

(33) プレストレッシングによる道路橋床版の耐久性向上について

大阪大学工学部

○松井繁之

1. まえがき

現在、第二東名・名神の第一次発注分が建設中であり、その工法、構造形式等に新しい工夫が要求されてきたことから、橋梁技術者の大きな興味対象となっている。この新規路線では、橋梁建設の経済性と迅速化を考えて、主桁は少数主桁化し、簡素な支持桁システムが導入されるとともに、床版にはプレキャスト床版が組み合わされる。プレキャスト床版を使用する場合、解決すべき重要問題は継手であり、その設計法・構造詳細について決まったものがなく大きな課題である。また、既存のRC床版では、過去の多数の損傷経験から耐久性の向上が望まれている。単に床版厚を大きくするだけではなく、適切な力学挙動評価に基づいた構造改革・施工技術改革が必要である。

以上の2つの課題に対して、床版にプレストレスを与えることが有用な方法と考えられる。ここに、筆者の経験を述べ解決の一助になれば幸いである。

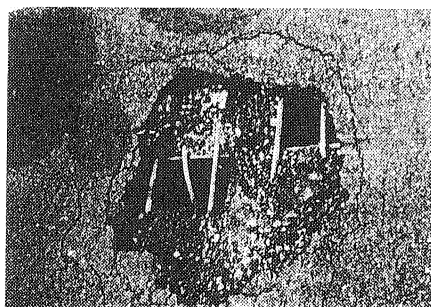


写真-1 RC床版の最終破壊状況

2. 既存RC床版の損傷機構

RC床版の最終破壊は写真-1に示すように部分的なコンクリートの抜け落ち現象で、その原因は過積載の輪荷重と設計時の予測を超えた交通量による疲労であり、加えて、舗装から浸透した雨水が損傷を加速していると筆者は輪荷重走行試験機による疲労実験から推定している¹⁾²⁾。床版上面に発生しているひび割れに雨水が浸入すると、輪荷重の走行毎に水圧が発生し、ひび割れ面に繰り返し応力が発生することと、ひび割れ面相互の相対づれの動きに対する潤滑油の役目を担い、骨材を徐々に動かし、圧縮側コンクリートが骨材化する。

このようなひび割れの動きは特に橋軸直角方向のひび割れ、すなわち、配力鉄筋に直角に発生しているひび割れに顕著である。そして、この方向のひび割れは橋軸方向ひび割れよりも先に発生する可能性が大きい。理由は、コンクリートの乾燥収縮によるものである。乾燥収縮が無いとすると、理論上、一方版では輪荷重による床版下面での引張応力は橋軸直角方向の方が大きく、当然、橋軸方向にひび割れが先に発生する。しかし、上記のように直角方向ひび割れの方が早いのはコンクリートの乾燥収縮を鋼桁が拘束するためである。このため、このような床版損傷は鋼橋の合成桁に多いという結果になっている。

筆者の輪荷重走行試験機による疲労実験経験から、RC床版の疲労損傷過程は以下のように進行すると説明できる(図-1参照)。

①初期曲げひび割れ発生段階

建設後、輪荷重が作用すると床版下面では直角2方向の曲げモーメントが発生し、それらによる引張応力が引張強度を越えるとひび割れが発生する。そして、コンクリートの乾燥収縮を支持桁が拘束する。橋軸方向には剛性の大きい主桁によって、橋軸直角方向は剛性の小さい横桁あるいは対傾構によって拘束されるため、橋軸方向により大きな拘束応力すなわち引張応力が発生することになる。これに輪荷重による曲げ応力が加わり、初期には橋軸直角方向のひび割れが先行するのである。このひび割れ発生によって、床版は直交2方向(橋軸方向、橋軸直角方向)で曲げ剛性の異なる直交異方性版となる³⁾。橋軸方向への荷重分配作用が低下し、それに伴い橋軸直角方向の荷重分担が増加し、橋軸方向のひび割れが発生することになる。そし

て、供用期間の増加に伴い、格子状のひび割れ網が形成されていく。

②上面ひび割れも発生

輪荷重走行試験機による疲労実験を行うと、最も特徴的に発見される現象が、橋軸直角方向に上面ひび割れがある間隔で発生することである。定点に脈動荷重をかける通常の疲労実験では全く発生しないひび割れである。このひび割れの発生はねじりモーメントによるもので、走行荷重によって支持桁付近で交番する引張主応力が発生するためである⁴⁾。

③貫通ひび割れの形成

①の床版下面に発生したひび割れは載荷回数が進むと徐々に上方への進展し、②の上面からのひび割れは下方への進展する。そして、ある間隔毎に両者のひび割れが連結し、貫通ひび割れとなる。ただし、橋軸直角方向のひび割れのみが貫通する。この間隔は18cm程度の厚さの床版では約40cm程度となる。

④ひび割れ面の磨耗によるはり状化

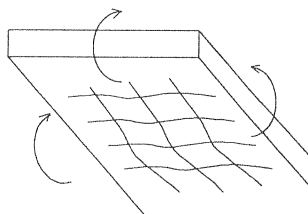
貫通後は、せん断力およびねじりモーメントの交番作用によってひび割れ面相互が繰り返しこすり合わされ、磨耗が進行する。そして、ひび割れ面における剛性発揮は内部の配力鉄筋のみとなり、橋軸方向への荷重分配作用が極端に低下する。

⑤主鉄筋断面のせん断疲労の進行

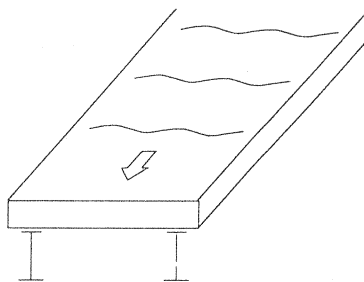
その結果、荷重のほとんどは貫通ひび割れ間の主鉄筋方向のはりで受け持たれるようになり、そのはりのせん断抵抗強度は小さいので、ついには、その断面がせん断疲労破壊する。その結果、コンクリートの一部が抜け落ちるのである。残った鉄筋網を観察しても疲労破断は無く、健全に残っているのが一般的である。

⑥水の影響による圧縮側コンクリートの骨材化現象の併発

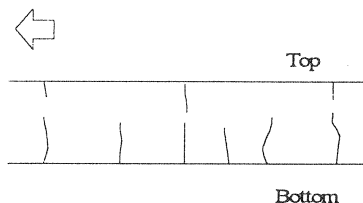
上記⑤までが、乾燥状態での床版の疲労破壊機構である。一般に床版の上にはアスファルト舗装が施工されており、雨がふるとこれに浸透し、床版上面のひび割れに浸入する。その結果、最初に述べたような圧縮側コンクリートの骨材化現象を伴うことになり、床版は早期に陥没する結果となる。このようなことから、床版と舗装の間には防水工を施工するのが肝要である。しかし、現在まだその施工は少ない。床版工事が高価になることと、舗装の打ち換え毎に再施工しなければならないとの考えが増加しない原因となっている。



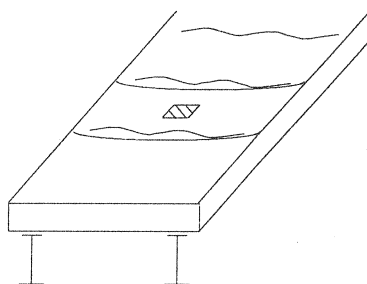
a) 床版下面の格子状ひびわれ発生



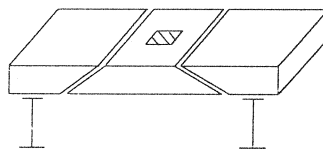
b) 床版上面の橋軸直角方向ひびわれ発生



c) 上下面ひびわれの連結



d) 主鉄筋方向の梁状化



e) 主鉄筋断面のせん断破壊

図-1 R C床版の損傷過程

3. プレストレッシングの種類と効果

R C床版の耐久性を向上させる最も有効な方法は前章で理解できるように、床版の橋軸方向の連続性を確保することである。よって、最も普通に考えられる方法は橋軸方向にプレストレスをP C鋼材によって導入することであろう。ここでは、この方法も含めて、床版で考えられる方法について事例、実験等を紹介し、方法論を考察したい。

3.1 インナーケーブルによる橋軸方向プレストレスング

コンクリート桁と同様にポストテンションによって床版にプレストレスを与える方法で、支持桁にプレキャスト床版を配置した後、床版中のシース内にP C鋼材を挿入し、床版間の間詰めコンクリートの硬化後にプレストレスを導入する。そしてシース内にグラウト注入することによって施工が完了する(図-2参照)⁵⁾。

これまで筆者が関係したこの形式でプレストレスした床版は、PPSC床版、チャンネル形床版、および、SBパネルである。

PPSC床版は合成桁への使用を狙ったもので、通常の床版内プレストレスング以外の特殊な目的を持たせている。すなわち、プレキャスト床版間のプレストレス後に、床版内に設けていたジベル孔にモルタルを流し込み、その硬化によって床版と桁とを合成させる。その後、橋軸方向のプレストレスを若干緩める操作を行う。そして、シースにグラウトする。上記操作は合成桁に逆モーメントをかけることであり、鋼桁および床版の応力を軽減でき、経済的な合成桁が製作できる。もちろん、このような操作なしで架設されてもよい。これまで多数の実績がある。この床版では、橋軸方向のプレストレス力を $20 \sim 50 \text{ kgf/cm}^2$ に変化させて継目部の耐久性の考察を、トラック走行による疲労実験で行った。その結果、最低の 20 kgf/cm^2 でも十分耐久性が確保されることが解った⁶⁾。

チャンネル形床版は日本道路公団の近畿道から関西国際空港方面に分岐した関空線内にある末広大橋に採用された床版である。通常のプレキャスト版は等厚状のものであるが、この床版は図-3に示すように橋軸方向に平行な断面が形鋼のチャンネル状の形状をしている。すなわち、両端にリブを有するものである。このリブで橋軸直角方向の曲げに対して抵抗させることが可能となり、中間部を薄くして軽量化できる。橋軸直角方向にプリテンションでプレストレスしたプレキャスト床版とし、桁に設置後、橋軸方向にポストテンションでプレストレスするものである。主桁の添接部では上フランジ上に添接板やボルトが飛び出た状態になるが、チャンネル版の薄い腹部をこの部位上に来るように配置することが可能である。

この床版では床版間の継目効果について輪荷重走行試験機によって確認した。衝撃を含んだ輪荷重で100万回の载荷を行ったが、間詰め部下縁でひび割れ相当の開きは全く発生しなかった。プレストレス量は若干大きい 50 kgf/cm^2 を導入することとなった。

SBパネルは橋軸直角方向がR Cのプレキャスト床版で、支持桁に設置後、橋軸方向のみプレストレスを導入するものである。若干の製作費低減が計られている。この床版を、例えば、夜間工事で既存橋梁床版と

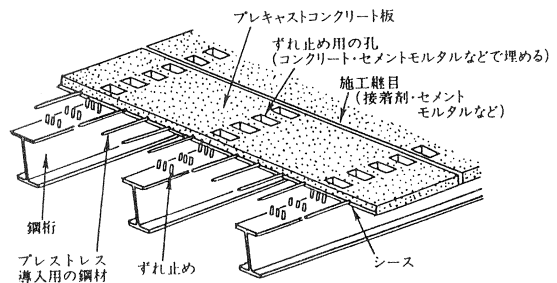


図-2 内ケーブル方式

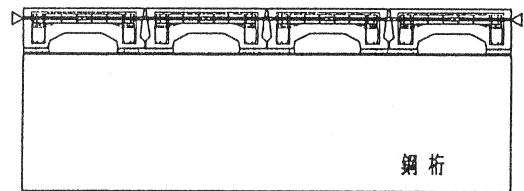


図-3 チャンネル版の断面図

取り替える場合には、一晩で設置できる枚数は3～5枚程度である。昼間には仮復旧した本床版を実交通に解放する。このため、この解放によって床版にひび割れが発生する可能性が大である。一径間分の床版が設置されれば橋軸方向プレストレスをかけるが、長い支間では10日間程度交通解放することとなる。以上のことから、本床版について、RCプレキャストで良いのか、厚さは通常の現場打ちRC床版より薄くできないか、プレストレス導入前に交通解

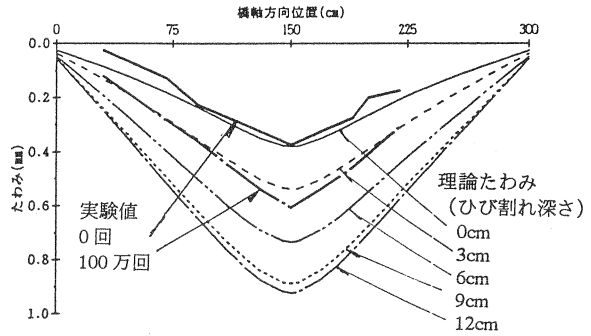


図-4 SBパネルの試験結果

放で発生したひび割れが、プレストレス導入後の挙動に悪影響を与えないか、等の疑問を解決するため、やはり輪荷重走行試験機を用いて一連の疲労実験を行った。その結果、橋軸方向プレストレスによって耐久性は飛躍的に向上し通常のRC床版より薄くできる、仮解放による初期ひび割れはプレストレス後の挙動に影響を与えない、等が解った。図-4に結果の一部を示す。

インナーケーブル工法で問題となるのは、工事工程である。一般的に次の主要5工数が必要であり、工期で問題となることがある。

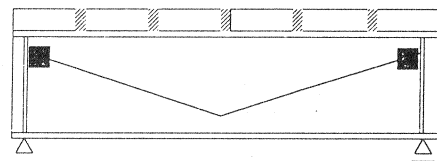
- ①支持桁上へのプレキャスト版設置、②間詰めコンクリート打設、③インナーケーブルによるプレストレスリング、④床版と支持桁間の一体化のためのジベル孔へのコンクリート打設、⑤端部床版の現場施工。

3.2 外ケーブルによる橋軸方向プレストレスリング

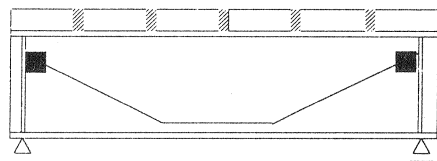
ケーブルを床版外に出して、床版にプレストレスを与える方法で、ケーブルの維持管理面でも有利な方法である。ただし、床版にケーブルを直接定着することは困難で、支持桁に定着する。基本的にポストテンション方式とプリテンション方式がある。

ポストテンション方式は支持桁上にプレキャスト床版を設置し、間詰めコンクリート打設を行い、その硬化後にプレストレスを導入することになり、主要工数は大きく三種に減少する。このプレストレスの場合、外ケーブルの配置は図-5に示す三種が一般的である。キング・クイーンポスト形状の配置はこれまで実績が多く、主桁補強を主目的に採用されてきたと考えられる。軸力よりも曲げが卓越するので、場合によっては床版に引張応力を発生させることになり、床版の耐久性を損ねるので注意が必要である。床版の耐久性向上を主目的とする場合には第三番目の直線配置が最適である。著者はこの直線配置に関する基礎研究を行っている⁹⁾。

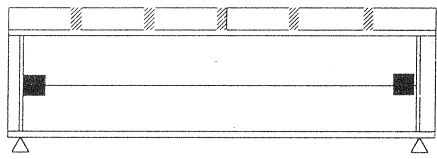
プリテンション方式は支持桁に偏心ケーブルによってプレフレクションを与えており、床版設置、間詰め



a) キングポスト配置



b) クイーンポスト配置



c) 直線配置

図-5 ポストテンション方式のケーブル配置

コンクリート打設・硬化の後、このプレストレスをリリースすることによって床版中に圧縮軸力を導入でき

るものである(図-6 参照)。桁の曲げ復元力を利用するもので、ポストテンション方式よりも小さいプレストレス力で大きな軸力が導入できる。このプレストレス力を与える位置は下フランジ下側で、なるべくフランジ面より離すと効率上がるが、定着装置の剛度を大きくする必要がある。また、若干プレストレス力を残しておいて支持桁の下フランジ応力を圧縮応力範囲に維持すると桁補強も兼ねることになる。

3.3 ケミカルプレストレスング

上記のようなケーブルによるプレストレスは確実であるが、工数がやはり多いこと、経済性の問題があること、ケーブルの維持管理が必要なこと、等で採用されない場合がある。日本道路公団による第二東名・名神の建設では、当面、ケーブル方式は採用せず、ループ継手を採用する方向である。この方法は図-7 に示すような構造で、左右の輪形状鉄筋を重ね合わせ、内部に直角方向鉄筋を挿入するもので、輪形状鉄筋に囲まれたコンクリートが拘束を受け耐力が上がり、継手としての機能を発揮すると期待したものである。安全側にするため、間詰めコンクリートには膨張コンクリートを使用し、ケミカルプレストレスを期待されようとしている。筆者の輪荷重走行試験機による疲労実験から、15~18 ton 程度の輪荷重下で本形状の継手は十分な耐久性があることが解った¹⁰⁾。実橋モデルの実験も現在試験中である。

3.4 インナーケーブルによる橋軸直角方向プレストレスング

ドイツなどではRC床版の耐久性を確保するため橋軸直角方向に1mピッチ程度でプレストレス筋が配置され20 kg/cm²程度のプレストレスが採用されている。

この効果は、2章で述べた最終破壊の主鉄筋断面のせん断破壊強度を向上させることにあると言われている。それ以外に、コンクリートのポアソン効果によって橋軸直角方向プレストレスによって橋軸方向にもプレストレスが導入されることが理解できる。それによって、コンクリートの乾燥収縮による初期の橋軸直角方向のひび割れの発生を遅らせ、その後の貫通ひび割れ発生にも抵抗となり、疲労劣化速度が小さくなると予測できる。この効果の研究のため、現在小型の床版供試体を作成し小型輪荷重走行試験機による疲労実験を行っている。プレストレスを0、フルプレストレス、ハーフプレストレスの三種に変えて挙動を比較しているが、プレストレスの効果が大きいことが認められている。この実験結果については別の機会で報告したい。

3.5 ジャッキアップ・ダウン方式によるプレストレスング

この工法はかつて連続桁を全橋長に亘って床版と鋼桁との合成断面の剛性を確保したい場合、中間支点上

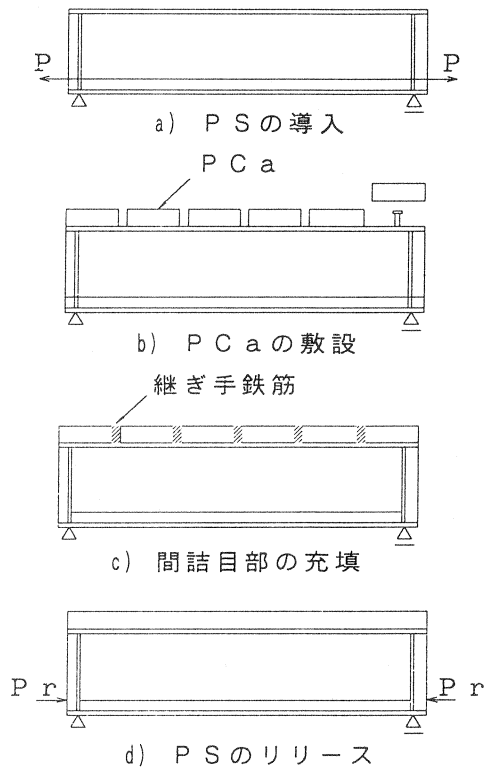


図-6 プリテンション方式

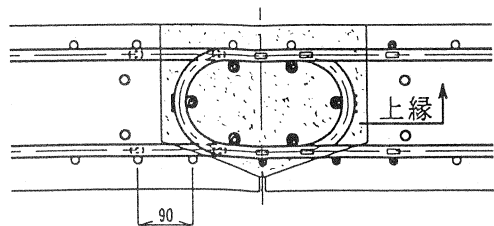


図-7 ループ継ぎ手の一例

で、床版コンクリート打設前に桁をジャッキアップし、コンクリートの硬化後にジャッキダウンしてプレストレスを与える方法である。この方法を単純桁にも適用し、プレキャスト床版と鋼桁とを合成できる。ただし、この場合、両支点を固定し、径間部をジャッキアップしなければならない。両支点を固定しないで行うのが、外ケーブルを使ったプリテンション方式である。

4. あとがき

以上、RC床版の耐久性を向上する方法、プレキャスト床版を適用する場合の耐久性のある継手の形成に対して、各種ケーブル方式について紹介した。紙面の都合上、詳細なデータは省略したが、詳細については参考文献を参照されたい。また、全方式ともまだ十分な数の実験がなされておらず、定量的な評価が乏しいと思われる。現在、輪荷重走行試験機が各所で保有されるようになり、床版の耐久性評価はこれらの試験機によって評価されることが標準となるようである。

参考文献

- 1) 前田幸雄・松井繁之：輪荷重動移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、1984.
- 2) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告集 9-2、1987.
- 3) 前田幸雄・松井繁之：道路橋RC床版の設計曲げモーメント式に関する一考察、土木学会論文報告集 第252号、1976年8月.
- 4) 岡村宏一・園田恵一郎：ひび割れ床版の力学的特性、鉄筋コンクリート床版の損傷と疲労設計へのアプローチ、土木学会関西支部鉄筋コンクリート床版疲労設計委員会報告、昭和52年7月.
- 5) 中井 博編：プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工、森北出版、1988.
- 6) 松井繁之・中井 博・袴田文雄・竹中裕文：プレストレスを導入するプレキャスト床版の継目部の連続性と耐荷力に関する実験的研究、構造工学論文集 Vol.34A、1988年3月.
- 7) 真鍋英規・寺田光太郎・曾田信雄・伊藤正人：チャンネル形状プレキャストPC床版の鋼橋への適用、第4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論文集、1994.10.
- 8) 栗原慎介・金崎喜美男・金田昌治・松井繁之：橋軸方向プレストレスによるRCプレキャスト床版の疲労耐久性の向上、第6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論文集、1996.10.
- 9) 松井繁之・東山浩士：外ケーブル方式によるコンクリート床版へのプレストレス導入に関する研究、第6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論文集、1996.10.
- 10) 森山・橋・松井・牛島・梶川・大澤：ループ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-152、平成7年9月.