

佐陀川橋（V型剛斜材を有するニールセンローゼ橋）の設計

辰口 聖一¹⁾ 鷲尾 修一²⁾

本橋はニールセンローゼ橋としては中規模の橋梁ではあるが、冬季の積雪を考慮してこれまでにない特徴をもたせた構造となっている。最大の特徴は、落雪による事故を防止することからストラットを2本とし、さらにアーチ材の面外座屈耐力が低下しないようV型剛斜材を設けた点にある。以下に本橋の特徴をまじえ、設計についての概要を報告する。

ま え が き

中国横断自動車道岡山・米子線は、岡山県の落合ジャンクションで中国縦貫自動車道から分岐し、鳥取県米子市へと続く高速自動車道である。

佐陀川橋は米子市河岡地区で佐陀川を約40°の斜角で横切り、米子I.C.の直前に位置する橋梁である(図-1参照)。本橋は将来完成時に2橋併列の上下4車線となるが、暫定的に上り線を供用する計画であり、本工事は上り線のみの単独橋である。

上部工形式は、

- ① トラスや他のアーチ系橋梁と比べ、変形性状や振動特性が良く、しかも経済性でも差がない。
- ② 国立公園大山を背景に米子I.C.のランドマークとなる。

ことから、ニールセンローゼ橋が選定された。また冬季にはストラット上の積雪が落下し、事故につながる可能性を考え、ストラット数を極力少なくした。一方、アーチ材の面外座屈耐力を確保するため、支間中央にV型剛斜材を有する特徴ある構造となった。

本文は佐陀川橋の設計の概要について報告するものである。

1. 工 事 概 要

本工事の概要を下記に、一般形状を図-2に示す。

道路規格 1種3級B

橋 格 1等橋 (TL-20、TT-43)

構造形式 V型剛斜材を有するニールセンローゼ橋

橋 長 108.488m

支 間 107.000m

| | |
|------|--|
| 幅 員 | 9.500m |
| 平面線形 | クロソイド R = 500~5,000m |
| 縦断勾配 | i = 0.922%直線 |
| 横断勾配 | i = 6.0% (R = 500m 区間) i = 2.0% (R = 5,000m 区間) |
| 舗 装 | アスファルト舗装 (7.5cm厚) |
| 床 版 | 鉄筋コンクリート床版 (22.0cm厚) |
| 設計震度 | Kh = 0.15 |
| 主要鋼材 | SM50Y、SS41 |
| 鋼 重 | 主構造 564.4ton |
| | 付属物 24.3ton |
| | 合 計 588.7ton |

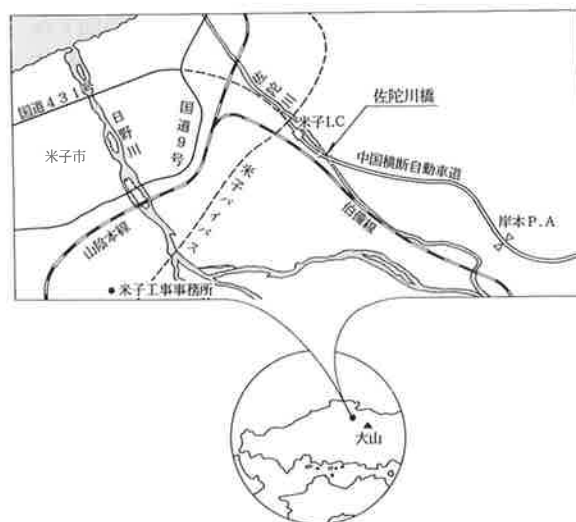


図-1 位置図

1) 大阪橋梁技術部 設計第1課係長 2) 技術士 大阪橋梁技術部 設計第1課副課長

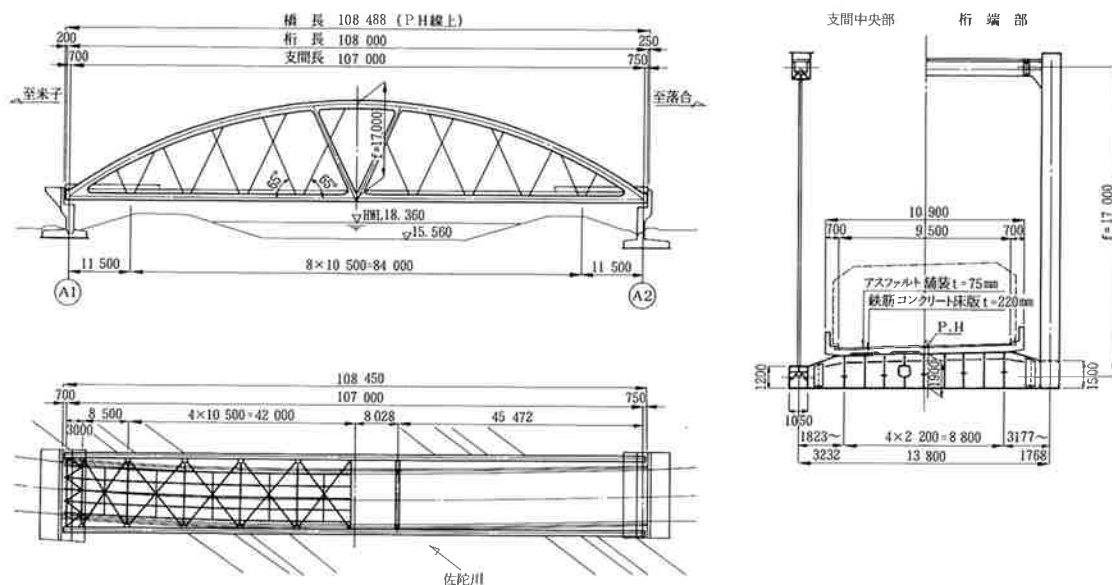


図-2 一般図

2. 構造の特徴

(1) ストラットとV型剛斜材の効果

一般にニールセンローゼ橋では数本以上のストラットを配置し、アーチ材の面外座屈耐力を確保している。本橋では先に述べたとおり、雪の落下による事故防止を考えストラットの本数を2本としたが、このままでは当然面外座屈耐力は低下する。そこで、支間中央にアーチ材の面外変形を斜材の剛性で拘束する目的で、V型の剛斜材（以下、V斜材という）を配置した。このV斜材を設けることにより、面内の対称モードの座屈耐力が約2倍に、また、ストラットと相乗して逆対称モードの座屈耐力および面外座屈耐力が増加した。また、V斜材の基部にあたる支間中央横桁は箱断面とした。これにより、横断面でみた場合、上下がストラットと横桁、左右がV斜材で構成されるラーメン構造となり、面外座屈耐力の増加につながった。

以上の2本のストラットとV斜材の組合せは、一般形（V斜材を有しない）で7本のストラットを配置した場合と同じ効果（座屈耐力）をもつものとなった。

(2) アーチ材基部の拘束条件

アーチ材基部の面外拘束条件は、支点上の横桁のみではヒンジに近い。これを固定の拘束条件に近づければ、面外座屈耐力は向上する。本橋では次のような構造とし、拘束条件を固定に近づけた。

桁端付近（アーチ材と下弦材の隅角部）に支点上ならびに中間横桁を3mの間隔で配置した。さらに、この2本の横桁を上下横構で連絡し、2本の横桁と上下横構からなる準箱断面を形成した。これにより、

桁端付近の横桁は面内面外とも剛性が高まり、アーチ材の拘束条件は固定に近いものとなった（図-3参照）。

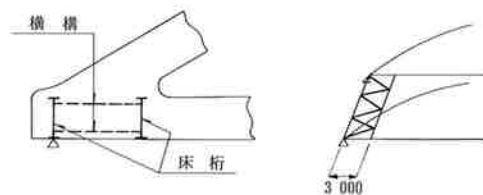


図-3 アーチ基部の支条件

3. 解析

解析は立体モデルを用いると各部材の断面力や変形が精度よく求められるが、反面、部材数が多く設計の効率が悪くなる。また、TT-43 に対する等価係数がアーチ橋の場合、明確ではない。したがって、TT-43 は実載荷するのが望ましいが、立体モデルでの実載荷（影響線載荷）は解析の効率が非常に悪い。そこで、平面モデルと立体モデルとで単位鉛直荷重に対する主構の断面力を比較検討した。その結果、両者でほとんど差がなく、鉛直荷重に対しては平面モデルで十分な精度を確保できると考えた。本橋の解析には、図-4 に示す平面モデルと立体モデルの両方を用いることとした。平面モデルでは面内荷重（死活荷重および斜材のプレストレス）による断面力を、立体モデルでは面外荷重（温度、風および地震）による断面力を解析した。TT-43 を含めた死活荷重は両主構間で1-0分配し、平面モデルに載

荷した。また、本橋の路面線形が曲線のため両主構での荷重強度が異なるので、平面モデルでは各々の主構についても解析した。平面および立体モデルとも変形特性を把握するため、支点部に支承回転中心までの長さをもつ足を設けた。

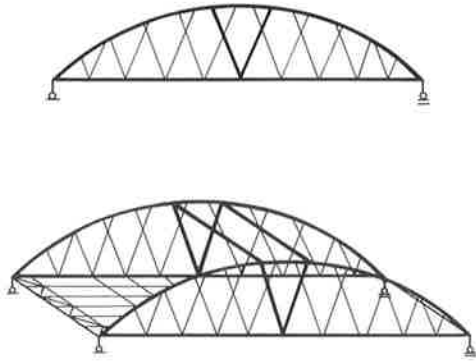


図-4 解析モデル

本橋の桁端部（床組端部）は2本の横桁と上下横構で構成されるため、下弦材軸力が縦桁に伝わるとともに下弦材自体の軸力も減少する。この解析には、下弦材を含めた床組全体を図-5に示す床組モデルに置換え、端部に平面モデルの下弦材軸力を作用させた。このモデルでは、縦桁に床版の合成効果がある場合とない場合の二通りを考慮した。

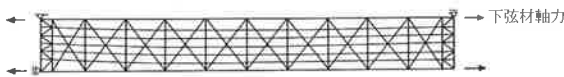


図-5 床組モデル

設計断面力は以上の平面、立体、床組モデルの解析結果を組合せた中から抽出した。図-6に設計断面力の解析フローを示す。

図-7にアーチ材および下弦材の面内曲げモーメントを示すが、両者ともV斜材の位置で突出した形状となるのがわかる。

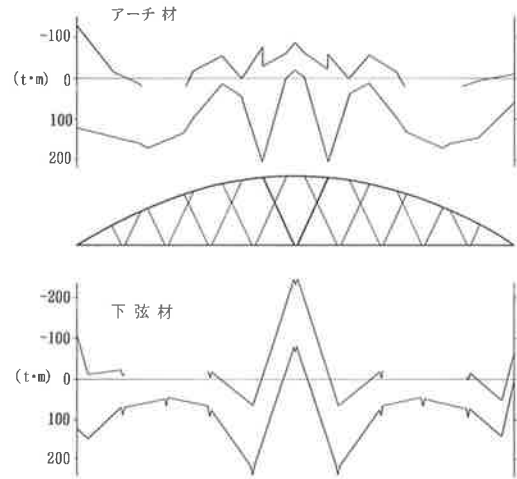


図-7 曲げモーメント図

4. 主構の設計

(1) アーチ材の有効座屈長

ニールセンローゼ橋の面内の有効座屈長は、現在のところ、その決定方法が明確ではない。従来の設計では図-8のように、着目点の両隣にある斜材のアーチ材との交点間距離を面内の有効座屈長としている例が多い。本橋では剛なV斜材があることから

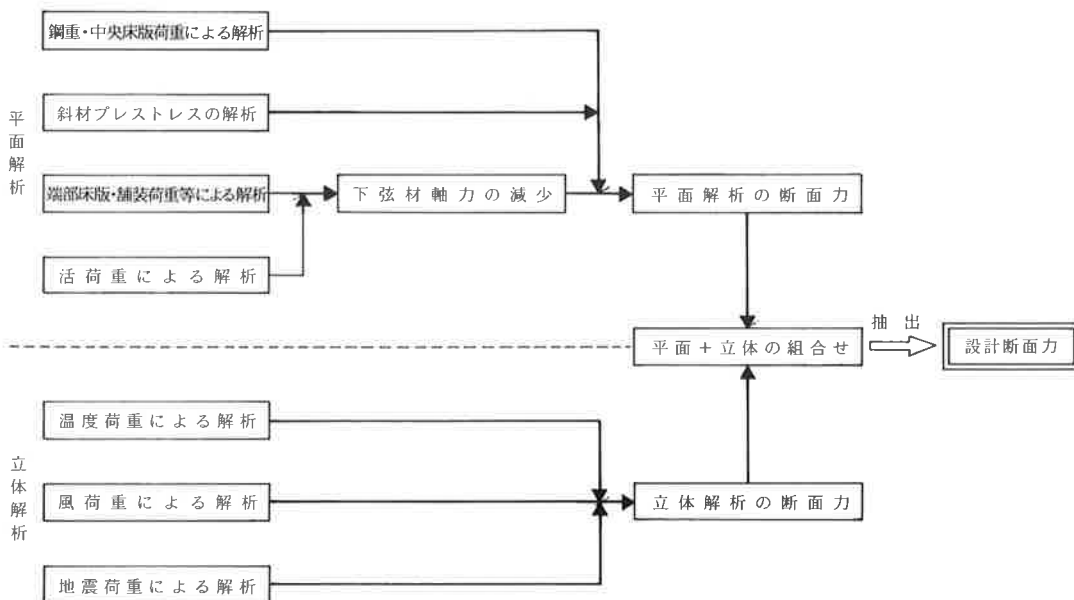


図-6 解析のフロー

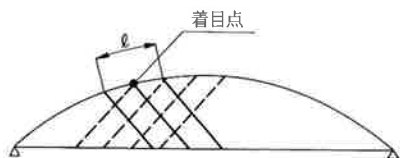


図-8 面内の有効座屈長

従来の例によらず、線形座屈解析を行い有効座屈長を決定した。解析は次の2ケースを考え、検討の結果、本橋の面内有効座屈長は13.5mとした。

- ① 死荷重+活荷重全載
- ② 死荷重+活荷重半載

面外有効座屈長は、一般にはストラットの固定点間距離を採用している例が多い。しかし、本橋ではストラットの本数が2本と少く、ストラットの固定点間距離も48.9mと長いため、そのまま採用するのは不合理と考えられる。そこで、アーチ材の合理的な有効座屈長を求めめるため、立体弾塑性有限変位解析を行い、終局限界状態に至るまでの挙動および終局強度について検討した。解析は次の3ケースの荷重に対して行い、本橋の荷重倍数を求めた。

- ① 死荷重+活荷重(偏載)×荷重倍数
- ② 死荷重+活荷重(中央載荷)×荷重倍数
- ③ 死荷重×荷重倍数

解析の結果、荷重と面内・面外変形の関係からすべてのケースにおいて、面外変形による座屈現象が先行して生じていると判明した。座屈時のアーチ材の軸圧縮応力度は $1790\sim 2680\text{kg}/\text{cm}^2$ とばらつきがみられ、アーチ材の全体面外座屈は各部材の変形が影響するものの、最終的には一部分の部材の塑性崩壊により発生すると考えられる。本解析では、座屈時の部材の変形(曲率)の大きな部分と軸圧縮応力度が最大になる部分がほぼ一致したため、荷重倍数は軸圧縮応力度が最大になる位置で求めるものとした。本橋の荷重倍数は $\nu = 2.04$ となり、道路橋示方書に規定される $\nu = 1.7$ を確保できた。以上より、本橋の面外有効座屈長は $l = 28.2\text{m}$ ($0.577 \times$ ストラット固定点間距離)とした。

(2) 主構の応力余裕

通常の構造物では、断面決定のさいに付加的に誤差応力を考えることはまれである。しかし、本橋のような内的に高次不静定構造物では、部材相互の関連が非常に複雑なため、設計上の仮定条件と実際とが異なると、主構の応力等に大きな影響を与える。そこで、本橋では設計上の仮定条件と実際との差異が生じるケースを考え、この差異により主構断面に付加的に生じる応力(誤差応力)を検討し、断面決定に反映した。誤差応力が生じるケースとして、次

の6ケースを考えた。

- ① 荷重誤差(鋼重や実床版厚等によるもの)
- ② 解析誤差(床版の合成効果で剛性が変化することによるもの)
- ③ 温度誤差(計測時のアーチ材と下弦材との温度差によるもの)
- ④ 張力誤差(真の張力と計測張力の差によるもの)
- ⑤ 骨組形状誤差(製作・架設時の形状の差によるもの)
- ⑥ 斜材定着間誤差(ケーブル長と定着間距離の差によるもの)

上記の①～⑥について誤差量を設定し、各ケースが主構に与える誤差応力を計算した。その結果、①～⑤による影響は非常に小さく、特に誤差応力として考えないことにした。しかし、⑥についてはシムを調整し、ケーブル張力を目標張力内におさめても、主構には $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度の応力が残る結果となった。このときの斜材定着間誤差は $\pm 10\text{mm}$ であった。したがって、主構の断面決定には $100\text{kg}/\text{cm}^2$ の応力余裕を考え、また、斜材定着間の製作・架設管理基準として $\pm 10\text{mm}$ を設定した。

(3) 主構断面

1) 主構の配置

主構の配置および断面形状については次の条件を検討し、決定した。

- ① 本橋は上下線が分離構造であり、将来、下り線施工時の作業空間として上下線構造物の間に50cm程度の間隔を確保する。
- ② 地覆外縁と主構との純間隔は施工性や維持管理を考え、20cm程度を確保する。
- ③ 上下線の主構は平行とする。
- ④ 断面幅は上下線間の作業空間とも関連するが、40cmに狭めても鋼重面で差が生じない。したがって、広い作業空間を確保する。

2) アーチ材、下弦材

アーチ材および下弦材の断面形状を図-9に示す。

3) V斜材

V斜材の断面形状を図-10に示す。ウェブ高は景観を考え、上端で850mmから下端で1100mmに変化させた。

4) ケーブル

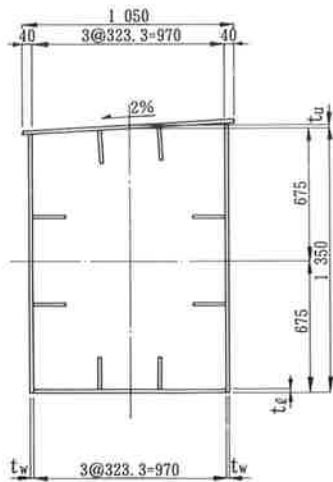
ケーブルの種類については次の条件を考えた。

- ① ニールセンローゼ橋は活荷重による応力振幅が大きく、疲労強度が問題となりやすい。
- ② 冬季には塩カリの散布が考えられるため、防錆上の配慮が必要である。
- ③ 施工性および経済性に問題がない。

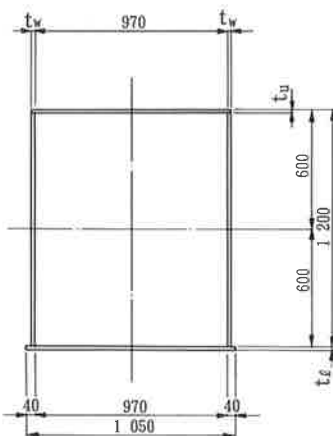
以上の条件をふまえ、次の3タイプについて比較検討を行った。

- ① グラウトタイプPWS
- ② ノングラウトタイプPWS
- ③ ロックドコイルロープ

このうち③のロックドコイルロープでは、材料の機械的特性や防錆の面から①②に比べ劣ると考えられる。①のグラウトタイプPWSは、ニール



(a) アーチ材



(b) 下弦材

図-9 断面形状 (アーチ材・下弦材)

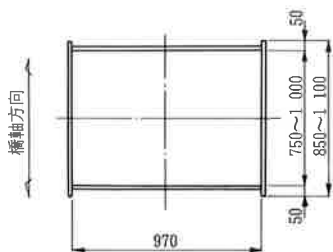


図-10 断面形状 (V斜材)

センローゼ橋での実績がない点および現地でのグラウト作業があり、②に比べ経済性が劣る。以上より、本橋では②のノングラウトタイプを採用し、素線径については5mmと7mmを比較検討し7mmとした。なお、桁端より2本目のケーブルには、疲労強度および最小応力等からプレストレスを導入した。

5) 床組

本橋は先に述べたとおり、床版および床組に下弦材の軸力が伝わり、常時引張力が作用した状態となる。したがって、床版および床組の設計には、床組としての作用力のほかにこの引張力も考慮した。ただし、全死荷重に相当する引張力を考えると大きな断面になるため、図-11に示す縦桁の連結板は長孔とし、床版打設後にHTBの本締めを行うものとした。これにより、鋼重および床版荷重(端部の打残しを除く)による引張力を床版に作用させずに、経済的な断面にできた。

縦桁には床版の合成効果を考えた場合と考えない場合の両方で引張力を計算し、不利な方を用いて設計した。

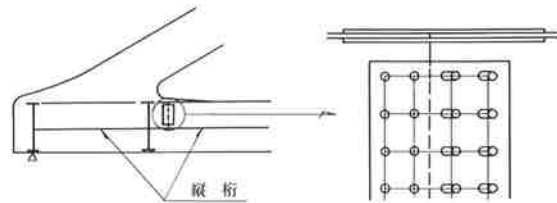


図-11 縦桁の連結

5. アーチ材、ストラットの落雪対策

本橋の架橋位置は山陰地方ということで、アーチ材やストラット上に冬季の積雪が予測される。この積雪が路上へ落下し、通行車両の事故を招くおそれがあるので、落雪対策について検討した。

既設橋梁の落雪対策の実施例をみると次のとおりである。

- ① アーチ材の上フランジを傾斜させる。
- ② ストラットをパイプ断面とする。
- ③ ストラットに積雪防止用の屋根を設ける。
- ④ ヒーティングを設ける。

本橋の場合をみると、アーチ材は車両通行位置より離れているため、落雪しても影響は少ないと考えられる。したがって、アーチ材には上フランジに2%の横断勾配をつけ、路面の反対側に落雪するようにした。しかし、ストラットは路面上にあり、落雪の影響も大きいため、何らかの対策をとるものとした。ただし、ヒーティング設置は維持管理上、また、積雪防止用の屋根は景観上問題が残ると考え、本橋で

は採用しなかった。パイプ断面も雪質によっては積雪の可能性があり、これも除外した。種々検討のすえ、当初のストラット形状（矩形）で実物大の模型を製作し、冬季の積雪状況を調査したうえで最終形状を決定することにした。

調査の結果、図-12(a)に示す当初の形状では、ストラットの④面および⑥面とも積雪が確認された（写真-1参照）。しかも、④面より傾斜のきつい⑥面の方が、一度に多量の落雪がおこることが明らかになった。また、過去の米子地方の積雪データから、当地方では一度に多量の積雪を見ることはほとんどないと判断して、傾斜の緩い④面にはストラットのウェブを上方に100mm突出させて、一時的な積雪による雪塊の落下を防ぎ、自然融雪を待つということにした。傾斜のきつい⑥面は積雪が起らないよう鉛直とした図-12(b)に示す形状を採用した。

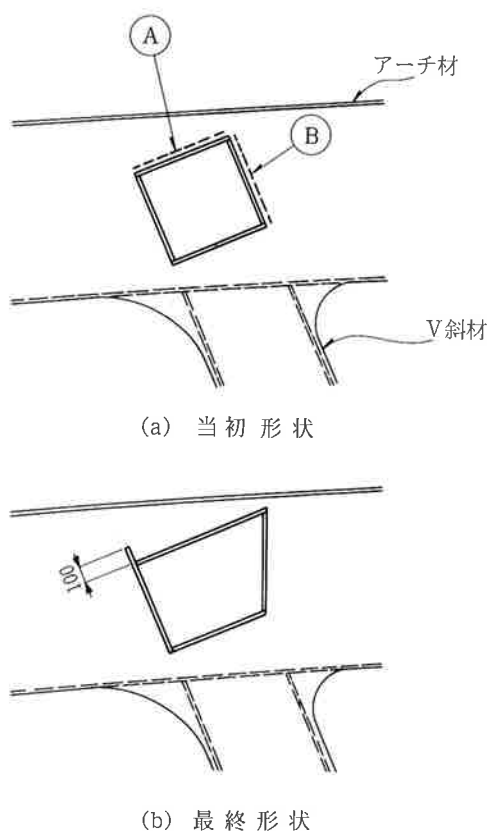


図-12 ストラットの断面形状



写真-1 積雪状況

6. 隅角部のFEM解析

隅角部は複雑な応力状態となるが、その設計方法といえば、鋼製橋脚のように2~3部材が平面的に直交する場合を除いて、明確なものがないといえる。そのため、既設橋ではそれまでの構造例を参考にしたり、隅角部近傍のFEM解析から構造詳細を決定しているのが現状である。

本橋でもアーチ材基部あるいはV斜材基部の断面決定では、部材個々の断面力から部材応力を計算したが、隅角部の実際の応力状態となると正確には把握できていない。そこで、隅角部の応力状態ならびに構造詳細の妥当性を確認するため、FEM解析を行った。解析は本橋の特徴であるアーチ材基部とV斜材基部の隅角部近傍に着目し、それぞれ図-13、14に示す立体モデルに置換し行った。

アーチ材基部の解析結果から次の箇所に応力集中がみられた。

- ① 端部の上下横構と下弦材ウェブの結合点付近
- ② アーチ材と下弦材のすりつけ部(図-13の"a"付近)

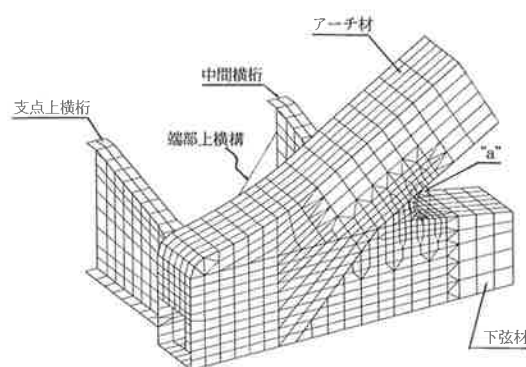


図-13 アーチ材基部

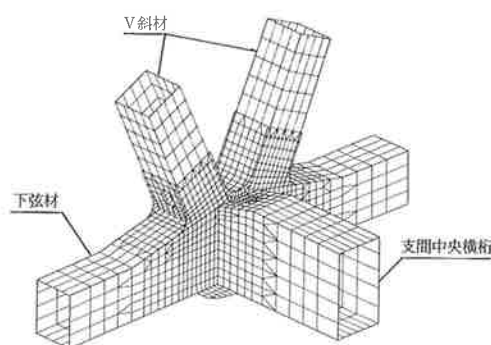


図-14 V斜材基部

①については、横構部材を線材にモデル化し、ウェブの1点のみに結合したためである。実際には、横構力はガセットプレートを介して分散した状態で伝わりと考えられる。これについては、ガセットプレートを考慮したときの応力度照査を行い、安全性を確認した。

②については、次の理由により特に問題はないと考えた。

- i) 曲線部の自由端のみに高い応力が発生している。
- ii) 接しているフランジの応力が低い。
- iii) 圧縮応力であるとともに、降伏点に至っていない。

V斜材基部の解析結果では、応力の流れは全般的に円滑で特に大きな応力集中はみられず、また、最大発生応力も $1600\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度と低めであった。

以上から、本橋の隅角部構造は現設計で問題ないと考えた。

あ と が き

以上、佐陀川橋の設計について概要を述べた。

本橋は落雪の影響を少なくする目的で、アーチ材の面外座屈耐力を確保しつつ、ストラット数を減らした例である。今後、同様な橋梁を計画、設計される際の参考になれば幸いである。

なお、本橋は現在鋭意架設中であり、架設時の形状管理やケーブルの張力管理については次の機会に譲るものとする。

最後に、現地での積雪状況の調査にご尽力をいただいた日本道路公団の楠橋技師、ならびに模型の設置にご協力いただいた株式会社大本組の方々に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 熊谷義次、中園明広、鷺尾修一：ニールセンローゼ橋「佐陀川橋」の計画と設計、橋梁、1988.4.