

(35) 波形鋼板ウェブを有する広幅員一面吊り P C 斜張橋への鋼製斜材定着部構造の適用

宮本 健次¹・山田 菊雄²・辻村 隆³・町 勉⁴

¹ 日本道路公団 本社 建設事業統括部 (〒100-8979 東京都千代田区霞が関3-3-2)
E-mail:kenji.1.miyamoto@jhnet.go.jp

² 日本道路公団 中部支社 建設事業部 (〒460-0003 名古屋市中区錦2-18-19)
E-mail:Kikuo.Yamada@jhnet.go.jp

³ オリエンタル建設株式会社 大阪支店 技術部 (〒503-0012 大阪市北区芝田2-6-23)
E-mail:Takashi.Tsujimura@oriken.co.jp

⁴ 正会員 オリエンタル建設株式会社 第二技術部 (〒102-0093 東京都千代田区平河町2-1-1)
E-mail:Tsutomu.Machi@oriken.co.jp

第二東名高速道路矢作川橋は、世界初の波形鋼板ウェブP C・鋼複合斜張橋である。本橋の最大支間235m、橋長820mはともに波形鋼板ウェブP C橋として世界最大であり、上部構造には世界最大級の上下線一体（8車線；総幅員43.8m）の一面吊り構造を採用している。主桁断面の中央に導入される斜材張力を有効かつ確実に主桁全断面に伝達できる性能が要求される斜材定着部構造には、FEM解析による検討の結果、鋼製定着梁構造を適用した。また斜材定着部横桁には、主桁自重を軽減できる鋼製横桁を適用した。

本稿では、本橋の主桁斜材定着部の選定に関する検討、および構造の安全性と設計の妥当性の確認を目的として実施した主桁斜材定着部の耐力実験・要素実験・疲労実験について報告する。

Key Words : *hybrid cable-stayed bridge, prestressed concrete girders, corrugated steel webs, steel anchor structure, perfobond leisten*

1. はじめに

第二東名高速道路矢作川橋は、第二東名高速道路と東海環状自動車道との共有区間で、1級河川矢作川を横過する波形鋼板ウェブP C・鋼複合斜張橋である。この橋の最大支間235m、橋長820mはともに波形鋼板ウェブP C橋として世界最大であり、上下線一体（8車線；総幅員43.8m）構造の一面吊り構造は世界最大級である。

この工事は、2005年3月開催の「愛・地球博」や中部国際空港へのアクセス道路となること、および名古屋圏の道路の渋滞緩和への対応等の観点から、厳しい工期制約があった。これらに対し、構造的にはコンクリートと鋼のメリットを最大限生かした複合構造を積極的に採用するとともに、最新の解析技術や様々な構造実験・施工性確認実験を行なうことで、構造安全性や耐久性の他、経済性の確保を図っている¹⁾。

主桁断面の中央に導入される斜材張力を有効かつ確実に主桁全断面に伝達できる性能が要求される斜材定着部構造には、FEM解析による検討の結果、鋼製定着梁構造を適用した（図-1）。また

斜材定着部横桁には、主桁自重を軽減できる鋼製横桁を適用した。これにより一般的に煩雑となるP C斜張橋の斜材定着部の鋼製ユニット化や、上下床版コンクリートを分離して打設することができ、主桁施工の大幅な省力化と工程の短縮を可能とした。

本稿では、主桁斜材定着部の構造選定に関する検討について報告する。また、構造の安全性と設計の妥当性の確認を目的として施工に先駆けて実施した、1/2モデルによる耐力実験²⁾、孔あき鋼板ジベルを対象とした斜材定着部要素実験³⁾、および斜材定着部疲労実験⁴⁾について報告する。

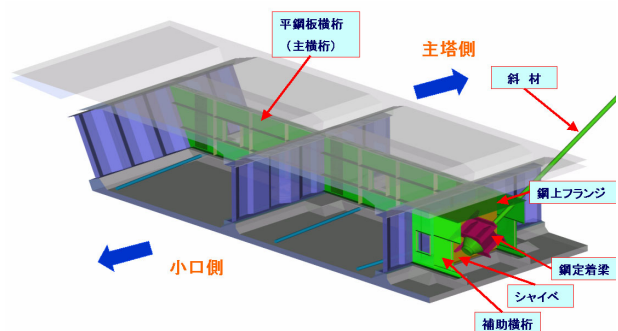


図-1 鋼製定着部を用いた斜材定着部

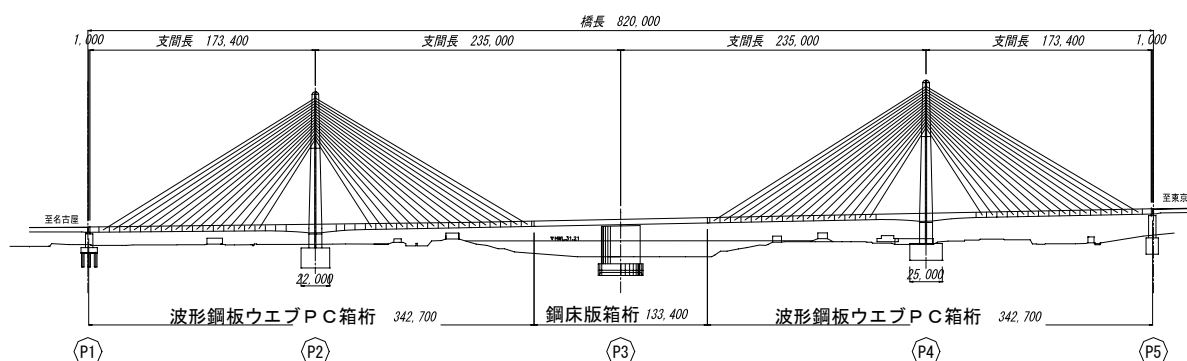


図-2 矢作川橋 一般図

2. 橋梁概要

以下に、本橋の橋梁概要を示す。また、橋梁の一般図を図-2に示す。

形式： 4 径間連続 P C ・鋼複合斜張橋
 橋 長： 820m
 支間長： 173.4m+2@235.0m+173.4m
 幅 員： 43.8m
 主 塔： R C 逆 Y 型主塔
 斜 材： セミファン形一面吊
 工 期： 2001年8月～2005年3月
 架設工法： 張出し架設工法

3. 主桁斜材定着部構造の選定

(1) 鋼製斜材定着部の適用

総幅員43.8mの主桁断面構成は、波形鋼板ウェブを用いた5室箱桁断面である。ここで課題となったのは斜材吊点を有する中央BOXの主桁間隔と斜材定着部構造であった。

この中央BOXには並列斜材が約1.1mの間隔で定着されるため、このBOX幅は斜材定着部構造と分けて考えることは出来ない。一般的に主桁間隔は狭い方が斜材定着部構造は小さくて済むが、当然他のBOXの床版スパンは大きくなる。さらに、本橋は波形鋼板ウェブを用いているため、外ケーブル定着部と同様に斜材定着部の局部応力の影響が波形鋼板にまで及び、そのため板厚が大きくなると言う懸念があった。

そこで、斜材定着部構造を、通常の P C 斜張橋で多く用いられているコンクリート構造、鋼板で定着突起形状と補強リブを設けその中にコンクリートを打設す

る合成構造、および、鋼製定着梁を用いる鋼製構造の3種類に絞り（表-1）、主桁間隔を3mと5mの2種類について比較検討した。ただし、鋼製構造の場合は、定着梁を波形鋼板ウェブに定着すると斜材定着力の橋軸方向成分に抵抗できなくなるため、定着梁の支持部材として主桁と平行に平鋼板のシャイベを設けている。

その結果、主桁間隔3mでも5mでも合成構造、コンクリート構造の場合は波形鋼板ウェブに大きな局部応力が発生し、波形鋼板ウェブの板厚に与える影響が大きく不可であった。そこで、どの形式の斜材定着部構造にしても、主桁間隔を5mとし、斜材定着部と波形鋼板ウェブの間に、鋼製構造と同様にシャイベのような波形鋼板の局部応力を緩和する部材を設ける必要性が認められた。このような経緯を経てさらに比較検討をした結果、波形鋼板に与える局部応力や張出施工サイクル工程に与える影響が最も小さいと予測された鋼定着梁形式を採用することとした。

最終的には、F E M解析による詳細な検討を行い、鋼製定着梁、シャイベ、横桁、補助横桁、フランジ等からなる斜材定着部構造を決定し、耐荷力実験による安全性の確認、及び疲労試験による構造細目の決定を行った。

表-1 主桁斜材定着部比較表

	①鋼定着梁タイプ	②合成定着タイプ	③コンクリート定着タイプ
イメージ図			
概算重量および経済性	鋼材 : 20.5 (t) 合計 : 44.2 (t) 最も軽量で経済性も③とほぼ同等 ○	鋼材 : 20.0 (t) 合計 : 75.0 (t) ③より鋼重増で経済性劣る △	鋼材 : 13.6 (t) 合計 : 103.1 (t) 最も重いが鋼重減で①とほぼ同等 ○
床版応力度	引張・せん断応力度が大きい △	引張・せん断応力度が大きい △	引張・せん断応力度が小さい ○
波形ウェブ応力度	鉛直方向応力度が小さい 31N/mm ² ○	鉛直方向応力度が小さい 42N/mm ² ○	鉛直方向応力度が大きい 112N/mm ² ○
施工性	コンクリート工少なく施工性良い ○	コンクリート工少なく施工性良い ○	突起部の型枠工が煩雑 △
総合評価	○	△	△

(2) 鋼製斜材定着部

横桁の適用

本橋は広幅員一面吊構造であり、斜材定着部横桁構造は主桁の横方向剛性、斜材張力の有効伝達長、床版横締鋼材の有効係数などに影響を与えるのみでなく、張出施工サイクル工程に与える影響も大きい。そこで、波形鋼板、平鋼板、鋼フレーム、鋼コンクリートサンドイッチ構造などに関し、比較検討を行った（表-2）。

この内、波形鋼板はマンホール等の開口部補強のためにアコーディオン効果が期待できず平鋼板と差異は認められない。鋼フレームは横桁開口部が大きく、施工性には優れているものの、広幅員ゆえにフレーム部材も大型となり鋼重量の割には剛性が小さく、また、コスト的にも不利であった。また、鋼コンクリートサンドイッチ構造は、上下床版をコンクリート部材で繋ぐことができ、そこに横桁横締鋼材を配置することで主桁全体の剛性を上げる効果はあるものの、反面、横桁重量が一箇所当り他の構造と比べ5倍程度の重量となり、それが斜材ケーブル構成にまで影響するとともに、施工性も劣る。

一方、平鋼板は鋼コンクリートサンドイッチ構造に比べ剛性には劣るものの、横桁横締鋼材も床版部に配置可能な本数で対処でき、斜材定着部構造との連続性も保て、施工性も良い。このような経緯から斜材定着部横桁は平鋼板構造とした。

表-2 横桁構造比較表

横桁構造	波形鋼板	平鋼板	鋼フレーム	コンクリート
横方向剛性(曲げ、せん断) 【張出先端たわみの比較】	29 mm ③	26 mm ②	35 mm ④	22 mm ①
直角方向上床版引張応力	-6.7 N/mm ² ③	-6.4 N/mm ² ②	-12 N/mm ² ④	-5.9 N/mm ² ①
必要横締本数(1S28.6)	22本 ②	23本 ③	23本 ③	21本 ①
横締め後張出先端たわみ	15 mm ③	13 mm ②	22 mm ④	10 mm ①
施工性	○	○	○	△
構造特性【問題点】	開口部の影響	プレストレス拘束	剛性不足	重量大
横桁重量	16 ton	16 ton	16 ton	85 ton
総合評価	○	◎	△	△



写真-1 斜材定着部の耐力確認実験供試体

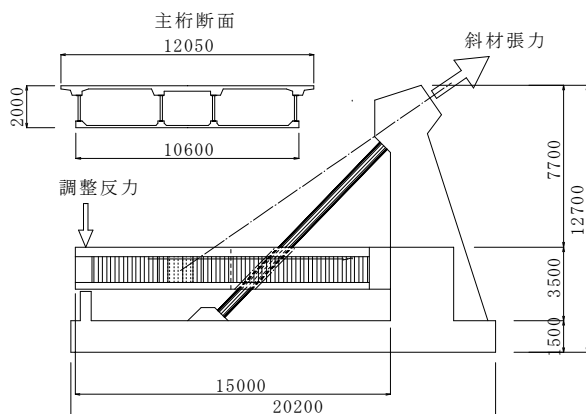


図-3 主桁斜材定着部耐力確認実験

4. 主桁斜材定着部の耐力確認実験

(1) 実験概要

本橋は、従来のP C斜張橋に比べて大幅な自重軽減を目的として、主桁ウェブ、横桁ウェブに鋼部材を用いた複合構造を採用している。さらに、主桁斜材定着部構造についても鋼定着梁構造を用いることにより上部構造の軽量化を果たし、全体工費の低減と、施工の省力化を可能としている。これらの構造は類似の実例がなく、実橋の設計においては斜材張力の伝達力を仮定し、各パーツごとの設計と3次元FEM解析による応力照査を行っているが、斜材定着部を構成する各々の部材は、橋梁の安全性および耐久性に重大な影響を及ぼす。そこで、実橋の施工に先立って、耐力力の確認と設計の妥当性の確認を目的に実験を行った。

供試体の縮尺は、構造部材の細目が再現できる最小寸法である1/2とした（写真-1）。また供試体断面は、事前解析により実験目的が達成可能であることを確認した上で、3室箱桁にモデル化した。供試体形状および寸法を図-3に示す。

(2) 実験概要とその考察

実験の主な結果と考察を以下に述べる。

a) 主桁斜材定着部構造の耐力

载荷は、①設計荷重（0.4Pu）、②架設時荷重（0.6Pu）③終局荷重（0.68Pu）および④斜材降伏荷重（0.74Pu）のステップで行った。その結果、供試体は、斜材降伏荷重を安定して保持し、目視可能な変状は観察されなかった。定着部構造の要求性能は、斜材の降伏荷重に対して主桁斜材定着部材および横桁部材が降伏しないという絶対条件であり、本実験により、実橋における必要耐力を十分に有していることが検証された。

b) 主桁斜材定着部構造の応力伝達性状

鋼・コンクリート複合構造の特性として、両者の結合の安定性を有することが重要課題となる。本構

造では、上下コンクリート床版と鋼ウェブのジベル結合が線形挙動を維持できるかが実橋設計の仮定の妥当性を検証する必要条件となった。そこで、実験で計測された変位、ひずみについて、線形FEM解析によって求められた理論値と比較した。

上床版横桁上の鉛直変位分布を図-4に示す。同図に示すように、各载荷ステップにおいて計測値は計算値と良く一致している。また、断面中央を支持点とする緩やかなたわみ性状が荷重に比例して見られた。この性状は、実橋施工時の主桁形状管理のデータとしてフィードバックした。

上床版横桁上コンクリートの橋軸直角方向ひずみ分布を図-5に示す。同図より、シャイベ上で局部的に大きな引張ひずみが生じているが、設計計算においても最もクリティカルとなっている部位であり、FEM解析とほぼ同値を示していることから、設計の妥当性が検証されたといえる。また、全てのコンクリートのひずみ分布に関しても計測値は計算値をトレースしており、荷重载荷とともに線形挙動を示している。鋼コンクリート接合部の相対変位に着目すると、斜材定着部や波形鋼板ウェブの接合部において0.1mm～0.2mmの相対変位が観測された。しかし、その量は僅かであり、繰り返し载荷を行っても残留変位の増加や非線形性の発現は観測されなかったことから、接合部の性能はほぼ剛結であることが評価できた。

以上の結果より、この複合斜材定着部および横桁合成構造は、安定的かつ効率良く各ウェブへ応力を伝達していることがわかる。

c) 波形鋼板ウェブの設計方法の検証

斜材降伏荷重载荷時における波形鋼板ウェブのせん断応力を図-6に示す。同図より、実測値が解析値を若干下回るものの両者とも外ウェブのせん断応力は、中ウェブの約60%を示している。また、载荷ステップにおける、設計荷重、架設時荷重および終局荷重の各载荷時における結果も線形挙動を維持しながら同様の傾向であった。この結果から、平鋼板横桁合成構造における各ウェブへのせん断力伝達に関して、3次元弾性FEM解析により評価することが可能であった。

5. 主桁斜材定着部の要素実験

(1) 実験概要

本橋の主桁側斜材定着部は複合構造であり、鋼定着梁に作用した斜材張力は、シャイベから定着部の上下フランジを介してコンクリートに伝達される。この時、上床版側の鋼コンクリート接合部には大きな水平せん断力と押込み力が作用する。一方、下床版側の鋼コンクリート接合部には水平せん断力と引抜き力が作用する。本橋では、定着部の鋼コンクリート接合構造には孔あき鋼板ジベル（Perfobond Leisten；以下、PBLと呼ぶ）が採用された。しかしながら、高強度コンクリート（ $f_{ck}=60\text{N/mm}^2$ ）を対

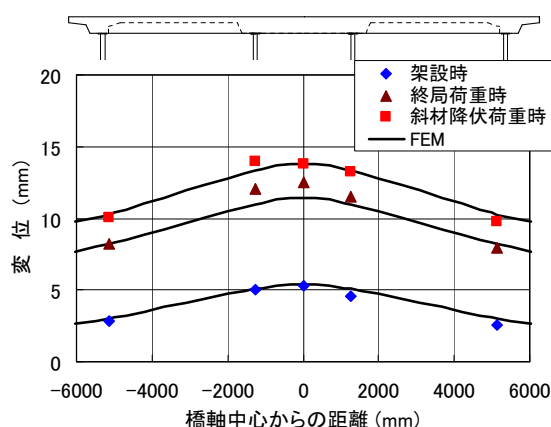


図-4 上床版鉛直変位（横桁上）

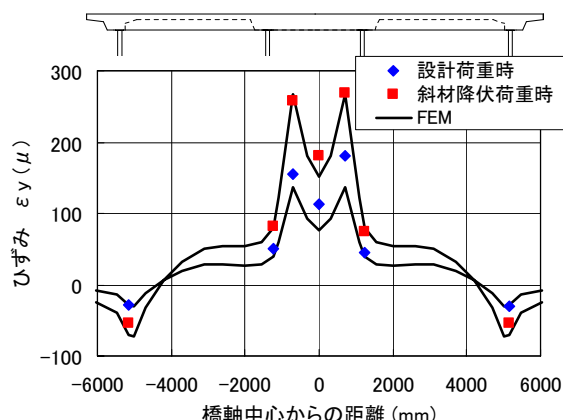


図-5 上床版コンクリート橋軸直角方向ひずみ（横桁上）

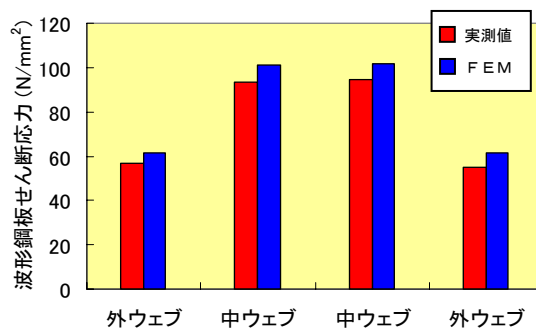


図-6 波形鋼板ウェブせん断応力

象とした場合や、せん断力に加えて引抜き力が作用する場合におけるPBLの設計法は確立されていない。そのため、所要性能を有するPBLの仕様について実大要素実験により検討を行った。

(2) 試験方法

実験供試体の概念図を図-7に示す。実橋における水平せん断力は、実験では鉛直ジャッキにより载荷した。また、下床版側の場合の鉛直引抜き力は、2基のコンクリート矩体の間に水平ジャッキを設け、これらを引き離すように水平力を作用させることで载荷した。上床版側の鉛直押込み力は、2基の矩体をPC鋼棒で結構し、これらを引付けるとに緊張力を与えた。

載荷荷重は、設計荷重時（0.4 Pu時）→架設荷重時（0.6 Pu時）→斜材降伏荷重時（0.74 Pu時）の順に行ったが、斜材降伏荷重時には、下床版側では引抜き力がジベル耐力を低下させると予想されたため、斜材張力による引抜き力が最大となる最下段斜材定着部の引抜き力をまず載荷し維持しながら、破壊まで水平せん断力を漸増した。上床版側では逆に、鉛直押し込み力はジベル耐力を向上させるため、鉛直押し込み力が最小となる最上段斜材定着部の押し込み力を維持しながら、破壊まで水平せん断力を漸増した。

(3) 試験結果

試験の結果、図-8に示すように、上床版側については、ジベル孔径70mmで、配置深さを孔径の2倍としたPBLを2列配置することにより、また、下床版側については、ジベル孔径120mmで配置深さを孔径の2倍としたPBLにより所要の性能を満足することを確認した。

6. 主桁斜材定着部の疲労実験

(1) 実験概要

本橋の主桁斜材定着部は、厚い鋼板の溶接で構成される構造であり、FEM解析より斜材定着梁付け根部に応力集中も確認された。また、近年鋼構造物の疲労損傷が顕在化し、維持管理上の重要課題となっており、本構造でも疲労耐久性が課題となった。以上の背景から、主桁斜材定着部のフィレット形状と溶接ディテールの検証のため、縮小モデルによる疲労試験を行った。

試験供試体は、斜材張力が最大かつ、活荷重変動力も最大であるP1側の側径間最上段斜材（定着角度： 31.9° ）の定着ブロックを、試験設備に設置可能な最大のスケールである7/10に縮小、モデル化した（写真-2、図-9）。比較試験を行うため、定着梁の左右で2通りのディテールとした。比較したディテールは、フィレット半径80Rと10R（定着梁端部）である。

(2) 試験方法

載荷荷重は、設計の最大活荷重変動力（P1側の側径間最上段斜材：4.09MN）に荷重縮小スケール倍（ $\times 0.49$ ）した2.0MNの変動荷重範囲に1.1倍の割り増しを行い、最大荷重2.3MN、最小荷重0.1MN、変動荷重2.2MNとした。載荷は試験供試体を上下反転させ、5MNサーボジャッキにて行った。この変動荷重で200万回の繰り返し載荷を行ったが、着目部に疲労き裂が生じなかったため、変動荷重を2倍の4.4MNとし、50万回追加載荷した。疲労試験の途中では、約5万回ごとに各着目部の目視での疲労き裂の確認、および静的載荷試験によるひずみの変化の確認を行った。

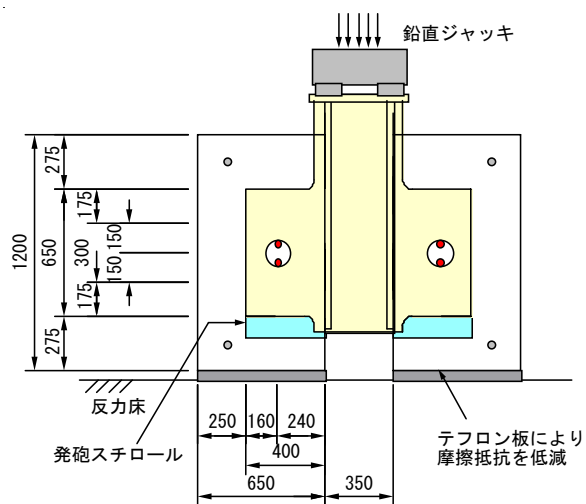
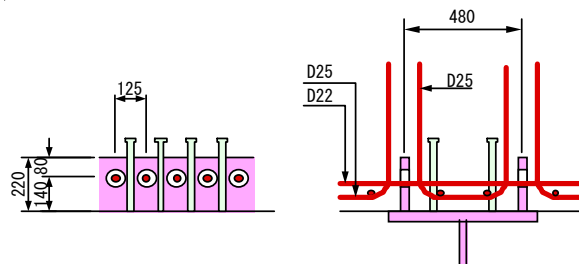
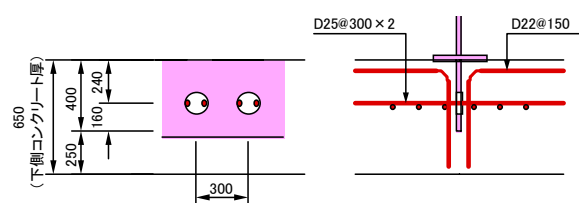


図-7 実験供試体概念図



(a) 上床版側



(b) 下床版側

図-8 採用したジベル構造タイプ³⁾



写真-2 疲労試験状況

(3) 試験結果

疲労試験開始前に実施した静的載荷試験より、最も作用応力度が高いフィレット部を主たる着目部とした。200万回載荷後、変動荷重を2倍にして繰り返し載荷を行ったところ、27万回載荷後にフィレット部（10R）の定着梁フランジ溶接止端部に、目視にて長さ5mm程度のき裂が確認された。この結果を

JSSCの疲労設計曲線⁵⁾上にプロット(図-10)すると、疲労上の最弱部である定着梁端部のフィレット部(10R)は、C等級の一定振幅応力の打ち切り限界未満で疲労き裂が生じており、強度等級はD等級程度であることが確認された。この結果と大型車計画交通量からフィレット部(10R)の疲労耐久年数は、最も不利な条件で100年以下と推定された。

以上の疲労試験結果より、フィレット部の半径は80Rを採用し、疲労上の安全性を確保するものとした。

7. おわりに

以上、矢作川橋の主桁斜材定着部の構造選定に関する検討、1/2モデルによる斜材定着部耐力実験、孔あき鋼板ジベルを対象とした斜材定着部要素実験、および斜材定着部疲労実験について報告した。本工事は、コンクリートと鋼のメリットを最大限生かした複合構造を積極的に採用することで、施工の大幅な省力化と工程の短縮を可能とした。本橋における鋼製斜材定着部構造の適用が今後の複合橋や長大P C橋の発展に寄与すれば幸いである。

謝辞：本検討は、第二東名高速道路矢作川橋の設計・施工に関する技術検討委員会(委員長：池田尚治横浜国立大学名誉教授)の一環として行ったものである。ご指導賜りました関係各位には厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 角, 寺田, 関根, 山内, 関口：矢作川橋の構造概要, 橋梁と基礎, Vol.39, No.2(2005.2)
- 2) 垂水, 浦川, 忽那, 今井：波形鋼板ウェブP C斜張橋(矢作川橋)における斜材定着部耐力試験報告, 第58回土木学会年次学術講演会(2003.9)

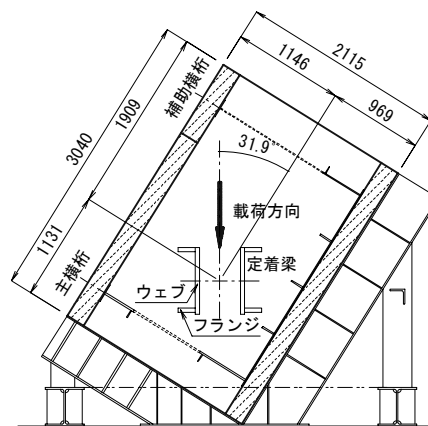


図-9 試験供試体

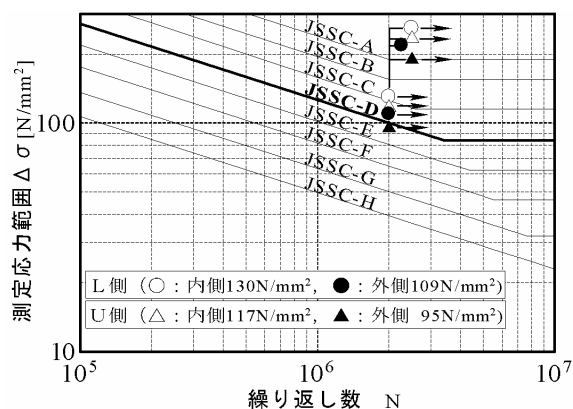


図-10 疲労設計曲線(フィレット部(10R))⁴⁾

- 3) 白谷, 垂水, 佐々木, 新井：第二東名矢作川橋の主桁側斜材定着部における孔あき鋼板ジベル構造と耐力確認実験, 第12回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム(2003.10)
- 4) 佐野, 山田, 栢木：矢作川橋の鋼主桁斜材定着部疲労試験報告, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集(2004.9)
- 5) (社)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説(1993.4)

APPLICATION OF STEEL ANCHOR STRUCTURE TO A HYBLID CABLE-STAYED BRIDGE SUSPENDED AS A SINGLE-PLANE WITH THE WIDE WIDTH

Kenji MIYAMOTO, Kikuo YAMADA, Takashi TSUJIMURA and Tsutomu MACHI

Yahagigawa Bridge, which is located in the New Tomei Expressway, is a hybrid cable-stayed bridge composed of prestressed concrete girders and a steel girder. Corrugated steel webs were applied to concrete girders for the first time as a cable-stayed bridge. The bridge is 820m long with the main span of 235m long, and both lengths are the longest in the world as a prestressed concrete bridge with corrugated steel webs. In addition, its girder, suspended as a single-plane with the width of 43.8m, is one of the widest bridges in the world. The steel anchor beam and steel cross beam were applied to the anchor structure of the main girder considering its effect on total weight, its construction period and its cost.

Adequacies and safeties of the structures were verified, making full use of analytic technologies and various experiments. A load-carrying capacity test, a element test for perfbond leisten, and a fatigue loading test on the steel stay-cable anchor structure were carried out.

In this paper, examinations on aptitude of a steel anchor structure by FEM and the details of the experiment on the steel anchor structure are described.