
招待論文
Invited Paper

招待論文

床版工事の近代化と PC 合成床版工法

MODERNIZATION OF THE DECK WORKS AND PRESTRESSED CONCRETE PANEL COMPOSITE SLAB METHOD

渡辺 明*

By Akira WATANABE

1. 緒 言

戦後の困窮の中から、しかも地盤の悪さに加え地震・台風などの悪条件とも戦いながら高度のインフラストラクチャーを構築してきた日本の土木技術に対する世界の評価は高い。だが、高度成長期の10年間に日本で施工されたコンクリート構造物の量は欧米諸国の100年分にも匹敵するといわれ、そのあまりに急増したツケは確実に回ってきている。特に近年の「用地買収がすんだら工事は終わったようなもの」という言葉に象徴される用地取得難、公害規制の前に工期が逼迫し、突貫工事や厳しい経済工事を余儀なくされ、丹念なる打込み・締固め・養生を鉄則とするコンクリート工事に致命的な皺寄せがなされたことは否めない事実であり、しかも骨材の払底から必然的に急増した海砂の使用、砕石、砕砂の登場、あるいはNO_x、SO_x、酸性雨¹⁾などの影響で、塩分による鋼材腐食、アルカリ骨材反応などを引き金とする種々のコンクリート劣化がもたらされたことは予期せぬ痛手であった。

道路橋の床版は過載を含む車両荷重によるおびただしい頻度の、しかも複雑な繰返し載荷を受ける部材であり、特に昭和48年以前に設計され、床版厚16~18cmで、かつ配力鉄筋量が少なかった東名・名神高速道路の鋼橋の鉄筋コンクリート床版などに損傷の報告が多い。

欧米諸国の道路網整備は1950~1970年代に最も活発に行われ、おびただしい橋梁が架けられたが、それに従事した技術者たちの多くは、戦中戦後の混乱期で既存橋梁の維持補修、新橋の建設などほとんどなされなかった時代を経てきた、いわば経験の少ない人達であった。し

かも安価迅速が重視されるあまり、長期視点に立った配慮がなされず、逐年進行した車両の大型化・重量化に加え特に路面散布の凍結防止塩による鉄筋腐食なども拍車をかけ、40~60年と考えられて設計されてきた当初の橋梁寿命を大幅に短縮せざるを得ない状況にあるといわれている。

アメリカが世界に誇る高速道路網も、1日10万台の走行に、近年その病弊が目立ってきて、全米の車道にかかる56万橋のうち、その45%に当たる25万橋に構造上の不備が認められ、いよいよ「老害時代」を迎えたとアメリカ連邦運輸省がすでに4年前に報じている。

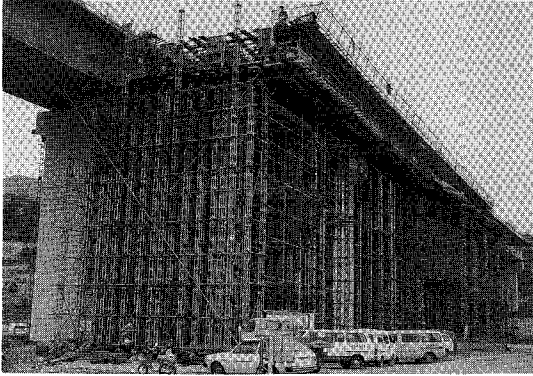
さて、日本には、このところ難民の漂着が続き、大きな政治問題となっているが、彼らの中には出稼ぎ目的の偽装難民が多数混じっているとマスコミが報じている。また、『NIKKEI CONSTRUCTION』誌は、建設業における型枠工・とび工など技能工の高齢化(平均年齢50歳)・不足の慢性化はもとより、大手自動車メーカーなど好条件の人材募集を行っている製造業へ労働力が流れた影響などで、近時、普通作業員ですら不足気味で、賃金の高騰が目立っていると報じている。

これまで新幹線、本四架橋、超高層インテリジェントビルなどと赫々たる実績を成してきた建設業だが、人力依存率が高く、受注産業であるという基本体質の下で、いまや労務者問題で重大な局面を迎えたといわなければならない。

さて、錯綜煩瑣な支保工・型枠施工がいかに工事の進捗を妨げるかは、在来工法による床版工事の一例(写真-1)から瞭然であり、また、かつてACI 347委員会が「建設費の中に占める支保工・型枠費の割合は実に35~60%にも達する」と指摘したが、上記要因や短工期施工への要求が、床版工法を合理化し近代化しようとするこれまでの機運にさらなる拍車をかけたことはいままでもない。

* 正会員 工博 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科 建設工学教室 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

Keywords: form work, deck work, composite slab, prestressed concrete, rapid construction



写真一 在来の煩瑣な支保工・型枠施工

床版工法を改善しようとする方策の1つに合成床版工法がある。床版をプレキャスト部と現場打ち部とに分け、前者を支保工・型枠代わりに利用して後者のコンクリートを打ち、両者を一体化させ、合成断面として荷重に抵抗させようとする考え方を基調としている。

本文ではまず道路橋床版損傷の形態・メカニズムなどを考察、次いで、各種合成床版工法を概観した後、特にPC合成床版（Prestressed Concrete Panel Composite Slab「PCC床版と略称」）工法について詳述する。

2. 道路橋床版損傷の形態とメカニズム²⁾

(1) 床版損傷の形態

床版の損傷の形態は大別して次の4つになる。

- a) 亀甲状ひびわれが発達した抜け落ち
- b) 床版上面のかぶりコンクリートの剝離
- c) 施工継目部の破損
- d) 施工不良、その他による欠陥

このうち、いま、ひびわれの発生・発達に焦点を絞り、鉄筋コンクリート床版として最も汎用されている「主鉄筋が車両方向と直角に入っている一方向版」の場合について追跡してみると、

- 1) 主鉄筋方向にひびわれが発生
- 2) 配力鉄筋方向にもひびわれが発生（異方性版とし

て挙動)

- 3) 2方向ひびわれが床版全面に拡大
- 4) 角落ち、すりへり現象を伴ってひびわれの幅・深さの増大
- 5) ひびわれが床版を貫通、漏水・遊離石灰の発生
- 6) 20~30 cm程度の亀甲状ひびわれになるとひびわれ密度が停留（ひびわれ密度：幅0.1 mm以上のひびわれの1 m²当たりの総延長）
- 7) すりへり粉溶出、鉄筋との分離、せん断抵抗の低下、部分抜け落ち

などのパターンが多く、これを模式的に示すと図-1となる。

(2) 床版ひびわれ発生の要因と損傷のメカニズム

ひびわれ発生の要因を掲げ、その発達、貫通、そして版耐力の低下へのメカニズムを考察する。

a) 配力鉄筋量の不足

床版においては〔短辺/長辺〕比によるが、一般の橋梁の場合、橋軸方向にもかなりの曲げモーメントが配分される。昭和42年の道路局長通達前の示方書では「配力鉄筋は主鉄筋量の25%以上配置すること」と低く規定されていたため（表-1）²⁾、同示方書による床版の橋軸直角方向（主鉄筋方向）にひびわれが発生した。

そして、そのひびわれのため、より異方性版へと移行した版の挙動として、剛性の大きい方向にも曲げモーメントが配分される結果、さらに橋軸方向（配力鉄筋方向）にもひびわれが発生し、やがて2方向ひびわれ（亀甲状ひびわれ）へと発展する。

b) 主（縦）桁の剛度不足

主（縦）桁の剛度が不足すると、床版自体の橋軸方向曲げモーメントにさらに桁のたわみによる曲げモーメントが加算されることによって、橋軸直角方向にひびわれが生ずる。また、連続桁やゲルバー桁の場合などにおいても主桁の作用に床版が同調する結果、支点上辺りにひびわれの発生がみられることがある。

c) 床版厚の不足

昭和30年代から40年代前半に設計された床版は、そ

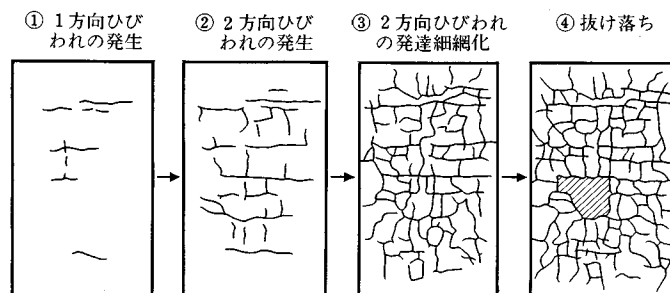


図-1 ひびわれの変化（模式図）

表-1 鋼橋鉄筋コンクリート床版の設計基準の変遷

項目		制定年月日	33.3	39.10	42.9.9	43.5	43.8	45.1	46.3.18	47.4.25	48.2	53.4.13	
適用基準および示方書		溶接ガーダー橋設計要領 (31.5 示方書準用)	設計要領	「鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版の配力鉄筋に関する道路局長通達」	「鋼道路橋床版の設計に関する暫定基準(案)」	構造物設計図集Ⅳ(鋼橋編)	設計要領第2集	設計要領第2集	「鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版の設計について」道路局長通達	設計要領第2集改訂	道路橋示方書	「道路橋鉄筋コンクリート床版の設計、施工について」 街路課長 企画課長	
主要規定の内容	輪荷重 (t)	8	→						9.6	→			
	衝撃係数 i	$20/(50+l)$	→						(設計モーメントに含まれる)				
	許容応力	コンクリート (kg/cm ²)	$\sigma_{28}/3$ 60	→				80	80	→			
		鉄筋 (kg/cm ²)		SD30…1800	→		SD30…1400	SD30…1500	SD30…1500	SD30…1400	→		
	最小版厚 (cm)	14	→				16	16	16	$3l+11 \geq 16$	18	→ $d=k_1 \cdot k_2 d_0$ 18	
	活曲げモーメント中央	主鉄筋 (t・m)	$0.4P(1+i)(l-1)$ $l+0.4$	→						(0.12l+0.07) × P × 0.8			
配力鉄筋 (t・m)		主鉄筋の25%	→		中央支間70% 支点上35%	→			(0.10l+0.04) × P × 0.8				
備考			・異形鉄筋の要領化	・配力鉄筋量の増加	・SD30の許容応力減	・コンクリート許容応力の増加 ・SD30の許容応力設定	・交通量を加味した輪荷重の割増し ・曲げモーメント計算の変更 (設計曲げモーメントの増加)	・コンクリート許容応力の減 ・床版厚の増	・交通量および付加曲げモーメントの追加				

の経済性が優先され、死荷重軽減が重視されて許容応力度を大きくし、床版厚を薄くしたものが多い。床版厚が薄くなるとたわみや曲率が大きくなり、結果としてひびわれを多発する。その反省から昭和48年改訂の道路橋示方書では鉄筋の許容応力度の低減、床版厚の増大が図られた²⁾。

d) 主桁相互の不等沈下

床版が3本以上の桁で支持されている場合、各桁の不等沈下の影響で床版に曲げモーメントが加わる。特に、たとえば横桁が少なく不等沈下が考えられるような構造では橋軸方向に伸びるひびわれが発生する。

e) 主桁のねじりと不等沈下の影響

横桁がないか少ない場合には主桁がねじれやすかつ不等沈下も起こしやすい。T桁橋ではハンチに沿ってひびわれが発生することが多い。

f) せん断力の交番と水の影響

床版の損傷はこれまで過大過頻の車両荷重に起因するひびわれの発生、進展、伸縮継手部位差により誘発される衝撃力による床版応力超過の繰返しなどを要因として直さ的に論ぜられてきた。

しかしながら、以上の要因だけでは輪荷重走行線に沿う床版下面の貫通ひびわれと漏水を説明するには不十分との観点から、道路公団試験所が床版の上面に水を張って大掛かりな移動繰返し載荷試験を実施した結果、せん断応力の交番でまずひびわれが貫通し、それに雨水が進入すると、荷重の繰返し下で相対変位によるひびわれ部摩耗が加速的に進行して、床版のせん断耐力が低下することが判明した。

この件については園田³⁾も独自の輪荷重繰返し装置を製作して本格的な実験を遂行し、静的載荷、移動繰返し載荷各場合に対するひびわれと破壊モードを図-2のごとく報告している。静的載荷におけるひびわれパターン

は載荷点より広がる放射状であるのに対し、移動繰返し載荷の場合は床版下面全域にわたる格子状または亀甲状であることがわかる。

また、著者らもPC合成床版について同様の疲労試験を実施し、静荷重の場合よりかなり小さい荷重でひびわれが貫通することを確認した。

3. 合成床版工法の特質と概観⁴⁾

合成床版工法ではプレキャスト部が鋼の場合とコンクリート系の場合の2通りあるが、後者は特にハーフスラブ工法とも俗称され、近年多用されている。いま、ハーフスラブ工法のさらなる利点を掲げると次のようになる。

a) 現場打ち部が生コンという安価な材料で施工されるので、オールプレキャストの場合よりも経済的。

b) プレキャスト板の敷込みの不陸などが、現場打ちコンクリートで吸収修正され得る。

c) プレキャスト板のためかぶりの精度が良く、耐久性大。

d) 単純反復作業のため習熟効果が大きく、安全・迅速施工が可能。

ハーフスラブ工法にはそれぞれシュタールトン板、オムニア板、PC板、スパンクリート板、そしてピコス板などをプレキャスト板とする合成床版工法があり、近時、ダブルT形にしたものやボイド型枠を併用して改良したものなども登場してきている。

(1) プレキャスト部が鋼の場合

プレキャスト部が鋼の場合の例をまず眺めてみる。

図-3は、昭和49年度の建設省技術研究補助金によって開発された鋼製型枠ユニット床版で、これを用いることによって、加工、配筋、型枠設置といった従来の現場作業の大部分が工場での作業に置き換えられ、現場での

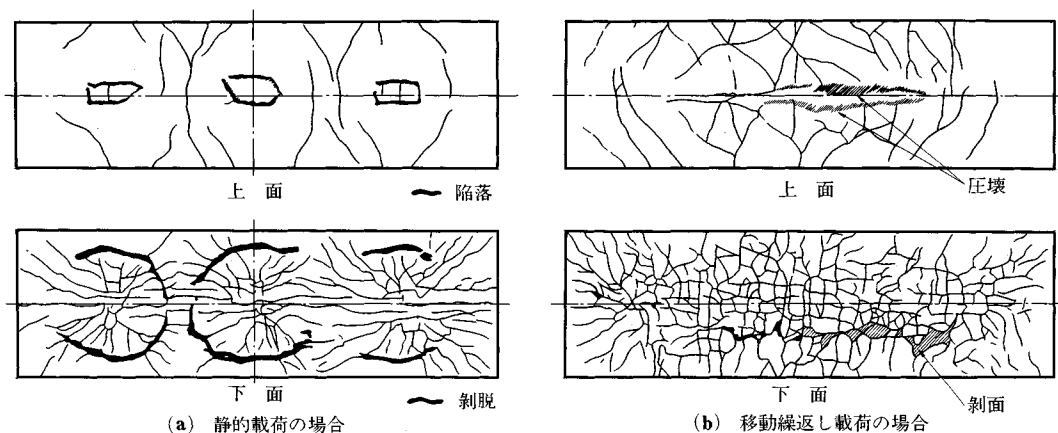


図-2 ひびわれ図と破壊モード

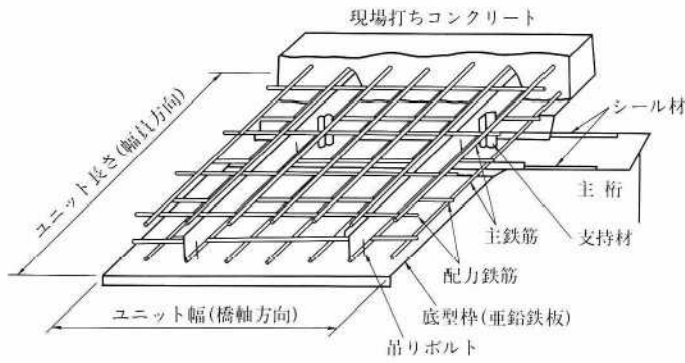


図-3 鋼製型枠ユニット床版

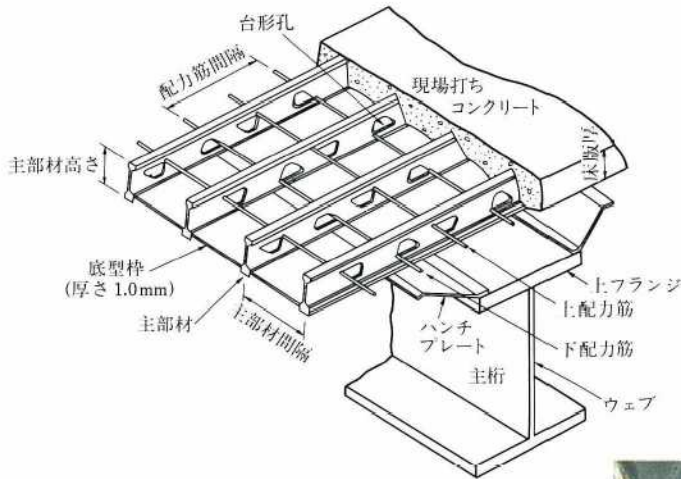
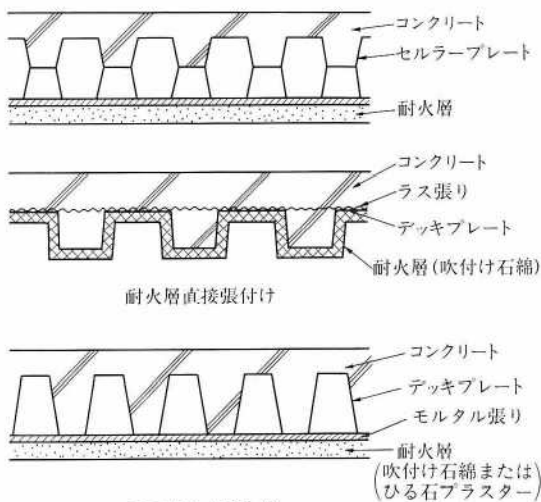


図-4 鋼格子床版



耐火層直接張付け

ラス張り+耐火層

図-5 デッキプレート床版

作業は、型枠付きの鉄筋かごの設置とコンクリートの打設だけとすることに成功した。

また、鋼格子床版の例を図-4に示す。
図-5は、波型鋼板を捨て型枠として使用するデッキプレートスラブで、建築でよく用いられる。そのままでは耐火上の難点があるので、種々の耐火被覆が施工される。

注) これらの床版で、鉄板が捨て型枠として処理され、引張主鋼材は別に配置されている場合には問題ないが、型枠と引張主鋼材が兼用になっているタイプのもものでは、負モーメント領域はもちろん正モーメント領域でも、床版上面からの浸透水や、輪荷重の繰返し・せん断力交番に基づく貫通ひびわれをたどっての貫通水などが底部主鋼板上にたまり、肝心の鋼板を発錆劣化させてしまうおそれのあることは2.(2)fで述べた理由および全面・短冊鋼板接着工法を実施した床版下面で漏水と鋼板腐食の著しい事例(たとえば写真-2)より明白で、プレキャスト部をコンクリート系とするハーフスラブ工法が逐年普遍化しつつあるのは、耐久性設計の見地から必然の成行きなのであろう。プレキャスト部が鋼板の場合には床版上面の止水と鋼板下面



写真-2 床版下面の漏水と鋼板腐食の事例(鋼板接着工法)

の防錆処置が肝要である。

(2) プレキャスト部がコンクリート系の場合

a) シュタールトン床版工法

通常のRC床版で施工した場合、その重量は建物全重量の約22%にも達するといわれ、床版の重量軽減への要請は強い。ホロータイルの利用とPCのいち早い適用でその要請に応えた例に、スイス生まれのシュタールトンスラブがある。すなわち図-6に示すように、上面に溝のある高さ6cm、幅15~25cmの粘土製品をプレテンションベッド上に連続して並べ、その溝内にPC鋼線を通して緊張し、モルタルで充填した後緊張を解放し、100 kgf/cm²程度のプレストレスを導入したシュタールトン板と、ホロータイルを横方向に並べ、その上に現場打ちコンクリートを施工する方法で、ヨーロッパでかなり普及した模様である。

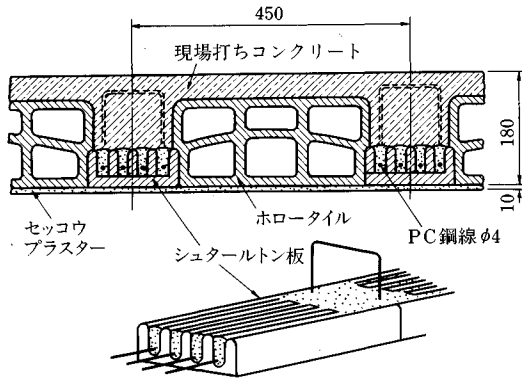


図-6 シュタールトン床版工法

b) オムニア床版工法とその改良工法

西ドイツのラインバウ社が開発したオムニア板の歴史は古く、建築で国際的に多用されている(図-7)。オムニアトラス筋(オムニア型、カイザー型)の下弦材を4~6cmのコンクリート板に埋め込んだものを、後からの現場打ちコンクリートと一体化させるもので、耐火・耐久性スラブとして実績を重ねてきた。

近年、長期たわみ・ひびわれ対策上から、場合によってはさらにプレストレスを導入することもなされ(図-7(b))、PCストランドによる方法、またはプレベームの原理にならないオムニアトラス筋にプレベンディングを与えておくことによって導入する方法などがとられている。

c) スパンコンクリート合成床版工法

スパンコンクリートはホロータイプの板状PC製品である。この表面に円形のシャコッター(φ25×7mm、600個/m²)を付したものをはりに並べ、これらを支保工・型枠代わりに用いて現場打ちコンクリートを打設し、両者を一体化させて合成床版とする工法である(図-8)。曲げに対する贅肉が除かれているためPC板が軽量であり、ひびわれ、長期たわみの点でも優れている。

d) ピコス工法

Precast Insitplaced Concrete Composite Slab 工法の略称で、コンクリート版をたくさん敷き並べ、その上に現場打ちコンクリートを打設して一体化する方法ではなく、原則として、“1グリッド・1パネル”方式で施工する工法である¹⁸⁾。

スパン8m程度までを対象に、図-9に示すように大

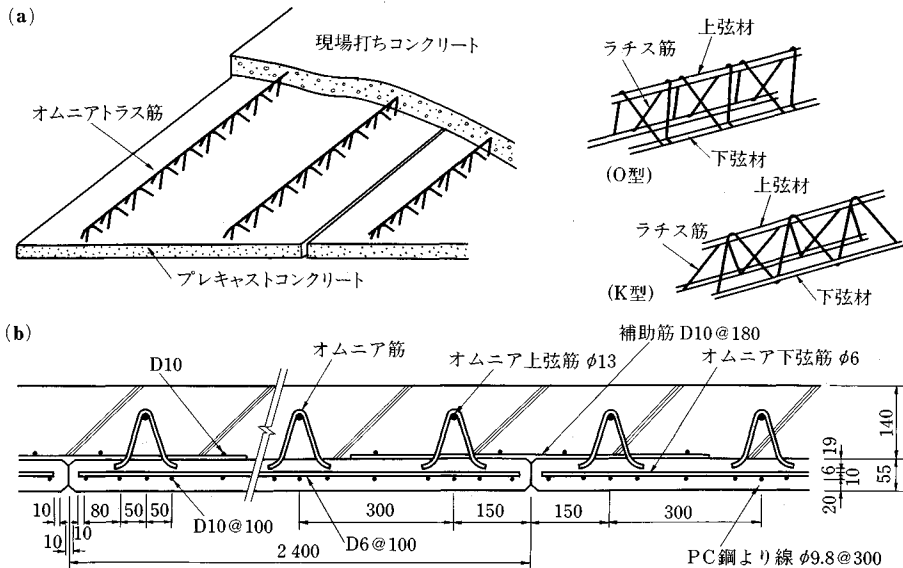


図-7 オムニア床版工法

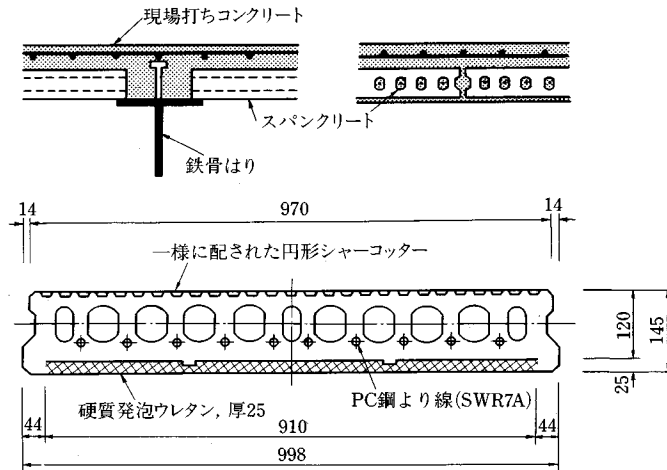


図-8 スパンクリート合成床版工法

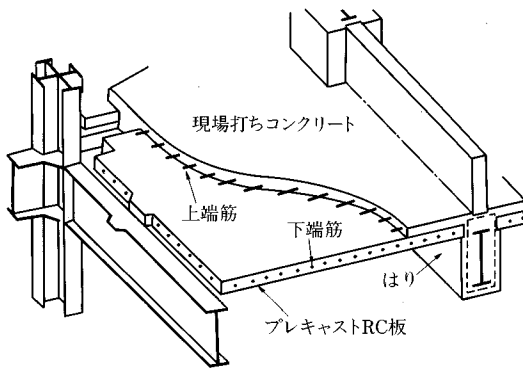


図-9 ピコス工法

型プレキャスト RC 板 (厚さ 70 mm 以上, PC 板ではない) が現場で積層製作されるところに特色がある。それらはクレーンで専用の治具を介して吊込みセットされ、その上に上端筋などが配された後、現場打ちのコンクリート (厚さ 60 mm 以上) が打設され、合成される。

なお、板の表面には $80 \times 80 \times 8$ mm のシャーコッターが、普通の場合周辺に最低 3 列、フォークリフト等が走行する床および積載荷重が 500 kgf/cm^2 を超える床については全面に設けてある。

4. PC 合成床版工法

(1) 本工法と指針制定

本工法は、図-10⁶⁾に示すように平型、リップ付き平型、ホロー型、チャンネル型などと、スパンに応じて断面形を工夫した PC 板を型枠・支保工代わりに敷き並べ、その上に配筋などを配置してコンクリートを打ち、合成断面として荷重に抵抗させようとするもので、いま、橋梁の床版、建築スラブに適用した場合の概念図をそれぞれ図-11、図-12 に示す。

著者の本研究へのかかわりは、現場における熟練労務者の減少の趨勢に対処するためには、特に型枠・支保工工法の近代化が急務であるとの強い認識に端を発したが、遠くは昭和 31 年に実施した PC 合成桁試験を起爆剤としており、著者が本工法を当初 Stagingless Live Form 工法⁶⁾と名付けたのは「支保工が要らない、捨て型枠ではない」の実体を的確に表わしたいためであった。

本工法の汎用を図るためにはその設計・施工指針の制定が必須で、土木学会コンクリート委員会の「PC 合成床版工法に関する研究小委員会 (委員長: 渡辺 明)」は昭和 59 年 4 月以来、その制定作業に当たり、昭和 62 年 3 月、『PC 合成床版工法設計施工指針 (案)⁷⁾』として刊行した。

(2) 本工法の問題点とその解決

本指針の制定にあたり特に問題になった点は、

- ① プレキャスト PC 板と現場打ちコンクリートとの接合面のせん断耐力は大丈夫か。
- ② 橋軸方向に PC 板継目が存在し、その上に現場打ちコンクリートが打設された場合、その版を等方性版として取り扱えないか。
- ③ 連続桁支承上、負モーメント領域における PC 板は鋼線定着のフープテンションにさらに引張応力が加わるため、PC 鋼線の定着部にひびわれが生じる懸念はないか。

などであったが、それぞれについて理論的、実験的に追究し検討した結果を次に示す。

①に関する研究と結果

はり試験における PCC および RC ばり供試体の断面図を図-13 に、供試体の種類および本数などを表-2 に示す。ジベルとしては、図-13 のように、 $\phi 13$ mm の馬蹄形異形鉄筋を両端部から 30 cm の位置に埋め込ん

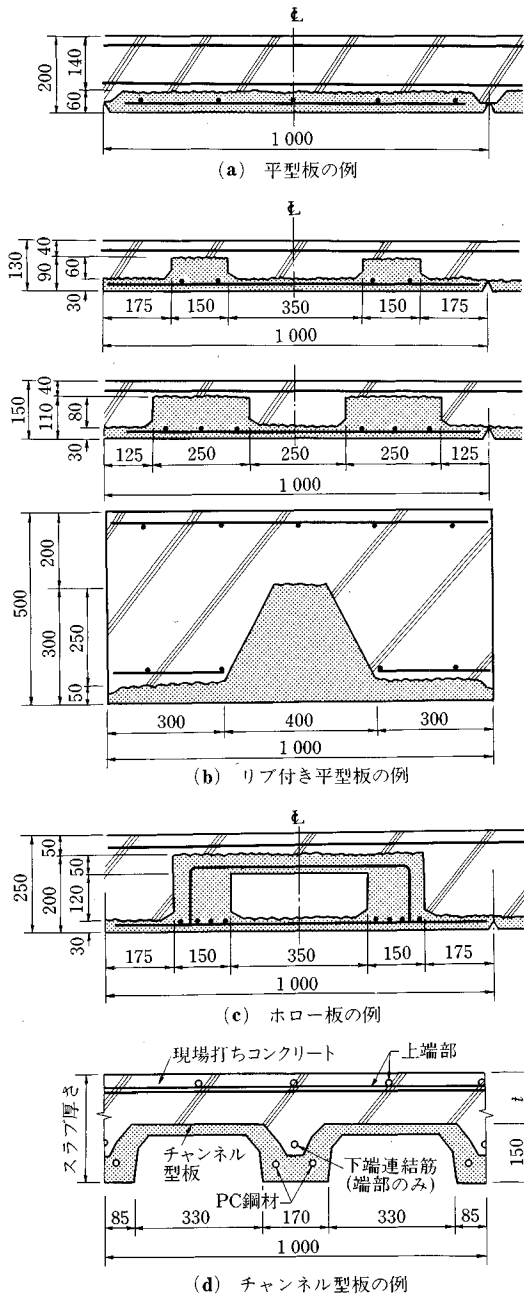


図-10 PC板の種類

だ。Cシリーズは、施工の最も悪い状態を想定して、離型剤をPC板表面に塗布し、翌日現場打ちコンクリートを打設したものである。

はりの曲げ強さとともに、水平打継ぎせん断強さ、PC鋼材の付着強さを確かめる目的で、荷重方法は3等分点2点荷重とした。疲労試験では、静的破壊強度の45~80%を上限荷重、8%(1.75tf)を下限荷重として、繰返し荷重を行った。

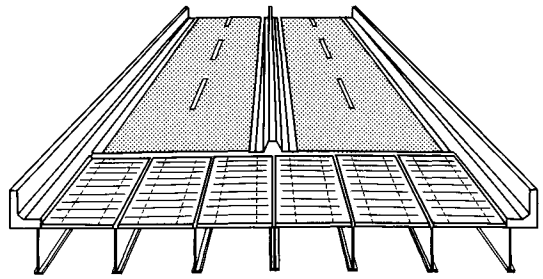


図-11 PCC床版工法の橋梁への適用概念図

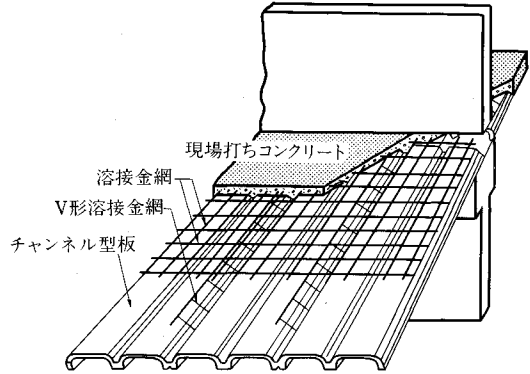


図-12 PCC床版の建築スラブへの適用概念図

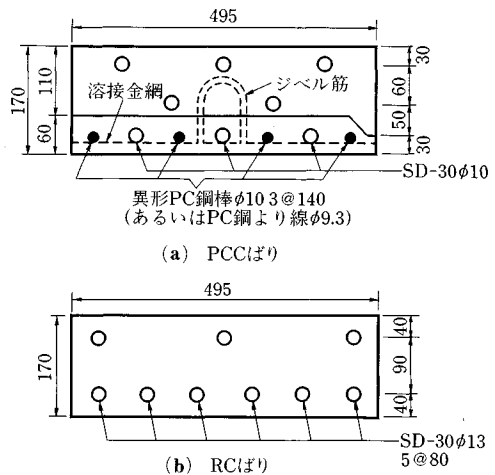


図-13 はり供試体断面

PCCばりのひびわれ発生荷重はRCばりの4倍強で、設計荷重(3.2t, 2.1tf・m/m)の約2倍であった。PCCばりのAおよびBシリーズ供試体は、いずれも22tf前後で鋼材が降伏破断しており、打継ぎ面およびPC鋼材の付着に問題は生じなかった。離型剤を塗布したCシリーズ供試体は、18tf(設計荷重の5.6倍)で打継ぎ面が突然剥離し、シベル筋がPC板から孔抜けして破壊した。RC供試体は、11.5tfで鉄筋の降伏とみ

表-2 はり供試体の種類

供試体記号	供試体数	PC鋼材	ジベル筋数	水平打継ぎ面状態
A	7	異形PC鋼棒	0	通常
B	7	PC鋼より線	2	通常
C	7	異形PC棒鋼	2	離型剤塗布
D	7	鉄筋コンクリート		
E	7	異形PC鋼棒	2	通常

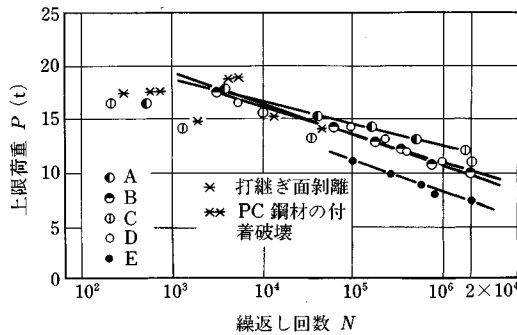


図-14 P-N線図

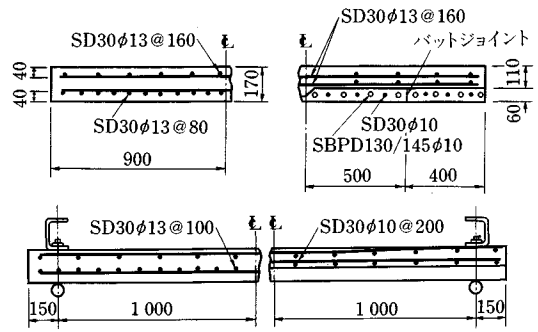
られる急激なたわみの増加があった後、13.5 tf で破壊した。

疲労試験結果は図-14に示される。Aシリーズの上限荷重17.5 tf (80%)、16.4 tf (75%)の供試体は、PC鋼材がすべり込んで破壊した。離型剤塗布のCシリーズは、13.2 tf (60%)以上では打継ぎ面が剥離して破壊した。

上記以外のPCCはり供試体は、いずれもPC板中の鉄筋が疲労破断し、引き続きPC鋼材が疲労破断した。DシリーズのRCはりは、すべて鉄筋の疲労で破壊した。PCCはりの200万回疲労限は10~11.5 tf (6.6~7.3 tf・m/m)であり、これはRCはりの疲労限7.4 tf (4.9 tf・m/m)の1.4倍、設計荷重の3.5倍に相当する。次に、設計モーメントに相当する3.2 tfを上限荷重、0.5 tfを下限荷重として50万回の繰返し载荷を実施したが、荷重とたわみの直線関係が失われたのは、設計モーメントの2.5倍に相当する8 tfかつ60万回のときで、良好なひびわれ性状を示した。

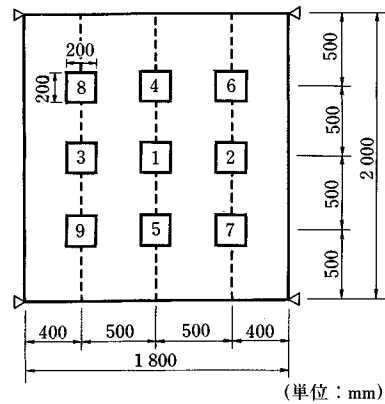
以上の結果^{5),6)}から、PCCはりにはひびわれ発生後もPC板のプレストレスが有効に作用しており、むしろPCはりとしての特性を示すことがわかり、いずれの場合にも設計荷重に対し十分な耐力を有することが実証された。

次に辺長比1:3、単純支持板としてモデル化し、プレキャストPC板と現場打ちコンクリートの厚さの比を3種類変えた版に、縁端载荷すなわちせん断卓越型載



(a) RC床版 (b) PCC床版

図-15 版供試体断面



(単位: mm)

図-16 移動载荷位置

荷をした場合の解析を行い、4.01~6.74 kgf/cm²の最大せん断応力度を算出したが、PC板表面に網目をつけた程度でも10 kgf/cm²以上、4 mm程度の凹凸をつければ19.6 kgf/cm²以上の付着せん断強度があることを実験的に明らかにしており⁸⁾、後者程度の凹凸をつけておけば全然問題ないことが確認された。

さらにこのことに関しては、2径間連続供試体における500万回の疲労試験でも問題は生じなかったとの報告⁹⁾があり、またAASHTOでは、単にブラッシングしただけでも十分と結論づけている¹⁰⁾。

②に関する研究と結果^{11),12)}

実験に用いた床版供試体の断面を図-15に示す。

床版は、二等橋に用いられる一方向版と仮定して、スパン2 m、版幅1.8 m、版厚17 cmとした。PCC床版の方には、PC板継目の影響を調べる目的で幅40 cmと50 cmを2枚ずつ、計4枚のPC板を用いた。载荷は実際の床版に近い状態にするため図-16に示すように载荷点を移動させて行った。荷重はT-20後輪荷重の8 tf (一等橋荷重で実験した)を上限、0.5 tfを下限荷重とし、1か所1万回载荷で合計200万回に達するまで繰返

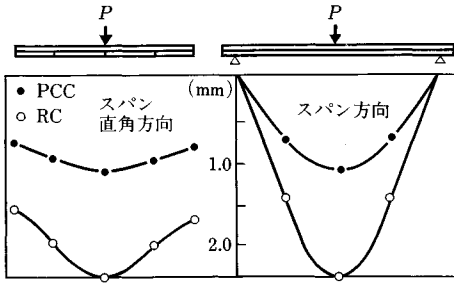


図-17 200万回載荷後のたわみ比較

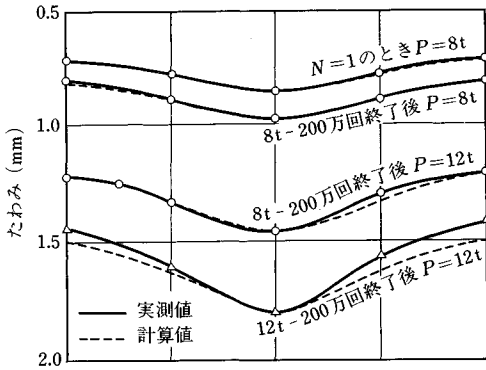


図-18 FEM解析した理論たわみと実測値(中央点載荷の場合)

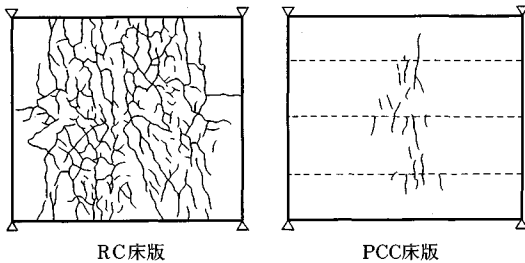


図-19 床版下面のひびわれ比較

し移動載荷した。

PCC床版とRC床版について、後輪荷重8tfの繰返し荷重によるたわみ変化を調べた結果、前者の場合、残留たわみは200万回載荷後で0.8mmであったが、後者の場合には最初の静的載荷ですでに0.8mmに達し、最終的には3.8mmにもなった。

200万回載荷後、中央点に8tf載荷した場合のスパンおよびスパン直角方向のPCC床版のたわみはRC床版のそれらの半分以下で(図-17)、プレストレスの効果が顕著に認められ、また、PCC床版はPC板の継目があるにもかかわらず、十分な曲げ剛性を有していることが判明した。

PCC床版底面のButt-jointの影響を調べる目的で、

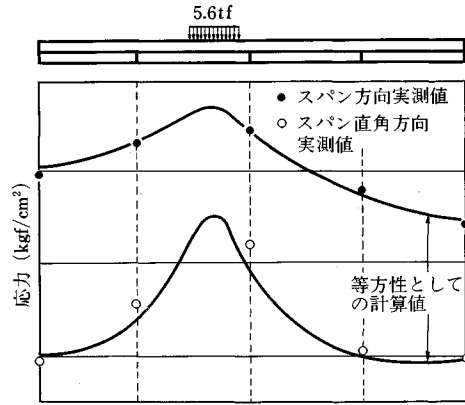


図-20 PCC床版上面の応力度分布

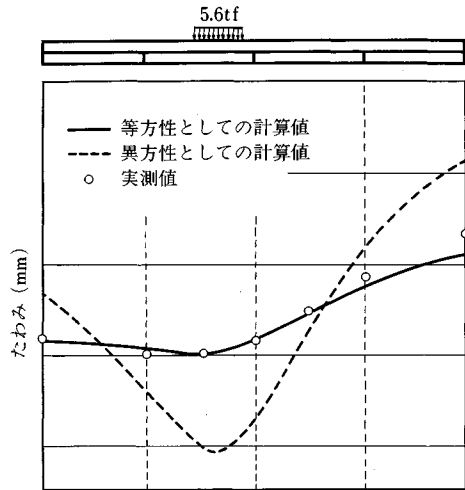


図-21 バットジョイントのある方向のたわみ (PCC床版、スパン直角方向)

中央点のたわみの実測値と、等方性版としてFEM解析した中央点の理論たわみとを一致させた場合のスパン直角方向たわみ曲線を図-18に示す。同図より、8tf-200万回繰返し載荷後も疲労前の静的載荷の場合と同様に計算値と実測値はきわめてよく一致している。

図-19に、PCCおよびRC床版の8tf-200万回載荷後の下面ひびわれ状況を示す。PCC床版のひびわれはRC床版に比べて著しく少なく、しかも除荷後は目視できないほどに閉じた。

引き続き、PCC床版において現場打ちコンクリートの厚さを極端に薄くした場合の挙動も調べるため、プレキャストPC板厚7cm、現場打ちコンクリート厚7cmのPCC床版について移動載荷試験を実施した¹³⁾。

図-20、図-21は、T-14後輪荷重5.6tfを床版の中央部に載せたときの版上面応力分布、たわみ曲線などを

示したものである。PCC 床版を等方性版とみなし、全厚 14 cm で計算した理論たわみ曲線が図-21 の実線であり、スパン直角方向については PC 板厚を無視し異方性版として計算したたわみ曲線が同図の点線である。これらの計算の場合、コンクリートの弾性係数は $3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比は 0.17 を用いた。これらの結果から、実測値は等方性版として取り扱った計算値によく合っていることがわかる。疲労試験においても同様のことが認められた。ちなみに、新指針では現場打ちコンクリート厚の最小値をプレキャスト PC 板厚の 1.5 倍と定めている。

以上の結果、PCC 床版は等方性版として十分設計できることがわかった。このことは、アメリカにおける大規模な実験と実績を背景に導かれた次の結言¹⁴⁾にも集約されている。

1. The bond at the interface between the prestressed precast panels and the cast-in-place concrete performed without any indication of distress under cyclic design loads and static failure loads.

2. Wheel loads were transferred and distributed across transverse panel joints in a satisfactory manner.

③に関する研究と結果

鋼線の径を種々変えて鋼線定着に起因するフープテンションを計算し、それに負モーメントによる引張応力を加算してコンクリートの引張強度と対比してみたが、鋼線径 9.3 mm 程度までなら、實際上主桁フランジと負鉄筋に拘束されていることも手伝って、問題ないことがわかった。

しかし、材料学会が実施した横曲げ試験で、 $\phi 10.8 \text{ mm}$ になると急激にひびわれが発生することが認められ、あまり太径の鋼線の使用は避けるべきであることが結論づけられた。

(3) 本工法の設計法^{7), 15)}

a) PC 板の使用限界状態に対する検討法

プレストレッシング直後において、(i) プレストレスによる軸圧縮応力度は、 100 kgf/cm^2 以下であること、(ii) プレストレスと PC 板の自重とを合成した場合、同一断面内の曲げ圧縮応力度の最小値はその最大値の 3/5 以上であることとし、また床版の施工時において、有効プレストレスと PC 板の自重、現場打ちコンクリートの自重および作業荷重とを合成した場合、コンクリートの曲げ圧縮応力度は 200 kgf/cm^2 以下であり、かつコンクリートには曲げ引張応力が生じてはならないと規定した。

プレストレス力および PC 鋼材の偏心量をできる限り大きくして、床版の施工時または PC 合成床版の設

計荷重作用時に曲げ引張応力が作用する箇所に、大きな曲げ圧縮応力を作用させるのがよいが、PC 板のような薄肉部材では、過大なそりや座屈が生じやすくなることなどを考慮した制限条項である。

b) PC 合成床版の使用・疲労限界状態に対する検討法

次の 3 つの方法を示し、いずれの方法を選んでもよいとした。

A 法：応力度を忠実に算定しようという方法であったが、各施工段階ごとに、PC 板あるいは現場打ちコンクリートがどのような荷重に抵抗できるかを考慮して応力度を算定していく方法である。設計荷重作用時に PC 板に曲げひびわれが生じるのを許しており、曲げひびわれおよび鋼材の疲労に対する検討を行うこととしている。この方法は他の方法に比べて、経済的に設計できるが、設計計算は最も繁雑である。

B 法：A 法と応力度の算定方法は同じであるが、PC 板内に引張応力の発生を許さないことによって、耐久性の優れた PC 合成床版を造るとともに、設計計算を簡単に行える方法である。すなわち、PC 板の曲げひびわれに対する検討が不要であるとともに、PC 板内の鋼材応力度の変動は小さくなるので、疲労に対する検討も不要となる。さらに、正の曲げモーメントが作用する箇所では「コンクリート標準示方書」設計編 11.3.1 (3) に準じて、現場打ちコンクリートに生じている曲げ引張応力に相当する分の引張鉄筋を現場打ちコンクリート内に配置し、PC 合成床版の全断面を有効とする計算を行ってもよい。ただし、負の曲げモーメントが作用する箇所では、現場打ちコンクリートの曲げひびわれと現場打ちコンクリート内の鋼材の疲労に対する検討を行わなければならない。

C 法：簡略化した算定方法であり、実際の応力状態とは異なった仮定を用いている。すなわち、床版施工後に PC 板内に残っている圧縮応力を無視し、上載荷重などが作用する前の PC 合成床版内の圧縮応力度をすべて 0 と仮定している。この意味で、A 法と比べると経済的とはいえないが設計計算は簡単になっている。

c) PC 合成床版の終局限界状態に対する検討法

終局限界状態に対しては、曲げモーメントおよび軸方向力に対する安全性の検討、せん断力に対する安全性の検討を「コンクリート標準示方書」設計編 6.2 および 6.3 に準じてそれぞれ行うものと規定し、設計曲げ耐力の設計曲げモーメントに対する比が、設計せん断耐力の設計せん断力に対する比が、そして設計押抜きせん断耐力の設計押抜きせん断力に対する比などが、それぞれ構造物係数 (1.15) 以上でなければならないとしている。

(4) PC 合成床版工法の適用例⁶⁾

平型板を用いて鋼桁上に最初に施工した例に日本道路公団・京葉道路の鬼高架道橋（鋼合成連続桁橋）、中央自動車道の明智高架橋（鋼非合成単純桁橋）などがある。同公団試験所が13年経過、交通量3万台/日の現状下の明智高架橋について本格的調査を実施したが、特に異常は報告されていない。ちなみに、同橋に用いたPC板は厚さ50mm、幅398mm、長さ2450mmで、上縁に40kgf/cm²、下縁に114kgf/cm²のプレストレスが導入されていた。

現場打ちコンクリートの厚さは180mmで全厚は230mmとなり、橋軸方向に、D-16鉄筋を上側120mm、下側240mmのピッチでそれぞれ配置してある。当時の設計では、スラブ自重はPC板に負担させるものの、活荷重によるモーメントに対してはPC板厚を除くRC版として抵抗させる扱いで処理された。その後、引き続きいくつかの橋梁に適用されていったが、東関東自動車道・小中台高架橋（PC合成連続桁橋、6主桁）工事¹⁷⁾においては、住宅地貫通のため下部工工事が大幅に遅れた分をリカバーした。

この橋に使用したPC板は、前例の場合（398mm）よりも拡張して1000mmとし、 $\phi 9.3$ mm PC鋼より線6本で有効プレストレス46kgf/cm²が導入され、施工時荷重に対しPCⅡ種で設計された。

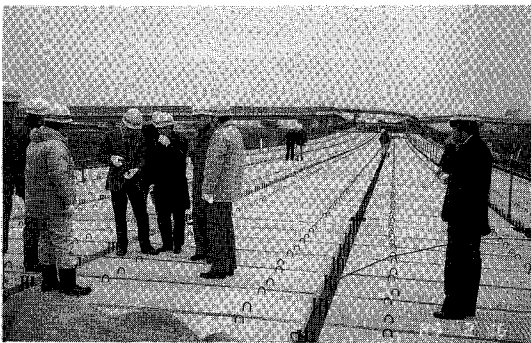


写真-3 平型板の鋼非合成桁橋への適用（阪神高速東大阪線）

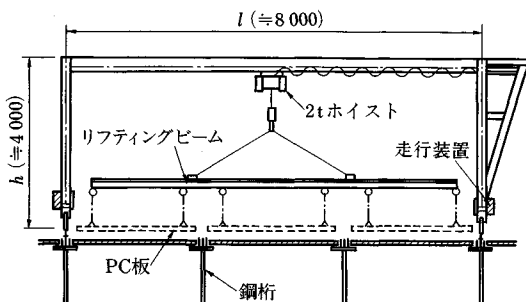


図-22 門型走行クレーンによるPC板敷設要領図

一般に支承上にPC板を敷設する場合、ジョイントフィラーを張り付けその上にPC板を据え付ける。またPC板間のButt-joint部には無収縮モルタルを流し込む。

写真-3は本工法が阪神高速道路公団の東大阪線の鋼非合成桁橋に採用された際、PC合成床版工法研究会で現地調査に赴いたときの状況で、施工管理の容易さの点でもきわめて高い評価を得ていた。橋梁におけるPC板敷設には一般に門型（図-22）・ユニバーサルトラッククレーンなどが用いられる。

次に、マンションスラブへチャンネル型板を適用した東京都の例を写真-4に示す。

スパンの増大に伴い、PC板の曲げ耐力を強化するためには、図-10(b)に示すように板の上面に適当なリブを付けるのが効果的である。リブの数、高さを適当に工夫する必要のあることはもちろん、図-10(c)のように、ホロー断面とすることによって自重の軽減を図ることも可能である。

リブ付き平型板は一般にスパン4～5m程度に利用されるが、さらにスパンの大きい場合に対処してリブ高さをスパン中央に向かって高くすることによって、断面係

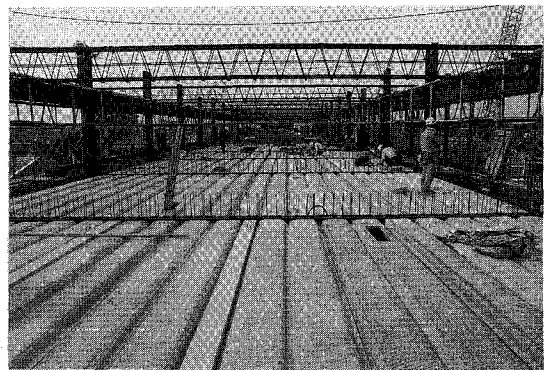


写真-4 チャンネル型板のマンションスラブへの適用（東京都）

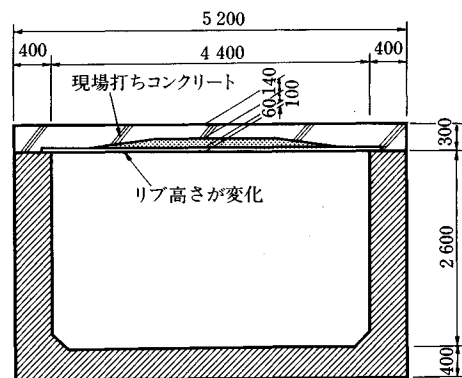


図-23 カルバート覆蓋工事

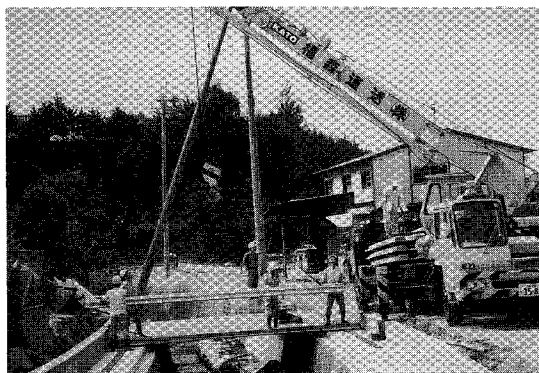


写真-5 水路覆蓋工事 (奈良市)

数と PC 鋼材の偏心を大きくし、スパン中央部のモーメント耐力を効果的に大きくすることもできる (図-23 参照)。

都市の再開発を図るうえで必要な水路覆蓋工事は、周囲の環境条件により工法の選定に制約を受けるとともに一般に急速施工が要求される。

リブ付き平板を並べて水路を覆蓋し、駐車場にした奈良市の例を写真-5 に、また長さ方向にリブ断面を変化させたものを用いて下水路 (カルバート) の覆蓋工事を実施した三原市の例を図-23 などにそれぞれ示す。

(5) 現状と今後の展望

阪神高速道路公団の場合、発足当時 17 cm であった橋梁床版厚が現在 25 cm に増厚され¹⁵⁾、首都高速道路公団の場合でも、床版厚と鉄筋量がそれぞれ 1.5 倍、1.2 倍に増やされ、強度面での強化が図られてきた。

PC 合成床版工法は、プレキャスト PC 板を用いることによって、施工中の支保工・型枠工事を著しく改善し、しかも完成後、現場打ちコンクリート部との合成断面で抵抗させるという一石三鳥の効用を図るものだが、この適用によって、ひびわれ・たわみ特性が格段に優れた橋梁床版が実現した意義は大きい。

また、ひとたび供用が開始されると、交通事情などの制約を受けて、構造物の保守管理作業がきわめて難渋するため、初期投資は大きくともむしろ完成後の保守管理のより容易なものを選ぼうとする傾向や、構造物を耐用部位と更新部位とに分けて設計しようとする、いわゆる「部位別耐久設計」において、たとえば橋梁床版を更新部位として位置づけ、更换しやすい構造細部にしようとする気運などにも対処する必要があるが、本工法の適用により、保守管理、更换性などの点でも好都合な床版が生まれたことになる。

支保工なしで省力、安全、迅速かつ良質施工ができる効用は大きく、特に建築の場合、各階の床版工事を同時着工ができる利点は著しい。また、チャンネル板やダブ

ル T 板などを用いればスパン 10 m 以上のところでも、無支保工かつ小ばりなしで施工できることから、大空間を必要とする建物、荷重の集中度の高いたとえば重倉庫、原子炉廃棄物収納庫などの床版に一層威力を発揮しよう。また、インテリジェントビルにおける電子情報設備機器内蔵のための、より大きな空間と耐荷力の要求、さらに、電気配線・情報通信回線収納に備えた床断面を、との要請などにも対処する方向で、床版に関する研究は今後ともさらに活発に展開しよう。

本工法は指針制定以前には工期や施工上の理由による設計変更の形で採用されることが多かったが、同制定以後は本格的採用の例がふえ、さらに各地の高速自動車道などで実績拡大の気運である。また、本工法を海底トンネルの上下間仕切り車道床版や都市土木でのオープンカットトンネルの覆工版に利用したり、栈橋や擁壁に適用しようとする試みなどもあるようである。

前記したごとく、土木学会はこの工法の土木分野での汎用を図るべくいち早くその設計・施工指針を制定したが、これまでの累積施工面積は土木：8 万 m² (約 20 億円)、建築：120 万 m² (約 180 億円) と建築分野での利用の方が圧倒的に多いという結果になっている。保守性の強い「官」と軌道修正の速い「民」との発注形態の相違、その他にもよるのであろうが、逐年深刻化する労務事情を背景に、またその品質が買われて土木分野での実績も今後急速に拡大するものと思われる。

謝 辞：PC 合成床版研究委員会は、著者が委員長をおおせつかり、岡村 甫副委員長兼幹事長、藤井 学副委員長を主軸とする官産学 41 名の委員構成で発足し、3 年後にその設計施工指針 (案) を制定したが、その間の各位格段のご尽力に対し深甚の謝意を表わしたい。また、特に 2 回にわたり本会へご足労頂き、ご意見・側面鼓舞を賜りました水野高明、国分正胤、岡田清の各先生方にも心から御礼を申し上げます。最後に、本工法の端緒を拓き、永年その研究戦線と共にしてきた畏友、故 FPS 副社長 村上義彦氏に対し、本文をもって感謝報告の一端とも致したい。

参 考 文 献

- 1) 大上剛司・斎藤宏保・小平信行：NHK 特集 森が危ない、日本放送出版協会、1986. 8.
- 2) 日本道路公団試験所コンクリート試験室：道路橋鉄筋コンクリート床版の損傷機構にもとづく健全度判定と補修工法の選択、試験所技術資料、第 413 号、1985. 3.
- 3) 園田恵一郎：移動繰返載荷の下での道路橋 R. C. および S. C. 床版の疲労特性、文部省科研成果報告書、1983. 3.
- 4) 渡辺 明：合成化と PC 化による床版工法の発展、プレストレストコンクリート、Vol. 29, No. 5, Sept. 1987.
- 5) 渡辺 明 (研究代表者)：PC 板埋設型枠の利用による新

- 省力・迅速施工法に関する研究，昭和56・57年度文部省科学研究費一般研究(B)研究成果報告書，1983.3.
- 6) Watanabe, A., Idemitsu, T. and Emoto, Y. : Cyclic Loading Test on Composite Slab Using PC Stagingless Live Form, Trans. of JCI, Vol.3, 1981.
 - 7) 土木学会：PC合成床版工法設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー，第62号，1987.3.
 - 8) 阪神高速道路公団・日本材料学会(委員長 岡田 清)：PC埋設型枠床版の耐荷性状に関する調査研究報告書(その1, その2)，1982.3, 1983.3.
 - 9) 首都高速道路公団神奈川建設局：PC板を用いたPC合成床版の疲労実験概要報告書，1986.4.
 - 10) Robert M. Barnoff: Full Scale Test of Prestressed Bridge with Precast Deck Planks, PCI Journal, Sept. Oct. 1977.
 - 11) 江本幸雄・渡辺 明・出光 隆：PC板埋設型枠を用いた合成床版に関する研究，土木学会論文集, No.360/V-3, 1985.8.
 - 12) Watanabe, A. and Idemitsu, T. : Use of Prestressed Concrete Panel Composite Slab in Concrete Deck Works of Construction in Japan, Proc. of Japan-U.S. Seminar on Precast Concrete Construction in Seismic Zones, Oct. 1986.
 - 13) 江本幸雄・出光 隆・渡辺 明：移動載荷方式による現場打ちコンクリート厚さの薄いPC合成床版の疲労試験，プレストレストコンクリート，Vol.29, No.2, Mar. 1987.
 - 14) Buth, E., Furr, H.L., Jones, H.L. and Toprac, A.A. : Evaluation of a Prestressed Panel, Cast-in-place Concrete Bridge, The Research Report 145-3, The Texas Highway Department, Sept. 1972.
 - 15) 阪神高速道路公団PC構造物検討委員会(委員長 藤井学)：PC埋設型枠を用いた鋼道路橋床版の設計・施工，橋梁と基礎，Vol.20, No.5, 1986.5.
 - 16) 渡辺 明：PC合成床版工法とその活用，コンクリート工学，Vol.24, No.10, Oct. 1986.
 - 17) 佐々木武彦・氏家俊和・鈴木哲夫・上田 哲：東関東自動車道・小中台高架橋におけるPC板合成床版の設計・施工，橋梁，Vol.16, No.5, 1980.5.
 - 18) 友永久雄・高田博尾・前田義一：PICOS合成床板工法の施工について，日本建築学会大会学術講演梗概集，1986.8.

(1990.1.23・受付)