

合成桁斜張橋・プレキャスト床版の設計法と ループ状重ね継手の耐久性に関する研究

DESIGN OF PRECAST RC-SLABS AND DURABILITY OF LAPPED LOOP JOINTS
IN CABLE-STAYED COMPOSITE GIRDER BRIDGE

前田研一*・橋吉宏**・柳澤則文***・志村勉****・梶川康男*****

By Ken-ichi MAEDA, Yoshihiro TACHIBANA, Norifumi YANAGISAWA, Tsutomu SHIMURA
and Yasuo KAJIKAWA

This paper presents a design of precast RC-slabs and durability of its lapped loop joint in cable-stayed composite girder bridge. Generally, the composite girder bridge using precast slabs must be discussed about cracks of the slabs and their jointing system in the area where negative moment occurs. In the case of this bridge, the method to introduce compression stress into the slabs, and durability of the lapped loop joint, were investigated theoretically and experimentally, respectively. From results of these investigations, it became possible to introduce the required compression stress in the slabs by controlling tension of cables, and it was confirmed that the joint had enough durability to serviceability limit states.

1. まえがき

工期に制約のある新設工事や、急速施工を要求される補修工事において、プレキャスト床版が最近多く使用されるようになってきている。この傾向は、熟練技能者の不足もあって、今後さらに強まっていくものと思われる。

橋梁床版のプレキャスト化の工法は、型枠、配筋、コンクリート打設の3段階のうち、工場製作される範囲がどの段階までであるか、によって3種に大別される。このうち、最後の段階までを工場製作する工法は、床版本体を複数のパネルに分割して製作し、架設現場では鋼桁との結合と各パネル相互の接合のみが行われるもので、工期の短縮、品質管理の容易さに加えて、架設途中での仮通行も可能であることなどから、着実に地歩を固めつつある¹⁾。

この種のプレキャスト床版における問題の一つに、工場製作された各パネル相互の現場接合法があり、わが国では、橋軸直角方向に目地(間詰部)を配し、PC鋼材によって橋軸方向(配力鉄筋方向)にプレストレスを与えて、各パネルを連続化する方法が多く採用されている。間詰部の配筋が不要で、その幅を最小限に抑えることができ、プレストレスを適切に配分することによって、中間支点上の負の曲げモーメントにも対処できることから、着実に実績をあげるとともに連続合成桁への適用も既に試みられている²⁾。

* 工博 川田工業(株)技術本部中央研究室長 (〒114 東京都北区西ヶ原3-45-4)

** 工修 川田工業(株)技術本部中央研究室 (同 上)

*** 川田工業(株)技術本部中央研究室 (同 上)

**** 川田工業(株)技術本部技術部設計一課 (同 上)

***** 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920 石川県金沢市小立野2-40-20)

一方、海外で最近脚光を浴びている橋梁形式として合成桁斜張橋があり、プレキャスト床版が使用されているが、各床版パネル相互を現場接合によって連続化するためには、間詰部にループ状重ね継手が配置され、それに伴う局部的な配筋とコンクリート打設工が架設現場において行われている³⁾。斜張橋の場合には、斜吊材（ケーブル）からのプレストレスを利用することによって、負の曲げモーメントへの対処が可能であり、PC鋼材を配置することは力学的にみて必然性がない。床版のひび割れ対策として、橋軸方向にプレストレスをさらに加えた例があるが、経済的な方策とはいえない。

ループ状重ね継手は、海外では、合成桁斜張橋のみならず、一般の合成桁、非合成桁のプレキャスト床版パネル相互の現場接合に対しても多く採用されている。しかしながら、DIN1045、CEB-FIP等にもループ効果に関する明確な規定がなく、設計思想については必ずしも確立されているとはいえず、重ね継手長さの所要値に対する考え方には大きな差異が見られる⁴⁾。

わが国においては、橋梁用プレキャスト床版にループ状重ね継手が用いられた例はほとんどなく、対応する設計上の規定も全く整備されていないのが現状である。しかも、道路橋示方書（以下、道示と呼ぶ）のコンクリート橋編（4章 構造細目）では、鉄筋の継手位置は原則として一断面に集中させてはならないことが規定されており、文献4)では、その場合にひび割れに対して不利となることが示されている。したがって、間詰部への適用に際しては、継手の耐久性に関する確認実験を行うことが必要と思われる。

以上の観点から、著者らは、プレキャストRC床版におけるループ状重ね継手の基礎的研究を進めてきたが、今回、合成桁斜張橋の設計、施工に実際に携わる機会を得、床版へのプレストレス導入法、ひび割れ対策の検討、および、継手の耐久性に関する種々の確認実験を実施できた。本論文は、これらの結果について報告するものである。

2. 合成桁斜張橋の概要と形式選定の経緯

対象とした橋梁は民間橋梁であり、主として、モニュメント性や景観デザイン面から、斜張橋形式が選定されたものである。反面、全体形式選定後は、経済性の向上、工期の短縮が課題とされ、その結果、プレキャストRC床版を用いた活荷重合成桁斜張橋が採用されることとなった。

合成桁構造として、上述の海外における合成桁斜張橋の実施例では、桁高の非常に低いI断面鋼桁との合成が注目を浴びている。そこで、箱断面鋼桁とI断面鋼桁の両者について、道示に基づき比較検討を加えた。その結果、本橋の場合は、規模の大きさにもよると思われるが、桁高の低減や床組構造を含めた総合的な経済性には差異がないことがわかり、施工性や桁下からの美観などから、箱断面が採用された。

構造一般図を図-1に示すが、本橋では、合成後荷重による負の曲げモーメントを減じるために、主塔位置における主桁の中間支点を省き、床版に作用する引張応力の低減を図っている。なお、わが国においても、合成桁斜張橋の実施例は既にある⁵⁾が、プレキャスト床版を用いたものとしては本橋が最初のものである。

3. プレキャスト床版の設計法と構造詳細

合成桁斜張橋のプレキャスト床版の設計においては、通常の床版設計における各種の照査の他、引張応力

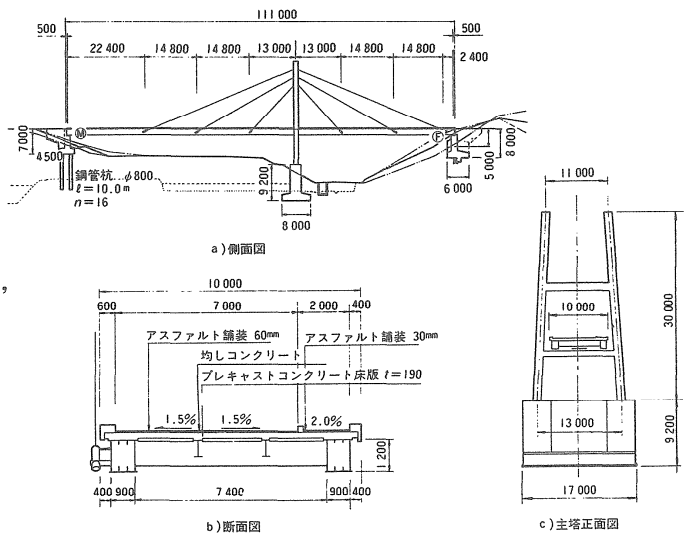


図-1 構造一般図

の低減を目的としたプレストレスの導入法、ひび割れ対策、および、ループ状継手の重ね継手長さの決定などの問題が考えられる。本章では、これらの問題への対処方法を述べるとともに、最終的に採用されたプレキャスト床版の構造詳細を示す。

(1) プレストレスの導入法

本橋の場合、前述したように、主桁の中間支点を省いて負曲げモーメントの低減を図っているが、それによっても床版に作用する引張応力は過大であり、プレストレスの導入が必要であった。すなわち、材令90日後の施工を考え、この材令に対応する係数を用いて、斜張橋モデルによるクリープ・乾燥収縮解析⁶⁾を行った結果からは、クリープ・乾燥収縮によるもののみで床版に最大約26kgf/cm²の引張応力を生じることがわかり、道示の鋼橋編（9章 合成桁）におけるコンクリート断面を有効とする設計を行う場合の版の許容引張応力度の規定を満足できないことは明らかであった。

そこで、プレキャスト床版の鋼桁との合成前後にケーブル張力の調整を行い、床版に圧縮応力を導入する方法を適用した。この方法は、図-2に示すように、2、3段目のケーブルに対して合成前にそれぞれ60mm、130mmの仮シムを余分に挿入し、合成後に仮シムを撤去して主桁の断面力分布を変化させ、合成後荷重によって負の曲げモーメントが支配的となる領域で正の曲げモーメントを発生させると同時に、斜勾配の緩やかな1段目ケーブルの張力の変化に伴って軸圧縮力をも発生させるものである。これにより床版には断面力の変化量に見合う応力がプレストレスとして導入され、道示の規定を満足することが可能となった。

なお、プレキャスト床版の有効幅は、影響線を用い、主桁の各着目点において最大、最小値を生じる状態での曲げモーメント図から、等価支間長を求めて算出した。

(2) ひび割れ対策と防水層

設計面からのひび割れ対策として、本橋では、負の曲げモーメントに対しコンクリート断面を無視する設計も同時に行い、この設計から橋軸方向鉄筋量2%（道示に定められた最小鉄筋量）を決定した。

他方、材料面からは、現場打ちされる間詰部のコンクリートに膨張コンクリート（設計基準強度 400kgf/cm²）を使用し、工場製作された床版パネルとの材令差に寄因するひび割れに対処することとした。膨張材量の決定に際しては、鉄筋量が比較的多いこともあり、実大模型による膨張および収縮試験も実施した。

また、ひび割れの要因の一つである打継ぎ目におけるせん断応力の伝達については、工場製作時に型枠に遅延剤を塗布した後、水で洗浄して粗面仕上げとすることで対処し、安全性を模型実験により確かめた。

さらに、これらのひび割れ対策を施しても、ひび割れを完全に除去することは不可能であることから、舗装と床版の境界に防水層を配し、漏水による鉄筋の腐食や劣化の進展に対処することとした。

(3) 重ね継手長さとは構造詳細

道示にはループ状重ね継手に対応する規定がなく、本橋では、安全側の配慮からループ状筋の効果を入れず、単なる引張継手の規定を準用することとした。したがって、重ね継手長さの所要値は鉄筋径の20倍である320mm、間詰部の幅は施工性から400mmとなり、図-3に示すような継手構造を採用した。

間詰部の幅が決定されたことによって、プレキャスト床版パネル(幅1500mm×長さ9700mm)の配置は図-

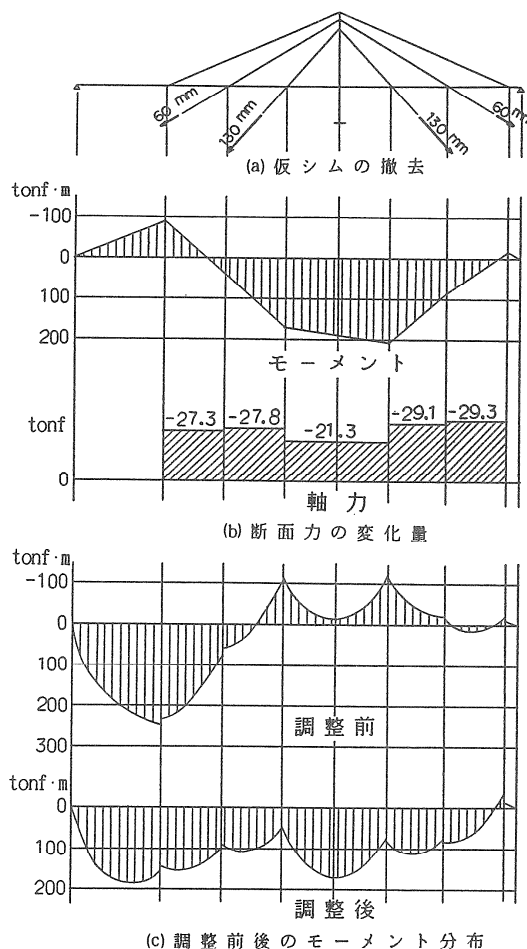


図-2 仮シム撤去による断面力変化

4に示すように定められた。本橋は、急速施工、および、カンチレバー架設を想定して、前述したように活荷重合桁として設計されており、鋼桁、ケーブルの架設完了後に各パネルを敷き並べ、現場接合により連続化した。その際、間詰部の現場打ちコンクリートとして膨張コンクリートを用いたことから、各パネルの固定を目的に、鋼桁との合成を間詰部のコンクリート打設に先行して実施することとした。

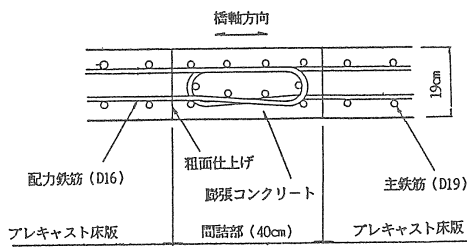


図 - 3 継手構造

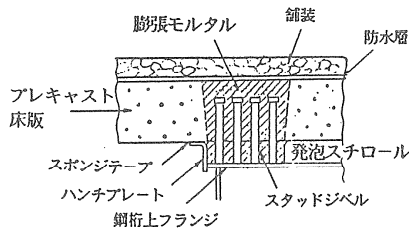
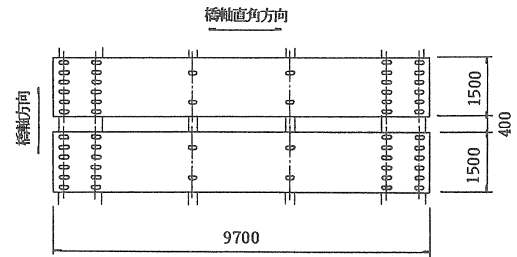
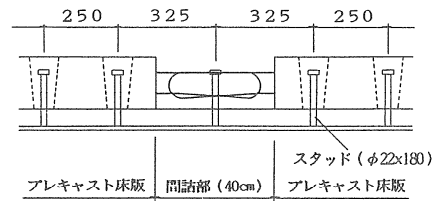


図 - 5 鋼桁との合成



(a) プレキャスト床版の配置



(b) スタッドジベルの位置

図 - 4 床版の配置とジベルの位置

床版パネルと鋼桁との合成は、図-5に結合部の詳細を示すが、スタッドジベルにより行った。製作、架設誤差に起因する不陸に対しては、ハンチプレートと床版との間隙にスポンジテープを挿入し弾性支持状態として軽減を図る一方、設計面では、主桁および縦桁で支持された床版の支点変形の影響も考慮に入れて照査した。パネル表面の開孔部から注入する材料としては、従来は無収縮モルタルが使用されてきたが、経済性を考え、本橋では膨張モルタルの採用を検討した。非常に微細な箇所へ注入されることから、十分な強度とともに流動性の確保が要求され、種々の配合試験や実物大模型による施工試験を実施した結果、所要の性能が得られ、採用が決定された。

4. ループ状重ね継手の応力伝達性能実験

道示に対応する規定がないこと、および、わが国における橋梁用プレキャスト床版への実施例もほとんどないことから、ループ状重ね継手の耐久性に関する確認実験を事前に行った。

本章では、引張応力の伝達性能を検証することを主たる目的として行った静的荷重試験の実験結果とその考察について述べる。

(1) 供試体と実験方法

合成桁構造では、一般に中立軸が鋼桁部に位置することから、負の曲げモーメントによってプレキャスト床版に生じる応力は、上、下縁ともに引張応力である。したがって、ループ状重ね継手の引張応力の伝達性能を検証することは、通常のRCはり供試体を用いた曲げ試験では不可能である。そこで、本実験では、このような全鉄筋が引張応力となる状態に

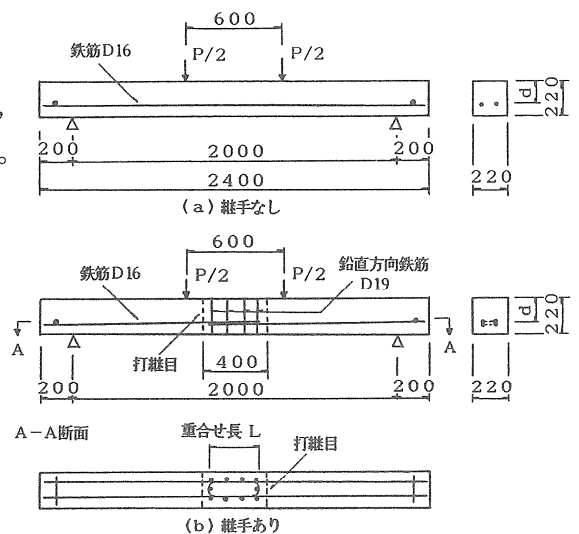


図 - 6 はり供試体と荷重方法

擬したモデルとして、図-6に示す供試体を採用した。この供試体は、図に同時に示した載荷方法によって引張応力を生じる水平面に鉄筋および継手を配置したものであり、著者らの知る限り過去に適用された例はないが、本実験の目的には十分に合致したものであると考えられた。

供試体の種類としては、比較のために、継手なしのもの3体（供試体名称N-A, B, C）の他、継手ありのものについては、重ね継手長さを320mm, 240mm, 120mmと変化させたものを各3体（供試体名称I, II, III-A, B, C）を用い、打継目も実際に即して設けた。これらの3種の重ね継手長さは、それぞれ、道示, DIN1045の規定, および, 文献4)における記述に基づいたものであり、将来において間詰部の幅の低減を図る上での資料を得ることも目的として適用した。

継手ありの各供試体には、橋軸方向鉄筋（配力鉄筋）に対応するもの（D16）の他、拘束筋の役割も果たす橋軸直角方向鉄筋（主鉄筋）に対応するもの（D19）が、鉛直方向にそれぞれ10本, 6本, 4本配置されている。載荷は、変位制御により、図-6に示したように2点載荷で行い、引張応力状態にある各供試体の鉄筋および継手の応力伝達性能の相違が、変形, ひび割れ, 耐荷力等に及ぼす影響の把握を試みた。

(2) 実験結果とその考察

実験結果の一部として、図-7, および, 図-8に、荷重-変位曲線, および, ひび割れ形状の代表例を、表-1に、降伏荷重と耐荷力を、各供試体について示す。

表-1における降伏荷重は、荷重-変位曲線から読取ったものであり、耐荷力は、最大変位を30mmとして実測された最大荷重値を表わしたものである。この表には、参考のために、有効高さd（設計値160mm）の実測値も示しておいた。

a) 継手の有無による影響

表-1, 図-7から、継手の有無によって、載荷初期の段階における曲げ剛性の変化の度合いが異なることがわかる。この曲げ剛性の変化は、ひび割れ発生に伴う全断面有効の状態からの剛性の変化により生ずるものであり、継手ありの場合は、図-8にも示したように打継目の位置で早期に第1ひび割れが発生することから、以後は緩やかな変化となっている。これに対し、継手なしの場合には、一定量の荷重載荷後に第1ひび割れが発生することから、その直後に急激な変化がみられる。

しかしながら、重ね継手長さが120mmのものを除いて、継手の有無による降伏荷重および耐荷力の差異はほとんどなく、ほぼ同程度の応力伝達性能を有することがわかった。

b) 重ね継手長さの影響

前項にも述べたように、重ね継手長さが320mmのものとは240mmのものとは、変形挙動, 耐荷力にはほとんど差異が見られない。DIN1045の規定は、ループの有効性は認めていないものの、単なる重ね継手とはせず、半円形フック付重ね継手と同じ条件を適用して、鉄筋径の15倍に定めたものである。

したがって、ひび割れ形状はかなり異なり、本実験のみから単純に判断はできないが、重ね継手長さの所要値の低減の可能性は十分にあることがわかった。

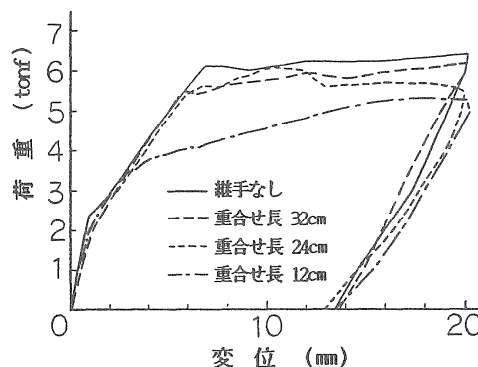


図-7 荷重-変位曲線

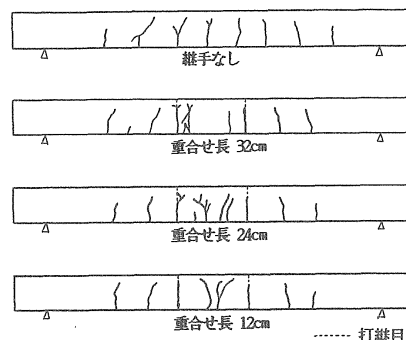


図-8 ひび割れ形状

表-1 降伏荷重と耐荷力

供試体番号	重ねせ長 L (mm)	鉛直方向鉄筋本数 (D19,本)	有効高さ d (mm)	降伏荷重 (tonf)	耐荷力 (tonf)
N-A	-	-	162	5.94	6.83
N-B			162	5.85	6.43
N-C			162	5.81	6.87
I-A	320	10	156	5.42	6.32
I-B			157	5.63	6.56
I-C			157	5.73	6.87
II-A	240	6	157	5.62	6.18
II-B			161	5.60	5.92
II-C			156	5.86	6.39
III-A	120	4	156	-	5.48
III-B			156	-	3.74
III-C			156	-	5.89

c) コンクリートの腹圧力による伝達性能

一方、重ね継手長さが 120mm のものは、他の供試体と全く異なる性状を示しており、耐荷力の値には大きなバラツキがみられる。この継手長さの所要値は、道示、D I N のように鉄筋の付着による応力の伝達ではなく、ループの効果積極的に取入れ、コンクリートの腹圧力による応力の伝達を想定して定められたものである。ここに、腹圧力による鉄筋一本当りの伝達力は、文献4)によれば、ループの内径を D、鉄筋径を ϕ 、コンクリートの圧縮強度を σ_c とし、次式で表わされる。

$$Z = \frac{D \cdot \phi \cdot \sigma_c}{2} \dots\dots\dots (1)$$

図-7 に示した荷重-変位曲線からは、この場合の供試体には明確な降伏現象がみられず、曲げ剛性がかなり低下した後、依然として一定の勾配を持って変化していることがわかり、腹圧力により応力が伝達されているものと推測された。また、図-8 のひび割れ形状には、ループ位置の移動に伴う変化が明瞭に現われている。

腹圧力による応力伝達のメカニズムが解明されれば、所要継手長さの大幅な低減による経済性の向上が見込まれる。しかしながら、未だ不明の点も多く、わが国の現状では、通常のお重ね継手の規定を準用し、ループの効果については、継手位置を一断面に集中させることへの配慮とするのが妥当と考えられた。

5. 繰返し載荷試験によるひび割れの検討

土木学会のコンクリート標準示方書の7章には、引張応力を生じるコンクリート部材の耐久性および使用性に対する限界状態の検討項目として、ひび割れに対する検討が規定されている。合成桁に関する道示の規定を満足していれば、通常は問題のない規定である。

しかしながら、前章に述べた静的載荷試験において、打継目の存在により、継手なしの場合に比較してかなり早期にひび割れが発生したことから、ループ状重ね継手の耐久性を確認するためには、ひび割れの進展状況に対する検討が不可欠と考えられた。

本章では、ひび割れの発生とその進展状況から使用限界状態に対する検討を加えるために行った、合成桁モデルによる繰返し載荷試験の実験結果とその考察について述べる。

(1) 供試体と実験方法

実験に用いた合成桁モデルは、図-9 に示すように、H形鋼とRCコンクリート部とをスタッドジベルにより合成させたものであり、継手なしのもの、道示における所要長さの規定を準用したループ状重ね継手を有し打継目が存在するものとの両者の供試体を作成した。

RC部の厚さ、鉄筋量は実橋と同じ値の190mm、2%とし、図-9 に示した載荷状態により負の曲げモーメントが作用する状態で全断面に引張応力が生じる様に、断面構成を決定して中立軸を鋼桁内に位置させた。

繰返し載荷の各段階における載荷荷重と繰返し回数を表-2 に示す。ここに、最初の段階で設定した載荷荷重3.2 ton は、道示の合成桁に関する規定において、コンクリート断面を有効とする設計を行う場合にお

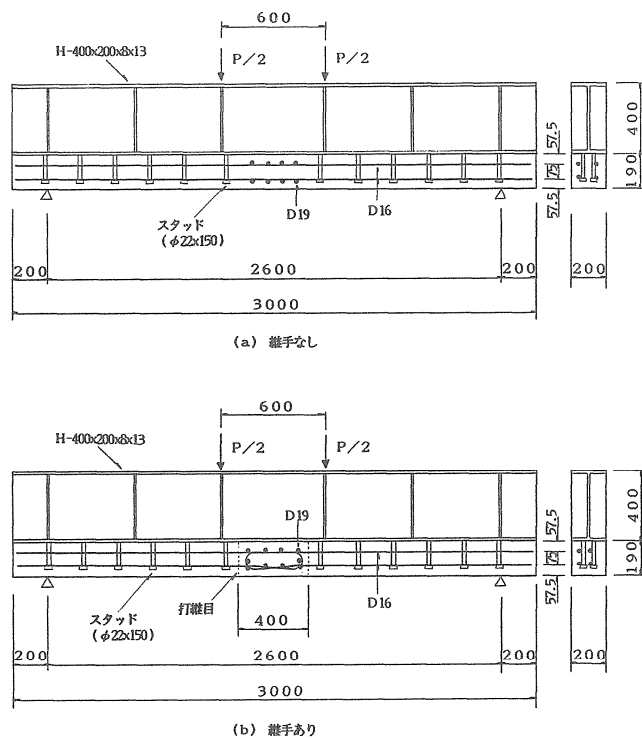


図-9 合成桁モデルと載荷方法

ける許容引張応力度に対応したものである。すなわち、規定では、負の曲げモーメントに対し、死荷重、プレストレス、および、クリープ・乾燥収縮等の持続的に作用する主荷重による引張応力は許容されないが、活荷重、衝撃を含めた場合には許容値が設定されており、計算上において版の上縁に発生する引張応力をその許容値と一致させ、これらの変動荷重に対応する載荷状態を基準とした。

また、最終段階の載荷荷重 7.68tonの状態は、ひび割れの影響を考慮しコンクリート断面を無視した設計を行う場合において、計算上の鉄筋応力が降伏応力を上回っている状態に対応している。

(2) 実験結果とその考察

実験結果の一部として、図-10に、繰返し載荷後のひび割れの発生状況と最大幅を示す。

この図から、継手なしの供試体の場合、許容引張応力に対応した荷重レベルでは、120万回繰返し載荷後もひび割れをほとんど発生していないことがわかる。ひび割れは、荷重レベルの増大に伴って発生したが、計算上の鉄筋応力が降伏応力を上回る最終段階の荷重レベルにおいても、その幅は0.05mm以上には進展していないことがわかる。

他方、道示における所要長さの規定を準用したループ状重ね継手を有する供試体の場合は、許容引張応力に対応した荷重レベルにおいて、繰返し数5万回前後で、幅0.05mm程度のひび割れをループ位置に生じた。このひび割れ幅は、荷重レベルの増大に伴って拡大したが、最終段階においても0.15mmを越えていないことが図からわかる。

前出のコンクリート標準示方書の7章では、鉄筋の腐食に対するひび割れ幅の許容値が規定されており、このようなループ状重ね継手部のひび割れ状況に対する使用性の評価法として、この許容値を基準とすることは一つの考え方である。この許容値は、構造物の環境条件、かぶり、および、鋼材の種類に応じて定められており、今回対象としたプレキャスト床版の場合は0.15mmであった。

したがって、本実験で用いた供試体においては、許容引張応力度に対応する荷重レベルで0.05mm、最終段階に対応する荷重レベルで0.15mmの最大ひび割れ幅であったことから、計算上の鉄筋応力が降伏応力を上回る状態でも許容値を下回っており、実橋プレキャスト床版に採用した継手構造が、耐用期間中に十分使用に耐え得る耐久性を有することを確認できた。

6. 結 論

これまでに述べてきた合成桁斜張橋・プレキャスト床版の設計法の適用結果、ループ状重ね継手の耐久性に関する確認実験の結果、および、それらに対する考察から、次のことがいえた。

- (1) プレキャスト床版と鋼桁との合成前後に仮シムを挿入、撤去して、ケーブル張力の調整を行い、床版

表 - 2 載荷荷重と繰返し回数

載荷段階	上限荷重 (tonf)	下限荷重 (tonf)	繰返し回数 (x10 ⁴)
1	3.20	0.50	120
2	3.84	0.50	20
3	4.48	0.50	20
4	5.12	0.50	20
5	5.76	0.50	20
6	6.40	0.50	20
7	7.04	0.50	20
8	7.68	0.50	20

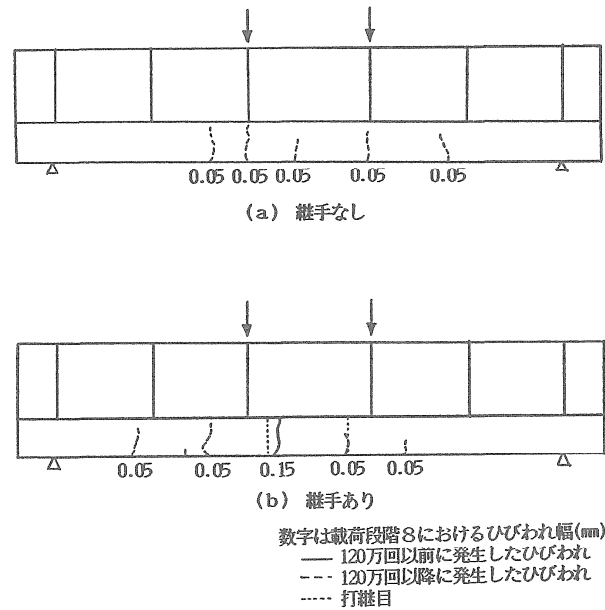


図 - 10 ひび割れの発生状況と最大幅

に圧縮応力を導入する方法を適用したことにより、道示の合成桁に関する規定におけるコンクリート断面を有効とする設計を行う場合の版の許容引張応力度を満足させることができた。

(2) 主桁の中間支点を省き、上述のケーブル張力の調整を行うことによって負の曲げモーメント量を低減したことにより、コンクリート断面を無視する設計から決定された橋軸方向鉄筋（配力鉄筋）の所要量は道示に定められた最小鉄筋量となり、十分なひび割れ対策が材料面からのみならず設計面からも可能となった。

(3) 道示における通常の重ね継手に対する所要長さの規定をそのまま準用すれば、床版パネル相互の現場接合に用いたループ状重ね継手は、継手のない場合に比較して、ひび割れ性状はかなり異なるものの、耐荷力にはほとんど差異がなく、ほぼ同程度の応力伝達能力を有することが確かめられた。

(4) 半円形フック付重ね継手と同じ条件を適用したD I N 1045の規定を準用した重ね継手長さの場合も、ループ位置の移動に伴うひび割れ形状の変化はみられるものの、道示の場合と同様の応力伝達性能を有しており、将来における所要継手長さと同詰部の所要幅の低減による経済性向上の可能性が予測された。

(5) 鉄筋の付着ではなく、ループ内のコンクリートの腹圧力による応力伝達を想定した考え方によれば、所要継手長さの大幅な低減が見込まれるが、耐荷力に顕著なバラツキがみられるなど、未だ不明の点も多く、現状では、ループの効果は、継手位置を一断面に集中させることへの配慮と考えるのが妥当と思われた。

(6) 道示における所要長さの規定を準用したループ状重ね継手は、コンクリート断面を無視した場合の計算上の鉄筋応力が降伏応力を上回る程度の荷重段階まで繰返し載荷された後も、コンクリート標準示方書に規定された鉄筋の腐食に対するひび割れ幅の許容値を越えるひび割れを生じず、耐用期間中に十分に耐え得る耐久性を有することを確認できた。

以上のことから、設計法の妥当性、および、ループ状重ね継手の耐久性が検証されたとしてもよいと思われた。対象とした合成桁斜張橋は、現在既に完成しているが、架設途中、および、完成後に種々の実橋実験を実施しており、今後の機会に報告したい。

参 考 文 献

- 1) 高速道路調査会・日本橋梁建設協会：鋼橋の計画ならびに構造の合理化に関する研究，昭和62，63年度報告書，1989.
- 2) 中井 博・編：プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工 — 床版の急速施工と耐久性向上のために，森北出版，1988.
- 3) 佐野・長井・井澤・奥井：合成桁構造斜張橋の適用支間に関する一検討および構造詳細の紹介，橋梁と基礎，Vol. 23, No. 2, 1989.
- 4) F. レオンハルト・E. メニッヒ（横道英雄・監訳）：鉄筋コンクリートの配筋（レオンハルトのコンクリート講座3），鹿島出版会，1985.
- 5) 赤尾・栗田・加藤・松川・中西：大和橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol. 9, No. 8, 1975.
- 6) 町田・北島・越後：鋼・コンクリート合成構造の汎用クリープ乾燥収縮解析，土木学会第38回全国大会，昭和58年度年次学術講演会講演概要集，1983.

(1989年10月2日受付)