

プレキャストPC床版を用いた少数主桁橋 の設計と施工

曾根英樹¹・中村一平²・松井繁之³・堀川都志雄⁴・竹中裕文⁵・江頭慶三⁶・小川久志⁶

¹正会員 阪神高速道路公団 京都建設事務所 (〒604-8152 京都市中央区烏丸通錦小路上ル手洗水町 659)

²正会員 工博 阪神高速道路公団 交通環境室 環境技術課 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

³フェロー会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

⁴正会員 工博 大阪工業大学教授 工学部土木工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

⁵フェロー会員 工博 (株)春本鐵工 本社設計部 (〒104-0033 東京都中央区新川 2-26-3)

⁶正会員 (株)春本鐵工 本店設計部 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島 6-20-34)

近年、鋼橋の合理化を目的とした技術革新が行われている。鋼橋の主構造の合理化については、省力化桁や少数主桁橋と呼ばれる橋梁形式とすることで相当な進展を図ることができる。しかし、少数主桁橋等の場合には、プレストレストコンクリート床版が一般的であり、床版のコストアップは否めない。そこで、現場施工のより一層の省力化と経済性を追求したグラウト充填型せん断キー構造の接合部を有するプレキャストPC床版を用い、併せて新しい橋軸方向のプレストレス導入工法を開発した。実用化にあたっては、種々の試験を行い、その結果を設計に反映させた。さらに現場計測を行い、設計・施工法の妥当性を確認した。

Key Words: precast slabs, shear key, sequential jacking-up and down, fatigue

1. はじめに

公共工事の建設費縮減を前提とした鋼橋の省力化構造が建設省より提案されて以来、種々の省力化構造の橋梁が建設されている。なかでも、主桁本数をこれまでより少なくし、主桁間隔が4mを超える少数主桁橋の採用が増加している¹⁾。この形式の橋梁では、経済性・耐久性・耐荷力の向上を目的として、一般にはプレストレストコンクリート床版(以下、PC床版という)が採用される。

また、床版の品質向上と現場施工の省力化には、プレキャストPC床版を採用することが効果的である。しかし、床版の工場製作費用がコストを押し上げる要因となることがあるため²⁾、製作費と現場施工費の両方のコストダウンが達成可能なプレキャスト化が望ましいと考えられる。そこで、プレキャストPC床版相互の接合方法に着目し、既に実用化されている種々の構造³⁾を調査した結果、工場製作と現場施工性をさらに改善し、経済性の面でも現場打ちPC床版と競合できる接合構造を有するプレキャストPC床版の開発が必要と考えられた。

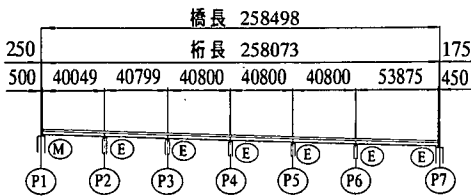
以上の背景から、省力化を迫及した「グラウト充填型せん断キー構造」と、新しい橋軸方向のプレ

ストレス導入工法の「逐次ジャッキアップ・ダウン工法」を開発し、阪神高速道路4号湾岸線の大阪南港地区に新設した出入路橋に採用した。

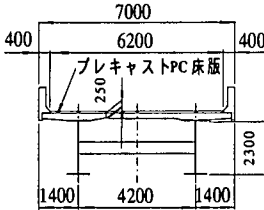
本稿では、全体の概要と構造を述べた後、プレキャストPC床版とグラウト充填型せん断キーの詳細構造、およびプレストレス導入工法について述べる。次に、開発に際して行った確認試験の結果と設計に反映した内容を記述し、最後に実施工の状況と実測結果を示し、本橋の設計、施工法の妥当性について確認する。

2. 橋梁概要と構造形式

南港中出入路橋は、大阪南港地区の周辺道路で発生している交通渋滞の緩和と、利便性改善のために計画されたもので、既設高架高速道路と一般街路を結ぶ出入路で構成されている。このうち本稿で述べる少数主桁橋(2主I桁橋)は、出路部が4径間連続非合成I桁橋、入路部が6径間連続非合成I桁橋である。以下、入路部を対象に記述する。図-1に構造全体の一般図、表-1に構造諸元を示す。主構造は、省力化手法を取り入れており、一部に曲率半径500m



側面図



断面図

図-1 入路橋一般図

表-1 構造諸元

構造形式	6径間連続非合成2主1桁橋
橋格	B活荷重
橋長	258.5m
主桁間隔	4.2m
幅員	総幅員 7.0m, 有効幅員 6.2m
主要鋼材	SS400, SM490Y, SM570
鋼材重量	主構造 365.2ton, 高力ボルト 7.8ton
プレキャストPC床版	コンクリート設計基準強度 $\sigma_{ck}=50N/mm^2$
	PC鋼より線 SWPR7BL-T12.7 鉄筋 SD345
場所打ちPC床版	コンクリート設計基準強度 $\sigma_{ck}=35N/mm^2$
	PC鋼より線 SWPR19L-1S21.8 鉄筋 SD345

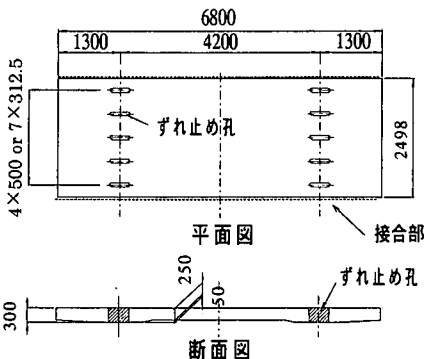


図-2 プレキャストPC床版外形図

を有する曲線桁橋であるが、対傾構と横構を省略している⁹⁾。支点上横桁は充腹構造で、中間横桁は5m～7mの間隔でH形鋼を主桁高の中心付近に設置し

ている。横構の省略と横桁の構造については、床版を含めた全橋モデルで立体FEM解析を行い、各部に生じる応力の確認を行い、その結果を細部構造に反映している。

また、主桁は非合成桁として設計しているが、4で述べる橋軸方向のプレストレス導入に合成桁としての挙動を前提としているので、床版と主桁を接合するスタッドは、合成断面として作用する施工時と供用時の合計せん断力に対して設計を行っている。

3. プレキャストPC床版

(1) 床版の設計

図-2にプレキャストPC床版の外形図を示す。床版支間長(=主桁間隔)は、橋軸直角方向の床版設計曲げモーメントに対し、床版支間中央部下縁と、主桁上上縁の引張応力がほぼ等しくなるように、バランスを考慮して4.2mとした。

また、死荷重時には床版コンクリートに引張応力の発生を許さないものとし、設計荷重作用時は引張は許すが、ひび割れを許さない許容曲げ引張応力度 $1.8N/mm^2$ 以下になるようにプレストレスを導入した。床版厚は、道路橋示方書(以下、道示とする)の規定より、必要最小厚の25cmとした。また、プレキャストPC床版のパネル幅(橋軸方向)は、大きい方が床版間接合部の数が少なくなり、床版の疲労耐久性上、および経済的に有利であるので、輸送幅と重量から幅2.5mとした。

(2) 床版間接合部

プレキャストPC床版を採用する際、最も注意を払わなければならないことは、各床版パネルを相互に連続・一体化する方法を選定することである。図-2のように接合する場合、配力鉄筋を相互に連結し、間詰めコンクリートを充填して一体化する方法が設計的には明快である。この種の接合方法としては、ループ状の重ね継手を有する接合構造が実用化されているが、主鉄筋をループの中に挿入する必要があることと、床版を敷設する時に、一旦仮置きした後、橋軸方向へスライドさせないと定位置にセットできない⁹⁾など、微調整を含めた現場工数が多くなる。さらに、本橋のように並行して道路がある場合には、鉄筋をループ内に挿入する際、交通の妨げとなって施工が困難になると考えられた。他の方法としては、噛み合わせ型せん断キーの構造が考えられる。この種の接合方法は、プレレストコンクリート橋のプレキャストセグメントの接合方法に用いられてお

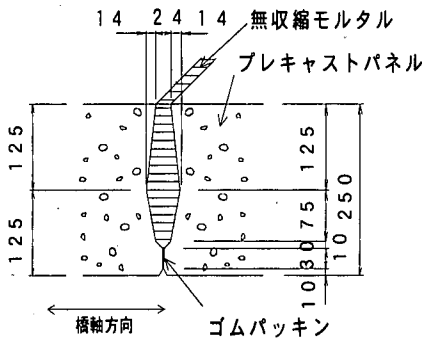


図-3 グラウト充填型せん断キー

り多くの実績がある。しかし、曲線部での精度や現場作業性、およびコスト面で課題が残る。

以上のことから、現場施工性と工場製作の合理化と、それによって床版施工のコスト削減が可能と考えられる接合構造を考案した。これをグラウト充填型せん断キー構造とよび、図-3にこれを示す。この構造の特徴を以下に列挙する。

- ①極めて簡単な構造で、床版製作コストが安価。
- ②せん断キーを噛み合わせる構造ではないので、過度の製作精度が不要。
- ③無収縮モルタルを充填するだけで現場作業が完了。
なお、せん断キー部の表面は、力の伝達性をより向上させるため粗面仕上げとした。

(3) 橋軸方向プレストレス

床版間接合部にせん断キーを用いる場合、接合部に引張力が生じると応力の伝達が損なわれるおそれがある。接合部を開かせるような挙動は、連続桁の中間支点付近で主桁作用によって生じるので、橋軸方向にプレストレスを導入することで解消できると考えられる。

(4) 本接合構造の解決すべき課題

本接合構造は、充填されたモルタルがせん断キーとなり、さらにプレストレスによって一体化する構造である。そこで、以下に示す項目について調査する必要があった。

- ①せん断力の伝達に対し、適切な充填部の寸法や形状と充填材、および必要プレストレス力。
- ②接合部が弱点とならないよう床版本体と同等以上の耐荷力と耐久性を有するために必要な構造寸法とプレストレス力。

これらの項目を同時に満足させるために、静的せん断試験を行って適切な接合部の形状寸法と必要プレストレス力を決定し、疲労試験によってこれを確

認するという方法をとった。詳細の結果は5で説明する。

4. 逐次ジャッキアップ・ダウン工法

床版間接合部に必要な橋軸方向のプレストレスを導入する方法としては、PC鋼より線を用いる方法、従来から行われているジャッキダウンによる方法、およびそれらを併用する方法がある。しかし、本橋のような多径間連続桁橋に採用した場合には以下の問題がある。

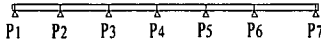
- ①PC鋼より線を用いる場合には、PC鋼より線を床版内に挿入する作業が困難で、かつ、摩擦によるプレストレスの損失も大きくなり、経済性と施工性が低下する。
- ②全中間支点ジャッキダウンによる場合には、ジャッキダウン量が大きくなり、施工性・安全性・経済性が低下する。
そこで、以下に説明する新しいプレストレス導入工法を考案した。

(1) 工法の詳細

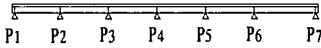
本橋で実施した「逐次ジャッキアップ・ダウン工法」の手順を図-4に示す。プレキャストPC床版を全量敷設後（この時、床版間接合部とスタッド孔はモルタル未充填）、中間支点をジャッキアップする。次に桁と中間支点を挟むプレストレス導入箇所（床版を一体化（接合部とスタッド孔にモルタルを充填）する。さらに、ジャッキダウンによりその中間支点付近にプレストレスが局部的に導入され、一工程が完了する。これを中間支点毎に繰返し行い、順次プレストレスを導入する。床版と上フランジに着目して説明すると、ジャッキアップで余変形（引張）を局部的に与えた鋼桁に床版を合成させ、ジャッキダウンによって鋼桁がもとの状態に戻ることで上フランジに設置されたスタッドを通じて床版に圧縮力が導入されるという原理である。したがって、支承の拘束条件や構造には依存しないものである。従来の各中間支点を一度にジャッキダウンする工法とは異なり、コンパクトにプレストレスを導入する工法といえる。

入路橋を例に、各中間支点で後死荷重+活荷重+支点沈下の組合せにおいて、床版コンクリートに生じる引張応力を相殺する圧縮応力を導入するのに必要なジャッキアップ量を計算すると、従来工法の場合が2270mm(P4 支点)、逐次ジャッキアップダウン工法の場合が235mm(P6 支点)となり、最大ジャッキ

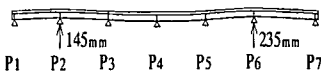
1. 鋼桁架設



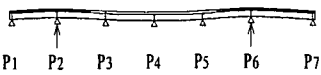
2. プレキャスト床版敷設



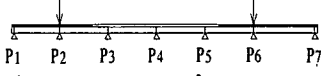
3. P2,P6 支点ジャッキアップ



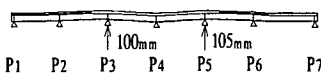
4. プレキャスト床版と鋼桁の合成



5. P2,P6 支点ジャッキダウン



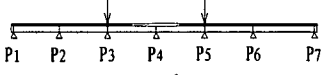
6. P3,P5 支点ジャッキアップ



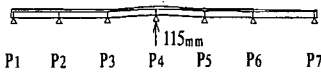
7. プレキャスト床版と鋼桁の合成



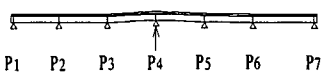
8. P3,P5 支点ジャッキダウン



9. P4 支点ジャッキアップ



10. プレキャスト床版と鋼桁の合成



11. P4 支点ジャッキダウン

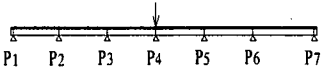


図-4 逐次ジャッキアップ・ダウンの手順

アップ量を10分の1程度に抑えることができる⁹⁾。以上のことから、多径間連続橋樑の橋軸方向へプレストレスを導入する方法として、施工性・安全性・経済性に優れた工法のひとつであると言える。特に、乾燥収縮の小さいプレキャストPC床版を用いれば、プレストレスの損失を抑えることができ、より効果的と考えられる。

(2) 橋軸方向プレストレスの分布

図-5に後死荷重(地覆, 高欄, 舗装)を施工した後に床版厚の中心で残存するプレストレスによる圧

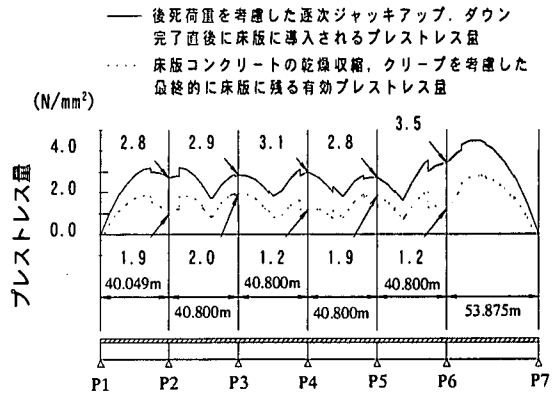


図-5 逐次ジャッキアップ・ダウンによって床版に導入される圧縮応力度分布

縮応力の計算結果を示す。プレストレスの分布は、各中間支点付近で大きく、支間中央付近で小さくなっており、プレストレスを必要とする区間に効率よく導入されているのが分かる。完成直後のプレストレス量は、ジャッキダウンを行わない端支点付近を除いて、少ない箇所でも2.0N/mm²程度の圧縮応力度が導入されている。次に、床版コンクリートの乾燥収縮・クリープを考慮した最終的に残存する圧縮応力度は、少ない箇所でも1.0N/mm²程度となる。なお、5で説明するが、本橋で用いた床版間接合部は、0.5N/mm²程度の圧縮応力度が導入されていれば床版の連続性とせん断耐力、および疲労耐久性に問題のないことを試験で確認しているため、0.5N/mm²に満たない両端支点付近の約6mの範囲については、場所打ちPC床版とし、連続した配力鉄筋を配置することにした。

次に各中間支点に着目すると、コンクリートの乾燥収縮・クリープを考慮した結果、残存する圧縮応力度の平均は、1.5N/mm²程度となる。後死荷重+活荷重+支点沈下で主桁作用によって床版コンクリートに生じる引張応力度は、3.0N/mm²程度で、相殺すると1.5N/mm²程度の引張応力度が生じる。しかし、床版コンクリートの許容曲げ引張応力度の1.8N/mm²以下で、ひび割れが生じないため、配力鉄筋を増量させるなどの対処は行わないこととした。

(3) 合成断面としての照査

本橋の鋼桁は非合成桁としての断面性能を有しているが、必要本数のスタッドを配置し、合成桁としてジャッキダウンにより床版にプレストレスを導入している。したがって、逐次ジャッキアップ・ダウン工法では、施工時の各ステップで床版と桁が合成される区間が変化するため、各ステップ毎に、合成

表-2 プレキャスト PC 床版コンクリートの示方配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 F
20	8±2.5	2.0±1.0	37.5	40.0	155	413	715	1110	2.68

されている区間と、合成されていない区間を考慮して断面力を算出し、床版と鋼桁断面の応力照査を行った。すなわち、図-4 に示すように床版敷設完了時までは床版と鋼桁は合成されていないが、外側の径間から中央に向かってジャッキアップ・ダウンの施工ステップが進むにつれて順次合成断面となり、最後に中央部 P4 橋脚付近の床版が一体化されれば、全径間が合成断面となる。

ジャッキダウン量は各施工ステップにおいて、合成断面の床版に引張応力の発生を許さないことと、鋼桁断面に生じる応力が許容応力度以内に収まるよう仮決定する。次に、後死荷重と床版コンクリートの乾燥収縮・クリープ、および鋼桁との温度差応力から必要最低量を最終的に決定した。この際、コンクリートの乾燥収縮度(ϵ)は、プレキャスト PC 床版の材齢が製作後 60 日間以上のものを敷設すること、コンクリートの単位水量を小さく(155kg/m³)、水セメント比を小さく(37.5%)したことで $\epsilon=120\mu$ として計算した。また、クリープ係数(ϕ)については、本床版には橋軸直角方向と橋軸方向の 2 方向にプレストレスを導入することから、文献⁷⁾を参考に $\phi=0.8$ とした。表-2 にプレキャスト PC 床版に用いたコンクリートの示方配合表を示す。

(4) 本工法の課題

過去に、本工事のように大規模にプレキャスト PC 床版とジャッキアップ・ダウンを組み合わせた実績が見あたらないため、理論どおりの圧縮応力が床版に導入されることと、鋼桁や床版等の各部材の挙動、および施工手順の確認を行っておく必要があると考えられた。

5. 確認試験

現場施工に先立ち、新たに開発したプレキャスト PC 床版間の接合構造、および逐次ジャッキアップ・ダウン工法について、以下の項目を目的として確認試験を行った。

①逐次ジャッキアップ・ダウン工法の理論の確認と挙動確認、および安全性と施工手順の確認。(1)で

説明する。

②適切な床版間接合部の構造寸法と充填材料、および接合部に必要なプレストレス量の決定。(2)で説明する。

③プレキャスト PC 床版と床版間接合部の疲労耐久性・耐荷力の確認。(3)で説明する。

なお、各試験は相互に関連しており、①から③の順に行い、各試験の結果を反映して行った。

(1) 逐次ジャッキアップ・ダウン工法による模型桁の応力計測⁸⁾

a) 3 径間連続模型桁のひずみ計測

①試験方法

図-6 に示す 3 径間連続桁の試験体を用いて、P2 と P3 の中間支点を本工法の手順にしたがって逐次ジャッキアップ・ダウンを行い、プレストレスによる鋼桁と床版のひずみを計測した。鋼桁は、H 形鋼を用い、床版は、幅 500mm、厚さ 60mm、長さ 1500mm のプレキャスト版 31 枚で構成されている。ジャッキアップ・ダウンの量は、それぞれ P2 支点が 13.1mm、P3 支点が 10.9mm である。

②試験結果と考察

一連のジャッキアップ・ダウンが完了した時のプレキャスト PC 床版に導入された圧縮応力の分布を、計算値とともに図-7 に示す。図-8 にジャッキダウンによる P2 支点付近の計測断面におけるひずみ分布を示す。これらの図から、圧縮応力は計算値よりも若干小さいが、概ね一致していると考えられる。また、断面内のひずみ分布に着目すると、プレキャスト PC 床版下面と鋼桁上フランジとの間に若干の差異が生じているものの、ほぼ直線分布を呈している。このひずみの差異は、上フランジ下面のひずみをスタッドの直下で計測しているため、せん断力によるスタッドの変形にともない、板厚の薄いフランジに局所的な板曲げが生じ、そのひずみも含まれているためと考えられる。

b) まとめ

模型桁を用いた計測試験の結果、以下の諸点が確認された。

①ジャッキアップ・ダウンにより、理論どおりのプレストレスをプレキャスト PC 床版に導入できる。

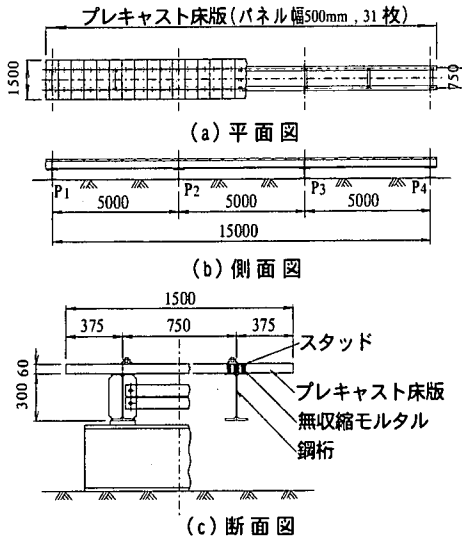


図-6 3径間連続模型桁

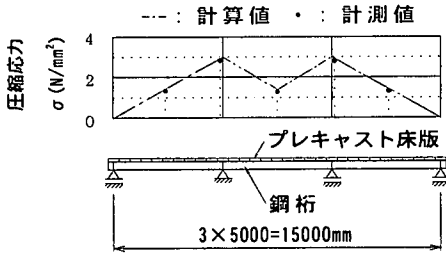


図-7 床版に導入された圧縮応力度分布

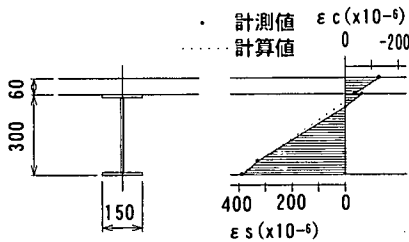


図-8 計測断面のひずみ分布

- ②プレキャスト PC 床版と鋼桁に生じるひずみは、梁計算により十分な精度で求めることができる。
- ③本試験では、ジャッキアップ・ダウンによるプレストレスは、橋軸直角方向にほぼ一様に分布しており、問題となるほどのせん断遅れ現象は見られなかった。

(2)プレキャスト PC 床版のせん断キー-接合部の耐力に関する試験^{9),10)}

a) 静的せん断試験機による試験

①試験方法

図-9 に試験体と試験装置を示す。天地反転した試

験体の一端を固定し、片持先端部に荷重を載荷した。荷重載荷点と固定部の中間に接合部を設け、プレストレスは試験体の前後に定着体を設置し、PC 鋼桁を用いて導入する構造である。さらに、試験体の先端には、鉛直変位は拘束せず回転のみ拘束する治具を設置し、接合部には曲げモーメントが極力作用しないよう配慮した。

図-10 に床版間接合部の形状寸法と充填材料をパラメータとした 4 種類の試験体を示す。これらは、厚さ 25cm の実物大の接合部から幅 25cm の部分を切り出した梁試験体で、実橋と同じ強度 ($\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$) のコンクリートで製作されている。接合部の形状は、タイプ A, B, C の 3 種類で、せん断キーを形成する充填材料は無収縮モルタルである。タイプ D は、タイプ A の充填材料を樹脂モルタルとした試験体である。試験体に導入する圧縮応力度は、0, 1.0, 2.0, 2.9 N/mm^2 の 4 種類とした。

②試験結果と考察

各試験体の初期ひび割れと圧縮応力の関係を図-11 に示す。導入する圧縮応力の増加にともない、初期ひび割れが生じる荷重も大きくなる傾向を示した。なお、圧縮応力度が 2.9N/mm^2 になるとタイプ B, C では若干ではあるが、初期ひび割れの生じる荷重が小さくなる結果が得られた。しかし、今回比較したせん断キーの形状では、概ね大差のないことが確認できた。

次に、初期ひび割れと最終的な破壊形態の状況を写真-1 に示す。この写真はプレストレスによる圧縮応力度が 0.98N/mm^2 のものである。初期ひび割れは、導入された圧縮応力の大小に関係なく、せん断キーと母材との境界面に沿って発生する。しかし、最終的な破壊の性状は、プレストレスが導入されている試験体全てにおいて、載荷点から斜め下方向にせん断破壊した¹¹⁾。したがって、接合部が起点となる破壊面でないことから、接合部が弱点となることはない判断した。

これより、実橋床版に設計輪荷重が作用した場合のせん断破壊面の面積と梁試験体のせん断破壊面の面積の比 (約 10:1) から、実橋床版の輪荷重値を梁試験体用の値に換算した ($P=14\text{kN}$)。図-11 から接合部に必要な圧縮応力度を算出すると、安全率を 3 程度考慮しても、 0.5N/mm^2 程度の圧縮応力度を作用させれば、ひび割れは生じないと考えられた。

b) まとめ

床版間接合部の静的せん断試験の結果、以下の諸点が確認された。

- ①無収縮モルタルを充填した接合部 (タイプ A~C)

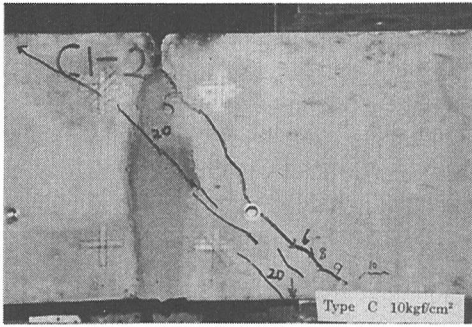


写真-1 接合部のせん断試験結果
(タイプC)

は、 0.5N/mm^2 程度の圧縮応力度が導入されていれば、十分なせん断耐力を有していると考えられる。なお、樹脂モルタルは十分な接着能力を有していたが、コスト面から採用しなかった。

②プレストレスが導入されておれば、接合部からせん断破壊しない。つまり版として連続した構造となる。

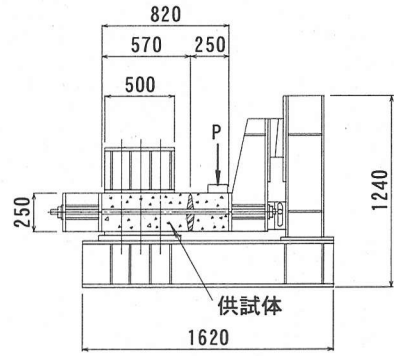
なお、実橋の線形条件から、横断勾配の変化にともなってプレキャスト PC 床版の接合部には最大 17.5mm の段差が生じる。図-10 に示すタイプCの接合部形状であれば、段差が生じても接合部下面からモルタルが流れ出ることがないので、このタイプを採用した。

(3) 床版間接合部にせん断キーを用いたプレキャスト PC 床版の疲労耐久性^{12),13)}

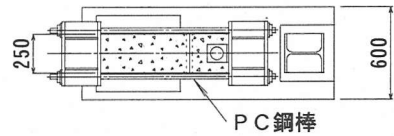
a) 輪荷重走行試験機による疲労試験

①試験方法

疲労耐久性試験は、大阪工業大学所有の輪荷重走行載荷試験機を用いて行った。図-12 に示すように、床版試験体は橋軸直角方向長さ 3.4m × 橋軸方向長さ 1.0m × 床版厚 18cm のプレキャスト版 12 枚からなる。床版間接合部の形状寸法は、せん断試験体タイプ A のものを床版厚に応じて縮小した。試験体の主桁間隔は試験装置の制限から、最大の 2.5m とし、床版厚は道示に準じ、主桁間隔から決まる 18cm とした。実橋と試験体の設計荷重に対する応力レベルはほぼ等しく、どちらも床版支間方向にはプレテンションで 6.0N/mm^2 のプレストレスが導入された。また、走行タイヤの接地面積は $37 \times 27\text{cm}$ (98kN 時) であった。以上のことから、相似則に基づいた寸法比になっていない。本試験は 18cm 厚の床版の疲労耐久性を確認することにより、押抜きせん断耐荷力が約 1.5 倍大きい 25cm 厚の実橋床版が十分な疲労耐久性を有していることを示そうとしたものである。



(a) 側面図



(b) 平面図

図-9 静的せん断試験装置

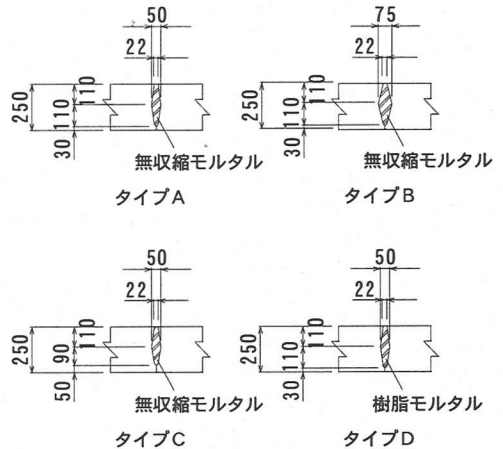


図-10 静的せん断試験の試験体

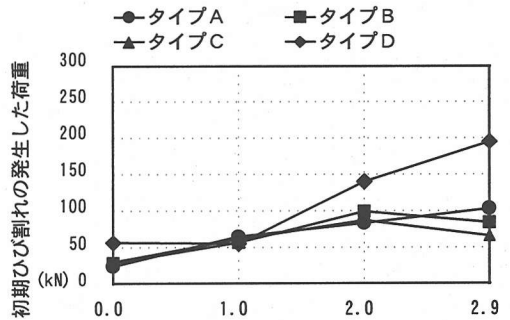


図-11 導入プレストレスと初期ひびわれ

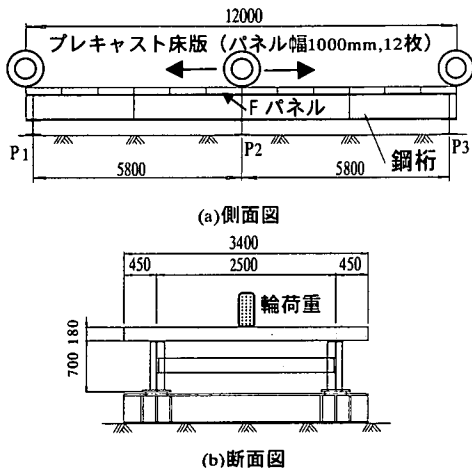


図-12 輪荷重走行試験

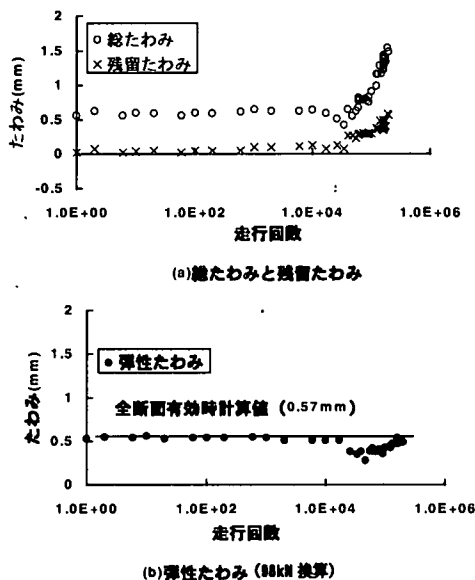


図-13 たわみの経時変化 (Fパネル)

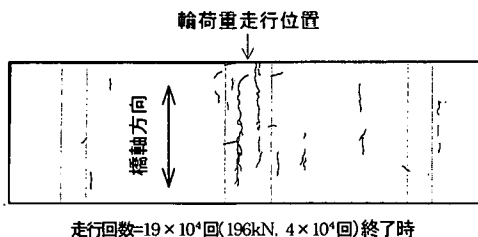


図-14 ひび割れの状況 (Fパネル上面)

主桁は全高 700mm の 2 径間連続合成 I 桁で、 $\phi 22 \times 150$ の頭付きスタッドをずれ止めとして用いた。プレストレスは中間支点を固定した状態で、両

端支点部をジャッキアップし、中間支点上の床版接合部の圧縮応力度が 3.0N/mm^2 、両端支点上で 0 となる三角形分布となるよう調整した。

②試験結果と考察

中間支点の F パネルに着目して述べる。輪荷重を 98kN から段階的に 196kN まで、延べ 20 万回走行させた。図-13 に示すように荷重の増加にしたがってたわみは増加するが、総たわみから残留分を除いた弾性たわみを輪荷重 98kN に換算した結果、変化は認められなかった。また、床版全断面を有効とした計算結果とほぼ一致することから、接合部を含め各プレキャスト PC 床版は、曲げ剛性の低下も無く、一体となって挙動していたと考えられた。さらに、圧縮応力度が 0.5N/mm^2 の端部の接合部も含めた全ての接合部と床版本体には疲労耐久性が損なわれるような現象は認められず、十分安全であることが確認できた。また、図-14 に示すように、床版上面の輪荷重走行面のみひび割れが生じ、試験終了時まで下面には、ひび割れは確認できなかった。同時に、各接合部に有害な段差や開きも確認されなかった。

b)まとめ

本接合構造はせん断伝達を主とした構造であり、曲げ応力の伝達までは期待していない。RC 床版の疲労損傷機構から判断すれば、疲労耐久性を確保するためには、プレキャスト PC 床版接合部のせん断伝達が重要であり、必要条件と考えられる¹³⁾。これを本試験結果によって実証したと考えている。

6. 現場施工および応力計測

プレキャスト PC 床版、および逐次ジャッキアップ・ダウン工法の施工について主に記述する。現場条件と問題点を以下に示す。

- ①本橋の下には、交通量の多い一般街路が並設されているため、工事の安全性と、急速施工が要求された。そのため、スタッドの厳しい施工精度と現場工程の厳守を両立する必要が生じた。
- ②現場には、プレキャスト PC 床版の仮置場所がなかったため、床版敷設に際しては、綿密な工事計画とタイムスケジュールの履行が要求された。
- ③逐次ジャッキアップ・ダウン工法の施工においては、特に安全性を重視するとともに、設計理論を現実なものにする高度な工事技術が要求された。

(1)スタッドの施工

鋼桁と床版の一体化をより完全なものとするためには、プレキャスト PC 床版のジベル孔中心にスタ

ッドが溶植されていることが望ましい。したがって、誤差を±10mm 以内とすることを定めた¹⁴⁾。スタッドを工場で溶植した場合、この誤差内に収めることは容易でないと判断し、床版敷設後にスタッドを現場で溶植することを検討した。ジベル孔を再現した模型を用いてスタッドの溶植試験を行った結果、若干の作業効率の低下はあるものの施工可能であることが確認できた。

施工実績としては、ケレンなどの準備作業を含めた1グループ3名で、施工本数は1日500本程度である。工程上は床版敷設後に後追い施工となるため、問題とはならなかった。また、溶植の管理は、スタッドの溶接余盛の確認と、確実に溶植された後のスタッドの高さがほぼ一定となることからスタッドの高さの管理を追加し、確実に溶植されたことを全数確認した。また、スタッドのハンマー打撃試験は、午前・午後の作業前にテストピースにスタッドの溶植を行い確認した。

(2) プレキャスト PC 床版の敷設

対象橋梁が、橋長の長い曲線桁であることから、床版の据付精度の確保が工事の重要な要素となることが予想されたので、以下の対策を講じた。

①鋼桁の上フランジに、床版敷設位置のケガキ線を入れ、敷設時の目安にすることにした。

②プレキャスト PC 床版パネルの幅の製作誤差が、プラス傾向で累積すると、床版敷設が定められた位置に収まらなくなるので、パネル幅の誤差をマイナス側(許容誤差:0~-2mm)に設定した。

床版の敷設は、上記の対策とスタッドを現場施工としたことで順調に施工できた。また、床版の運搬は、運搬重量の制限から1車あたり2枚とし、敷設時間は床版の荷取りを含めて床版1枚約30分で、1日最大12枚(30m)の敷設を行った。写真-2に敷設時の状況を示す。

(3) 逐次ジャッキアップ・ダウン工法の施工

ジャッキアップ量は、最大で235mmであり、安全性、施工性を十分検討し施工を行った。各中間支点のジャッキアップ・ダウンは、支承の前後に配置した2個のジャッキで行うこととし、主構造にねじりモーメントを作用させないよう、2主桁同時に計4台の連動ジャッキを用いた。一回のジャッキアップの量は30mmとし、ライナープレートをソールプレートと上柵との間に挿入し、盛り替えを行いながら所定の高さにした。

各中間支点における逐次ジャッキアップ・ダウン各ステップごとの反力は、計算値と比較して最大



写真-2 プレキャスト床版敷設状況

10%程度、実施工の方が大きくなった。これは、実橋床版のコンクリートのヤング係数の値が、計算値より15%程度大きいため(JIS 原案コンクリートの静弾性係数試験方法案による平均値 $E_c=38000\text{N/mm}^2$)と考えられる。

ジャッキアップからジャッキダウンまでの1サイクルの工期は、ジャッキの準備、無収縮モルタルの充填と養生を含めて8日間であった。

(4) 逐次ジャッキアップ・ダウン工法による圧縮応力の計測

逐次ジャッキアップ・ダウン工法によるプレストレス導入量を確認するため、実橋のひずみ計測を行った。図-15にP2支点とP6支点をジャッキアップした直後のP1-P2径間中央(C4)、P2支点上、P2-P3径間中央(C11)における合成前主桁下フランジのひずみの計測結果と計算値を示す。また、図-16に逐次ジャッキアップ・ダウン完了直後のC4、P2支点上、C11における合成後床版中心のひずみの計測結果と計算値を示す。床版合成前のジャッキアップ時の鋼桁ひずみはほぼ一致しているが、床版合成後のジャッキダウン時は計算値より大きい圧縮応力が床版に導入されている。これについても、実橋床版のコンクリートのヤング係数が計算値より大きいことが一因と考えられる。また、今後1年に4回程度の追跡計測を行い、床版に導入された圧縮応力の経時変化を調査する予定である。

(5) 載荷試験¹⁵⁾

a) 載荷試験の目的

一般にはコンクリート製の壁高欄が存在すると、この剛性の影響により、床版も含めて橋梁全体の応力状態は設計値と異なることが多い。そこで、本橋のように新しく開発された床版の挙動を把握するためには、壁高欄施工前の状況で載荷試験を行い、床版パネルの応力状態や接合部の挙動を測定できれば、

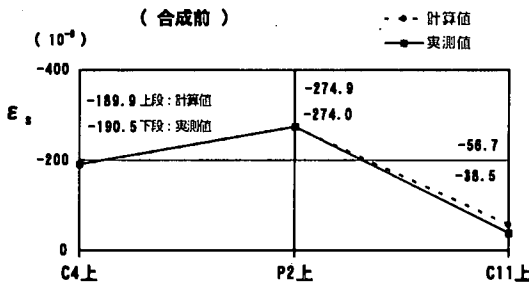


図-15 P2,P6 支点ジャッキアップ直後の鋼桁下フランジのひずみ

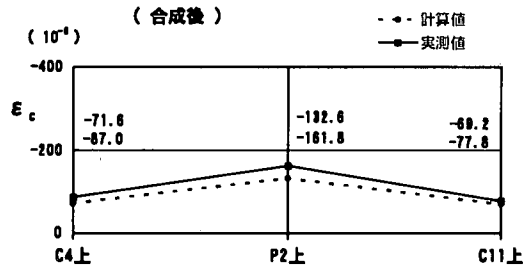


図-16 逐次ジャッキアップ・ダウン完了直後の床版中心のひずみ

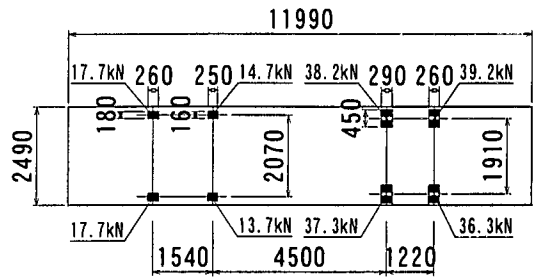
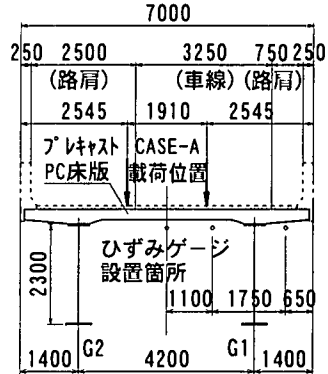
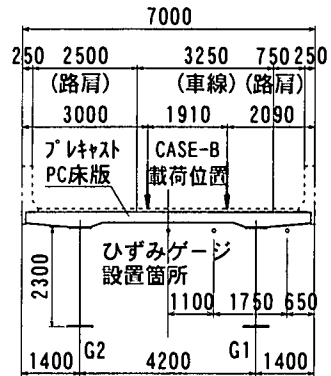


図-17 試験車両詳細寸法



(a) CASE-A



(b) CASE-B

図-18 試験車載荷位置とひずみゲージ設置位置

設計上のモデルに近い構造となり、設計の妥当性を確認することが容易となる。

b) 載荷試験方法

試験車は荷台に 98kN のカウンターウエイトを搭載した総重量 216kN の車両である。詳細を図-17 に示す。各タイヤの荷重と接地寸法は実測値である。

試験車の載荷位置とひずみゲージの位置を図-18 に示す。CASE-A は橋梁中心載荷であり、CASE-B は車線内載荷である。計測はそれぞれ 2 回づつ行った。今回着目する箇所は P1-P2 径間のほぼ中央で、横桁の影響が小さいと考えられる位置のプレキャスト PC 床版である。また、最も橋軸方向プレストレス量の少ない端部において、床版間接合部の健全性を確認するために接合部下面に π ゲージを設置し、開口変位も計測した。

c) 結果と考察

輪荷重を接合部上に載荷した場合でもプレストレスの効果により、接合部下面のひび割れは目視では確認できなかった。また、 π ゲージの橋軸方向の変位も 0.005mm 程度であり、誤差を含んでいるが、発生曲げモーメントに変換すると、7.84kNm/m 程度になる。これは床版を等方性と仮定し、試験と同じ載荷状態で FEM 解析を行って得られる橋軸方向の曲げモーメント値とほぼ一致することから、一体とな

って挙動していると考えられる。

次に P1-P2 径間中央の床版に関して、橋軸直角方向の曲げモーメントに着目し、FEM 解析を行った。床版と主桁の結合条件は、横桁の影響が無い位置であることから、主桁で単純に支持される結合条件とした。またハンチ高さが 50mm と、通常の高さより低いことから床版厚の変化の影響は無視し、シェル要素とした。主桁は実橋の断面剛性を持つ梁部材と

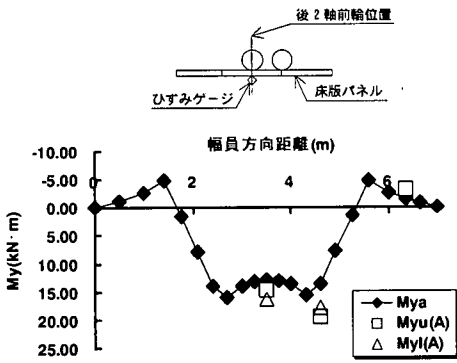


図-19 主鉄筋断面曲げモーメントの比較 (CASE-A, 後2軸前輪位置)

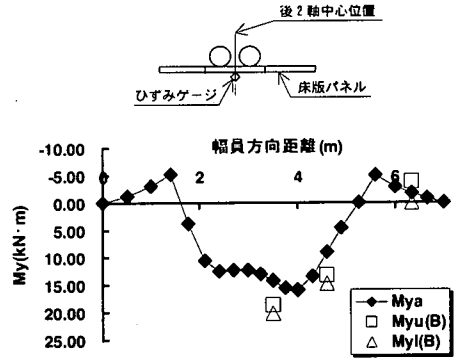


図-22 主鉄筋断面曲げモーメントの比較 (CASE-B, 後2軸中心位置)

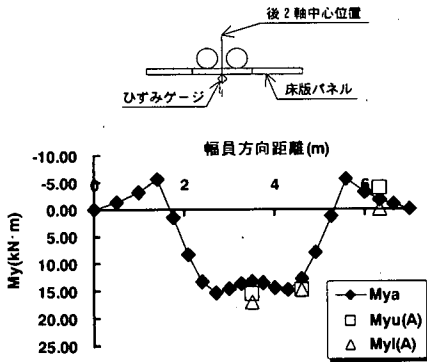


図-20 主鉄筋断面曲げモーメントの比較 (CASE-A, 後2軸中心位置)

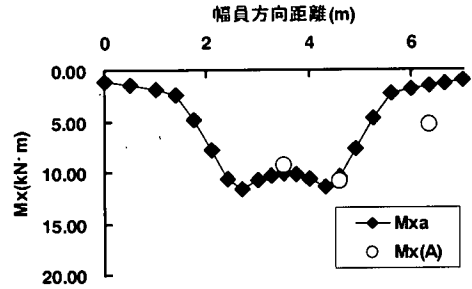


図-23 橋軸方向曲げモーメント分布 (CASE-A)

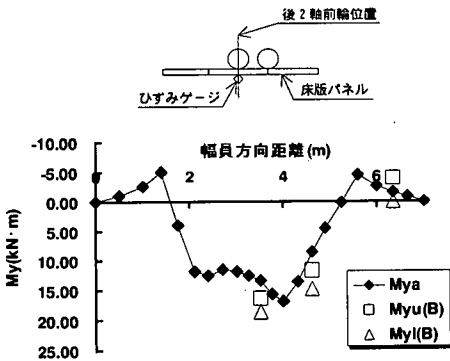


図-21 主鉄筋断面曲げモーメントの比較 (CASE-B, 後2軸前輪位置)

した。図-19~22 に解析と載荷試験で得られたデータの比較結果を示す。FEM 解析により算出された曲げモーメントを M_{ya} で示す。 M_{yu} , M_{yl} はそれぞれ床版上面, 下面の実測ひずみから換算した発生曲げモーメントである。添字の(A), (B)はそれぞれ CASE-A, CASE-B 載荷を示す。計測結果は解析値を

やや上回る傾向を示しているがほぼ同様の傾向を示していることが解る。

また、支間中央部の橋軸方向の曲げモーメント分布について、主桁作用によるひずみ成分を除いた床組作用によるものだけを図-23 に示す。床版を等方性と仮定した FEM 解析の結果と実測ひずみから算出した曲げモーメントをそれぞれ M_{xa} , M_x で示す。値がほぼ一致していることから、床版は橋軸方向に連続した版として挙動していることが判断できる。

d) まとめ

実橋載荷試験の結果、プレキャスト PC 床版は連続した版として挙動していることが明らかになった。また、床版間接合部の下面に橋軸方向に設置した π ゲージの変位は 0.005mm (接合部上に輪荷重を移動させた状態での計測値) と極めて小さく、目視ではひび割れを観察できなかった。万一接合部の引張側に曲げひび割れが生じた場合でも、橋軸方向のプレストレスの効果により、間詰め上半分が連続しており、十分なせん断抵抗を有する。したがって、RC 床版のような疲労問題は生じないと考えられる。

7. 結論

今回開発した「グラウト充填型のせん断キー構造」と「逐次ジャッキアップ・ダウン工法」に関する試験と実施工、および実測で得られた結論は以下のとおりである。

- ①「グラウト充填型せん断キー構造」は、圧縮応力を導入することで十分な疲労耐久性と耐荷性能を有している。また、プレストレスの効果により、プレキャスト PC 床版は、連続した版としての挙動を呈する。
- ②「逐次ジャッキアップ・ダウン工法」は、理論どおりの圧縮応力を床版に導入することができる。

8. あとがき

本工法を採用したことにより、従来工法（RC 床版を有する鋼連続非合成桁）と比較すると、工費縮減だけでなく、現場工期の短縮も可能となった¹⁶⁾。同時に、プレストレスが橋軸方向と橋軸直角方向の 2 方向に導入された床版であることから、橋軸直角方向だけにプレストレスを導入した床版より、さらに耐久性は向上していると推測される¹⁷⁾。今後、予定されている長期計測で、橋軸方向に導入したプレストレスの効果が確認されることを期待している。

耐久性と耐荷力の高い床版を採用することは、橋梁の長寿命化や、設計の自由度が広がることなどから、より経済性の高い合理化橋梁の開発に不可欠と考える。本報告が今後の PC 床版の設計施工の一助となれば幸いである。

謝辞：確認試験と実橋計測に関して有益な御指導を賜った福井工業大学 中井博教授に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 高橋昭一, 志村 勉, 木村 宏, 小西哲司: PC 床版 2 主桁橋「ホロナイ川橋」の現場施工, 橋梁と基礎, Vol.30, No.3, 1996.
- 2) 鳥海右近, 倉本健一: プレキャスト床版による施工の合理化, 橋梁と基礎, Vol.26, No.8, 1992.
- 3) 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.
- 4) 中村一平, 上松英司, 田畑晶子: 阪神高速 4 号湾岸線南港中出入路鋼 I 桁部の合理化設計, 平成 9 年度管内技術研究発表会, 近畿地方建設局, 1997.

- 5) 水口和之, 村山 陽, 北山耕造, 山下茂樹: 東海大府高架橋におけるプレキャスト PC 床版の設計と施工, プレストレストコンクリート, Vol.40, No.2, 1998.
- 6) 小川久志, 中村一平, 上松英司, 竹中裕文: 逐次ジャッキアップ・ダウン工法を用いたプレキャスト床版連続桁の設計, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, 1998.
- 7) 栗田章光: 回復クリープの影響を考慮した鋼・コンクリート合成桁橋の経時挙動に関する研究, 学位論文, 1992.
- 8) 竹中裕文, 袴田文雄, 田畑晶子, 中井博: 逐次ジャッキアップ・ダウン工法による模型桁の応力計測, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, 1998.
- 9) 松井繁之, 金閨七, 仲義史, 江頭慶三, 宮川治: プレキャスト床版のせん断キーの接合部のせん断耐力について, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, 1998.
- 10) Naka, Y., Matsui, S., Horikawa, T., Kim, Y., and Egashira, K.: A Rational Bridge System and Precast Concrete Slab in Japanese Highway Bridges, Developments of Short and Medium Span Bridge Engineering '98, 1998.
- 11) 松井繁之, 金閨七, 志村 敦, 江頭慶三, 宮川治: プレキャストコンクリート床版のせん断キー継手の耐荷力に関する実験的研究, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, 1998.
- 12) 木曾収一郎, 堀川都志雄, 佐藤大輔, 松尾和政: せん断キーを用いた接合部を有するプレキャスト床版の疲労耐久性について, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, 1998.
- 13) 江頭慶三, 袴田文雄, 松井繁之, 堀川都志雄: 省力化接合部を有する鋼橋プレキャスト床版の疲労特性と耐久性について, 構造工学論文集, Vol.46A, 2000.
- 14) 中井 博, 山内幸裕, 藤井 学, 袴田文雄, 吉川 紀: プレキャスト床版の実験的研究と鋼連続桁橋への適用, 橋梁と基礎, Vol.22, No.12, 1988.
- 15) 江頭慶三, 袴田文雄, 松井繁之: 2 主桁橋梁のプレキャスト床版に着目した実橋載荷試験, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集, 1999.
- 16) 袴田文雄, 松井繁之, 堀川都志雄, 江頭慶三, 小川久志: せん断キー継手を有する 2 主桁橋のプレキャスト床版の開発と設計・施工, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, 1998.
- 17) 松井繁之: 合理化橋梁の切り札, 土木学会誌, Vol.84, Apr. 1999.

(2000. 3. 30 受付)

A DESIGN AND CONSTRUCTION METHOD OF PRECAST PRESTRESSED CONCRETE SLABS FOR RATIONAL PLATE GIRDER BRIDGES

Hideki SONE , Ippei NAKAMURA , Shigeyuki MATSUI , Toshio HORIKAWA ,
Hirofumi TAKENAKA , Keizo EGASHIRA and Hisashi OGAWA

Recently, rationalization has been required in construction of steel bridges in order to reduce construction cost and periods. Taking the trend into account, the rampway bridges on the Wangan Route at Osaka Nanko area have been constructed by Hanshin Expressway Public Corporation.

This paper reports a rational design, construction method of the rampway bridges, and the related experimental studies on the applicability of precast slabs with simplified joints and longitudinal prestressing by sequential jacking-up and down method, as well as the field loading test results on one of the completed bridges.