

ループ継手を有するプレキャスト床版接合部の耐久性試験

Durability Test of Reinforcing Bars at Lapped Loop Joints in Precast Slabs

橋 吉宏

Yoshihiro TACHIBANA

川田工業㈱技術本部研究室係長

梶川 靖治

Yasuharu KAJIKAWA

川田建設㈱工事本部開発部長

牛島 祥貴

Yoshitaka USHIJIMA

川田工業㈱技術本部研究室

越後 滋

Shigeru ECHIGO

川田工業㈱技術本部長

大澤 浩二

Koji OSAWA

川田建設㈱工事部開発部技術開発課長

In recent years, in order to improve the efficiency of site operation for bridge decking, precast slab bridges have been increasingly favored among the alternatives. There are two jointing methods, the PC and the RC, used for the precast floor slabs of these bridges. The PC jointing system attempts to achieve an integral structure through the use of prestressing, while the RC jointing system dissipates stresses through the use of reinforced concrete joints. Of the two, the RC joint method offers significant advantages including no site prestressing, and the elimination of creep behavior. Both of these advantages facilitate construction management. There is little history on the use of the RC jointing system since there are no proper guidelines for the design of RC joints nor has the endurance of the RC joint been sufficiently tested and verified.

In order to determine the durability of the slabs, precast slabs with lapped loop precast slab joints and precast slabs were fabricated and submitted to mobile loading tests. This report presents the results of the tests.

Key words: precast slabs, lapped loop joints, wheel running machine test, durability/endurance, FEM analysis

1. まえがき

近年、鋼橋の床版において現場施工の合理化の観点からプレキャスト床版が使用されるようになってきている。プレキャスト床版の基本的な構造としてPC版とRC版が考えられるが、いずれの構造についても橋軸方向（配力鉄筋方向）の版相互の接合法が問題となる。接合方法は大きく分けて2タイプあり、PC継手とRC継手がある。

PC継手はPC鋼棒を用いて橋軸方向にポストテンション方式で床版の一体化を図る工法でわが国での実績が多く、札幌自動車道「新琴似高架橋」や上信越自動車道「栃木川橋」などがあげられる。橋軸方向にポストテンション方式でプレストレスを導入する2方向PC版であり、現場での作業はプレストレスを導入することが中心となり、PC工のような特殊作業が必要となる。

一方RC継手は、鉄筋継手により応力の伝達を図る工法であり、わが国では実績が少なく、磐越自動車道「差塩橋」や上信越自動車道「八木沢高架橋」などがある。現場での製作は、まず継手部の型枠、配筋、コンクリート打設や脱型などの作業であるが、特殊な作業が必要でないのに加えて工期も短くなりPC継手に比べると経済的であると言われている。

このRC継手において最近さまざまな実験が行われており、桁にループ継手を配置した静的な耐力試験を行っ

たケースや床版模型を用い定点繰返し載荷したケースなどがあげられる。これらの試験では、耐荷性状が確かめられるものの実橋の床版における移動荷重に伴う影響、すなわち、曲げ、せん断およびねじれなどによる床版損傷を忠実に再現することができず、耐久性の確認には輪荷重走行試験が不可欠であると言われている。

そこで今回、RCループ継手が配置されたPRC床版供試体により、プレキャスト床版の継手部分および床版部分の耐久性を確認するために輪荷重走行試験を試みた¹⁾。本文はこれらの結果を報告し、さらに継手部分と床版部分のFEM解析による一考察を行うものである。

2. 供試体の概要

(1) 床版部分

床版は2タイプ2ブロックを工場で作成した。タイプ1は床版部分と継手部分にシー管を取り付け継手部分のコンクリートを打設した後、配力鉄筋方向（ループ鉄筋方向）にプレストレスを与えたものであり、タイプ2は配力鉄筋方向にプレストレスを導入しない供試体である。版相互の応力伝達は床版から出ている鉄筋を丸くした形状のループ継手で行い、継ぎ目にはプレキャスト床版製作時に、遅延剤シールを型枠に貼付した後、粗面仕上げし、せん断伝達の確保を行った（写真1）。

すべての床版にはプレテンション方式で配力鉄筋と直



写真1 床版継ぎ目部分

交するようにPC鋼より線を配置した。PC鋼より線の導入張力は 66.7 kgf/cm^2 とし、床版中央載荷14 tfまではフルプレストレスとなるようにしている。また、径においては $\phi 12.7$ とし、使用した鉄筋は、配力鉄筋をD16ctc100とし、橋軸直角方向の鉄筋をD13ctc125とした。

床版部分の材料特性としては、早強コンクリートを用いており材令7日において圧縮強度は湿潤養生時で561 kgf/cm²、材令28日において686 kgf/cm²であった。

(2) 継手部分

欧米を中心にプレキャスト床版の採用が試みられ、接合部の構造もそれとともに多岐にわたり考え出された。接合方法には大きく分けて2タイプあり、橋軸方向にプレストレス力を導入して一体化を図るPC継手と鉄筋継手により床版相互の応力の伝達を図るRC継手があげられる。

今回、実験供試体として、RCループ継手であるDLR供試体とRCループ継手を有し配力鉄筋方向にプレストレスを導入したDLP供試体を製作した。それぞれの供試体の図を、図1と図2に示す。

また、継手部分の詳細は図 3 に示すように幅を 30 cm とした。継手部分のコンクリートに対して本来、乾燥収縮を補償する目的で単位膨張材量 30 kg/m^3 を用いるが²⁾、今回できるだけ膨張効果を期待したいとの配慮から単位膨張材量 50 kg/m^3 の膨張材を本実験で使用した。結果として、試験時には橋軸方向にプレストレス力が導入されている状態であった。

継手部分においても早強コンクリートを使用しており、材料特性としては、材令3日において圧縮強度は湿潤養生で569 kgf/cm²、材令7日において625 kgf/cm²であった。

(3) 継手部の膨張性

継手部の膨張によりケミカルプレストレス量の程度を確認する必要があった。そこで、DLR供試体を用いて継手部分の打設直後から7日間、図4に示す上鉄筋と下鉄筋の位置に取り付けた鉄筋ひずみ計の経時計測を行った。継手部分の膨張効果を高める散水養生を7日間行い、そ

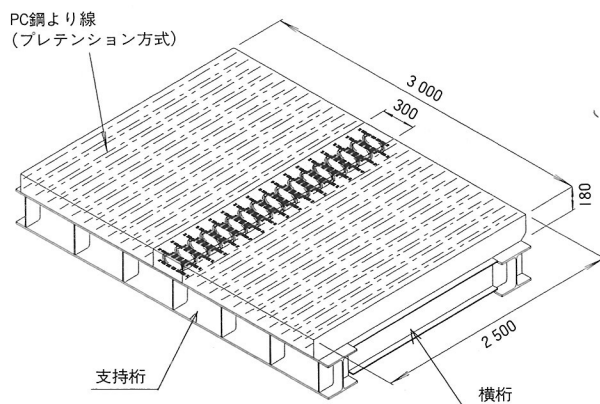


図 1 DLR供試体

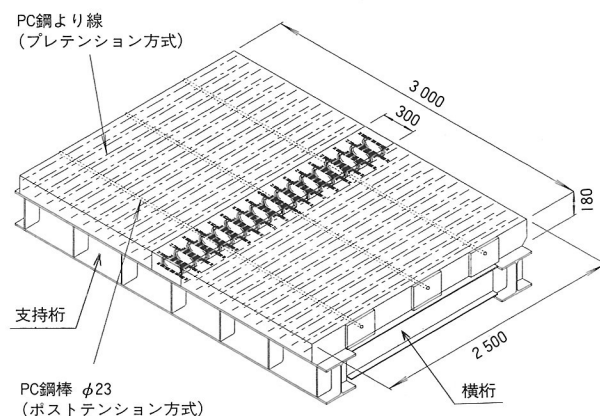


図 2 DLP供試体

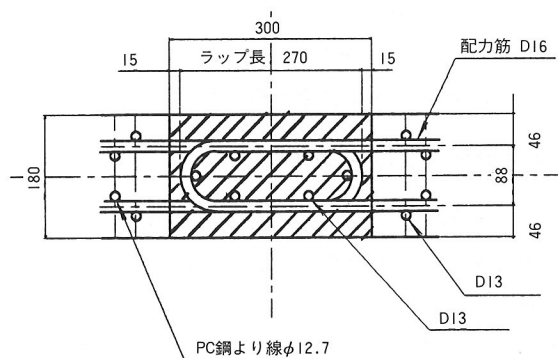


図3 継手部分

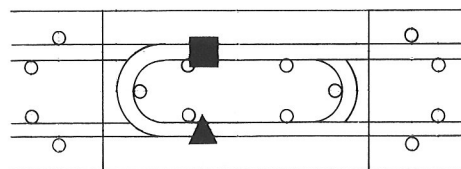


図 4 ゲージ貼付位置

の結果、ひずみ値は50~110 μ であった(図5)。

そこで、単位体積当たりの膨張コンクリートが拘束鋼材に対して仕事をなし、その仕事量が一定であるという仮定に基づいて展開された(1)式をもとに、ケミカルプレストレス量を算定した³⁾。

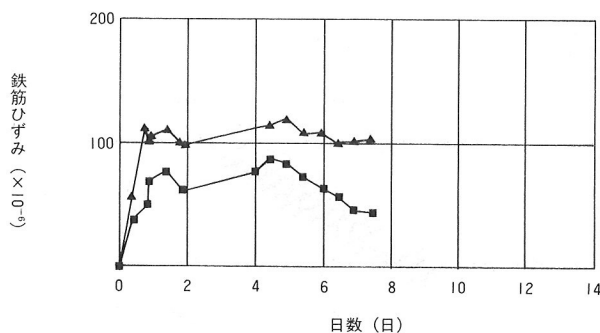


図5 鉄筋ひずみ計測結果

表1 拘束鋼材によるケミカルプレストレス

ひずみ (×10 ⁻⁶)	50	60	70	80	90	100	110
ケミカルプレストレス (kgf/cm ²)	10.3	12.4	14.4	16.4	18.4	20.5	22.5

なお、膨張材の目的は乾燥収縮を補償することを目的としており、結果として、プレストレス力が導入されている状態である。

$$\sigma_{cpay} = E_s \epsilon \sqrt{p_s} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

σ_{cpay} ：拘束鋼材により導入されるケミカルプレストレス量

ϵ ：供試体から計測される拘束鋼材のひずみ

E_s ：鋼材の弾性係数

p_s ：基準となる拘束鋼材比 (0.964%)

上式より、表1に示す結果が得られた。

3. 載荷装置および床版設置方法

載荷装置を図6に示す。この装置は実橋における床版の疲労現象をできるだけ忠実にシミュレートするために考案されたもので、あらかじめ車輪上の油圧ジャッキにより載荷した状態でモータを回転させシャフトを通じて

車輪を供試体の床版上に設けた軌道の上を往復走行させるものである。その車輪の荷重は、30 tfまで載荷可能であり任意に設定することができる。なお、荷重の大きさは油圧ジャッキ近傍の油圧回路中に組み込まれた圧力変換器によって検出、制御する構造である。

床版の設置は、継手部分を中央にくるように設置し、配筋鉄筋方向の支持桁を2辺単純支持で設置した。すなわち、図1と図2の供試体のコンクリート部分と桁とは合成されていない状態になっている。横桁位置を弾性支持とし、床版には浮き上がり防止のために治具を設置した。

4. 載荷方法

試験は、供試体中央で静的載荷を行った後、走行載荷に移った。DLR供試体の載荷荷重は、8 tfから走行を開始し9 tfまで200回ずつ試験走行させ床版下面にひび割れが生じていないのを確認した後、10 tfから8万回おきに3 tf増加させ走行載荷し、最終19 tfまで上げた。その後ひび割れが床版上面に発生した段階で、床版の劣化を促進させる目的で床版上面に水を張り移動繰返し載荷試験を行った。床版のたわみなどの計測は、途中走行を何回か停止させ、その都度、図7に示すC地点を静的に載荷測定した。

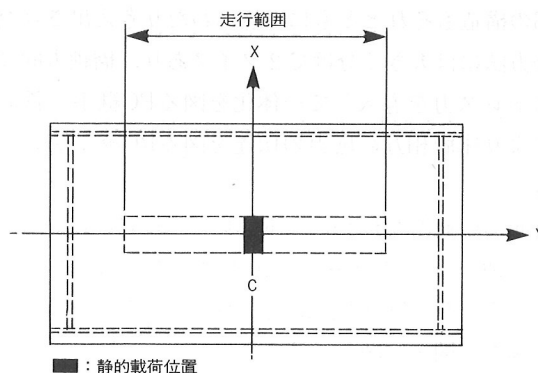


図7 静的載荷位置

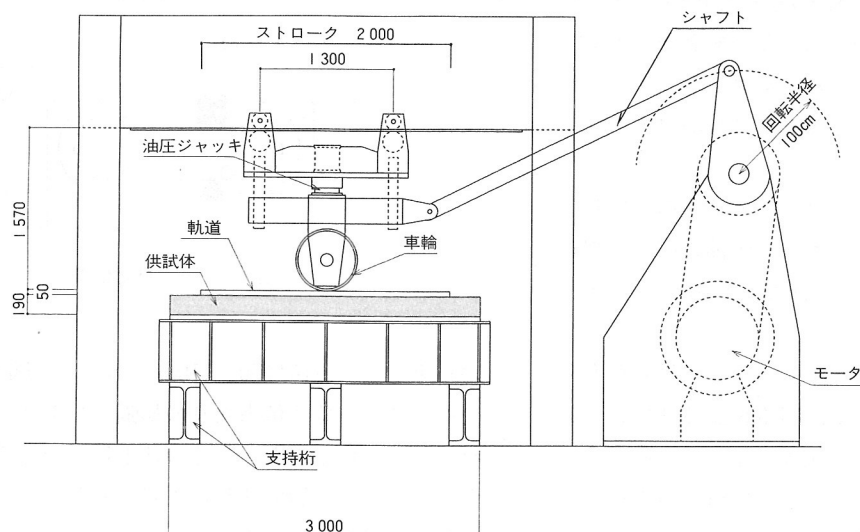


図6 載荷装置

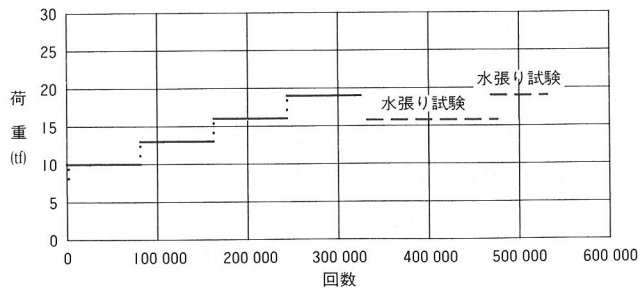


図8 載荷工程

DLR供試体の移動繰返し載荷に対する載荷工程は、図8に示すように行った。

5. 試験結果

(1) たわみ-繰返し回数曲線

図9は、DLR供試体の活荷重たわみと残留たわみを走行回数により表したものである。活荷重たわみは、図7に示すC地点に設計荷重10 tfを静的載荷し、C地点のたわみを計測したものである。また、残留たわみは床版を試験装置に設置したときに計測したたわみを基準とし、走行の途中で停止させ、荷重の除荷を行った後にその差を計測した値である。

この図9より、活荷重たわみの急激な増加は確認されなかった。よって、曲げひび割れの急激な発生・拡散は、生じなかったものと思われる。また、残留たわみの減少においては、320 000回以降水張り試験を行ったために、継手部分のコンクリートが再膨張したことによると考えられる。

(2) 活荷重たわみ分布図

図10は、配力鉄筋方向の活荷重たわみ分布図である。図9に示すたわみ計測同様、走行回数のある回数ごとに一時的に停止させ、床版中央で静的載荷10 tf (B荷重)を実施し、たわみを計測した図である。

結果として、DLR供試体の荷重10 tf時のたわみは、走行回数が増えても増加の程度が非常に小さく、継手部においても明瞭な角折れ現象などは観察されなかった。したがって、合成の変化状況およびたわみ性状などから判断して十分な耐久性を有していると考えられる。

(3) 床版のひび割れ状況

RC床版のひび割れの進行は、まず最初に主鉄筋方向(橋軸直角方向)にひび割れが発生し、その後、配力筋方向の曲げ剛性が主鉄筋方向と比べてかなり小さくなり、床版は等方性版から異方性版へと変化する。すなわち、ひび割れのために剛性が低下することにより配力筋方向の曲げモーメントの分担が低下する。それとは逆に、剛性の大きい主鉄筋方向の曲げモーメントの分担が大きくなり、配力筋方向のひび割れが生じるようになると思われる⁴⁾。

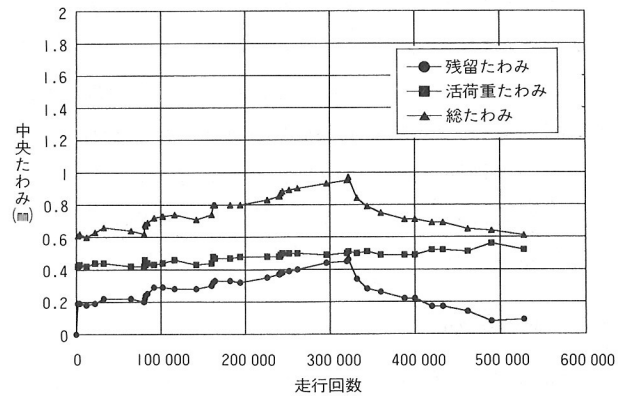


図9 たわみ-繰返し回数曲線

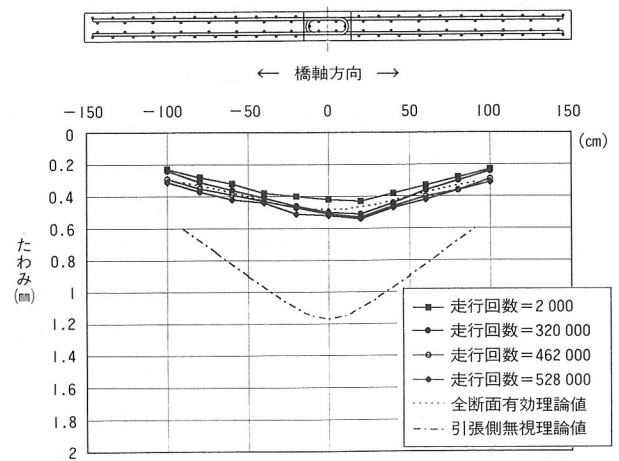


図10 活荷重たわみ分布図

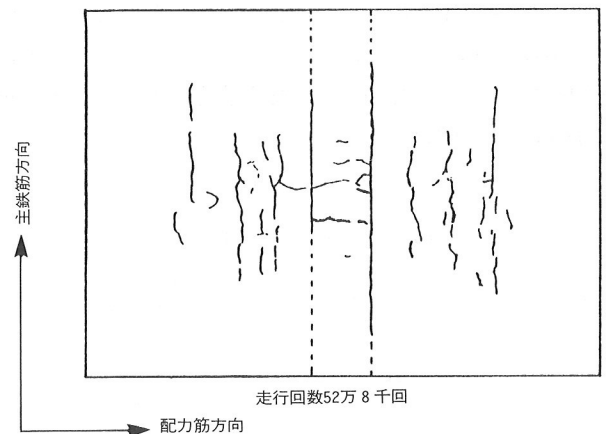


図11 DLR供試体ひび割れ状況(床版下面)

図11は、DLR供試体の走行終了後(走行回数=528 000)のひび割れ状況を示したものである。この図から、プレキャスト床版部分では主鉄筋方向のひび割れが、また、継手部分では配力筋方向のひび割れが発生していることがわかる。このようなひび割れ性状から、継手部の配筋(図3参照)についてはループ外側に配置する方が効果的であると推測される。

今回の実験で用いたDLR供試体は、床版部分は一方方向PC床版であり、継手部分は膨張効果がないものと仮定すると両方向ともRC構造となる。ひび割れの進展状況とし

て、まず最初に継手部分の配力筋方向にひび割れが発生し、次に、剛性の低い床版の配力筋断面すなわち主鉄筋方向にひび割れが生じたものと思われる。その後、RC床版を想定すると床版部分の配力筋方向にひび割れが進展するが、主鉄筋方向にプレストレスが導入されているため、主鉄筋方向の剛性が高くひび割れの進展がなかったものと思われる。

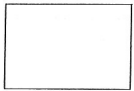
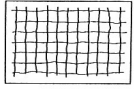
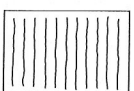
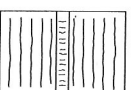
6. FEM解析

今回の実験で使用した供試体（寸法 $300 \times 250 \times 18$ cm, 床版支間220 cm, 継手部30 cm）は、継手部分と床版部分のひび割れによる剛性低下やコンクリートの打設時期のずれによる強度の違いなど、RC床版のように取り扱うことができない。すなわち、供試体の床版部分は橋軸直角方向にプレストレスが導入されているので橋軸直角方向の断面を全断面有効とし、RC構造である橋軸方向のコンクリート断面を引張側無視とした直交異方性版として考える必要がある。また、継手部分においては橋軸方向を全断面有効とし、橋軸直角方向のコンクリート断面を引張側無視とする直交異方性版として取り扱うのが床版損傷をより忠実に想定できるのではないと思われる。

そこで今回、表2の4タイプでMSC-NASTRANを用いてFEM解析を実施した。支持条件は、相対1辺単純支持、相対1辺弾性支持とした。

その結果、床版中央に荷重10 tfを想定したときのたわみを図12に示す。また、モーメント分布においても主鉄筋方向モーメント分布および配力筋方向モーメント分布を図13および図14に示す。

表2 解析ケース（荷重10 tf）

解 析 条 件		載荷位置 (載荷板 12×30 cm)
全断面有効		床版中央
2方向 引張無視直交異方性版 (2方向引張無視)	 (PC版を対象)	床版中央
橋軸方向のみ 引張無視直交異方性版 (橋軸方向引張無視)	 (1方向PC版を対象)	床版中央
PC部橋軸方向 間詰部橋軸直角方向 引張無視直交異方性版 (ひび割れ方向引張無視)	 (プレキャスト床版を対象)	床版中央

7. 考察

(1) 活荷重たわみの増加の程度

通常のRC床版であれば、輪荷重の走行回数が大きくなると、床版継ぎ目上のひび割れが発生して、それにとともに床版の剛性が低下する。ひび割れが床版上面に達した段階で水張り試験を実施すると、床版は加速度的に劣化が進む。この劣化の度合いは活荷重たわみの増加によって表すことができ、劣化の程度が進むと活荷重たわみ

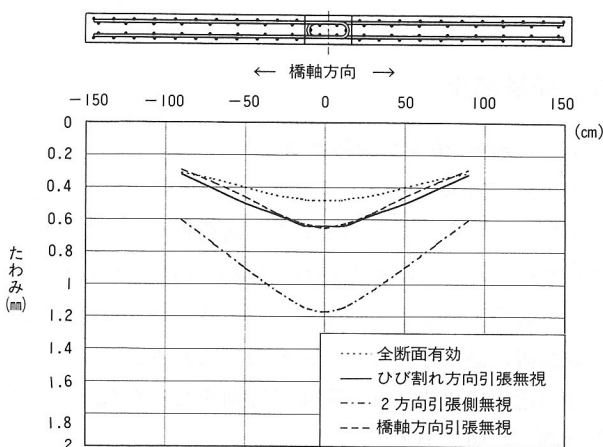


図12 たわみ図（FEM解析結果）

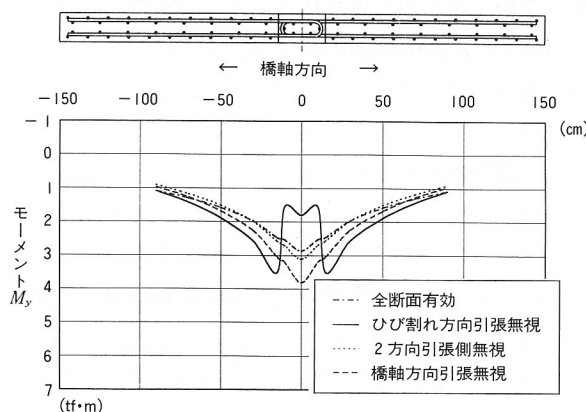


図13 床版中央載荷時の主鉄筋方向モーメント分布

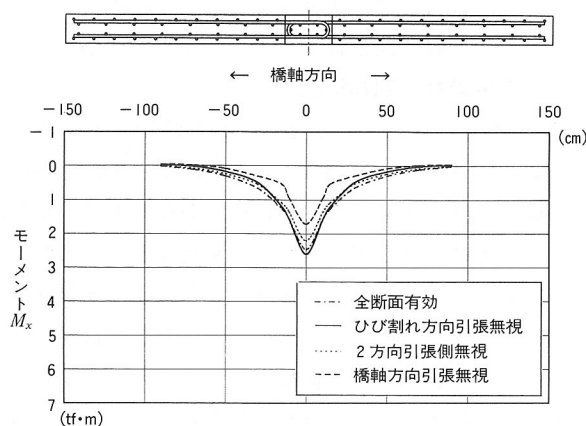


図14 床版中央載荷時の配力筋方向モーメント分布

は、床版剛性が引張側コンクリート無視の理論値に近づくことがわかっている。

今回対象とした、DLRおよびDLP供試体においては、通常のRC床版に比べて剛性低下の度合いははるかに小さく、十分な耐久性を有していると考えられる。

(2) ひび割れ性状

DLRおよびDLP供試体はともに同様なひび割れ性状であり、プレキャスト床版部分では橋軸直角方向に沿ったひび割れが発生し、継手部分はこれに直交するひび割れおよび打ち継ぎ目にひび割れが発生した。プレキャスト床版部分のひび割れは、一方向PC版(橋軸直角方向PC構造、橋軸方向RC構造)の特徴であり、一方、間詰め部のひび割れは、継手部がRC構造であるために生じたひび割れであると言える。しかしながら、プレキャスト床版部分と継手部分は一体の挙動を示している。すなわち継手部分はプレストレスによる全断面有効の曲率挙動と付随するため継手部分のひび割れ幅は0.1 mm程度であった。

ひび割れの発生状況から、一方向のひび割れにより等方性版から異方性版へと剛性が変化することが推測できる。この剛性の変化は、上述の活荷重たわみの増分と関係づけることができる。

(3) 橋軸方向プレストレスの効果

橋軸方向のプレストレス力は、継手部にプレストレス力を導入しない場合でも橋軸方向に沿ったひび割れ幅がそれほど大きくはならないために、鉄筋で制御できる範囲内であると考えられる。

(4) 膨張コンクリートの効果

今回使用した膨張コンクリートの単位膨張材量は50 kg/m³である。ケミカルプレストレスが期待できるが、ケミカルプレストレスについてはその管理が難しいために、乾燥収縮を補償する目的でできるだけ単位膨張材量を多くということによってこの量が決定された。

今回の試験では、この膨張コンクリートは継手部のひび割れの発生および打ち継ぎ目のひび割れの発生を遅らせるのにかなり有効であったと言える。また、床版上面にひび割れ発生が認められた段階で水張り試験を実施したが、この時に膨張コンクリートに水が浸透し、膨張の未反応部が反応して膨張作用を示し、その作用により床版上面に発生していたひび割れも閉じる傾向がみられ、水張り試験時においても有効であった。ただし、今回の実験においては間詰め部コンクリート打設後、約3週間から5週間後に試験を実施しているため、膨張効果を過大に評価していることになる。

実橋において、時間とともに膨張コンクリートの効果が小さくなれば打ち継ぎ目でひび割れが発生しやすくなることが予測されるが、十分な鉄筋量が配置されていればひび割れ幅は有害な量にはならず、また、防水層によ

り間詰め部が保護されていることを考慮すると、耐久性は保たれるものと推測される。

8. あとがき

今回の輪荷重走行載荷試験を行った結果、DLRおよびDLP供試体において、通常のRC床版に比べて剛性の低下の度合いははるかに小さく、両供試体とも継手部分を含めて十分な耐久性を保有していることが確認された。両供試体を比較すると、DLP供試体の方が橋軸方向プレストレスの効果により3tfひび割れ発生時期が遅くなっている。また、接合部の膨張コンクリートの効果によるケミカルプレストレス力の付加については、今後定量的な評価について検討を進める必要があると考えられる。剛性低下については、これまでのRC床版疲労のようにせん断が支配的であったが橋軸直角方向にプレストレスを導入することにより疲労に対しては曲げが支配的になる。よって、床版部分および継手部分の一方向ひび割れによる異方性版としての挙動を増すため、今後、ひび割れ発生後の活荷重モーメントの分配に対する検討も必要であると考えられる。最後に、本研究にあたり、ご指導賜りました日本道路公団・森山陽一氏および大阪大学・松井繁之教授に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 梶川靖治・橘 吉宏・大澤浩二・牛島祥貴：ループ状継手を有するプレキャスト床版接合部の疲労耐久試験，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，I-A152，1995年9月。
- 2) 土木学会：膨張コンクリート設計施工指針，平成5年7月。
- 3) 辻 幸和：コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究，土木学会論文報告集，No235，pp. 111～124，1975。
- 4) 阪神道路公団：道路橋RC床版のひび割れ損傷と耐久性，平成3年12月。