

複合トラス橋梁の格点部の実験的研究

Experimental Study on a Joint in Prestressed Concrete Composite Bridges with Steel Truss Web

野呂 直以*, 室井 進次**, 二井谷 教治***, 江口 信三****

Tadayuki Noro, Shinji Muroi, Kyoji Niitani, Shinzo Eguchi

* 工修 新日本製鐵(株) 鉄構海洋事業部 (〒229-1131 神奈川県相模原市西橋本5-9-1)

** 工修 新日本製鐵(株) 鉄構海洋事業部 (〒100-0004 東京都千代田区大手町2-6-3)

*** 工修 オリエンタル建設(株) 技術研究所 (〒321-4367 栃木県真岡市鬼怒ヶ丘5)

**** オリエンタル建設(株) 技術研究所 (〒321-4367 栃木県真岡市鬼怒ヶ丘5)

Prestressed concrete composite bridges with steel truss web have been developed to reduce self-weight and take advantages of both steel and concrete. In this type bridges, upper and lower concrete flanges are directly connected to steel truss web at joints. Since forces in members are transferred through each joint, steel-concrete connection system at joint has to be strong enough to carry these forces. Also, a type of joint affects on easiness of assembling in a construction site as well as durability and economy of structures. A new type of joint composed of steel pipe and steel plate is proposed. Steel pipe diagonals are directly embedded into slab concrete at both ends. Dynamic and static loading tests were performed on a full-scale model test specimen to investigate dynamic and static behavior of the joint. Only a few cracks in concrete were observed under a fatigue test. And the static ultimate strength of the joint was more than 2.2 times of that under design service load.

Key Words : composite bridge, joint, full-scale model test

キーワード: 複合トラス構造, 格点, 実物大供試体

1. はじめに

主桁自重の軽量化,あるいは構造の合理化を図った複合橋梁が,フランスを中心に発展してきている。複合トラス橋は,従来のPC箱桁橋のウェブを鋼トラスで置き換えた構造で,鋼とコンクリートのそれぞれの特長を活かした構造である。このタイプの橋梁は,わが国において施工実績はないが,下部工を含めた全体構造の経済性,合理性に優れ,次世代の橋梁として注目されている。

これまでの基礎的な研究から,複合トラス橋の載荷荷重に対する桁としての挙動は,従来の箱桁と同様,はりとして近似できるものの,はり構造でいうところの曲げモーメントおよびせん断力は,床版および斜材の各部材間で主に軸方向力として伝達され,いわゆるトラス構造としての特徴を有していることがわかっている。したがって,各部材の接合点である格点部では,各部材からの断面力が集中し,複雑な応力状態になることが予想されるため,確実に応力伝達できる格点構造とすることが重

要である。また,複合トラス構造の適用支間は,100m程度あるいはそれ以上も考えられ,施工方法も張り出し架設工法などの方法が考えられる。したがって,複合トラス橋梁において格点部の構造は,力学的な観点からだけではなく施工性の面からも,さらには経済性および耐久性の面からも重要な部位であるといえる。

格点部の構造形式としては,種々のものも考えられるが,ここでは図-1に示すように斜材に丸形鋼管を用い,圧縮・引張斜材の端部を雄型および雌型構造とした構造形式を対象とした。格点部の構造は,図-2に示すように,斜材端部を直接床版コンクリートに埋め込み,鋼管を利用したせん断キー(以下,リングシャーキー)およびコンクリートを介して,斜材から斜材への軸方向力の伝達を行おうとするものである。本研究では,実物大の格点部模型供試体を用いて疲労載荷試験および静的載荷試験を行い,格点部の動的および静的耐力を調査したので報告する。

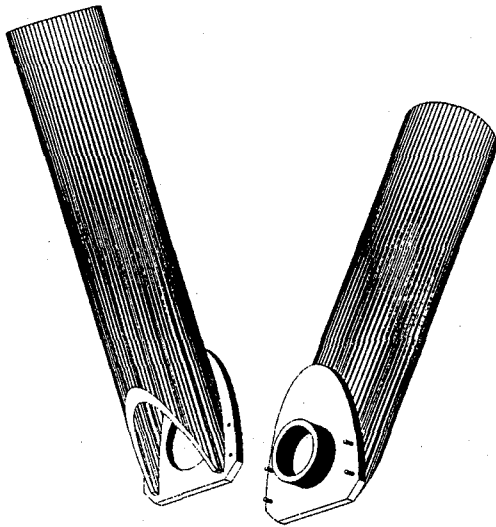


図-1 対象とする格点構造の概観

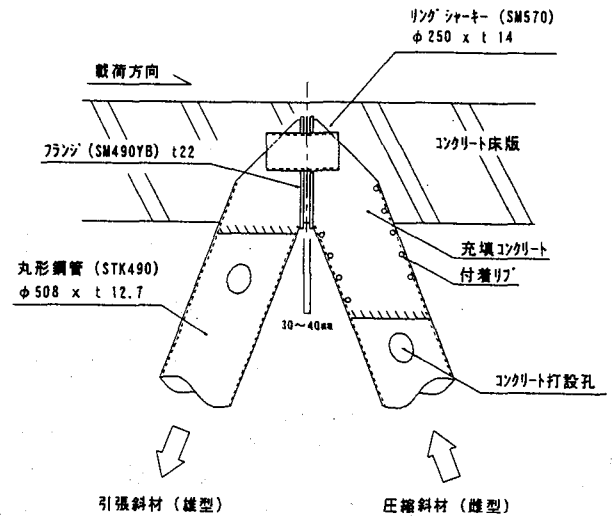


図-2 格点構造の概略

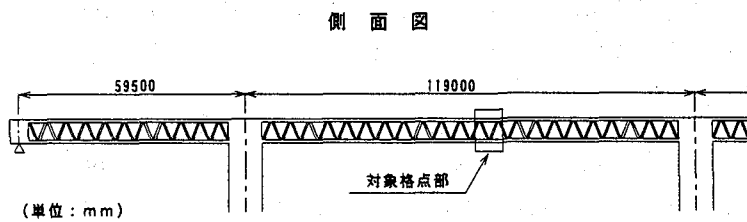


図-3 想定橋梁

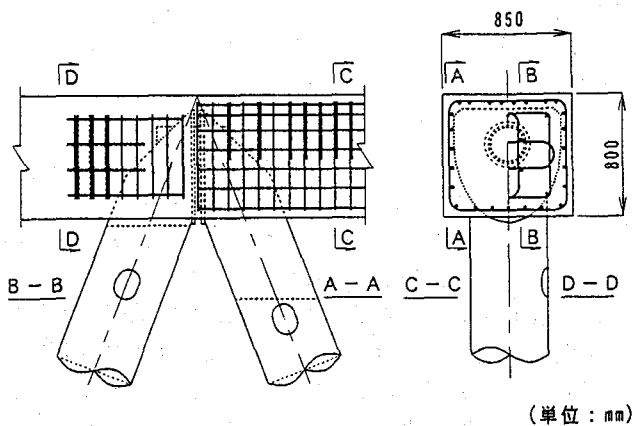


図-4 供試体格点部の配筋状況

2. 供試体の概要

2.1 供試体

試験に用いる供試体の寸法、設計荷重などを決定するために、図-3に示す橋梁を想定した。供試体は、想定橋梁にB活荷重を載荷した試設計の中から、支間中央部の下床版格点部を対象として、格点を中心に圧縮・引張

斜材および床版の一部を取り出した形のものとした。図-4に供試体の断面寸法および格点部の配筋状況を示す。鋼管の断面寸法は実物大とし、コンクリート床版の断面は矩形とした。これは、図-3に示す対象橋梁の床版部から、床版厚の薄い部分を省略し、格点周辺部だけを取り出したものである。コンクリート床版は、鉄筋コンクリート部材として設計し、スターラップは、道路橋示方書²⁾に基づく最小量を配置した。なお、設計荷重作用時とは、斜材軸力が想定橋梁のそれと等しくなる載荷荷重時を意味する。終局時の格点に作用するせん断力に対しては、本格点構造のせん断キーとして役目をするリングシャーキーのみで受け持つものと仮定し、設計荷重の3倍程度を想定して寸法を決定した。なお本載荷実験は、リングシャーキー等にて構成される格点本体の耐力の把握を目的としたため、斜材および床版の耐力は、リングシャーキーの耐力以上に設定した。斜材の途中にある楕円の開口は、鋼管内にコンクリートを打設するための打設孔と確認孔を兼ねたものである。コンクリートの打設は、格点部の周辺および鋼管内部など特に注意を要するため、別途行ったコンクリート打設施工試験によって決定した方法・手順によって行った。

表-1 コンクリートの配合

コンクリート 種 類	粗骨材 の最大 寸 法 (mm)	スランブ (cm)	スランブ 70- (cm)	水セメント 比 W/C (%)	水粉体 比 W/(C+LS) (%)	空気量 (%)	細骨材 率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)								
								水	セメント	膨張 材	混和 材	細骨 材	粗骨 材	混和 剤	混和 剤	増粘 剤
								W	C	E	LS	S	G	A 1	A 2	A 3
普 通	20	8±2.5	—	50	—	3±1.5	45	165	330	—	—	813	1005	6.6	—	—
高流動	13	—	65±5	70	32.7	2.5±1.5	50	180	257	40	253	790	796	—	11.6	0.4

表-2 コンクリートの性状

	普通	高流動
スランブ (cm)	7.5	—
スランブフロー (cm)	—	68×72
空気量 (%)	2.3	3.8
コンクリート温度 (°C)	32	25
圧縮強度 (N/mm ²)	45.5	55.8
弾性係数 (N/mm ²)	3.19×10 ⁴	2.99×10 ⁴

表-3 使用鋼材の種類と諸数値

鉄筋 (SD345)	D16	D19
降伏強度 (N/mm ²)	380	368
引張強度 (N/mm ²)	577	592
弾性強度 (N/mm ²)	2.06×10 ⁵	2.06×10 ⁵
鋼管	斜材	リングシャーキー
種類	STK490	SM570
寸法	φ508×12.7	φ250×14
降伏強度 (N/mm ²)	410	621
引張強度 (N/mm ²)	576	682
弾性強度 (N/mm ²)	1.62×10 ⁵	1.89×10 ⁵
フランジプレート (SM490YB)		
降伏強度 (N/mm ²)		403
引張強度 (N/mm ²)		545
弾性強度 (N/mm ²)		2.12×10 ⁵

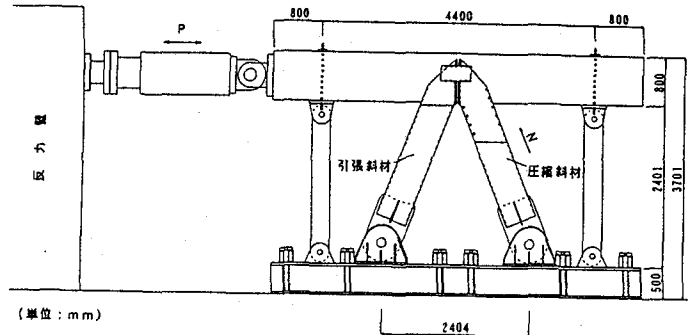


図-5 載荷供試体

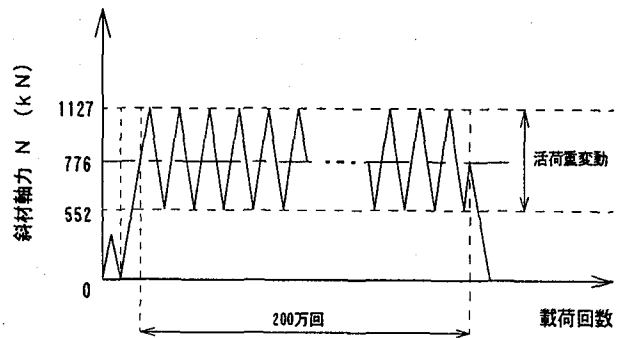


図-6 疲労載荷荷重

2. 2 使用材料

供試体に使用したコンクリートは、普通コンクリートおよび高流動コンクリートの2種類とした。床版および鋼管内部などの一般部には、粗骨材最大寸法20mmの普通コンクリートを用いた。図-2に示すように、両斜材端部のフランジプレート間は、40mm程度の間隔を設けている。これは、張り出し架設による施工時の上げ越し調整および誤差吸収が行えるように考慮したものである。このフランジプレート間は、間隔が比較的小さいため、コンクリート打設時の充填性を考慮して、粗骨材最大寸法を13mmの高流動コンクリートを使用した。また、高流動コンクリートは、目地部コンクリートの乾燥収縮によるプレートとコンクリートと肌別れを防止するため、膨張材を添加し、収縮補償コンクリートとした。コンクリートの配合を表-1に、フレッシュコンクリートおよび試験時の硬化コンクリートの性状を表-2に示す。

鋼材に関しては、鉄筋がSD345のD16およびD19を使用した。斜材には丸形鋼管STK490φ508、リングシャーキーには丸形鋼管SM570φ250、フランジプレートにはSM490Yをそれぞれ使用した。供試体に使用した鋼材の種類と物理的特性値の試験値を表-3にまとめて示す。

3. 疲労載荷試験

3. 1 試験方法

載荷試験時の供試体組立て状況を図-5に示す。圧縮・引張斜材とコンクリート床版からなる供試体とこれを支持する鋼製の治具とを組み合わせたπ型のトラス構造とした。荷重の載荷は、載荷能力2,000kNのアクチュエータを用いてコンクリート床版端面より水平方向に加力した。

荷重の載荷は、図-6に示すように、予備載荷を行った後、想定橋梁の試設計で算出した活荷重時の変動に相当する荷重（圧縮斜材の軸力において $N_{max}=1,127kN$ 、 $N_{min}=552kN$ ）を振動数1～3Hz、繰り返し載荷回数を200万回として載荷を行った。なお載荷荷重は、圧縮斜材の軸応力にて管理した。また測定項目は、鋼材およびコンクリートのひずみを中心に行い、コンクリートのひび割れ状況についても観察した。

3. 2 試験結果および考察

疲労載荷試験において、200万回の繰り返し載荷を行ったが、鋼材の降伏などの異常は確認されなかった。図-7は、載荷試験終了後のコンクリート床版上面のひび割れ状況である。ひび割れは、載荷回数178万回において引張斜材のフランジ直上で発生したが、載荷試験終了までひび割れ長さおよびひび割れ幅に変化は見られなかった。このひび割れの原因として、剛度が急変することによる応力の集中が考えられる。なお、格点中央近傍のコンクリート床版の側面の最大主引張応力度は $1.0N/mm^2$ 、軸方向鉄筋の最大引張応力度も $9.1N/mm^2$ と発生応力レベルは低く、載荷回数に依存せずほぼ一定値を示した。これより、コンクリート床版は、繰り返し荷重による影響がほとんどないといえる。一方、斜材のせん断キ-

して機能するリングシャーキーも図-8に示すようにひずみ振幅と載荷回数の関係はほとんど変化がなく、繰り返し載荷による影響がなかった。次に引張斜材となる雄型鋼管とフランジの溶接部のひずみ振幅を図-9に示す。溶接部に発生するひずみは、載荷回数に依存せずほぼ一定であったが、鋼管頂部（図-9の①部）のひずみは他の溶接部に比べて大きい振幅を示した。また本箇所では、最大活荷重状態で $88.5N/mm^2$ の引張応力が発生し、鋼管一般部における平均引張応力度の約1.6倍に相当する応力集中が発生した。これは図-10に示すFEM解析結果とほぼ同様の結果となった。これより、本箇所の溶接継手は、継手の区分等級に対する疲労設計曲線³⁾にしたがい、E等級の継手を採用する必要があるといえる。したがって、本箇所の溶接継手は、荷重条件や使用環境に応じて疲労照査し、検討する必要がある。

供試体の変形は、コンクリート床版の載荷面に設置した計測点の水平方向の変位振幅から確認を行い、載荷試験開始時、終了後ともに図-11に示すようにほとんど変化しなかった。また、この変位振幅量は、骨組み解析による解析値 $1.5mm$ とほぼ一致し、格点部としての剛性の低下がほとんどなかったといえる。一方、鋼管埋め込み部のコンクリートと斜材の肌離れも目視検査では確認されなかった。

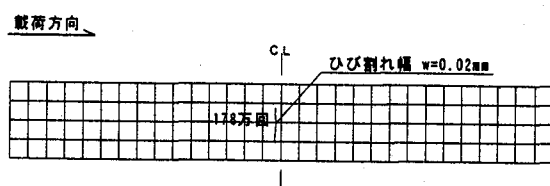


図-7 コンクリート床版上面のひび割れ観察図

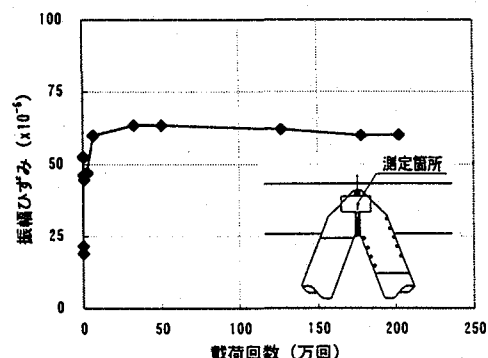


図-8 疲労載荷試験におけるリングシャーキーのひずみ振幅

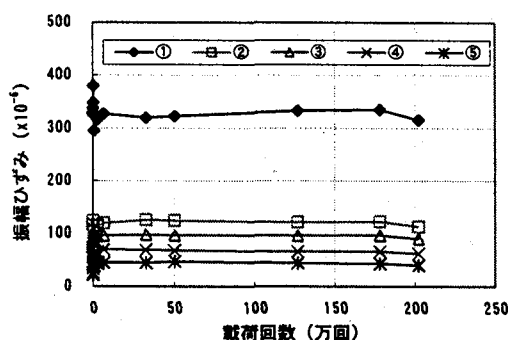
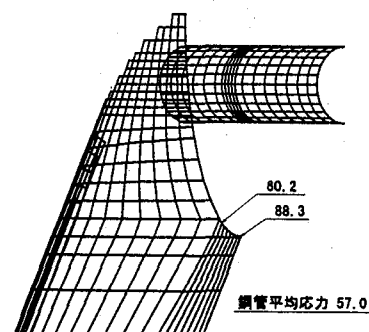
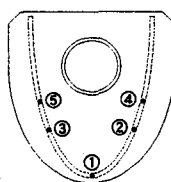


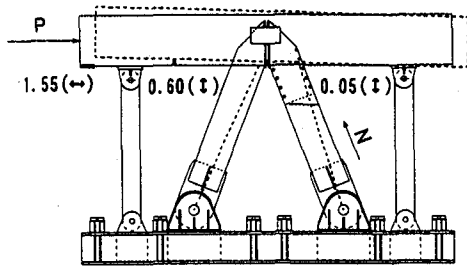
図-9 フランジ溶接部のひずみ振幅



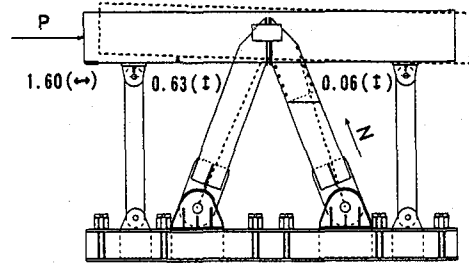
(単位: N/mm^2)

図-10 フランジ溶接部のFEM解析結果

疲労載荷試験開始時



疲労載荷試験終了後



(単位: mm)

図-11 疲労載荷試験前・終了後の供試体の変形形状
(活荷重変動に対する変形量を示す.)

4. 静的載荷試験

4. 1 試験方法

疲労載荷試験終了後の供試体を用いて静的載荷実験を行った。荷重の載荷ステップは、図-12に示すように3段階の漸増載荷とした。なお、本試験における最大載荷荷重は、載荷装置（アクチュエータ）の載荷能力から2,000kNとした。第1のステップでは設計荷重作用時まで、すなわち、圧縮斜材の軸力が想定橋梁の設計荷重作用時の値（以下、設計斜材軸力といいNd）である1,127kNが作用する荷重をピークとして載荷を行った。その後、荷重を除荷し、第2のステップではコンクリート床版に2.6N/mm²の最大主応力が作用する載荷状態をFEM解析にて算定した結果をもとに、設計斜材軸力の1.8倍まで載荷した。この2.6N/mm²とは、供試体コンクリートの設計

圧縮強度 $f_{ck}=40.0\text{N/mm}^2$ をもとに、土木学会の算定式⁴⁾から求めた引張強度算定値である。再度荷重を除荷した後、第3のステップでは、載荷装置の最大能力となる設計斜材軸力の2.2倍まで載荷した。測定項目は、疲労載荷試験と同様、鋼材とコンクリートのひずみ、およびコンクリートのひび割れ状況について観察した。

4. 2 試験結果および考察

静的載荷試験において、コンクリートのひび割れや鋼材の降伏などの異常は確認されなかった。図-13は、格点を構成する鋼部材において最大主ひずみが発生した格点中心部におけるリングシャーキーのひずみ測定値である。この図から、斜材軸力が設計斜材軸力の約1.9倍となる時、ひずみの増加傾向が変化することがわかる。なお、リングシャーキーの最大主ひずみは、最大載荷荷重状態でも、

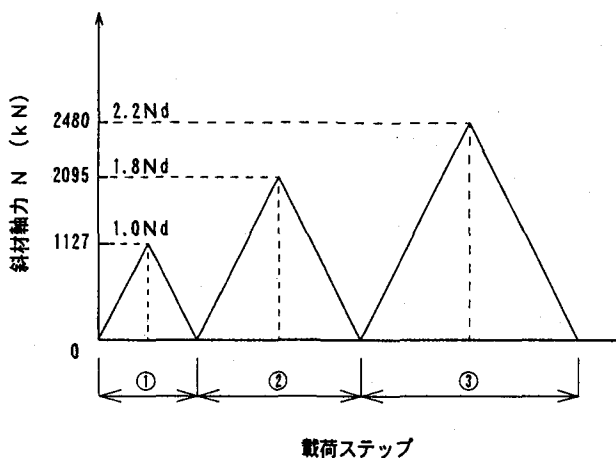


図-12 静的載荷荷重ステップ

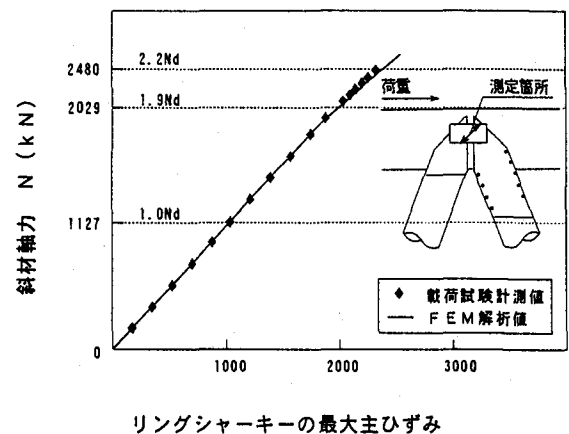


図-13 静的載荷試験におけるリングシャーキーの最大主ひずみ

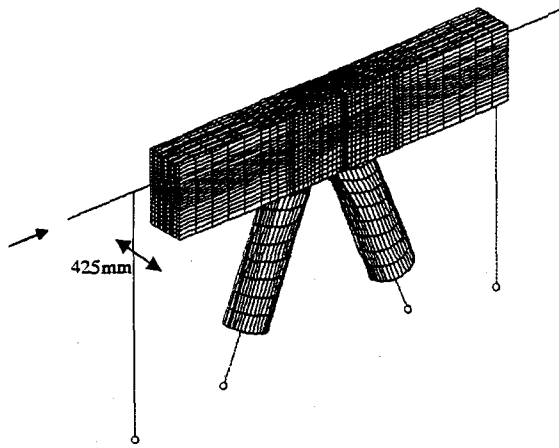


図-14 FEM解析モデル

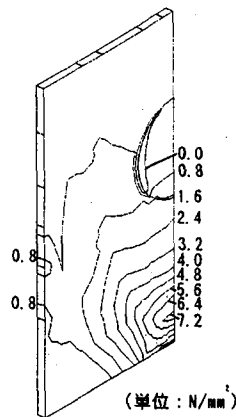


図-15 圧縮斜材フランジの発生せん断応力度 (設計斜材軸力作用時)

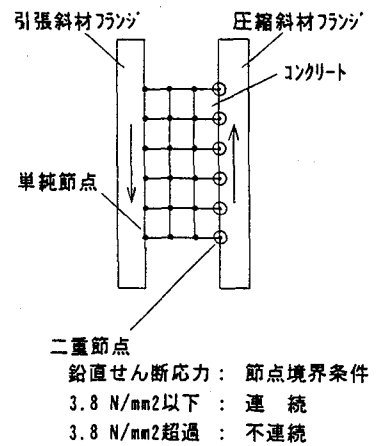


図-16 鋼とコンクリート接触界面の境界条件

鋼材の降伏ひずみに達していない。このことから、斜材軸力が設計斜材軸力の約1.9倍となる時点から、格点部の力の伝達が変化し始めたことが考えられた。そこで、図-14に示すような解析モデルによりFEM解析を行った。解析モデルは、供試体の载荷軸の中心線上で対象条件を与えた1/2モデルで、支点や荷重条件は試験方法に準じた。材料特性は、供試体の特性値に合わせて表-2と同値とし、材料非線形は考慮していない。一方、鋼材とコンクリートの要素同士は節点を共有させた。設計荷重作用時を想定した解析において、図-15に示すようにフランジとコンクリートの接触界面に過大なせん断応力度が発生することが判明した。しかし、載荷試験においてコンクリート床版にひび割れがほとんど発生していなかったため、接触界面のせん断応力度が、 3.8 N/mm^2 をこえる節点については、図-16に示すように節点を共有させず、接触要素を用いて同一座標間では圧縮軸力のみを伝達させる接合条件に変更した。この 3.8 N/mm^2 とは、コンクリートの付着強度推定式⁹⁾から算定した供試体のコンクリートの実圧縮強度に対する付着強度である。図-13の実線は、FEM解析で求めたリングシャーキーの最大主ひずみと載荷荷重の関係を示す。この図から、FEM解析の結果は、静的載荷試験の計測結果にほぼ近似することがわかる。このことから、斜材軸力が設計斜材軸力の約1.9倍となる時、フランジとコンクリートの接触界面で付着切れが発生したと推測される。これより、接触界面の接合条件を適切に評価し、解析モデルを作成すれば、本格点構造はFEM解析でほぼ適切に評価できるといえる。

5. まとめ

斜材に丸形鋼管を用い、施工性を考慮して圧縮・引張斜材の端部を雄型および雌型とした格点構造形式を対象に実物大供試体による疲労および静的載荷試験を行った。試験および解析結果から得られた結果を次に挙げる。

- 1)コンクリート床版には、疲労の影響はほとんどないものと考えられる。
- 2)斜材とフランジ、リングシャーキーとフランジの溶接部には軸変動力の作用により一部比較的大きな変動応力が作用するため、使用状態を考慮して溶接継手方法を検討する必要がある。
- 3)疲労載荷試験では載荷回数に依存せず、変形量はほぼ一定値を示し、格点部の剛性は低下しなかった。
- 4)格点部は設計斜材軸力の2.2倍以上の耐荷力を有した。
- 5)設計斜材軸力の約1.9倍で格点部の挙動が非線形になるが、フランジとコンクリートの付着切れが原因と考えられた。
- 6)鋼材とコンクリートの接合条件を考慮したFEM解析を行えば、供試体の格点部を構成する鋼部材の発生ひずみが比較的良好に再現できた。

本研究において、鋼とコンクリートの付着が本格点構造の挙動および耐荷力に大きく影響することが判明した。鋼とコンクリートの付着に関しては、定量的に把握された例も少なく、現状においても不明な点が多い。そこで、これら付着強度の定量的な把握に向けて、鋼とコンクリートの付着強度試験を実施中である。なお、この試験結果については別の機会に報告したいと考えている。

参考文献

- 1)二井谷教治, 正司明夫, 二階堂輝之, 渡瀬博: 鋼トラスウェブPC模型桁の載荷試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp931-936, 1998.7
- 2)(社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説書 III コンクリート橋編, pp126-168, 1996.
- 3)(社)日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説書, pp22-38, 1993.
- 4)土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], pp19-22, 1996.

(2000.9.14受付)