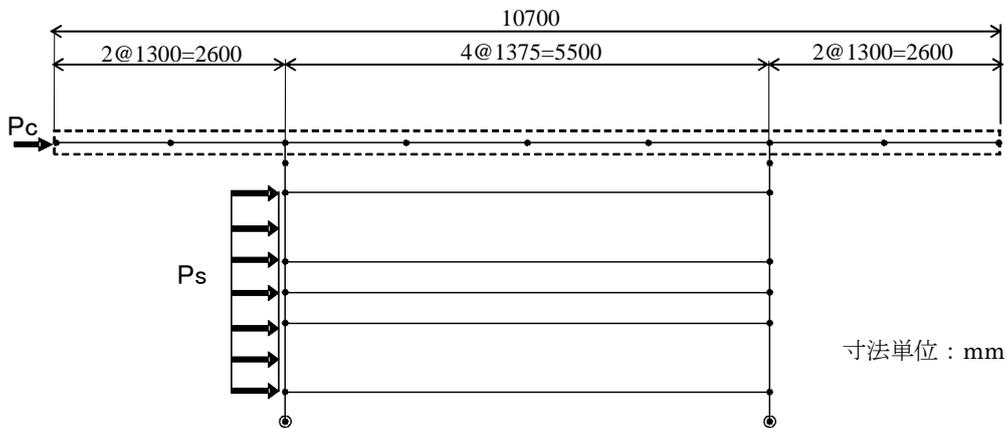
付図-2.25 温度差荷重の概念図

5) 風荷重

a) 載荷方法

床版に作用する風荷重は、床版外縁に等分布線荷重として載荷することを基本とする。

風上側主桁に作用する風荷重は、ウェブ面の垂直補剛材に等分布荷重として載荷する。



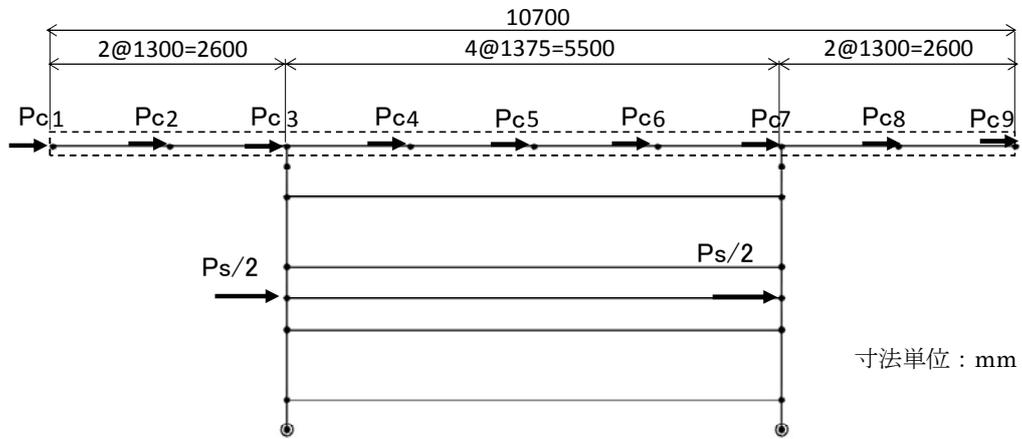
付図-2.26 横断面形状と風荷重の例

b) 橋軸方向の載荷パターン

風荷重は、着目部材力が最も不利になるように載荷する必要があるので、区間ごとに載荷した基本ケースを組み合わせて各部材力が最大・最小となるケースを抽出する。

6) 地震荷重

床版に作用する地震荷重は床版全節点に分担分を載荷し、主桁に作用する地震荷重は各主桁中心に載荷することを基本とする。橋軸方向には全載する。

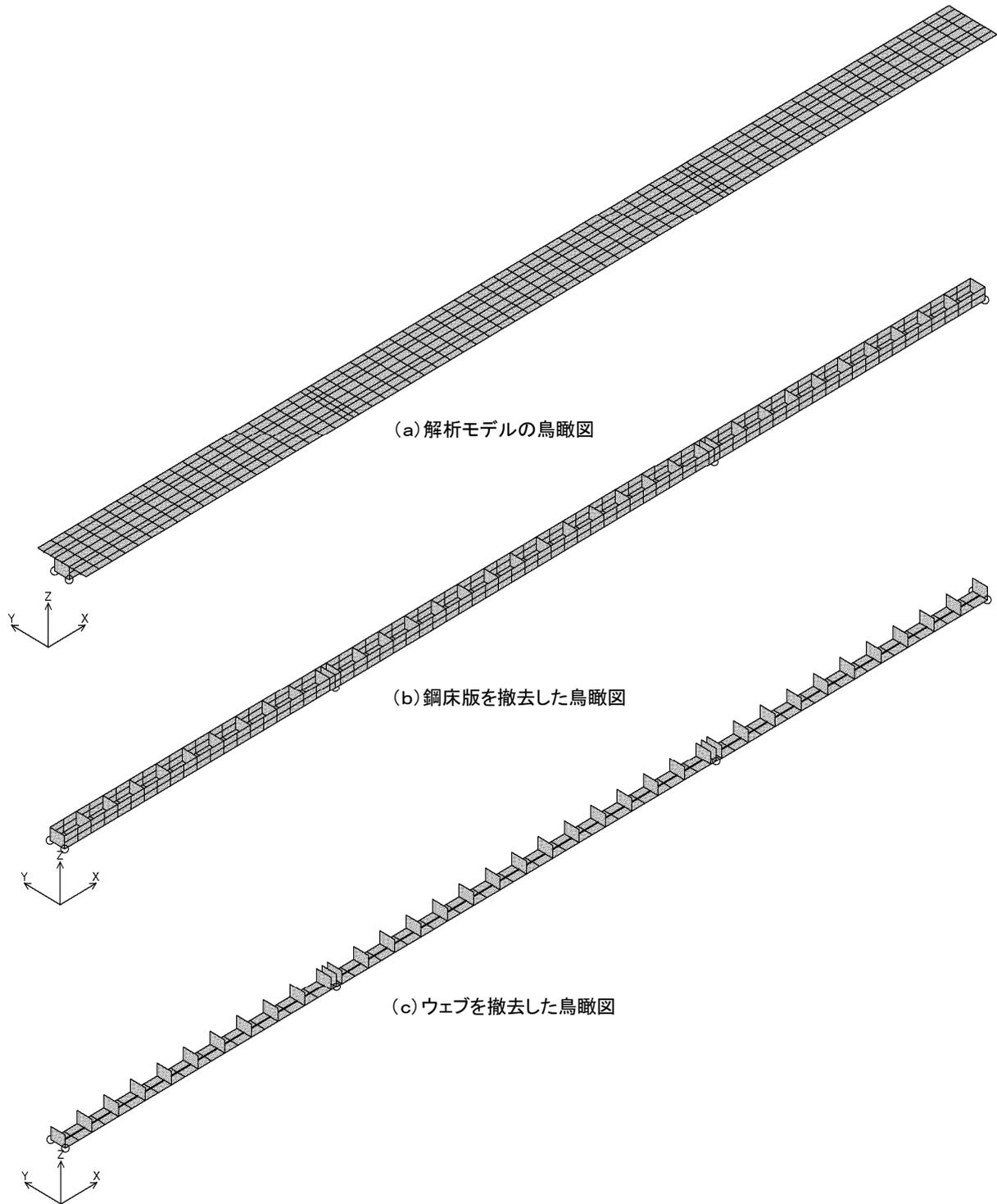


付図-2.27 地震荷重の載荷方法の例

付 2.2 鋼床版連続箱桁橋

(1) 概要

- ①主桁，鋼床版，ダイアフラムなど全ての構成部材を一定せん断流パネルと骨組部材（縁部材）とで全橋を立体的にモデル化する。
- ②せん断遅れの影響が小さい箱桁部分は，簡略化した要素分割でモデル化する。
- ③鋼床版の設計は，別途力学モデルを設定して解析する。



付図-2.28 鋼床版連続箱桁橋の一定せん断流パネル解析モデルの例

(2) モデル化

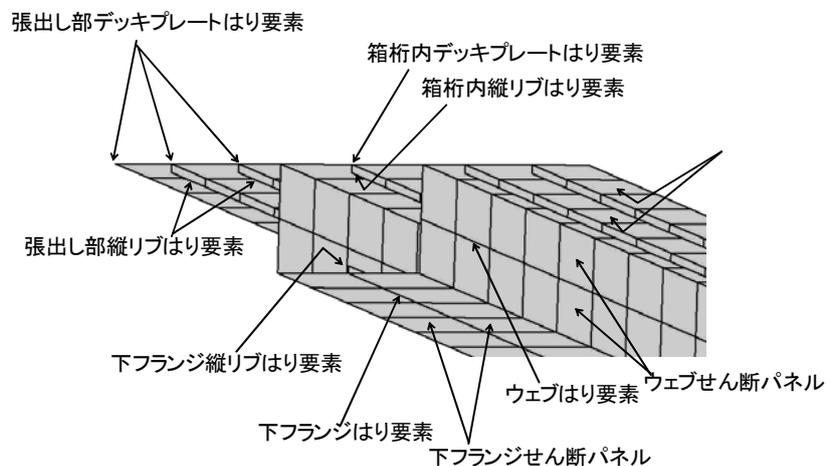
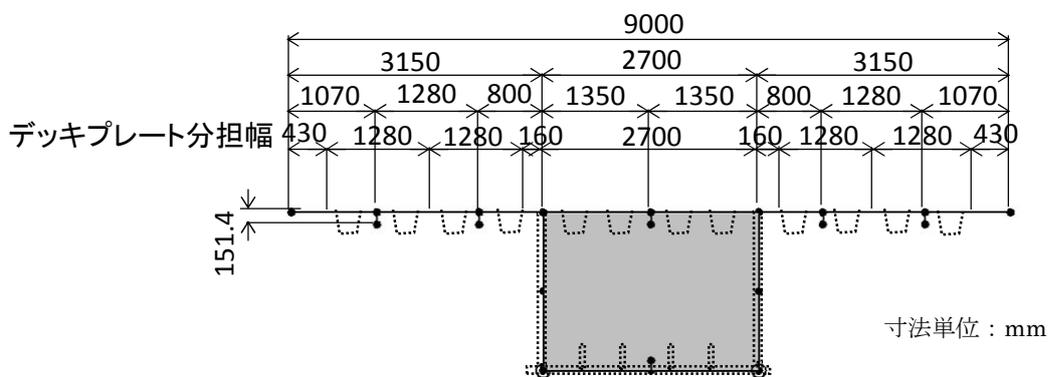
1) 鋼床版

a) モデル化要領

鋼床版を橋軸方向と橋軸直角方向のはり要素（縁部材）で格子状にモデル化して軸方向力と曲げモーメントを受け持たせ、格子の間に一定せん断流パネルを設置してせん断剛性を受け持たせることを基本とする。

縦リブは、デッキプレートの分担幅に存在する本数分を一つにまとめてデッキプレート縁部材位置に偏心させて取り付けることができる。

横リブは、デッキプレートの橋軸直角方向縁部材を合わせて配置するが、その形状はモデル化せず、剛性のみを付加することができる。



付図-2.29 鋼床版のモデル化の例

b) 要素分割

i) 橋軸直角方向

【目的】

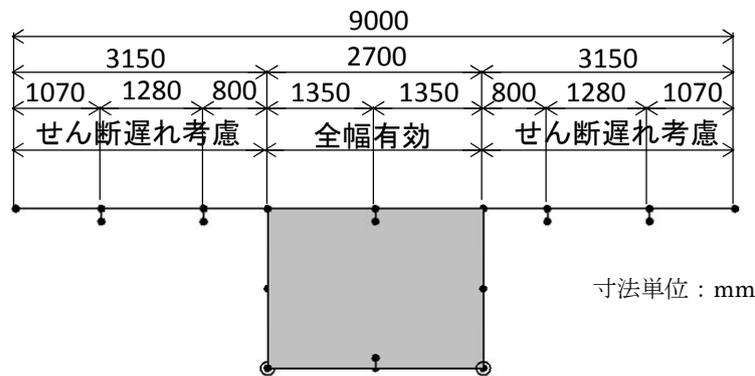
鋼床版成桁における床版のせん断遅れによる有効幅を評価できるように分割する。

【分割例】

せん断遅れが顕著に現れる鋼床版は、せん断遅れを適切に再現できる程度に鋼床版を断面内で分割してモデル化する。せん断遅れの影響については、あらかじめ道示Ⅱ11.3.5のフランジの有効幅の規定を参考にできる。

下図の要素分割例では道示Ⅱ11.3.5の規定によって、箱断面部分は全断面有効で、張り出し部の鋼床版はせん断遅れの影響があることから、箱断面部分は最小の2分割として張り出し部分を2分割以上の目安から3分割とする。

また、道示の有効幅を用いて算出する従来設計と、作用応力度や主桁のたわみが同等程度となることで要素分割の妥当性を確認することができる。



付図-2.30 鋼床版断面の要素分割の例

ii) 橋軸方向

【目的】

主桁作用の曲げモーメント分布により床版に作用する曲げ応力を評価できるように分割する。

【分割例】

橋軸方向の分割は、横リブ配置を最小限の分割とするとともに、それ以上の分割については主桁の要素分割に合わせることを参考にできる

c) 部材剛度

デッキプレートの橋軸方向縁部材の剛度は、デッキプレート分担幅の板断面の断面定数 (A, J, I_y, I_z) とすることを基本とする。

デッキプレートの橋軸直角方向縁部材の剛度は、横リブがある場合は横リブを含めた断面定数とし、横リブがない場合はデッキプレートの断面定数とすることを基本とする。この時、鉛直軸回りの断面二次モーメント I_z については、一定せん断流パネルのせん断変形を拘束しないように値を小さく(例えば 0.000001m^4) することを基本とする。

デッキプレート面に配置する一定せん断流パネルの厚さは、デッキプレート厚とすることを基本とする。

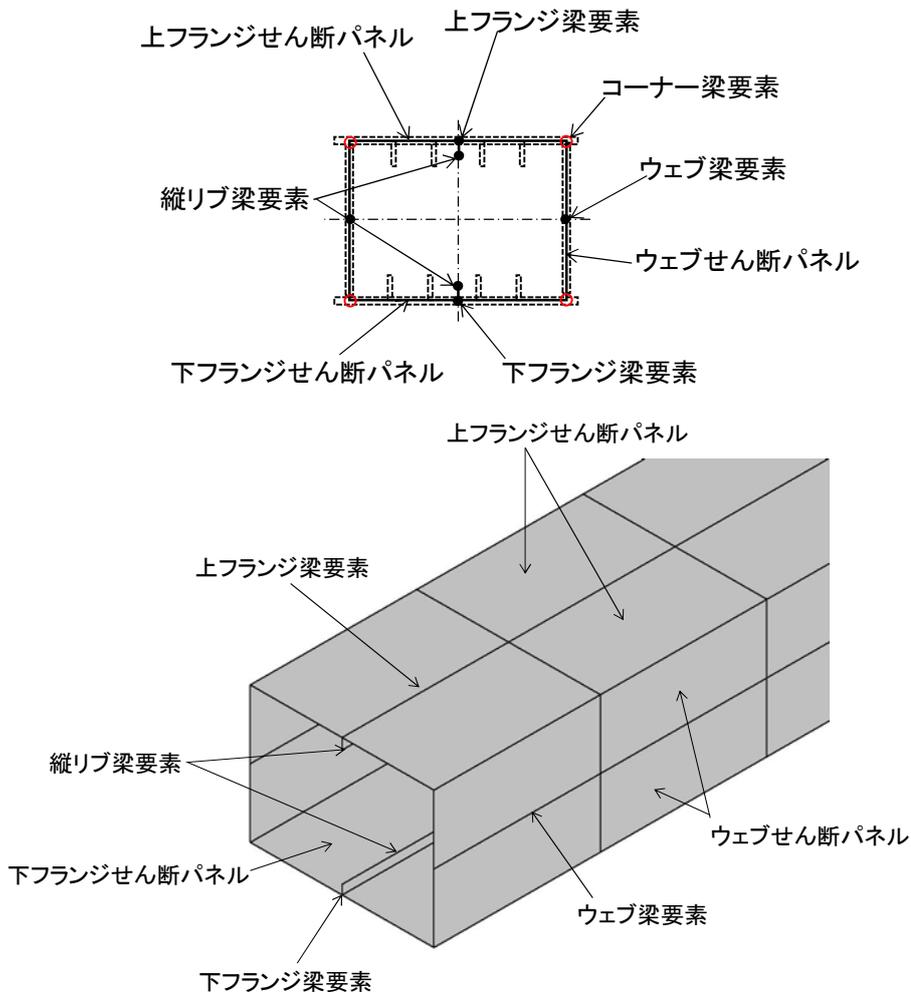
縦リブの橋軸方向縁部材の剛度は、モデル化要領に合わせてデッキプレートの分担幅内に存在する縦リブ剛度の合計とする。縦リブとデッキプレートを繋ぐ鉛直はり部材を配置し、それらに囲まれた空間にせん断剛性の大きな一定せん断流パネルを取り付ける。鉛直はり部材は、一定せん断流パネルのせん断変形を拘束しないように、一定せん断流パネル面内の断面二次モーメントを小さく(例えば 0.000001m^4) して、それ以外の剛性は大きくすることを基本とする。

2) 箱桁

a) モデル化要領

フランジとウェブをそれぞれ一つのはり要素（縁部材）に置き換え、箱断面の角部にはコーナーはり要素を設置し、断面方向にこれらを結ぶはり要素（縁部材）とで格子構造を形成することを参考にできる。この格子構造を縁部材として一定せん断流パネルを格子の間に設置して主桁をモデル化することを基本とする。

縦リブは、フランジに含まれる全ての縦リブを1本のはり要素に代表させて縦リブ重心位置配置し、フランジと縦リブ間には一定せん断流パネルを配置することができる。



付図-2.31 箱桁のモデル化の例

b) 要素分割

i) 橋軸方向

【目的】

主桁の曲げモーメント分布による曲げ応力、およびせん断力によるせん断応力を評価できるように分割する。

【分割例】

箱断面の要素分割は、上記 a) のように箱断面を構成する 4 つの板要素によりモデル化するか、または、せん断遅れの影響が大きい場合は、フランジを 4 分割することを参考にできる。要素分割の目安は、道示の有効幅の規定によってパラメータ b/l との関係参考にすることができる。

橋軸方向の要素分割は、横リブまたは垂直補剛材間隔を目安とすることを基本とする。

ii) 鉛直方向

【目的】

一定せん断流パネルで構成される主桁断面の曲げ剛性が、実際の曲げ剛性と等価となるように分割する。また、主桁の断面内に生じる曲げ応力、およびせん断応力の分布を評価できるように分割する。

【分割例】

付録 2.1 連続合成 I 桁橋の (2) 2) b) ii) 鉛直方向の要素分割を参考にできる。

c) 部材剛度

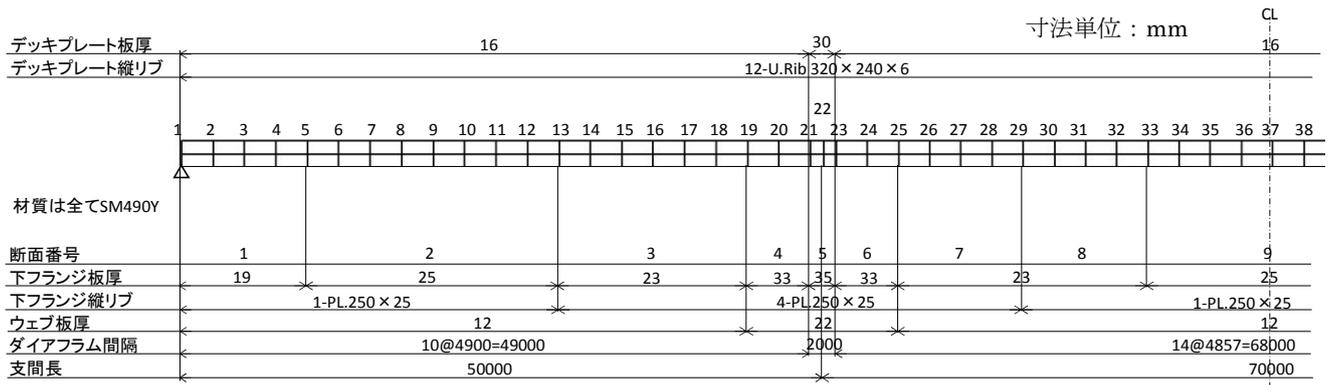
橋軸方向縁部材となるフランジとウェブの剛度は、各板要素の断面定数 (A, J, I_x, I_y) とする。実際の断面変化に合わせて断面を変化させることを基本とする。箱断面のコーナーに設けた橋軸方向縁部材の剛度は、他の部材に影響を与えないように全ての成分を小さく (例えば $A=0.00001\text{m}^2$, $J=I=0.000001\text{m}^4$) 設定することを基本とする。

横リブ、垂直補剛材など橋軸直角方向に配置される縁部材は、各はり要素の断面定数を計算した上で、縁部材としてモデル化することを基本とする。

フランジとウェブ面に配置する一定せん断流パネルの厚さは、それぞれの板厚とすることを基本とする。

縦リブの橋軸方向縁部材の剛度は、モデル化要領に合わせて母材の分担幅内に存在する縦リブ剛度の合計とする。縦リブと母材を繋ぐはり部材を配置し、それらに囲まれた空間にせん断剛性の大きな一定せん断流パネルを取り付ける。繋ぎのはり部材は、一定せん断流パネルのせん断変形を拘束しないように、一定せん断流パネル面内の断面二次モーメントを小さく (例えば 0.000001m^4) して、それ以外の剛性は大きくすることを基本とする。

鋼床版箱桁における例を以下に示す。



付図-2.32 鋼床版箱桁の断面構成図の例

付表-2.3 鋼床版箱桁の板要素の断面定数の例

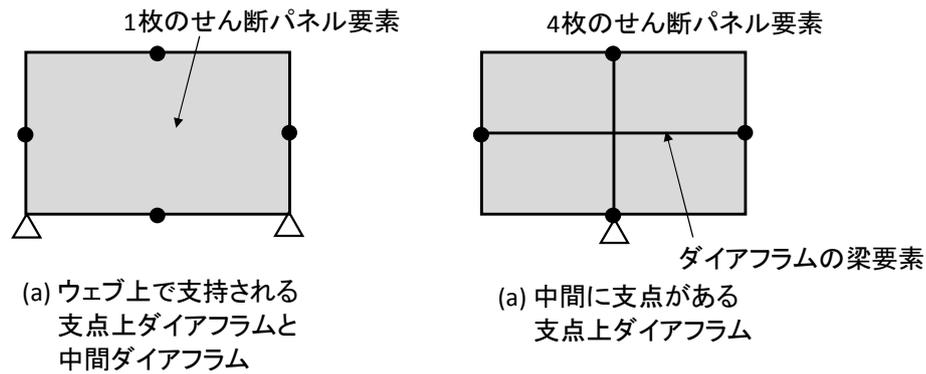
板要素	B(mm)	t(mm)	A(m ²)	J(m ⁴)	I _x (m ⁴)	I _y (m ⁴)
デッキプレート	430 ×	16	0.006880	0.00000059	0.00000015	0.00010601
	1280 ×	16	0.020480	0.00000175	0.00000044	0.00279620
	160 ×	16	0.002560	0.00000022	0.00000005	0.00000546
	2700 ×	16	0.043200	0.00000369	0.00000092	0.02624400
	430 ×	30	0.012900	0.00000387	0.00000097	0.00019877
	1280 ×	30	0.038400	0.00001152	0.00000288	0.00524288
	160 ×	30	0.004800	0.00000144	0.00000036	0.00001024
Uリブ	2-U.Rib 320 × 240 × 6		0.008052	0.00000010	0.00004920	0.00082450
	4-U.Rib 320 × 240 × 6		0.016104	0.00000019	0.00009840	0.00824500
ウェブ	2000 ×	12	0.024000	0.00000115	0.00800000	0.00000029
	2000 ×	22	0.044000	0.00000710	0.01466667	0.00000177
下フランジ	2950 ×	19	0.056050	0.00000674	0.00000169	0.04064793
	2950 ×	25	0.073750	0.00001536	0.00000384	0.05348411
	2950 ×	23	0.067850	0.00001196	0.00000299	0.04920539
	2950 ×	33	0.097350	0.00003534	0.00000883	0.07059903
	2950 ×	35	0.103250	0.00004216	0.00001054	0.07487776
L.Rib	1-PL. 250 × 25		0.006250	0.00000130	0.00003255	0.00000033
	4-PL. 250 × 25		0.025000	0.00000521	0.00013021	0.00911250

3) ダイアフラム

a) モデル化要領

充腹板方式の中間ダイアフラムと、ウェブ上で支持される支点上ダイアフラムの場合は、8 節点の一定せん断流パネル 1 枚でモデル化できる。ダイアフラムの中間に支点がある場合は、下図のように 4 枚の一定せん断流パネルでモデル化することを基本とする。

中間ダイアフラムがラーメン方式の場合は、矩形ラーメンの骨組の剛度を橋軸直角方向縁部材の剛度に組み込むことを基本とする。

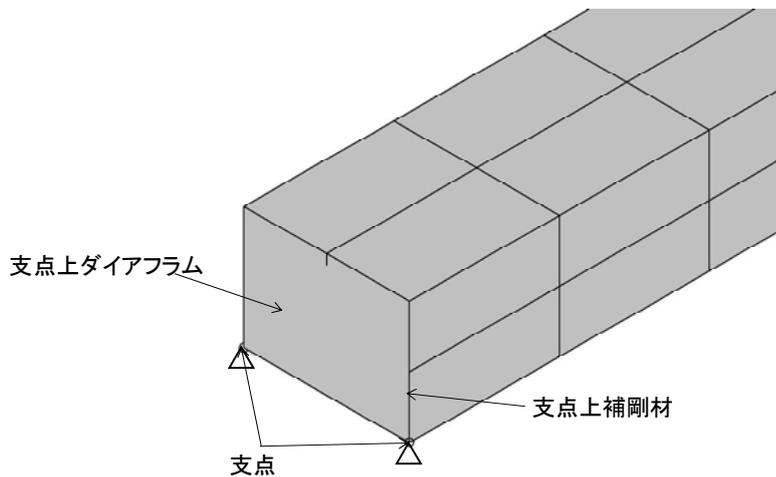


付図-2.33 ダイアフラムのモデル化の例

4) 支点

a) モデル化要領

支点上補剛材の直下で、格子桁モデルと同様に支持条件を与えることを基本とする。



付図-2.34 支点のモデル化の例

(3) 荷重

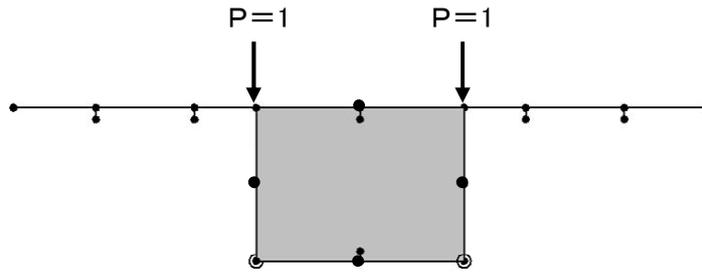
1) 鉛直荷重

a) 死荷重

死荷重を、一定せん断流パネルモデルに固定載荷することを基本とする。

従来設計と同様に、主構造による荷重分配効果のみを考慮する場合、鋼床版上に載荷される荷重についても、直接に床版要素に載荷するのではなく、主桁ウェブ上端を載荷点として作成した影響線を用いて各荷重に対する着目量（変位，断面力）を算出する。

一方、床版による荷重分配効果も考慮する場合、床版の橋軸方向縁部材を載荷点として作成した影響線を用いて計算することを基本とする。



付図-2.35 影響線作成のための単位荷重載荷点の例

b) 活荷重

i) L 荷重

B 活荷重 L 荷重は，主桁ウェブ上端に影響線載荷することを基本とする。つまり，主桁ウェブ上端に単位荷重を載荷して作成した影響線を用いて，着目量（変位，断面力）が最大・最小となるように有効幅員の中で移動させた載荷状態に対して影響線体積を積分して着目量を算出する。

ii) 疲労照査の T 荷重

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。

従来設計と同様に，主構造による荷重分配効果のみを考慮する場合，主桁ウェブ上端を載荷点として作成した影響線を用いて計算することを基本とする。

一方，床版による荷重分配効果も考慮する場合，床版の橋軸方向縁部材を載荷点として作成した影響線を用いて計算することを基本とする。

2) 風荷重

a) 載荷方法

橋面上に作用する風荷重は，鋼床版外縁に等分布線荷重として載荷することを基本とする。

風上側主桁に作用する風荷重は，ウェブ面の垂直補剛材に等分布荷重として載荷する。

b) 橋軸方向の載荷パターン

風荷重は，着目部材力が最も不利になるように載荷する必要があるので，区間ごとに載荷した基本ケースを組み合わせて各部材力が最大・最小となるケースを抽出する。

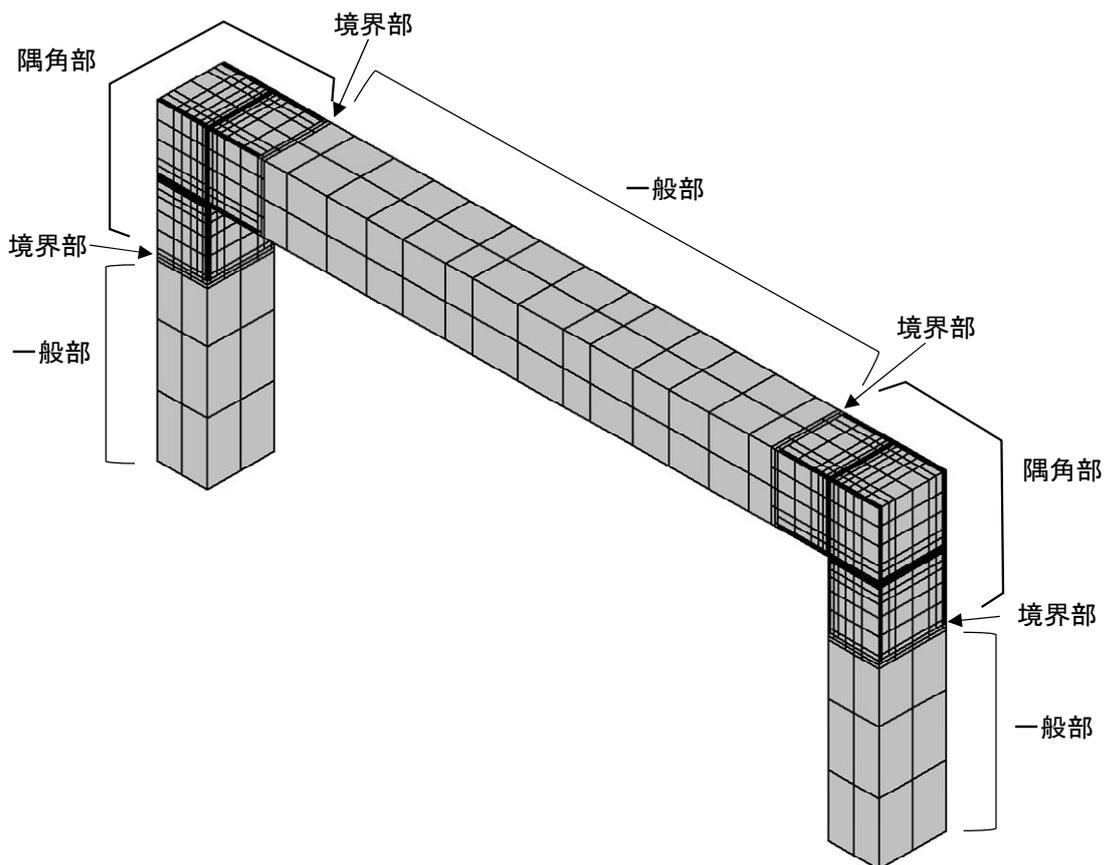
3) 地震荷重

橋面上に作用する地震荷重は鋼床版全節点に分担分を載荷し，主桁に作用する地震荷重は各主桁ウェブ中心に載荷することを基本とする。橋軸方向には全載する。

付録 2.3 鋼製橋脚

(1) 概要

- ① 鋼製橋脚の柱、隅角部、横はりなど全ての構成部材を骨組部材（縁部材）と一定せん断流パネルとで立体的にモデル化する。
- ② せん断遅れの影響が小さい一般部は簡略化した要素分割でモデル化し、隅角部は文献 付 2.6)を参考にして詳細に要素分割することができる。



付図-2.36 鋼製橋脚の一定せん断流パネル解析モデルの例

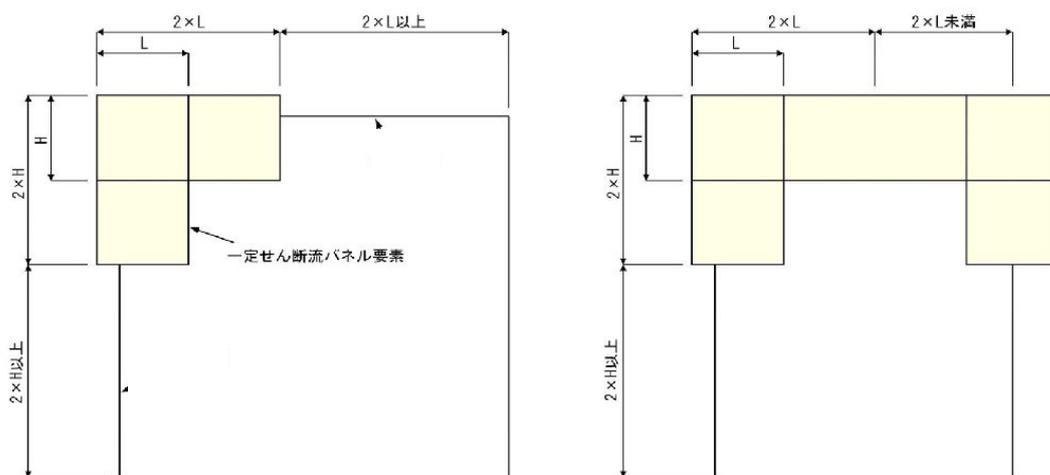
(2) モデル化

1) 隅角部の範囲

a) 隅角部の範囲

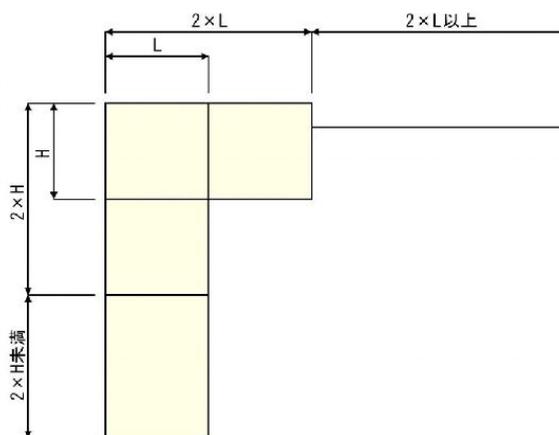
i) 着目隅角部より荷重（上部工反力）載荷点が十分に離れている場合

- ・ 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。
- ・ 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。
- ・ 横はり高さが低い場合は、柱全体を一定せん断流パネルモデル範囲とする。



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 $\times 4$

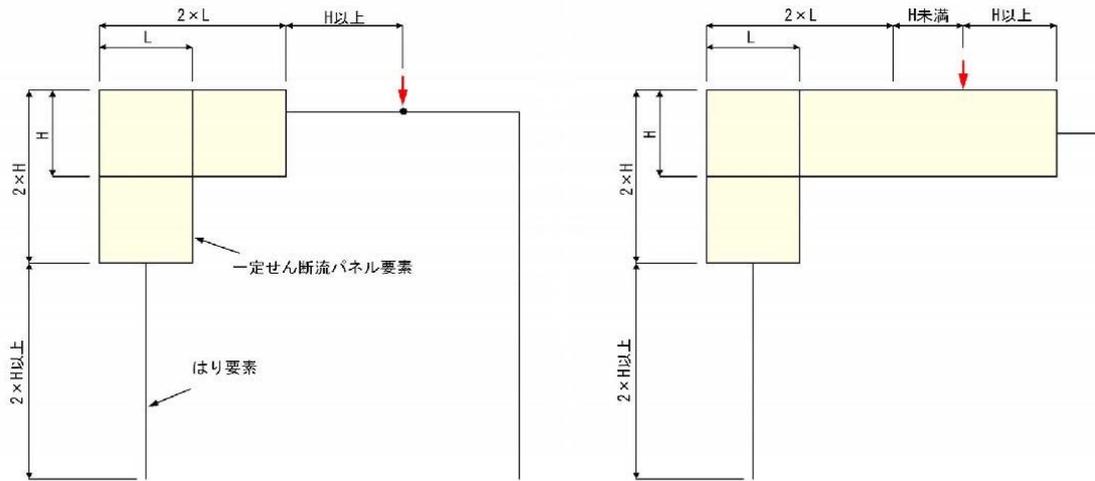


c) 橋脚高 \leq 横はり高 $\times 4$

付図-2.37 隅角部のモデル化範囲 (その1) 付 2.6)

ii) 着目隅角部と荷重載荷点が近い場合

- ・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、横はり方向は柱幅の2倍以上とする。
- ・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。



a) 橋脚高 $\times 2$ +横はり高
 \leq 柱幅 \sim 上部工反力位置

b) 橋脚高 $\times 2$ +横はり高
 \geq 柱幅 \sim 上部工反力位置

付図-2.38 隅角部のモデル化範囲 (その2) 付2.6)

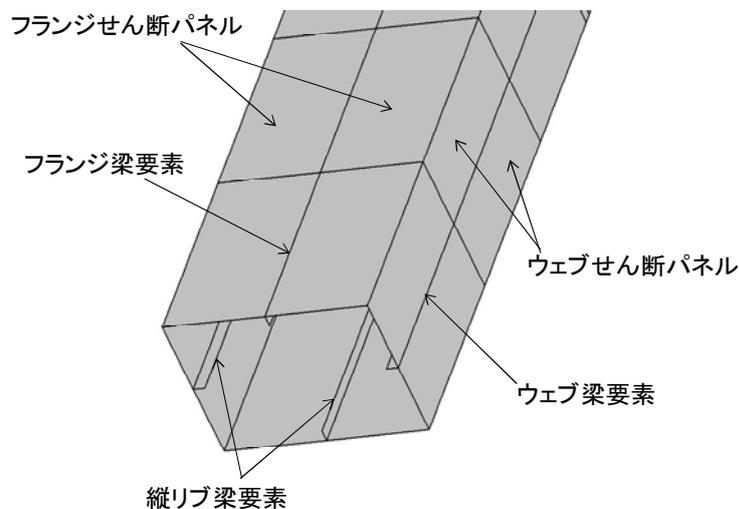
2) 一般部

a) モデル化要領

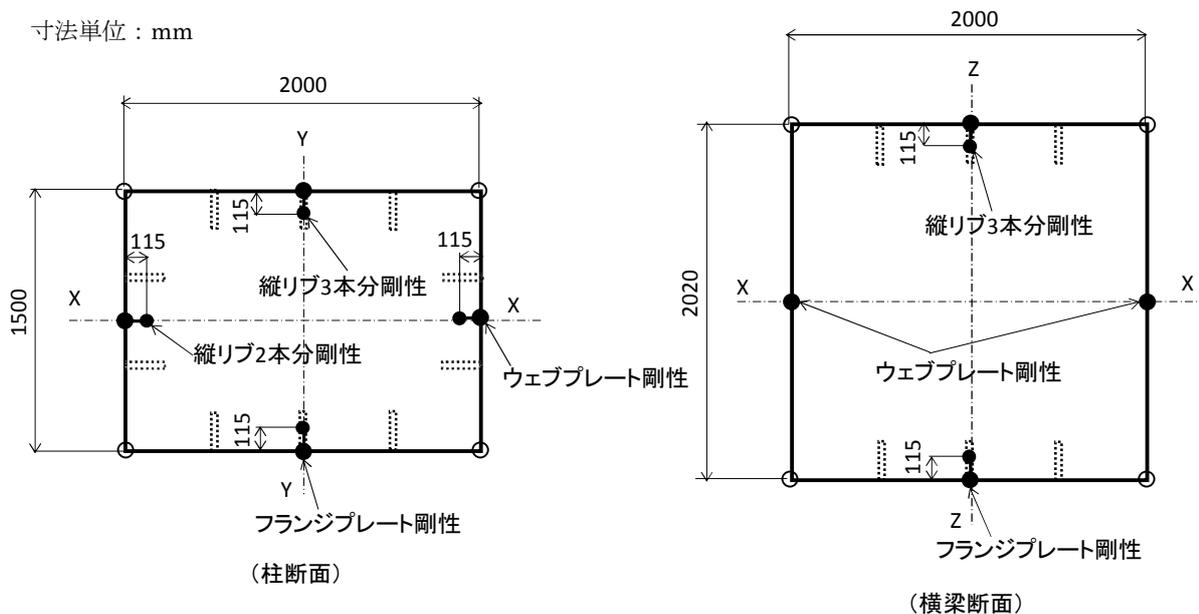
フランジとウェブをそれぞれ一つのはり要素（縁部材）に置き換え，箱断面の角部にはコーナーはり要素を設置し，断面方向にこれらを結ぶはり要素（縁部材）とで格子構造を形成することを参考にできる．この格子構造を縁部材として一定せん断流パネルを格子の間に設置して主桁をモデル化することを基本とする．

縦リブは，フランジおよびウェブに含まれる全ての縦リブを1本のはり要素に代表させて縦リブ重心位置に配置して良く，フランジと縦リブ間には一定せん断流パネルを配置する．

荷重が載荷されない中間ダイアフラムは，8節点の1枚の一定せん断流パネルでモデル化し，ダイアフラムの中に支点がある場合は，支点直下に縁部材を配置して複数枚の一定せん断流パネルでモデル化する．



付図-2.39 一般部断面のモデル化要領



付図-2.40 一般部断面のモデル化の例

b) 要素分割

i) 橋軸方向

【目的】

柱部，および横はり部の曲げモーメント分布による曲げ応力，およびせん断力によるせん断応力を評価できるように分割する。

【分割例】

箱断面の要素分割は，上記 a) のように箱断面を構成する 4 つの板要素によりモデル化するか，または，せん断遅れの影響が大きい場合は，フランジを 4 分割することを参考にできる。要素分割の目安は，道示の有効幅の規定によってパラメータ b/l との関係を参考にすることができる。

橋軸方向の要素分割は，ダイヤフラムまたは横リブ間隔を目安とする。

ii) 鉛直方向

【目的】

一定せん断流パネルで構成される柱部および横はり部断面の曲げ剛性が，実際の曲げ剛性と等価となるように分割する。また，柱部および横はり部の断面内に生じる曲げ応力，およびせん断応力の分布を評価できるように分割する。

【分割例】

付録 2.1 連続合成 I 桁橋の (2) 2) b) ii) 鉛直方向の要素分割を参考にできる。

c) 部材剛度

橋軸方向縁部材となるフランジとウェブの剛度は，各板要素の断面定数 (A, J, I_x, I_y) とする。実際の断面変化に合わせて断面を変化させる。箱断面のコーナーに設けた橋軸方向縁部材の剛度は，他の部材に影響を与えないように全ての成分を小さく $(A=0.00001\text{m}^2, J=I=0.000001\text{m}^4)$ 設定する。

横リブや補剛材など橋軸直角方向に配置される縁部材は，各はり要素の断面定数を計算した上で，縁部材としてモデル化する。

ダイアフラム位置の橋軸直角方向の縁部材は、母材の分担幅の断面定数とする。

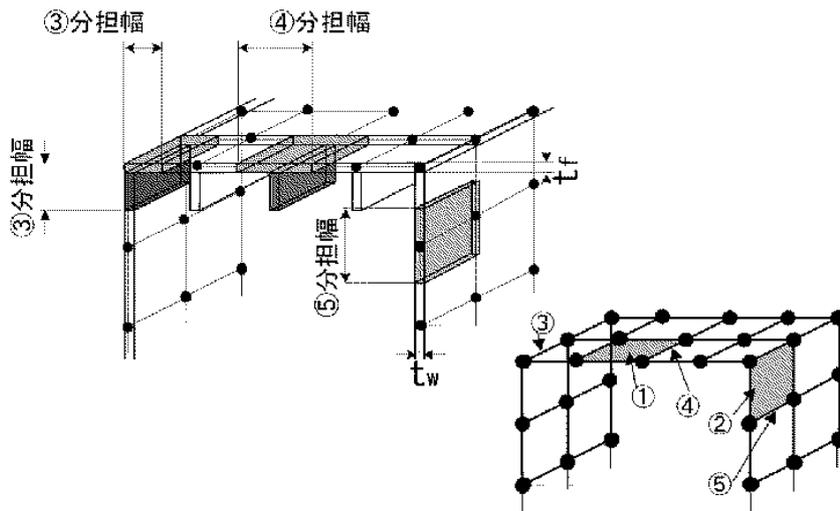
フランジとウェブ面に配置する一定せん断流パネルの厚さは、それぞれの板厚とする。

縦リブの橋軸方向縁部材の剛度は、モデル化要領に合わせて母材の分担幅内に存在する縦リブ剛度の合計とする。縦リブと母材を繋ぐはり部材を配置し、それらに囲まれた空間にせん断剛性の大きな一定せん断流パネルを取り付ける。繋ぎのはり部材は、一定せん断流パネルのせん断変形を拘束しないように、一定せん断流パネル面内の断面二次モーメントを小さく(0.000001m^4)して、それ以外の剛性は大きくする。

3) 隅角部

a) モデル化要領

- ・隅角部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 (①, ②) に置換える。
- ・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二次モーメント、ウェブ面外の断面二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の面外の断面二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の面外の断面二次モーメントを考慮する。



付図-2.41 隅角部断面のモデル化の例^{付2.6)}

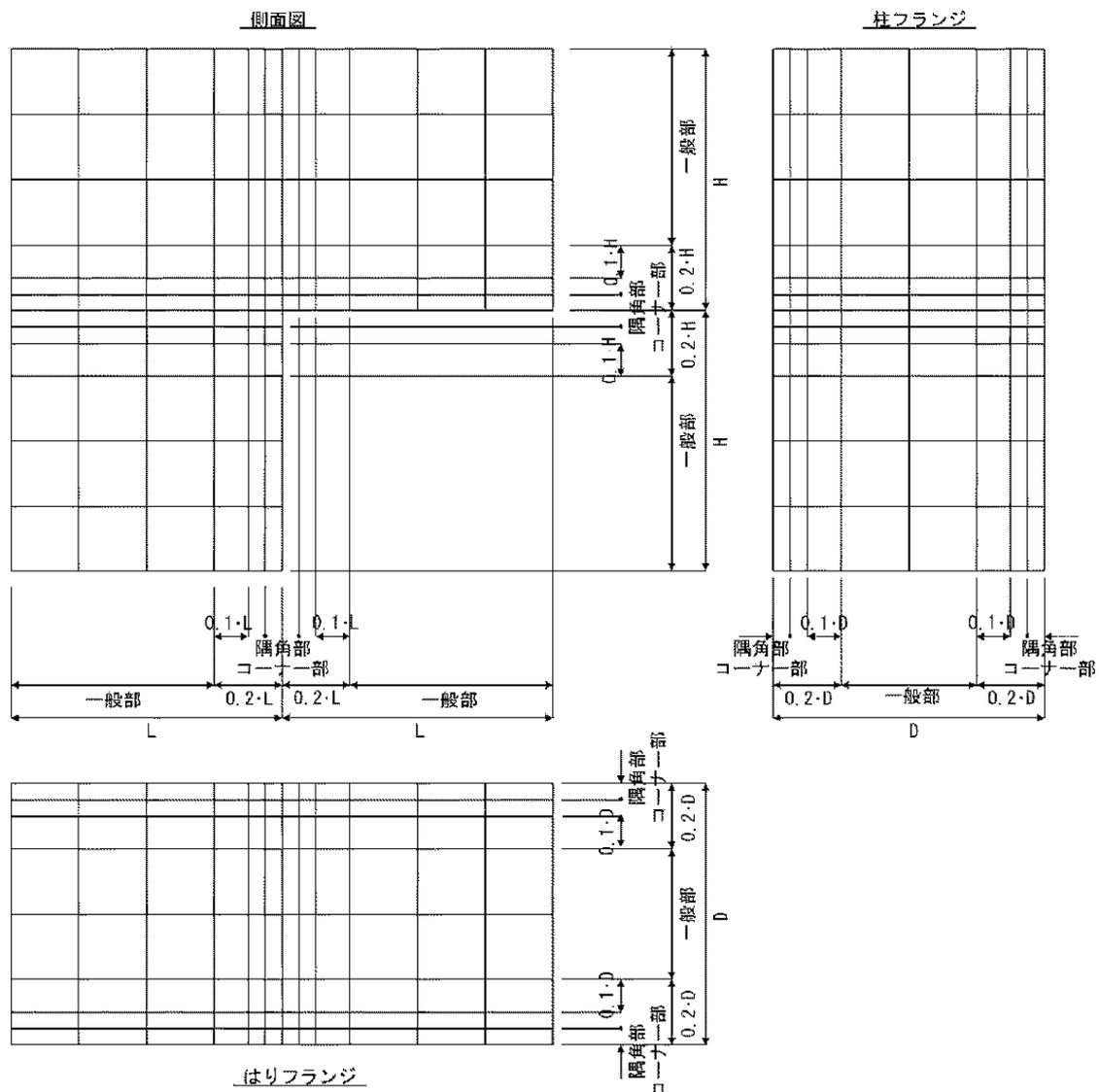
b) 要素分割

【目的】

隅角部におけるフランジのせん断遅れを評価できるように分割する。

【分割例】

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



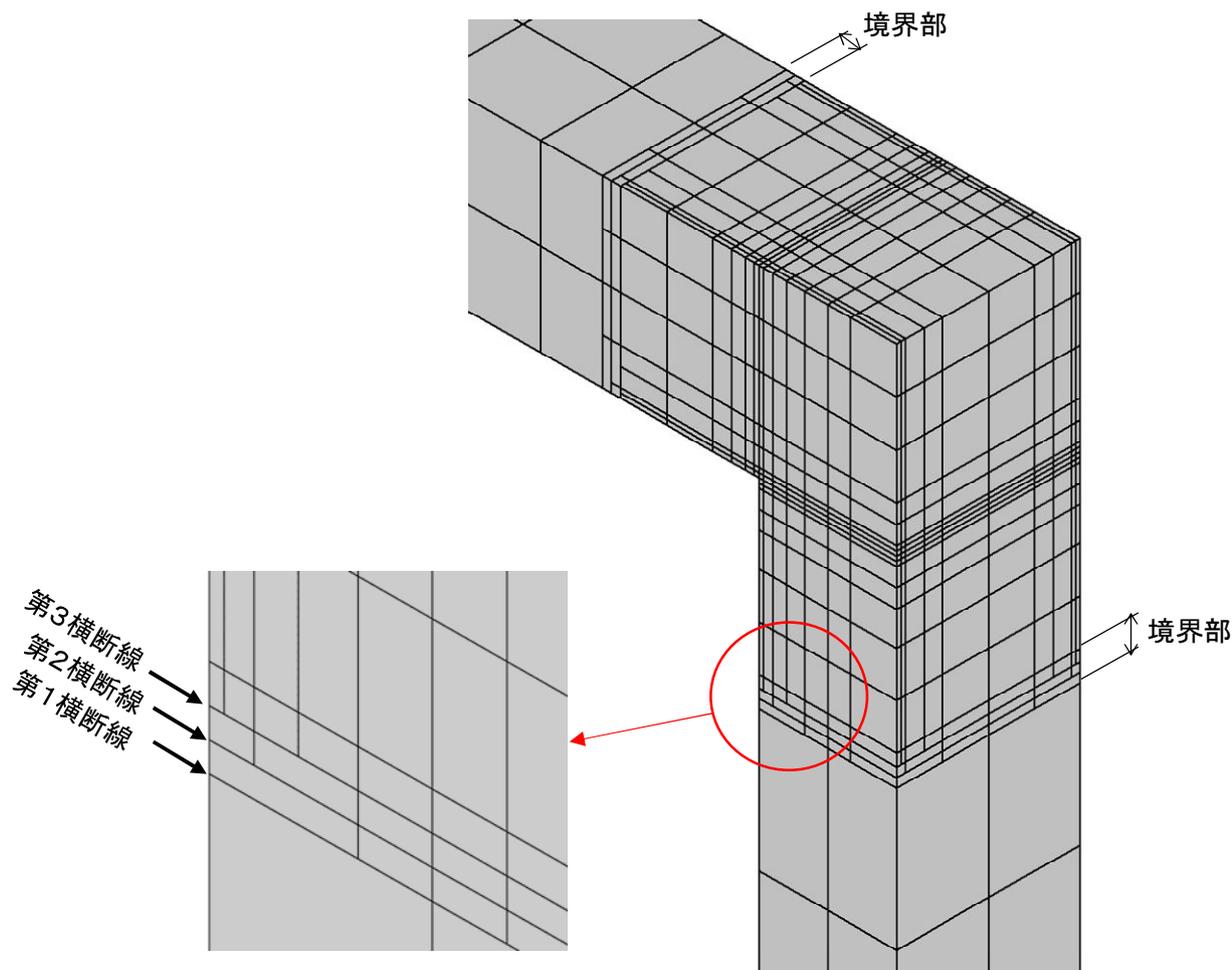
付図-2.42 隅角部の要素分割方法の例^{付2.6)}

4) 一般部と隅角部の境界部

a) モデル化要領

一般部の粗い要素分割から隅角部の細かな要素分割へ移行する境界部では、下図のように要素分割を行う。一定せん断流パネルの1辺の縁部材においては、中間に1個の節点を追加することができるので、一般部の要素分割を、1横断線目で2分割、2横断線目で4分割、3横断線目で8分割と細分化することができる。

境界部は、隅角部から離れた位置にありせん断変形の影響が少ないことから、平面保持の仮定が成り立つものとする。



付図-2.43 一般部と隅角部の境界部の例

b) 要素分割

【目的】

隅角部と一般部の両者の応力伝達がスムーズに行えるように分割する。

【分割例】

板幅方向の要素分割は上図の通りで、一般部の要素分割から隅角部の要素分割へ漸次変化させる。

境界部の母材面内の剛性は十分に大きくするので、横断線の間隔は小さいほうが有利となり、100 mm 程度が目安となる。

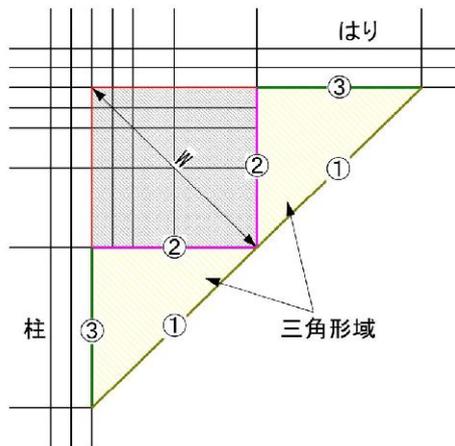
c) 部材剛度

横断線の縁部材剛度は、母材面内では十分に大きくし、母材面外では板の剛度とする。

部材軸方向の縁部材剛度は、中央の縁部材については一般部板要素の剛度を使用し、それ以外はダミーとして小さな値とする。

5) フィレット構造

フィレット構造を一定せん断流パネルによりモデル化する場合、曲線を廃して直線形状を近似しても下図のような三角形域ができる。しかし、一定せん断流パネル解析では三角形要素を定義できないため、このような箇所をはり要素 (①, ②, ③) とパネル要素を組み合わせでモデル化する。なお、各はり要素の部材剛度は、以下に示すように分担幅を定義して設定する。



付図-2.44 フィレット構造の要素分割法^{付2.6)}

・部材①のモデル化

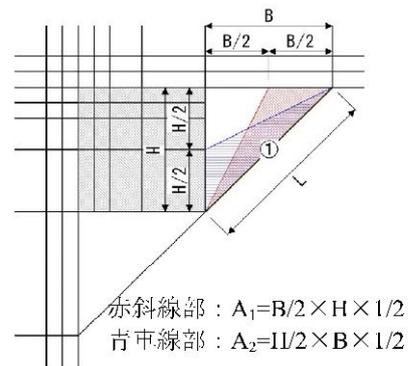
右図に示すような赤斜線部と青斜線部を考え、この斜線部の合計面積が部材①方向の面積と等価になる幅をはり要素の分担幅と考え、部材の剛度を算出する。

分担幅： $(A_1 + A_2)/L$

フィレット構造板厚： t

断面積： $(A_1 + A_2)/L \times t$

断面二次モーメント： $(A_1 + A_2)/L \times t^3/12$



赤斜線部： $A_1=B/2 \times H \times 1/2$
 青斜線部： $A_2=1/2 \times B \times 1/2$

付図-2.45 部材①のモデル化^{付2.6)}

・部材②のモデル化

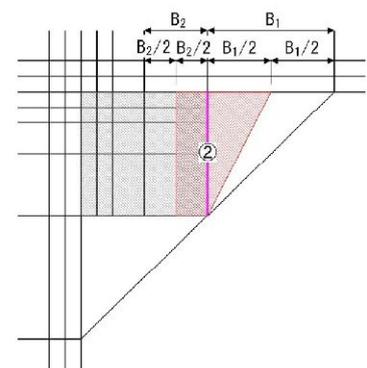
右図に示すような赤斜線部を考え、この斜線部の面積が部材②方向の面積と等価になる幅をはり要素の分担幅と考え、部材の剛度を算出する。

分担幅： $(B_1/2 + B_2)/2$

フィレット構造板厚： t

断面積： $(B_1/2 + B_2)/2 \times t$

断面二次モーメント： $(B_1/2 + B_2)/2 \times t^3/12$



付図-2.46 部材②のモデル化^{付2.6)}

・部材③のモデル化

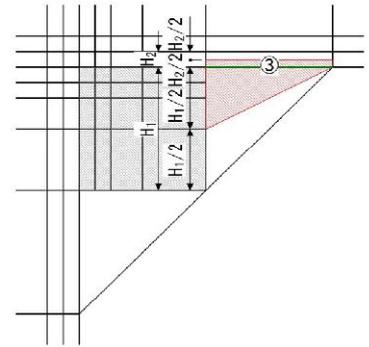
右図に示すような赤斜線部を考え、この斜線部の面積が部材③方向の面積と等価になる幅をはり要素の分担幅と考え、部材の剛度を算出する。

分担幅： $(H_1/2 + H_2)/2$

フィレット構造板厚： t

断面積： $(H_1/2 + H_2)/2 \times t$

断面二次モーメント： $(H_1/2 + H_2)/2 \times t^3/12$



付図-2.47 部材③のモデル化^{付2.6)}

6) 支点条件

柱基部の完全固定の条件を再現するために、脚柱の縁部材下端の境界条件を6成分とも固定とする。

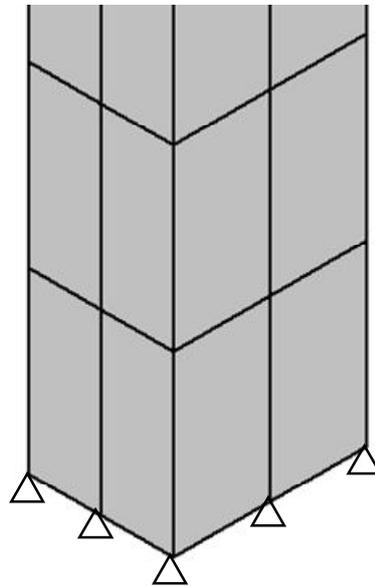


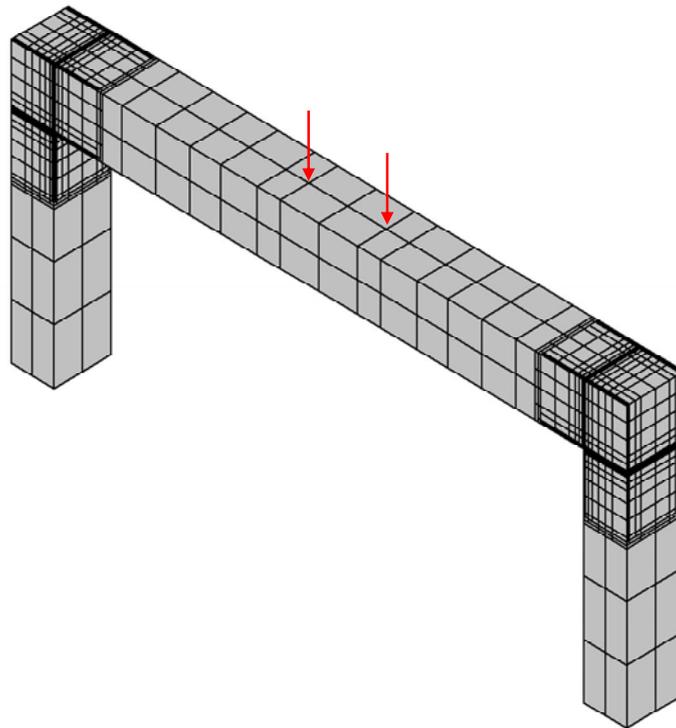
図-2.48 柱基部の支点条件

(3) 荷重

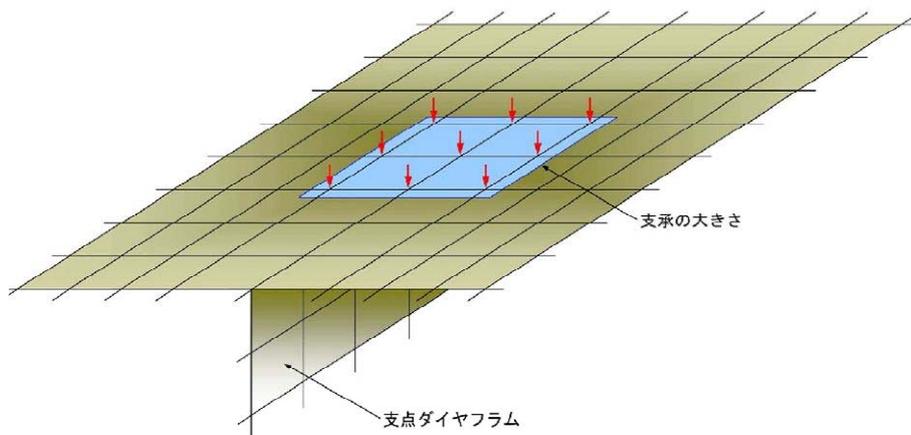
1) 上部工反力

・一般部に載荷する場合、下図のように支点となる節点に集中荷重として載荷する。

・隅角部に含まれる範囲に支点がある場合は，下図の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．



(a)一般部の支点



(b)隅角部の支点

付図-2.49 支点部の荷重載荷方法^{付2.6)}

2) 橋脚に作用する荷重

橋脚自重，充填コンクリート，根巻きコンクリートなどの死荷重，橋脚に作用する風荷重，地震荷重は，橋脚の節点に分散させて載荷する．

【付録2 参考文献】

- 付 2.1) 中井博, 北田俊行: 鋼橋設計の基礎, 1992.5, 共立出版株式会社
- 付 2.2) E.Reissner: Analysis of Shear Lag in Box Beam by Principle of Minimum Potential Energy, Quarterly of Applied Mechanics, Vol.4, No.4, pp.268-278, 1946.
- 付 2.3) H.Nakai and C.H.Yoo: Analysis and Design of Curved Steel Bridges, McGraw-Hill, New York, 1988.
- 付 2.4) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2012.3
- 付 2.5) 建設省道路局国道課 監修: 鋼道路橋設計ガイドライン (案), 1998.5
- 付 2.6) 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