

(37) 鋼トラスウェブPC橋の格点構造に関する実験的研究

Experimental research into Slab-Diagonals Connection in PC bridges with Steel Truss Web

猪熊康夫*, 本間淳史**, 黒岩 正***, 益子博志****, 日紫喜剛啓*****

Yasuo INOKUMA, Atsushi HOMMA, Tadashi KUROIWA, Hiroshi MASHIKO, Yoshihiro HISHIKI

*日本道路公団静岡建設局構造技術課 (〒420-0587 静岡県静岡市御幸町 11-3)

**日本道路公団静岡建設局構造技術課 (〒420-0587 静岡県静岡市御幸町 11-3)

***日本道路公団静岡建設局静岡工事事務所 (〒420-0804 静岡県静岡市竜南1丁目26番20号)

****プレストレストコンクリート建設業協会 (〒162-0821 東京都新宿区津久戸町4番6号)

*****プレストレストコンクリート建設業協会 (〒162-0821 東京都新宿区津久戸町4番6号)

Bridges comprising concrete slabs for the upper and lower beams combined with a truss web of steel are called combined-truss bridges. This configuration permits the construction of a bridge lighter in weight and with longer spans than would normally be possible with conventional concrete designs. In spite of the fact that the connectors used to secure concrete to steel play a crucial role in forming an integrated structure that transmits stress effectively, little research or experimentation has been performed into the fatigue or bearing capacity of connector elements. We performed tests on three different types of connectors in order to determine basic criteria for connectors used in these types of bridges.

Key Words: PC bridges with Steel Truss Web connection

1. はじめに

鋼トラスウェブPC橋は、主桁の上・下床版にコンクリート、ウェブに鋼トラスを用いた構造で、従来のコンクリート橋に比べて自重の軽減やスパンの長大化が可能である。本構造は海外にて数橋の実績（フランスのプレーニユ高架橋等）があり、我が国でも、第2東名高速道路において採用が計画されている（図-1）。鋼トラスウェブPC橋において、その格点部はコンクリート部材と鋼部材を一体化してかつ断面力の伝達機構となる構造上重要な部分である。しかし、現在まで、コンクリートと鋼トラス材の格点構造については、その疲労特性や破壊耐力の評価方法を含めて、実験・研究がほとんどな

れていない。そこで、格点部の構造特性を把握する目的で、構造の異なる3種類の実物大の格点部を製作し、施工性ならびに実物大試験を行った。試験としては格点部の施工性能試験、疲労試験、耐力確認試験を実施するとともに、FEM解析等により、試験との比較検討を行った。本報文ではこれらの結果について報告するものである。

2. 格点構造

実橋で最も活荷重によるトラス軸力変動幅（活荷重載荷時 $N_{max}=1126\text{KN}$ ～ $N_{min}=552\text{KN}$ ）の大きい格点を対象に3種類の試験体を製作し、試験を行った。

2.1 TYPE1(PC鋼棒格点構造)

図-2にTYPE1(PC鋼棒格点構造)を示す。モルタルを充填したトラス材とコンクリート桁にPC鋼棒を配置し、付着により力を伝達する構造である。PC鋼棒は、付着力を高める目的でネジ節のある異形PC鋼棒(φ36)を採用した。トラス材は、丸形鋼管(φ457.2mm t=19mm)で、材質および機械的性質がSTK400相当のものを使用した。引張側トラス材に12本、圧縮側トラス材に4本のPC鋼棒を配置した。鋼管と充填モルタルの付着力を高めるため、トラス材鋼管内面には、ビード溶接を施している。モルタルの付着強度は、28日で30N/mm²以上を確保できるものとした。

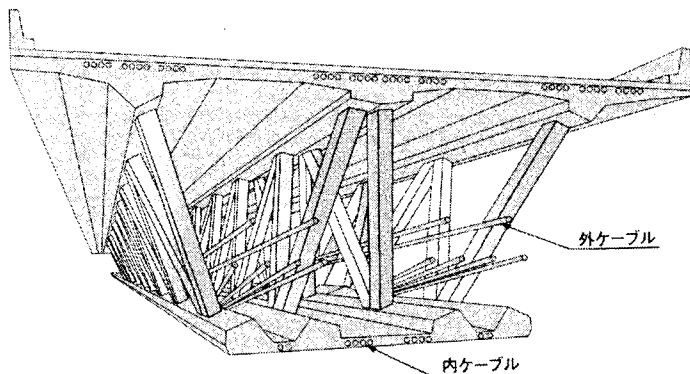


図-1 鋼トラスウェブPC橋

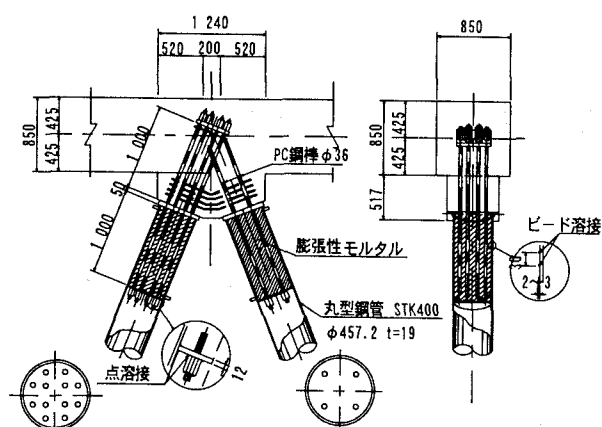


図-2 TYPE1 (PC鋼棒格点構造)

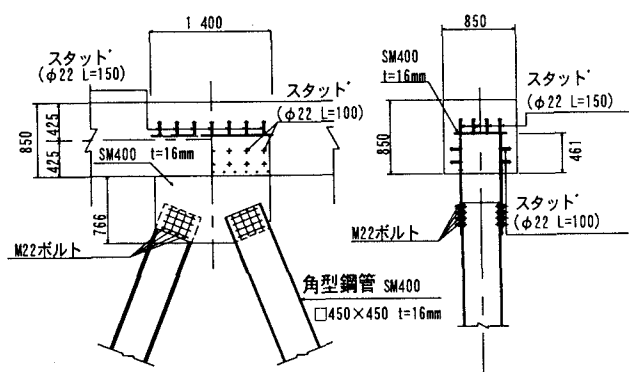


図-3 TYPE2 (ガセット格点構造)

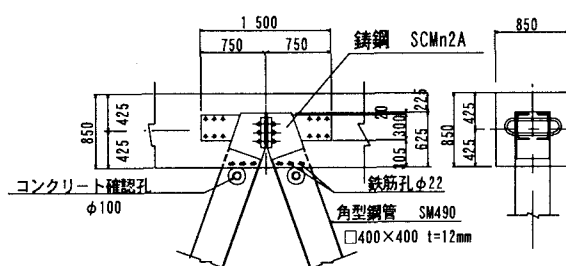


図-4 TYPE3 (鋳鋼格点構造)

2.2 TYPE2 (ガセット格点構造)

図-3にTYPE2 (ガセット格点構造)を示す。コンクリート桁内部にガセットプレートを埋め込み、ガセットプレートとトラス材をボルトで摩擦接合した構造である。本試験では、ガセットプレートとして、材質がSM400、厚さが16mmのものを使用し、φ22の頭付きスタッドを配置した。鋼管は、角型鋼管(450mm×450mm t=16mm)、材質および機械的性質がSM400相当のものを使用した。ガセットプレートとトラス材は、M22の高力ボルトで接合した。水平面のプレートには、十分な締め固めができるようにバイブレーターを挿入できるコンクリート充填孔(φ80)を設けた。

2.3 TYPE3 (鋳鋼格点構造)

図-4にTYPE3 (鋳鋼格点構造)を示す。格点部として、コンクリート桁内に鋳鋼部材を埋め込んだ構造である。鋼管は、角型鋼管(400mm×400mm t=12mm)とし

た。材質および機械的性質は、格点部、角型鋼管部ともに、SM490B相当のものを使用した。鋳鋼とトラス材は両面溶接で接合した。鋳鋼は、凸側と凹側の2部材からなっておりボルトで固定されている。配置は、引張側に凸部材、圧縮側に凹部材とした。

3. 施工性能試験

施工性能試験は、施工が困難と考えられる下床版を想定して行った。

3.1 トラス材のセット

本試験において、TYPE1は現場でトラス材の角度調整を行い、TYPE2とTYPE3は工場でトラス材を所定の角度で固定し、搬入した。実橋の施工を想定した場合、TYPE1は工場での膨張性モルタル注入と現場での角度調整が必要となり、TYPE2は角度調整の必要がないが、トラス材の長さの微調整ができない。TYPE3は必要であれば、現場において角度の微調整が可能である。

表-1 コンクリート打設時間

	TYPE1	TYPE2	TYPE3
打設時間	32分	34分	37分
	待ち5分含む		

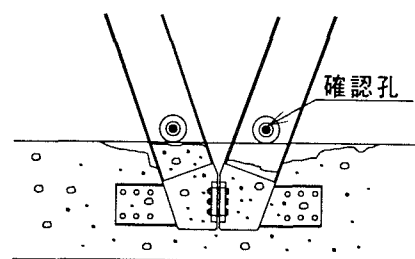
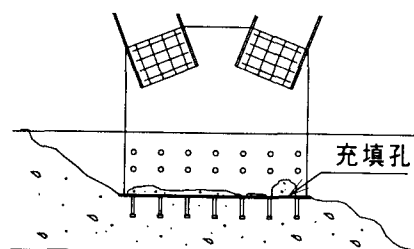
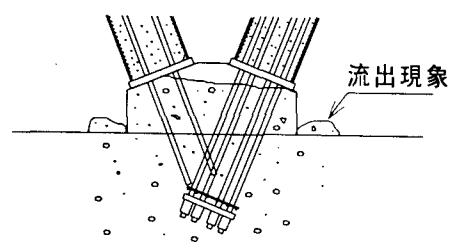


図-5 コンクリート打設状況図

3.2 コンクリート打設

各格点構造の打設時間を表-1に示す。コンクリートは、ポンプ車を使用して打設した。図-5にコンクリート打設状況図を示し、以下に、打設性能をタイプ別に示

す。

1)TYPE1 は、異形P C鋼棒や突起の鉄筋が配置されているにもかかわらず、打設時間が3タイプのうち最も短い。これは、鋼材が多く配置されているものの、それぞれの間隔が十分確保できているためと推察される。しかし、突起部の打設により、桁部にコンクリートが流出する現象が確認されたことから型枠や打設方法に工夫が必要である。

2)TYPE2 は、プレートにコンクリート充填孔が設けてあるため、プレート底部付近まで打ち上がった時点で充填孔よりコンクリートが噴き出ることが確認できた。また、打設開始時には、充填孔にバイブレーターを挿入できるため、プレートより下側のコンクリートを確実に締め固めることができ、鉄筋量も少ないためコンクリート打設作業は容易であった。しかし、トラス材端部付近のコンクリート天端均しに時間を要した。

3)TYPE3 は、格点部補強鉄筋が密な配置になっていることと、トラス材内部の所定の高さまでコンクリートを打ち上げる必要があることなどから打設に時間を要した。補強鉄筋の数量・配置間隔の改善やトラス材の確認孔の設置などが今後の課題である。

4. 荷重試験

4.1 試験概要

試験要領図を図-6に示す。コンクリート打設・脱型後、十分なコンクリート強度が得られたことを確認し、トラス部材と下部ベースはピンで接合、反力床にP C鋼棒で固定した。また、荷重時に桁が鉛直方向にそることを抑制するために、鉛直材を用いた。

本試験体は、コンクリート桁部が上方であることと、下部ベースのピン廻りに余裕があることから、部材軸直角方向に対して不安定なため、桁の両側に振れ止めを設置した。鋼トラス材への荷重は、コンクリート桁にアクチュエーターを用いて水平荷重をかける方法で荷重した。

図-7に荷重要領を示す。試験は、活荷重相当の変動軸力($N_{max}=1126\text{KN} \sim N_{min}=552\text{KN}$)を与えて200万回の繰り返し荷重を行った後、試験装置能力の限界まで荷重を行った。耐力確認試験の荷重は、3段階漸増荷重とし、トラス材の軸力で、疲労試験における最大荷重1126KNを荷重後いったん除荷し、その3倍の荷重3378KNを目標に荷重、再度除荷したのち、最大耐力を確認する荷重を行うこととした。ただし、荷重装置の制限から、試験体の明確な破壊がみとめられない場合でも、トラス斜材の軸力が4700KNに達した時点で実験を終了することとした。

4.2 疲労試験結果

以下に、疲労試験結果を示す。

(1)TYPE1 (P C鋼棒格点構造)

図-8に異形P C鋼棒の応力振幅の推移を示す。繰り

返し荷重による変化はなく、鋼棒の破断も生じなかった。実験値は最大で 0.67N/mm^2 、格点部に生じる曲げを考慮した解析値は 0.86N/mm^2 で、事前に行った異形P C鋼棒をモルタル定着した疲労実験では200万回繰り返し荷重の応力振幅の限界値は 1.27N/mm^2 であり、実験によって発生した応力振幅値は充分安全な値であったと考えられる⁶⁾。

また、鋼棒のひずみ分布も繰り返し荷重による変化はほとんど生じず、異形P C鋼棒とモルタルの付着性状にも変化は生じなかったと推察される。

コンクリートの発生応力は全ての点において微少であり、繰り返し荷重による変化はみられなかったが、定着突起部(引張側)に繰り返し荷重中にひびわれの進展が確認された(クラック幅 0.04mm)。また、コンクリート部材下面において荷重荷側定着突起の付け根付近に非線形の圧縮ひずみが計測された。

TYPE1 (P C鋼棒格点構造)について全般的に、疲労試験による大きな変状は生じなかった。

(2)TYPE2 (ガセット格点構造)

図-9はガセットプレートの主応力の推移を示す。プレートの応力の繰返し荷重による変化はほとんど生じていない。ガセットプレート中央部における最大主応力は 39N/mm^2 となり解析値(3次元FEM)の最大主応力 36N/mm^2 とほぼ一致した。

スタッドジベルには、ほとんど応力が発生せず、コンクリート部材とガセット部材の格点部のずれも確認され

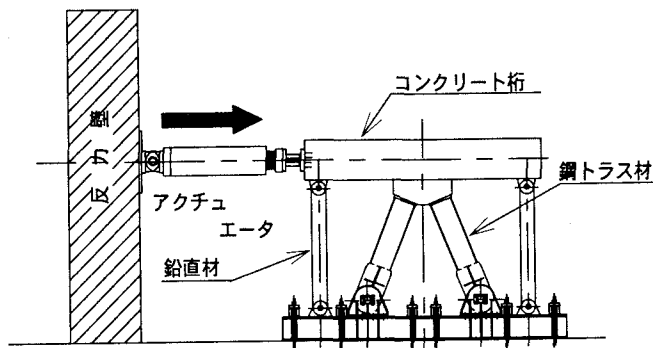


図-6 試験要領図

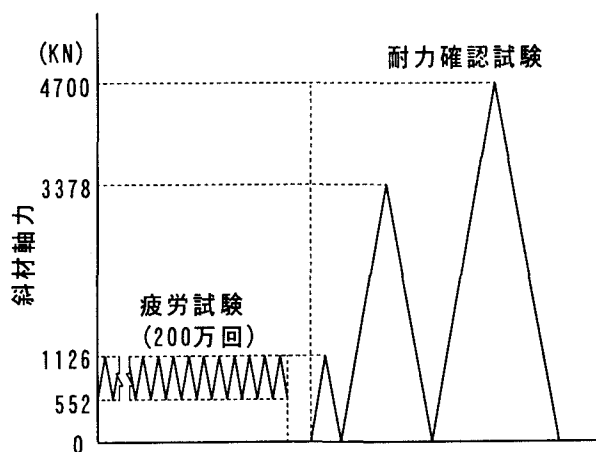


図-7 荷重要領

なかった。

TYPE2 (ガセット格点構造) について疲労試験による大きな変状は生じなかった。

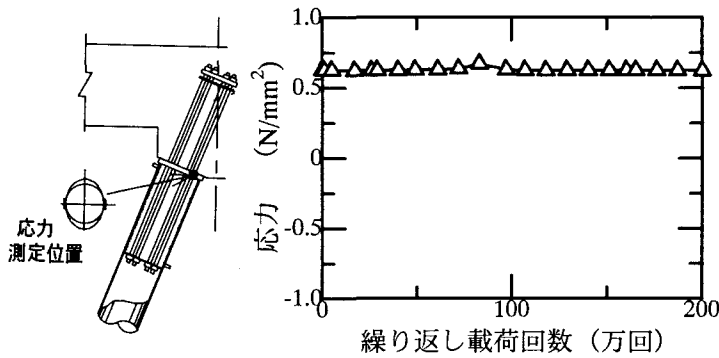


図-8 TYPE1 PC鋼棒応力振幅の推移

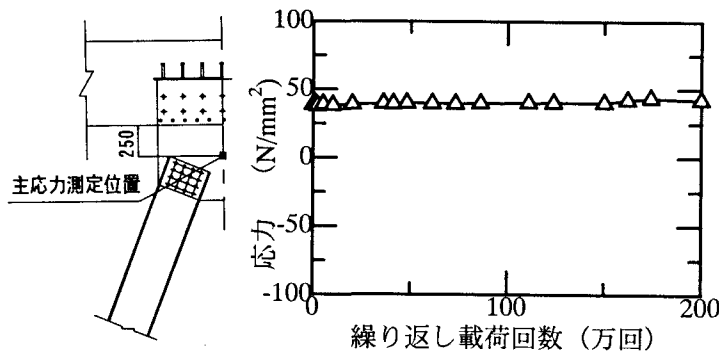


図-9 TYPE2 ガセットプレート主応力の推移

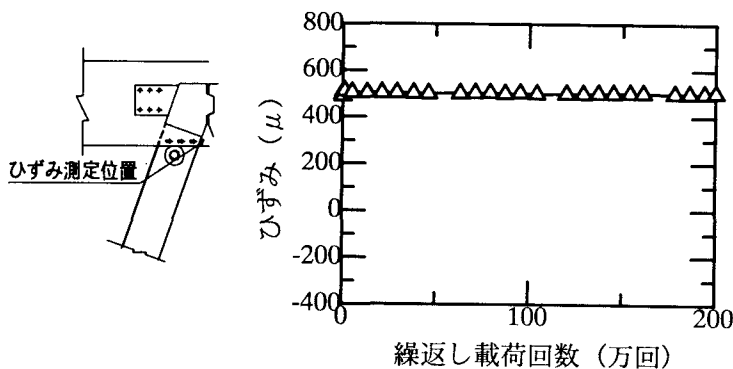


図-10 TYPE3 鋼管ひずみ(溶接部近傍)の推移

(3)TYPE3 (鋳鋼格点構造)

図-10に鋼管と鋳鋼部の溶接近傍の鋼管のひずみの推移を示す。繰返し载荷による変化はみられなかった。コンクリート中に埋め込まれた部分の鋼管ひずみがコンクリート外側のひずみに比べやや減少するものの、溶接箇所近傍に500 μ 近いひずみが計測された。また角鋼管の平面部とコーナー部のひずみは、疲労試験中ほぼ同一値であった。鋳鋼部の嵌合部のひずみはほとんど生

じず、繰返し载荷による変化はみられなかった。

コンクリート梁下面部の引張斜材と圧縮斜材の間に橋軸方向のクラックが生じた。

TYPE3 (鋳鋼格点構造) について全般的に、疲労試験による大きな変状は生じなかった。

4.3 耐力確認試験結果

以下に、耐力確認試験結果を示す

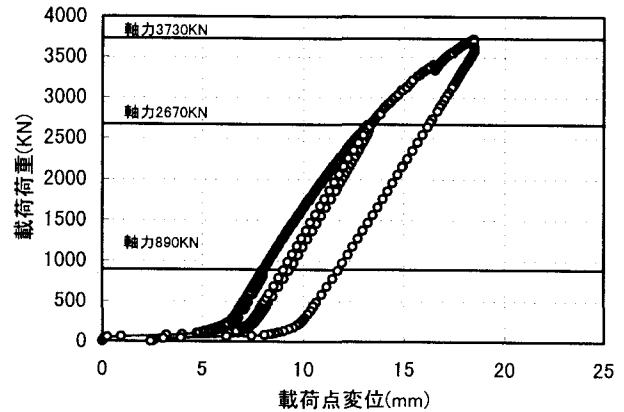


図-11 TYPE1 荷重と水平変位の関係

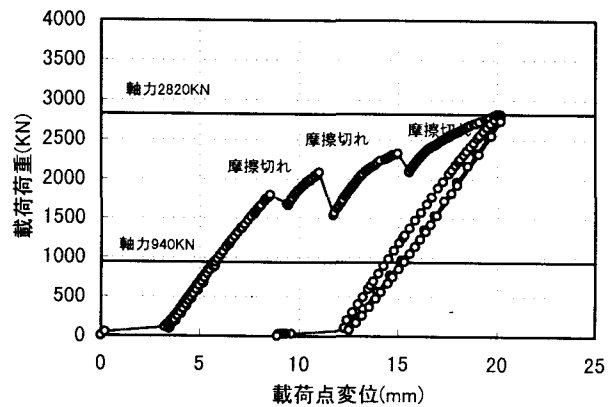


図-12 TYPE2 荷重と水平変位の関係

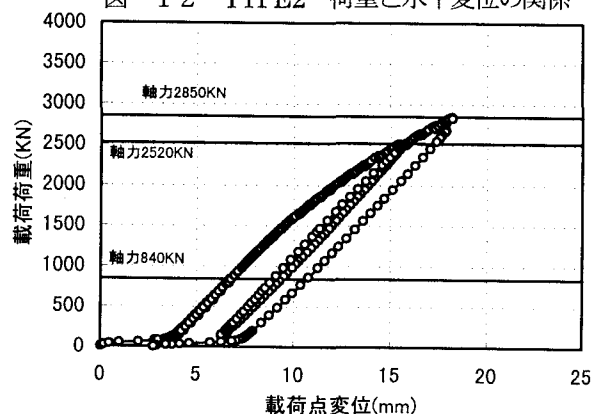


図-13 TYPE3 荷重と水平変位の関係

(1)TYPE1 (PC 鋼棒格点構造)

図-11に载荷荷重と水平変位の関係を示す。これによると、载荷荷重 100KN 程度までの初期には、試験体を固定しているピンの余裕から 5mm 程度の変位が生じているが、その後 1000KN まではほぼ線形であり、最大荷重

まで設計で想定していたような、鋼管とモルタルの間の付着切れによる破壊現象は確認できなかった。

格点部全体としては、コンクリート突起部側面にひび割れが若干入る程度であり、残留変位も1mm程度と小さく、おおむね健全であった。

鋼管とモルタル間で明確にずれた様子は確認されなかった。また、トラス斜材内のPC定着板が鋼管に溶接されているが、この部分は実験終了後も健全であった。

(2)TYPE2 (ガセット格点構造)

図-12に載荷荷重と水平変位の関係を示す。載荷荷重1760KNで圧縮側トラス材とガセットプレート間の一部でずれが生じ荷重が低減した。さらに載荷すると2090KNで圧縮側ボルト接合部全体がずれ、その後も載荷にともない荷重と変形が進行したが、2330KNの時点で今度は引張側トラス材とガセットプレート間でずれが生じ、その後2820KNまで載荷して実験を終了したが、ガセットプレートの座屈現象などは見られず、このときの残留変位は約10mmであった。

(3)TYPE3 (鋳鋼格点構造)

図-13に載荷荷重と水平変位の関係を示す。本実験では、載荷荷重2850KNまで破壊と考えられる現象は確認されなかった。載荷荷重1500KN程度から、鋳鋼部にひずみが発生しはじめたが、最大荷重時でも500μと小さく鋳鋼部に問題はないと考えられる。

5. 解析結果および考察

それぞれの試験体について3次元FEM解析等を実施し、試験値の検証を行った。解析は活荷重載荷時最大軸力 $N_{max}=1126KN$ がトラス材に導入されるように水平荷重を与えた。

5.1 TYPE1 (PC鋼棒格点構造)

PC鋼棒格点構造では、鋼管の定着突起の載荷側面付け根に局所的な圧縮ひずみが生じた。その現象を検証するため、3次元FEM解析を行った。解析モデルは引張側φ36異形PC鋼棒12本分の剛性を評価してバー要素にモデル化し、モルタルを充填した鋼管もその剛性を評価したバー要素とした。コンクリート桁部および定着突起はソリッド要素とした。圧縮側は鋼管から鋼管定着突起に軸力が直接伝達すると考え、圧縮側の異形PC鋼棒

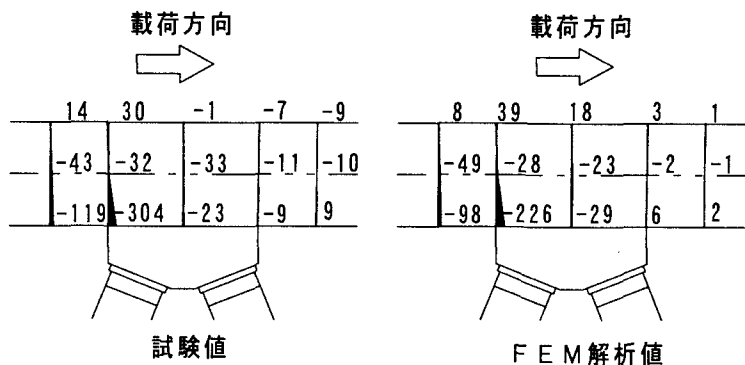


図-14 TYPE1 コンクリートひずみ分布

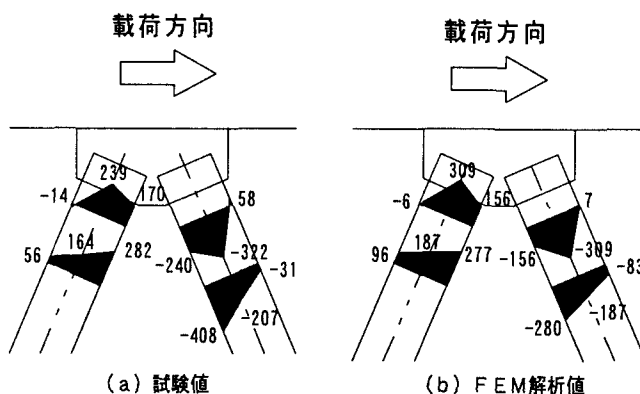


図-15 TYPE2 鋼管ひずみ分布

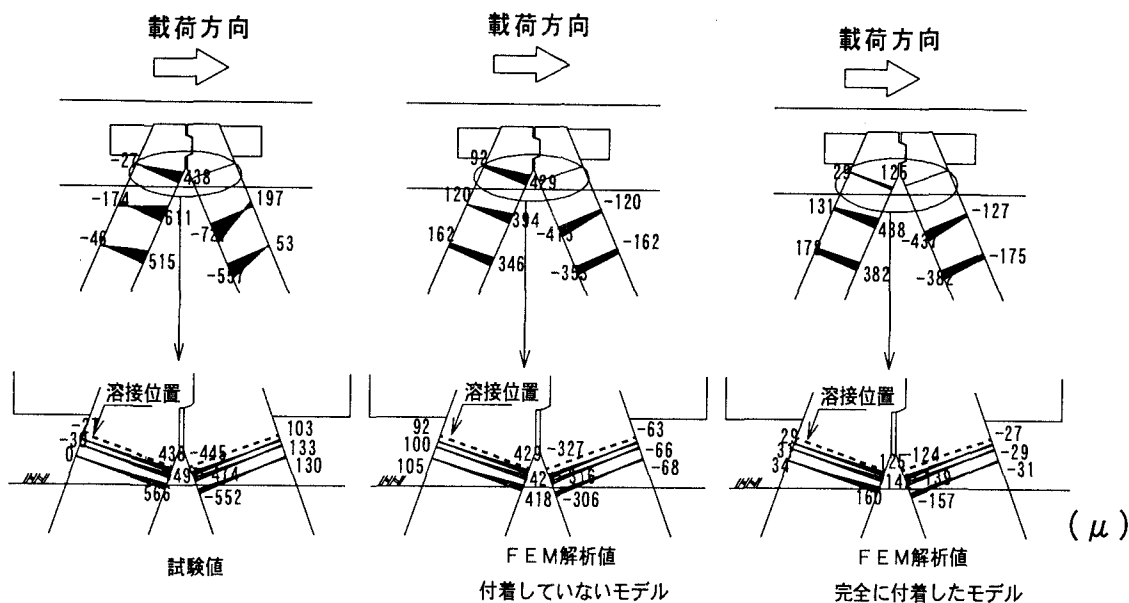


図-16 TYPE3 鋼管ひずみ分布

は考慮していない。

実測値とFEM解析値は図-14に示すように、使用状態の局部最大ひずみ（応力度） -304μ 程度（圧縮 9.5N/mm^2 ）に比べて、解析値は -226μ （圧縮 7.1N/mm^2 ）となり、解析値がやや小さい結果となったが、試験値の傾向がほぼ再現できた。ここで、この圧縮ひずみについては、応力のレベルが比較的low、また荷重が増加してもひずみの増分はほぼ線形的に増加していることを確認していることなどから、弾性的な挙動であると考えられるため、特に問題となる局部応力ではないものと判断される。

5.2 TYPE 2（ガセット格点構造）

ガセット格点構造におけるガセット取付部付近のひずみ分布が図-15(a)に示すようにガセットプレートと鋼管の接合面で大きくなる分布となった。この現象の把握のため、ガセットプレートおよび角型鋼管をシェル要素でモデル化した3次元FEM解析により検証を行った。

解析モデルは、ガセットプレート、角鋼管をシェル要素、コンクリート桁部は3次元ソリッド要素とし、ガセットプレートと角型鋼管を高力ボルトの位置で拘束した3次元FEMモデルとした。

図-15に実測値と解析値の比較を示す。ガセットと角型鋼管を高力ボルト位置で拘束した3次元FEMモデルにより、試験値の傾向が再現できた。これは軸力が高力ボルトによって鋼管からガセットプレートへ伝達されているため、鋼管の接合面のひずみが大きくなったものと考えられる。

また、本試験の範囲内では、トラス材付根の発生ひずみは骨組解析よりも小さな値となったが（試験値 -322μ 、骨組解析値 -333μ 、FEM解析値 -309μ ）、実橋ではガセットプレートの大きさなどにより剛性が変わるので、発生曲げモーメントが変化することが予想される。このため、ガセットプレートのモデル化に留意する必要がある。

5.3 TYPE 3（鋳鋼格点構造）

鋳鋼格点構造において、コンクリート中に埋め込まれた部分の鋼管ひずみがコンクリート外側のひずみに比べやや減少するものの、溶接箇所近傍に 500μ 近いひずみが計測されたため、3次元FEM解析により検証を行った。解析モデルは、ソリッド要素でコンクリート桁部、鋳鋼格点部、鋼管をモデル化し、コンクリートと鋳鋼および鋼管を完全に付着したモデルと付着のないモデルで解析した。

図-16に実測値と解析値の比較を示す。試験値では、コンクリート内に埋め込まれた鋼管の引張ひずみは、コンクリート外側の引張ひずみの値よりも減少している。しかし、格点部の構造を忠実にモデル化した3次元FEM解析において、鋼とコンクリートの付着条件を変えて解析した結果、完全に付着したモデルではひずみの減少量が大きく、付着のないモデルではひずみの減少がほとんど生じない結果となった。これらの結果から試験値は

ある程度の付着の影響があるものと推察できる。しかし、付着の影響度合の把握は困難であることから、鋳鋼と鋼管の溶接部について2次応力を考慮して疲労設計の検証が必要である。

6. まとめ

- 1) 本試験による3種類の格点構造で、それぞれ鉄筋配置やコンクリートの打設方法等で改善すべき点はあるが、施工性能に大きな差はなかった。
- 2) 3種類の格点構造ともに、問題となる挙動や異常は見られず、局部的に発生している応力も3次元FEM解析である程度予測できる。
- 3) PC鋼棒格点構造について載荷側コンクリートの下面の定着突起部に大きな圧縮ひずみが測定されたが、荷重に対して線形的に増加するひずみであり、弾性的な挙動であると考えられる。
- 4) ガセット格点構造のガセット鋼管の取付部に応力の乱れが生じたが2次応力を考慮した解析に基づいた設計を行えばよいものと考えられる。この際ガセットのモデル化に留意する必要がある。
- 5) 鋳鋼格点構造の鋳鋼と鋼管の溶接部は、剛結合によって生じる2次応力を考慮して疲労設計をする必要がある。

最後になりましたが、本試験の計画実施にあたり、ご指導をいただいた鋼・コンクリート複合トラス橋の設計施工に関する技術検討委員会の委員長である池田教授ならびに委員の先生方に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 本間、黒岩、日紫喜、古市、：複合トラス構造接合部の耐力確認実験；プレストレストコンクリート技術協会 第8回シンポジウム論文集、1998年10月
- 2) 黒岩、本間、藤田、益子：鋼・コンクリート複合トラス接合部の疲労実験；プレストレストコンクリート技術協会 第8回シンポジウム論文集、1998年10月
- 3) 猪熊、東田、寺田、岡田：巴川橋（複合トラス橋）の計画；土木学会第51回年次学術講演会、1996.9
- 4) 小川篤生：日本道路公団における複合構造橋梁の技術開発；第二東名神橋梁シンポジウム「これからの橋梁技術を考える」寄稿論文集、1997.4、pp4-1～4-14
- 5) 猪熊、本間、益子、日紫喜：鋼トラスウェブPC橋の格点構造に関する実験的研究；土木学会第54回年次学術講演会、1999.9
- 6) 益子、永井、杉村、高山：モルタルにより付着定着した異形PC鋼棒の疲労性状に関する実験的研究；土木学会第53回年次学術講演会、1998.10