

鋼方杖ラーメン橋の隅角部形状の検討

播 本 章 一¹⁾ 中 村 浩 志²⁾
梶 山 昭 克³⁾ 大 西 敏 也⁴⁾

周知のとおり、鋼方杖ラーメン橋の隅角部の形状の選定は、設計上あるいは製作上重要な問題である。しかし、実際によく用いられている形状について、具体的に数値計算を行って比較検討した例はみあたらない。本報告は実際の形状を基にして、3種類4タイプのモデルを選定し、有限要素法を用いて腹板やフランジあるいは、割込みフランジの応力分布や応力の流れを比較し、隅角部のより適切な構造形状について検討したものである。

同時に、一部のモデルについて3次元の立体的な有限要素法解析を行って、わん曲フランジの応力分布を求め、わん曲フランジの有効幅の算定に対してBleichの式がよく一致することを確かめ、わん曲フランジの補強リブの効果などに考察を加えたものである。

まえがき

方杖ラーメン橋は、中規模の橋梁形式として、あるいは、山間部で中間橋脚が設けられない場合や、景観美が要求される場合によく用いられている。

方杖ラーメン橋は、隅角部の構造形状の選定が設計、あるいは製作上重要な問題の一つである。通常、隅角部の計算方法としては、隅角部を曲りはりと見なして、Bleichの式¹⁾や大野式²⁾を用いることが多い。これらの式は簡便であるが、かなりの仮定があって、実際の応力状態が一致するかどうか問題があり、また、局所的な応力分布なども把握できない。

このような構造物の応力の分布状態を直接求める方法として、有限要素法(FEM)がよく用いられる。しかし、隅角部の設計にFEMを手軽に利用するというわけにはいかない。

以上の状況により、一般に隅角部の設計方法としては、上記のBleichの式や大野式を用いて断面を決め、必要に応じてFEMによって安全性を確認している場合が多いようである^{3)~5)}。また、文献5)では実施設計にあたって数種の構造形式の模型による光弾性試験を行い、FEMを用いて実験結果を確認している。しかし、実際の構造物における構造形式の応力状態について比較検討したり、3次元の立体的な有限要素法解析を行って、フランジの応力分布などについて研究した例はないようである。

本報告は、数種の構造形式についてFEMを用いて数値計算を行い、応力状態を比較検討することによって、隅角部のより適切な構造形を模索しようとするものである。

なお、本検討に用いた橋梁の規模としては、橋長が80m、脚の下端における支承間距離が50m程度のものを想定し、主構についてはI断面形式を対象とした。

1. 隅角部の形式

方杖ラーメン橋の隅角部の形式は種々考えられるが、応力集中を避けるために、円弧状のわん曲フランジを用いたものが多い^{3)~6)}。鈍角側(中央径間側)は断面力が大きく、フランジ力をはりから脚へ円滑に伝達できるように、比較的大きな曲率半径ではりの下フランジと脚のフランジを連続させている。鋭角側(側径間側)も同じようにフランジを連続させると、やはり曲率半径をある程度大きくする必要がある。

しかし、このような場合、隅角部の両側で、はり高さを同一にすると、脚を横断する下フランジ方向の割込みフランジがはりの下フランジと同じ位置に配置できなくなり、図-1(a)に示すように下フランジより少しずれたところに補剛材を設ける構造となる。

また、わん曲フランジには補強リブを用いて変形を防止するのが一般的であるが、補強リブの間隔や効果について検討した例は見当たらないようである。

フランジを直線状に交差させた形式は、主構が箱型断面の場合に用いられた例はあるが、一般的には非常に少なく、特に、I断面の場合は皆無である。

図-1(c)のように、下フランジ方向の割込みフランジをはりの下フランジに連続させた構造は、隅角部の応力の流れに合った形状であるが、実際に使用された例は比較的少ないようである。

1)大阪工場副工場長

2)設計部次長

3)設計部東京設計課長

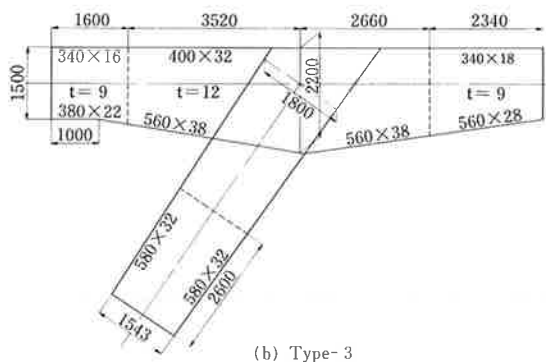
4)設計部大阪設計課

表-1 解析モデル

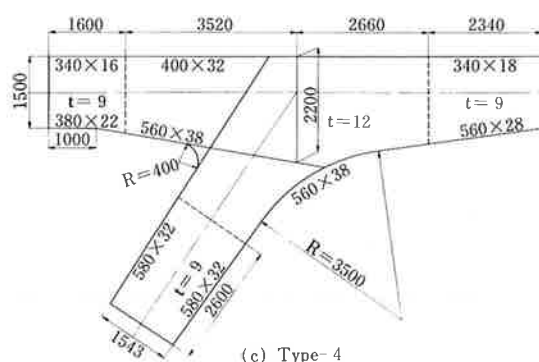
	Type-1	Type-2	Type-3	Type-4
はり高	一定 (h=1700)	一定 (h=1700)	変化させる 端部 1500 隅角部 2200	変化させる 端部 1500 隅角部 2200
隅角部の構造	曲線状のわん曲フランジ 鈍角側 R=3500 鋭角側 R=950	曲線状のわん曲フランジ 鈍角側 R=3500 鋭角側 R=950	直線状に交差	鈍角側 わん曲フランジ R=3500 鋭角側 円弧状のリブプレート R=400
解析の構造系	立体 (3次元)	立体 (3次元)	平面 (2次元)	平面 (2次元)
部材の要素				
はりの上フランジ	線材	線材	線材	線材
腹板(はり、脚)	面材	面材	面材	面材
はりの下フランジ	面材	面材	線材	線材
脚のフランジ	面材	面材	線材	線材
腹板の補剛材	一部線材として考慮	考慮せず	考慮せず	考慮せず
わん曲フランジの補剛リブ	線材	考慮せず	——	考慮せず
荷重ケース	曲げモーメント最大	曲げモーメント最大	曲げモーメント最大	曲げモーメント最大
概略形状	はりとの脚の交差角はすべて同じ			



(a) Type-1、Type-2



(b) Type-3



(c) Type-4

図-1 構造モデルの形状

2. 検討内容

方杖ラーメン橋の隅角部の応力分布に影響を与える要因としては、①隅角部の形状、すなわち、曲線状のわん曲フランジを用いるか、直線状に交差させるか、②わん曲フランジの半径、③はり脚の交差角、④断面力の方向や種類、⑤わん曲フランジの補強リブ、⑥割込みフランジの配置方法、などがある。今回の検討では、おもに①、⑤、および⑥に着目して、次の項目について比較検討した。

- a) 方杖ラーメン橋の隅角部の形状と応力分布
- b) 割込みフランジの配置方法と応力分布
- c) わん曲フランジの補強リブの効果と有効幅

3. 構造モデルと解析方法

計算に用いたモデルは、実際によく用いられている構造を参考にして、表-1に示すタイプとした。すなわち

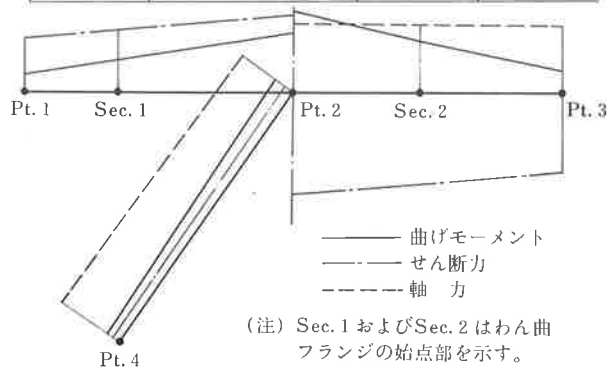
- ① Type-1：はり高を隅角部の両側で同一とし、隅角部には両側とも曲線状のわん曲フランジを用いた形式〔図-1(a)〕。
 - ② Type-2：Type-1において、腹板の補剛材やわん曲フランジの補強リブを取り除いて、はりおよび脚とも腹板とフランジのみで構成した構造〔図-1(a)〕。
 - ③ Type-3：隅角部付近ではり高を若干高くして、はり脚のフランジを直線的に交差させた形式〔図-1(b)〕。
 - ④ Type-4：Type-3において、鈍角側に曲線状のわん曲フランジを用い、鋭角側には比較的半径の小さいリブプレートを用いた形式〔図-1(c)〕。
- の4タイプを用いた。

FEMを用いて数値計算する場合、構造物全体を計算の対象とすると、節点数が多くなり、実質上あまり意味がない。そこで、今回の場合は、隅角部を中心にして、はり、脚とも対傾構1パネル分を対象とした。断面力は隅角部における曲げモーメントが最大となる状態を考え、表-2に示す値を用いた。隅角部の断面は、Type1、2、および4については曲がりはりとして計算したが、Type-3は曲がりの影響を考慮しない通常のはりとした。

荷重の載荷方法や支点条件などは種々考えられるが、実際の構造系を反映させ、かつ、解析を容易にするために、はりおよび脚の端部境界線上の節点を支点とし、ラーメン橋全体をフレーム構造として計算した際の変形量を支点の強制変位として与える方法を用いた。

表-2 断面力

着目点		曲げモーメント(t・m)	せん断力(t)	軸力(t)
Pt. 1		-121.1	-52.7	—
Sec. 1		-222.7	-60.8	—
Pt. 2	鋭角	-450.6	-76.1	—
	鈍角	-630.6	97.4	-131.0
	脚	-180.0	-12.8	-131.0
Sec. 2		-404.9	88.4	-131.0
Pt. 3		-200.5	74.6	-131.0
Pt. 4		-111.2	-11.0	-131.0



4. 計算結果の検討

(1) 主応力

各構造モデルの隅角部付近の腹板の主応力を図-2に示す。

隅角部にわん曲フランジを用いた形式 (Type-1、2、4) をみると、鈍角側では、はり部の下フランジから脚部のフランジに沿って大きな圧縮力が流れ込むために、隅角部内の腹板には、はり、脚ともに大きな圧縮応力が発生している。構造的にも3タイプともR=3500mmの半径のわん曲フランジを用いているので、主応力の大きさや方向にはとくに大きな差異がない。Type-1とType-2の主応力を比較すると、Type-1の値が若干小さくなっている。これはType-1のわん曲フランジに補強リブを用いたため、フランジが有効に働いて応力が軽減したことによると考えられる。

しかし、鋭角側では、Type-4に半径方向にやや大きい主応力が発生している。この部分には曲線状のリブを用いたが、その半径がR=400mmで比較的小さいために生じたものであろう。このような部材の半径はできる限り大きな曲率半径とするのが望ましいが、局部的な部材であるので、構造物全体の耐力を著しく低下させるものではないと思われる。

隅角部が直線形であるType-3では、はり部の下フランジに沿う圧縮力は、割込みフランジの方向に伝達されている。したがって、鈍角部付近では比較的大きな主応力が発生しているが、応力の流れが少ない鋭角側では、それほど大きな主応力が認められない。

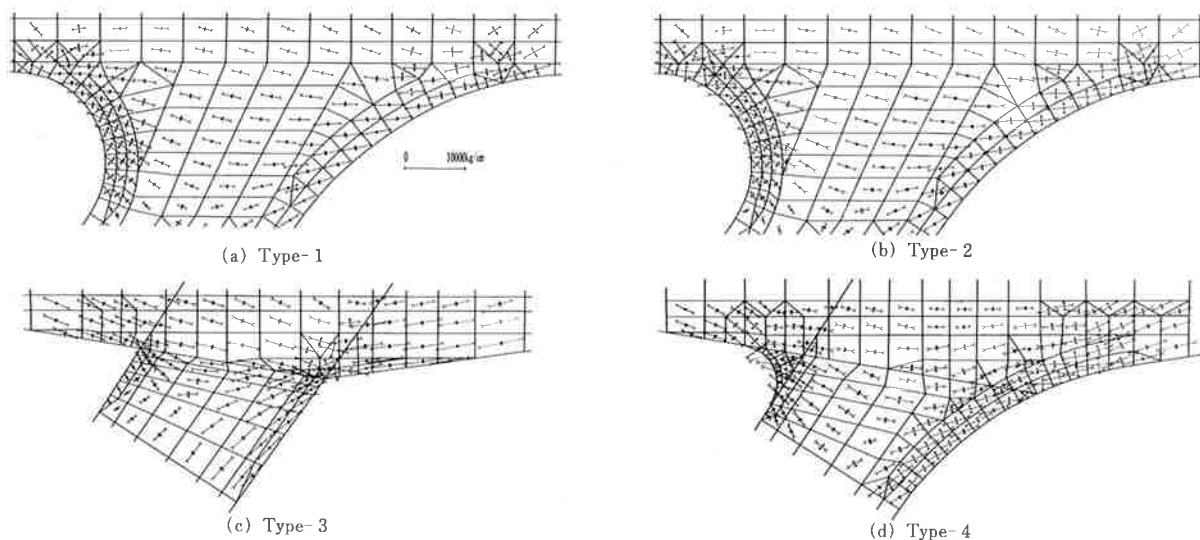


図-2 腹板の主応力図 (隅角部付近)

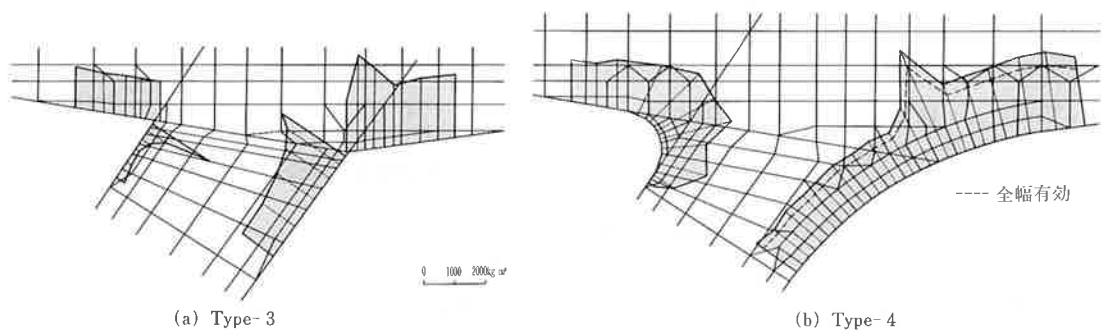


図-3 等価応力度

主応力は大きさと方向が問題になるが、Von Mises の等価応力を求めると大きさだけで評価することができる。図-3はType-3とType-4の隅角部付近におけるフランジに沿う腹板の等価応力を図示したものである。これによると、Type-3の鋭角部で大きな応力集中が見られる。このことは主応力だけではわからなかったことで、Type-3における注意点である。同様に、Type-4の鈍角部では、わん曲フランジと割込みフランジの交点付近で応力集中が見られる。Type-3の鈍角部では値が多少大きくなっているが、Type-4より小さい。Type-4の場合、わん曲フランジの有効幅を考慮して、フランジの断面積を小さくして計算したことによると考えられる。

(2) 腹板の軸方向応力

図-4は各タイプのはり部の腹板の軸方向応力の分布を示している。

曲げモーメントと軸力を受ける曲りはりの応力度は次式によって与えられる¹⁾。(図-5)

$$\sigma = \frac{N}{F} - \frac{M}{RF} - \frac{M(r-R)}{Z} \cdot \frac{R}{r} \quad (1)$$

$$Z = R^3 \left(b_1 \ln \frac{r_1}{r} + b' \ln \frac{r'}{r} + b_2 \ln \frac{r''}{r_2} \right) - FR^2$$

ここで、

F：全有効断面積

R：重心の曲率半径

r：任意点の曲率半径

N：軸力

M：曲げモーメント

その他の記号については図-5 参照

Type-1、2を見ると、フランジのわん曲が始まる点の下フランジ側で、応力度が大きくなっていて、曲りはりに似た応力分布である。一方、隅角部内部や一般部では、曲げモーメントと軸力をうける通常のはりとほぼ同じ傾向である。

Type-2において式(1)で求めた値を図示しているが、分布形状は異っており、値もFEMで計算した方が大きくなっている。今回の検討では、式(1)の評価はできないようである。

Type-4の応力分布は、Type-1、2と同じような傾向であるが、とくに下フランジの折れ点においても応力集中が発生している。

Type-3では、下フランジの折れ点でType-4と同じように、値が大きくなっている。しかし、他の部分では顕著な応力集中がみられず、通常の、曲りを考えないはりとかわらない。後述するように、Type-3は、はり脚が独立したような性状を示すので、このような応力の把握が容易という利点があると思われる。

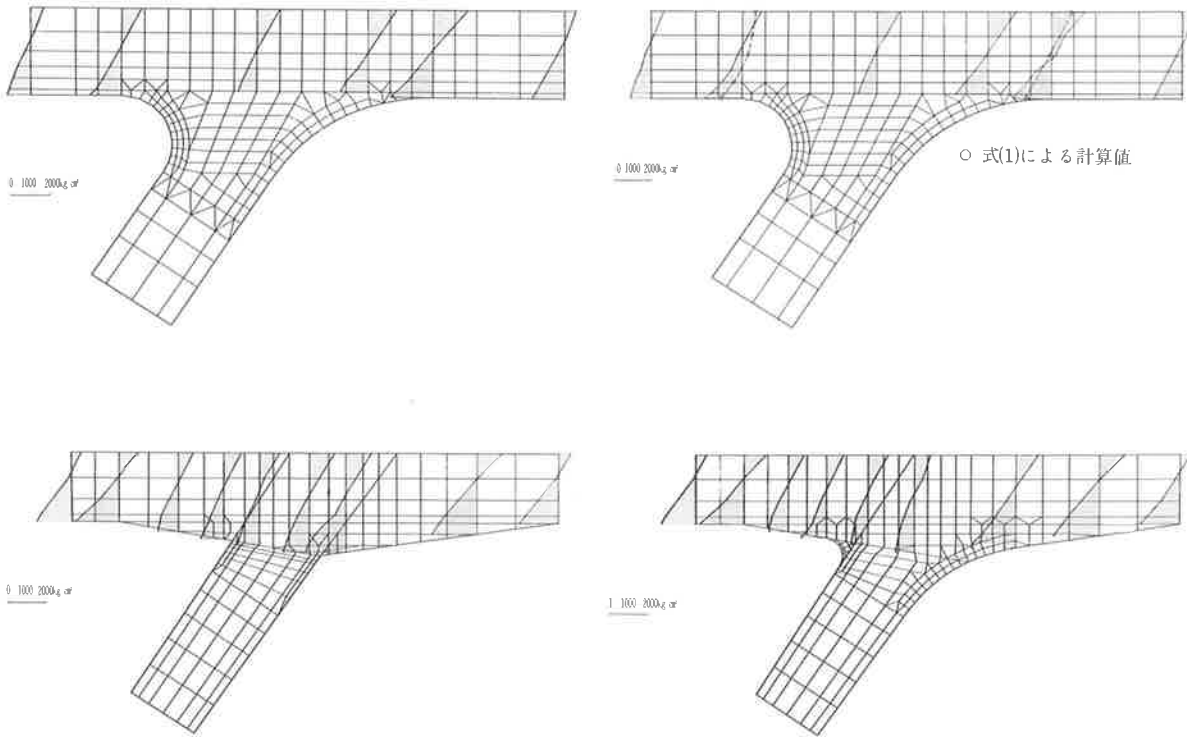


図-4 腹板の軸方向応力(σ)

(3) 腹板のせん断応力

図-6は各タイプのはり部の腹板のせん断応力の分布を示す。

曲りはりのせん断応力は、大野式²⁾によれば、次式で示される。

$$\tau = \frac{QR_o}{Fe r^2} \left[\left(\frac{b_2}{b'} h_2 + r - r'' \right) R - \frac{b_2}{b'} h_2 \left(r_2' + \frac{h_2}{2} \right) - \frac{r^2 - r''^2}{2} \right] \quad (2)$$

$$R_o = \frac{F}{b_1 l n \frac{r'}{r_1} + b' l n \frac{r''}{r'} + b_2 \frac{r^2}{r}}$$

ここに、

e : 重心軸と中立軸の差 ($e = R - R_o$)

Q : せん断力

その他の記号については図-5を参照

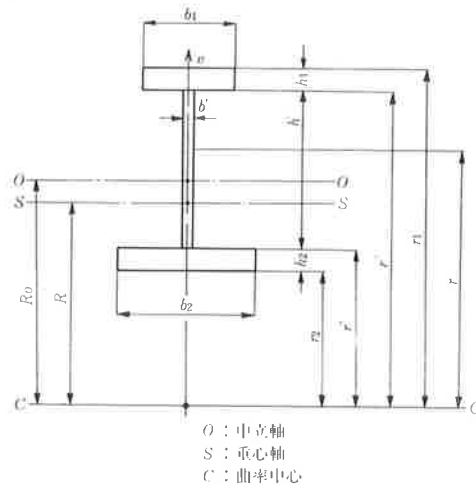


図-5

Type-2 (図-6(b)) に式(2)で求めた値を図示しているが、FEMで求めた値とかなり相違しており、FEMによる分布形状はむしろ曲りを考慮しない通常のはりに近い。しかし、Type-4では曲りはりに似た性状を示している。

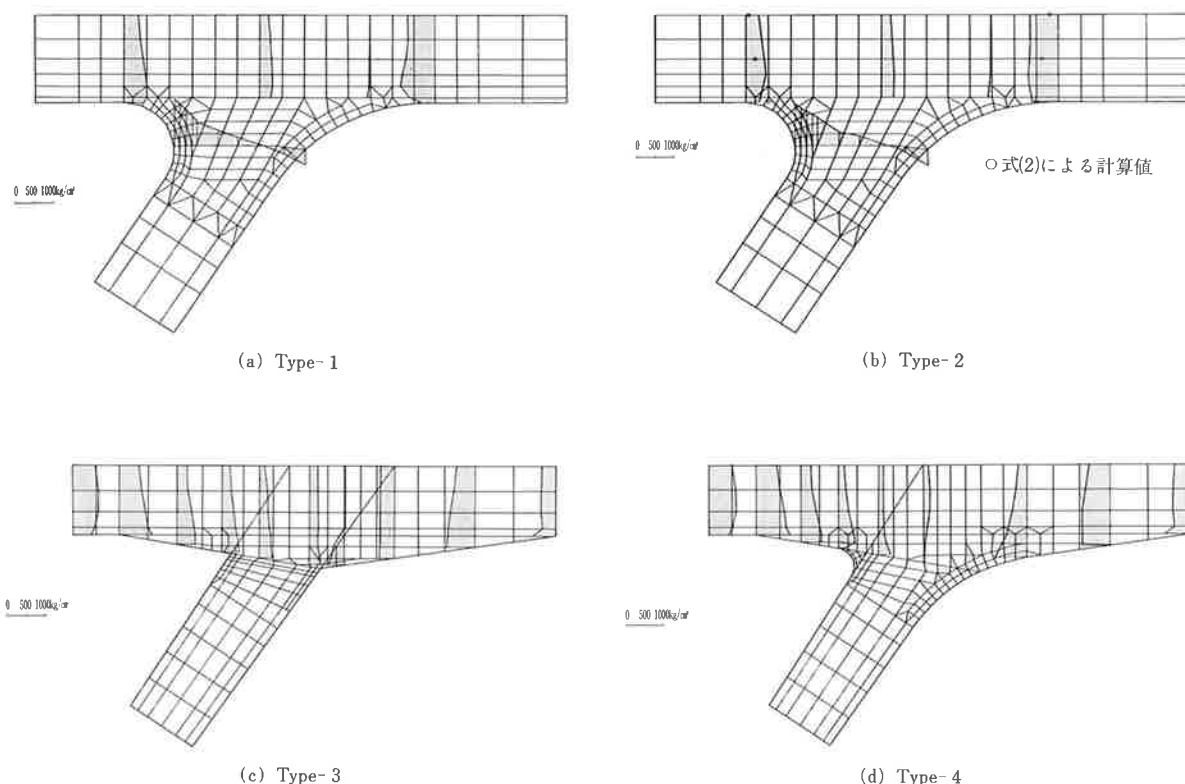
また、Type-3、4とも、フランジの折れ点の近傍で顕著な応力集中がみられる。実際の構造物ではこのような所に、補剛材カリブプレート进行けるので、このせん断応力はかなり緩和されると思われるが、注意が必要である。

(4) フランジおよび割込みフランジの軸方向応力

図-7は、はり部および脚部のフランジと割込みフランジの応力状態を示す。

Type-1およびType-2をみると、フランジ力のはりから脚へ円滑に流れていることがわかる。わん曲フランジ部では、Type-1の値がいくぶん小さくなっているが、これはわん曲フランジの補強リブがフランジの変形を防止して、フランジが有効に働いたためと思われる。

Type-1ではり部の隅角部腹板の下方に設けた水平補剛材(断面は140×12)の応力状態を図-8に示す。応力度としては1300~1400kg/cm²程度発生して



図一六 腹板のせん断応力(τxy)

いるが、軸力としてみるとフランジの軸力よりかなり小さく、この補剛材はフランジ力の低減にはあまり寄与していないようである。断面を大きくすることも考えられるが、下フランジと直接連続していないので、フランジ力の低減に効果があるかどうかは不明である。

一方、Type-4のはり方向の割込みフランジは隅角部内では、はりの下フランジとして作用しており、脚部のフランジ力の軽減に役立っている。

Type-3では、はり部のフランジ力そのまま割込みフランジに伝えられ、脚部のフランジ力は、はり部のせん断力から発生しているようで、はり部のフランジ力が直接脚部のフランジに伝わるといった形ではない。いわば、はりと脚が独立しているようで、隅角部は連続桁の中間支点上の性状に近くなっている。

一般に、方杖ラーメン橋の隅角部付近の応力の流れは、側径間のはりから中央径間のはりへ、あるいは、鈍角側におけるはりから脚へというのが主たるもので、鋭角側の応力の流れは少ない。したがってはり方向の割込みフランジは、隅角部内において、はりの下フランジとして作用させ、脚部のフランジ力を減少させる方が構造的に有利である。Type-4のように、はりの下フランジに直結する方が望ましいと思われる。しかし、この場合図一3でみたように、鈍角側のわん曲フランジと割込みフランジの交点で、応力集中が発生するので注意が必要である。

はり部の上フランジは、各タイプともほぼ同じ傾

向で、応力の大きさにも特別な差異はない。

次に、脚方向の割込みフランジをみると、鋭角側ではType-3、4ともあまり大きな応力が発生していないことがわかる。このことから、構造上複雑になるならば、この割込みフランジは、はり部の上フランジまで延ばさなくてもよいと思われる。

Type-3の鈍角側の割込みフランジには、はり部の腹板からの力をうけるために、かなり大きな応力が発生している。この力は脚のフランジ力として伝えられるので、Type-3ではこの割込みフランジは重要な部材である。

(5) わん曲フランジの有効幅と補強リブの効果

方杖ラーメン橋の隅角部のように、わん曲フランジに軸方向力が作用すると、半径方向の分力によってフランジが面外方向に変形し、軸方向応力のフランジ幅方向の分布が一定にならない。したがって、このような所には補強リブを用いてフランジの変形を防止し、フランジが有効に働くようにするのが一般的である。

わん曲フランジの有効幅の計算には、Bleichの式がよく用いられている¹⁾。いま、フランジの全幅をb、有効幅をb'とすると、b'/bの値は次式で与えられる(図-9)。

$$\left. \begin{aligned} \frac{b'}{b} &= \frac{1}{\alpha b} \cdot \frac{\sin 2\alpha b + \sinh 2\alpha b}{2 + \cos 2\alpha b + \cosh 2\alpha b} \\ \alpha^4 &= \frac{3}{r^2 d^2} \end{aligned} \right\} (3)$$

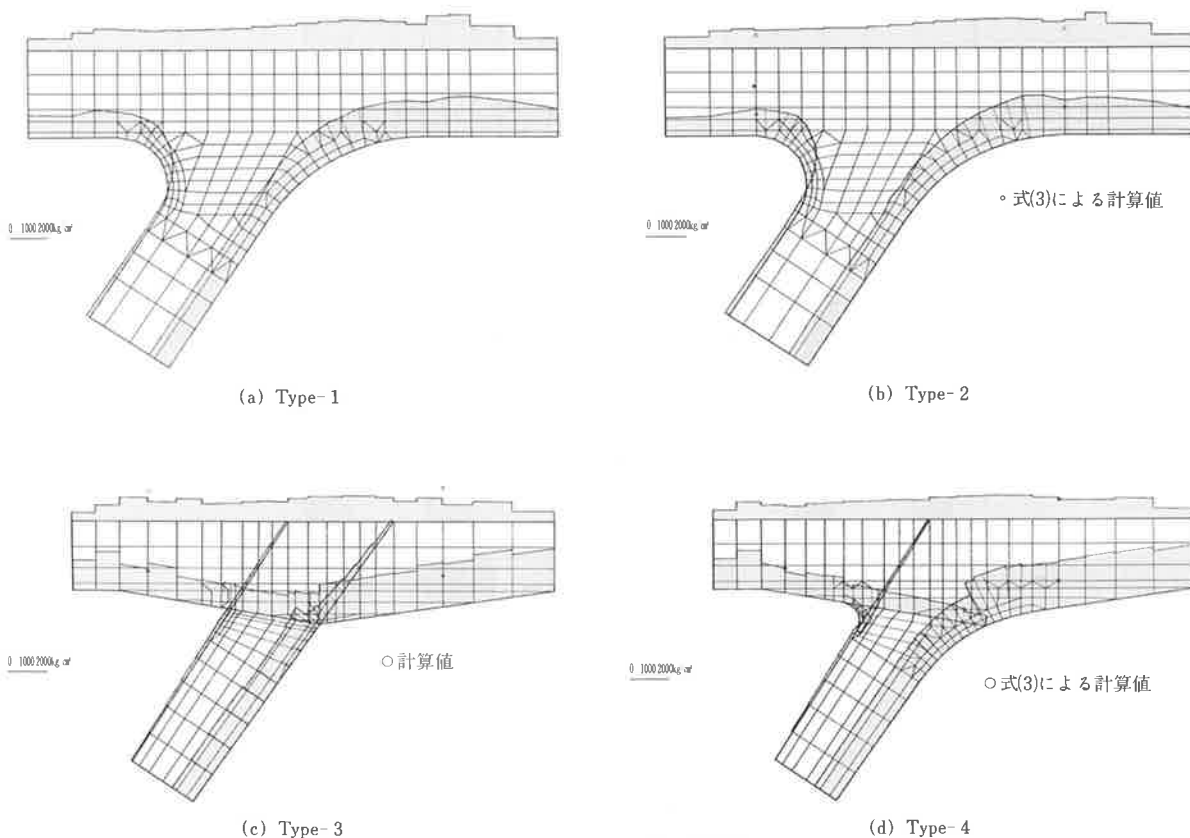


図-7 フランジの軸方向応力

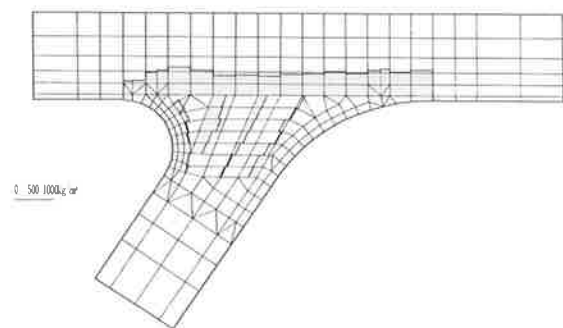


図-8 水平補剛材の応力分布 (Type-1)

ここに、

r : わん曲フランジの半径

d : わん曲フランジの板厚

式(3)によると有効幅は断面力に関係がなく、わん曲フランジの半径や突出幅、あるいは板厚など形状によって決まることがわかる。また、半径が小さく板厚がうすいほど有効幅が小さくなる。

本検討では、Type-1とType-2について、わん曲フランジを含め、はりの下フランジと脚のフランジを板要素として、3次元の立体有限要素法解析を行い、フランジ応力のフランジ幅方向の分布を求めた。

解析モデルは、Type-1はわん曲フランジに補強リブを設けて、フランジの変形を防止する構造とし、Type-2はリブを用いなくてフランジが自由に変形できるようにした。

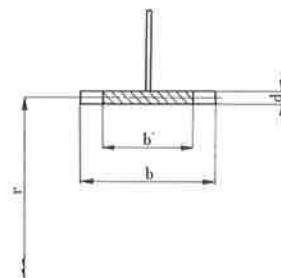


図-9

図-10は鈍角側 ($R = 3500\text{mm}$)、図-11は鋭角側 ($R = 950\text{mm}$)のわん曲フランジとその付近の応力分布を示す。

補強リブのないType-2をみると、フランジの応力は直線部では鈍角側、鋭角側ともフランジの幅方向にほぼ均等に分布しているが、わん曲フランジ部になると、腹板直下で大きく、フランジの縁端に向けて減少していて均等ではない。とくに、鋭角部では、その傾向が著しく、フランジの縁端では応力の方向が反転していて、引張応力が発生している。

表-3は応力の分布図より求めた b'/b の値と、式(3)によって求めた値を比較したものであるが、鋭角側でやや差があるものの、両者は非常によく一致している。

一方、Type-1の鈍角側は、直線部、わん曲部ともにほぼ均等に分布している。分布図より求めた b'/b の数値は約0.95で全幅有効と考えてよい。

鋭角側では応力の値が小さくて十分な評価ができないが、多少みだれがあるもののほぼ均等に分布し

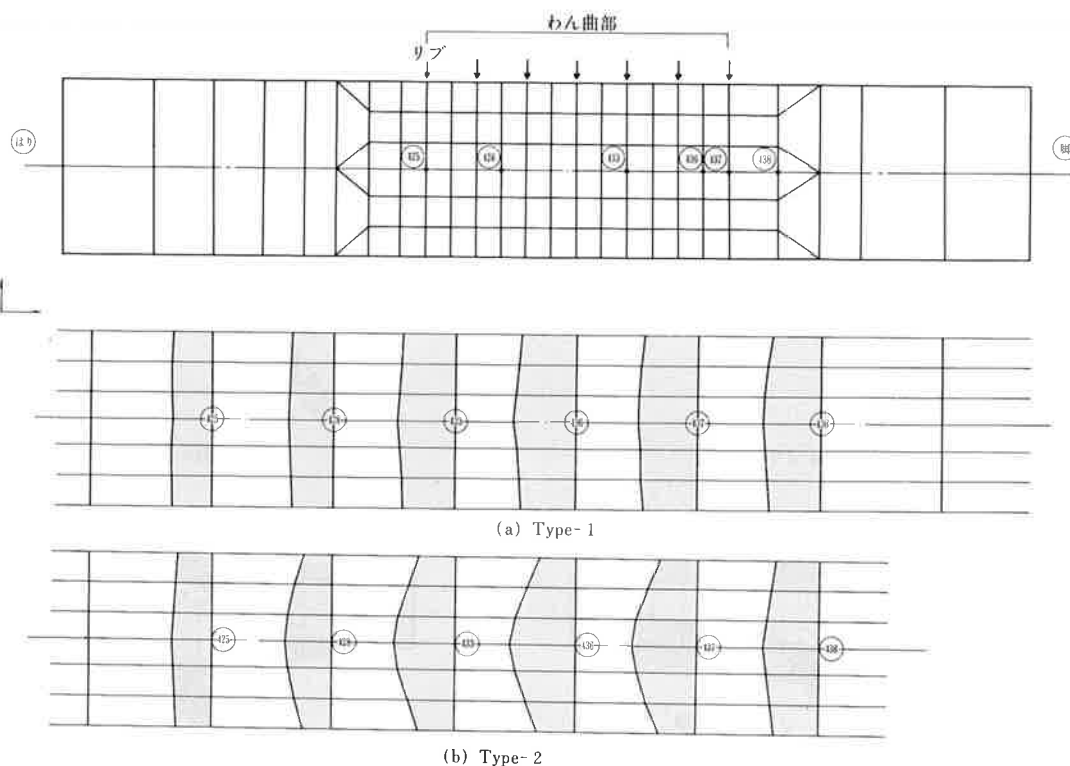


図-10 鈍角側わん曲フランジ部の応力分布

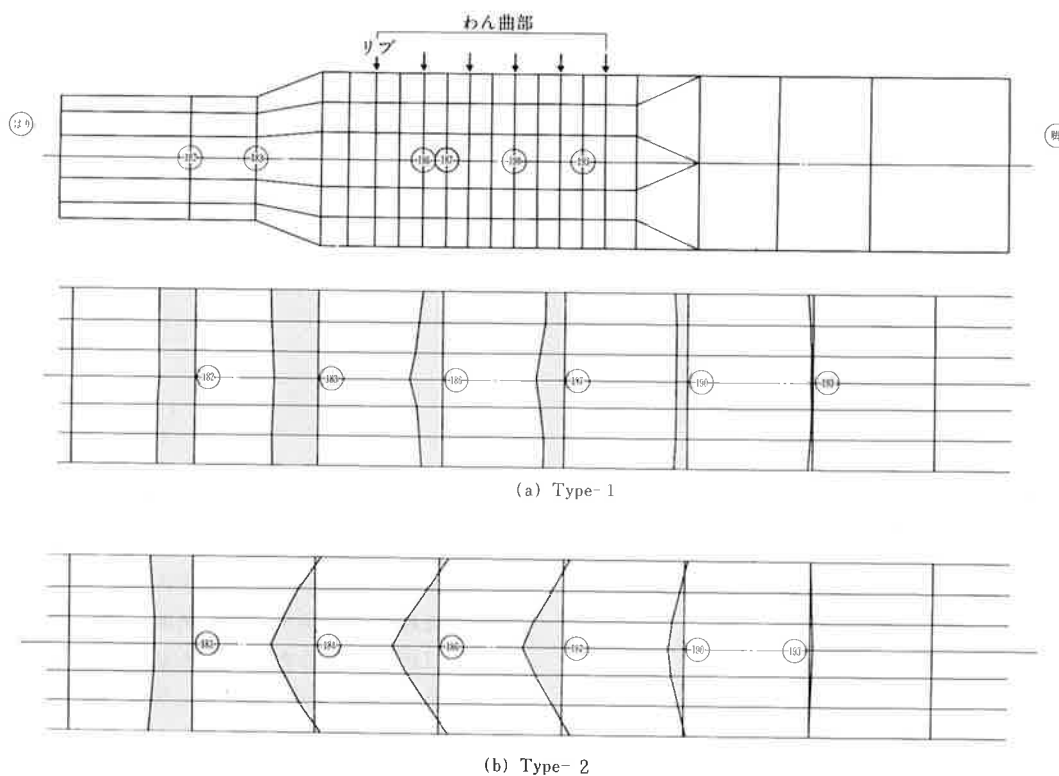


図-11 鋭角側わん曲フランジ部の応力分布

ていると考えてよい。

また、今回のモデルの場合、補強リップの間隔はフランジの突出幅の約0.6倍程度で、いくぶん密に配置したが、一般的にはフランジの突出幅程度でよいと思われる。

有効幅はフランジの突出幅が大きいほど小さくなるので、有効幅を考える場合には、フランジ厚を厚くし、突出幅を小さくする方が有利である。

表-3 b/bの値の比較

	①Bleichの式	②FEM*	比率①/②
鋭角側	0.457	0.479	0.95
鈍角側	0.824	0.826	1.00

* FEMによる値は応力分布図より求めた値の平均値

5. まとめ

以上の比較検討の結果、方杖ラーメン橋の隅角部の構造について、次のようなことが言える。

- ① 隅角部の鈍角側（中央径間側）は、わん曲フランジを用いる構造の方がよい。
- ② 隅角部の鋭角側（側径間側）は、フランジを直線状に交差する形を基本とし、応力集中を避けるために、円弧状のリブプレートをつける形とするのがよい。リブプレートにはフランジを付けて剛性を上げるようにする。
- ③ はりの下フランジの割込みフランジは、図-12に示すようにはりの下フランジの位置に連続して設置する方がよい。
- ④ 鋭角側の脚方向の割込みフランジは、構造上複雑になるならば、はりの上フランジまで延長させる必要はない。

なお、わん曲フランジに補強リブを設ける場合は、フランジは全幅有効と考えてよいと思われる。また、補強リブを用いない場合のフランジの有効幅の計算には、Bleichの式が有効であることがわかった。

これらの事項は、Type-4でほとんど考慮されているものである。したがって、隅角部の構造形状としては、Type-4を基にしてわん曲フランジに補強リブを用いた図-12に示す形が推奨できると考えられる。

あとがき

方杖ラーメン橋の隅角部の形状について、2~3の要因に着目して比較検討した。前述のように、隅角

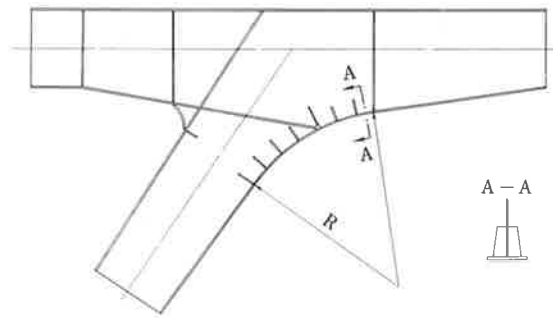


図-12 隅角部の構造形状

部の応力分布には多くの要因が関係する。今回の検討では考慮しなかった要因、例えば作用断面力の種類や大きさ、あるいは、はりとの交差角などによる影響も興味ある問題である。しかし、この研究である程度方向付けができたものと考えられる。

【参考文献】

- 1) Bleich (池部、高橋、竹山訳)：鉄骨構造(下)P.691、コロナ社
- 2) 土木学会：土木工学ハンドブック、P.780 (昭29)
- 3) 宮本、上野、小林：中央道日吉川橋(鋼方杖ラーメン橋)の設計、橋梁と基礎 (昭47.5)
- 4) 齊木、中井、岡本、山田：湯屋谷橋の設計と施工、橋梁と基礎 (昭49.6)
- 5) 田中、白川、渡部、高橋：白石橋隅角部の模型実験、橋梁と基礎 (昭45.5)
- 6) 神生、田原、柏尾：Vレックをもつ丸山大橋、橋梁と基礎 (昭45.5)