

PC板埋設型枠を用いた合成床版に関する研究

A STUDY ON CHARACTERISTICS OF COMPOSITE SLAB WITH PC PLANKS

江本幸雄*・渡辺明**・出光隆***

By Yukio EMOTO, Akira WATANABE and Takashi IDEMITSU

The precast PC planks employed as embedded forms have come into practical use to improve the construction works of concrete slab. This method has many advantages such as being able to construct the slab in safety without scaffolding, shortening the construction period, etc.. The authors fabricated composite beams as well as slabs with the precast PC planks and carried out static and cyclic loading tests. The composite slab was much superior in mechanical characteristics to RC slab and behaved as PC members. Consequently, it is concluded that this composite slab should be designed as PC member rather than RC one.

As a result of the test construction in situ, it has been made clear that this method is more practical and economical.

1. 緒 言

最近、交通量の激増に伴い、各地の鉄筋コンクリート道路橋床版でひびわれ損傷が生じ、その維持補修に要する労力と費用は大きな負担となっている。また、労働人口の高齢化に伴う鉄筋工、大工等の熟練工の不足や賃金高騰も深刻な問題となりつつある。これらの問題点の解決と道路橋床版の設計・施工の合理化を図ることを目的として、プレキャストPC板を埋設型枠として使用し、工事の簡素化を図る工法が開発されている。

アメリカ合衆国におけるPC板埋設型枠工法の研究は、すでに、1960年代から労働力節減のため始められ、1970年代から交通量の激化に伴う道路床版の損傷を解決する手段としてクローズアップされてきた。アメリカでは、すでに多数の実績と研究^{1),2)}により、AASHTOの規定が制定され、本格的に使用され始めている。わが国でも松本らによりPC素材で補強した合成構造に関する研究³⁾が行われ、十分利用可能であることが提唱さ

れている。また、すでにPC板埋設型枠合成床版の実施例も2、3みられ、その結果、近年問題となっているRC床版の過大たわみやひびわれ損傷に対して有効な手段になるものと期待されている。しかしながら、現在までのところ、わが国ではPC板を用いた合成床版についての設計規準は制定されておらず、本格的に実用化するにあたって、大きな障害となっている。

PC板埋設型枠工法では、主桁間に敷設されたプレキャストPC板は、現場打ちコンクリート打設時には型枠・支保工として働き、現場打ちコンクリート硬化後には床版断面の一部として、合成床版を構成し外力に抵抗する。この工法の採用にあたってはPC板と現場打ちコンクリートとの打継面のずれ、合成床版の下面に残るバットジョイントが床版の剛性に与える影響、さらにはそれらの疲労性状など、まだ解明されていない点も多く、実用化の遅れている原因ともなっている。

本研究では、これらの問題点を解決するため、PC板を用いた合成はりと合成床版を製作し、静的試験および疲労試験を実施した。

2. PC板埋設型枠を用いたコンクリート床版の迅速施工法

図-1にPC板埋設型枠工法の概略を示す。主桁架設

* 正会員 工修 福岡大学講師 工学部土木工学科
(〒814-01 福岡市城南区七隈8-19-1)

** 正会員 工博 九州工業大学教授 開発土木工学科
(〒804 北九州市戸畠区仙水町1-1)

*** 正会員 工修 九州工業大学助教授 開発土木工学科
(同上)

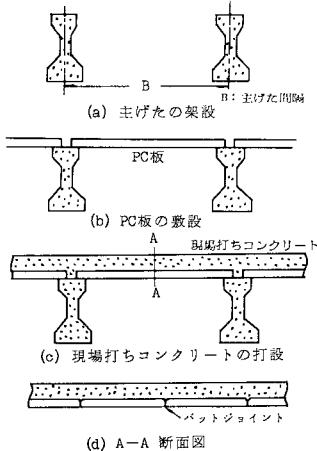


図-1 PC板埋設型枠利用の床版

終了後(図-1(a)), まずプレキャストPC板をその間に敷設する(図-1(b)). ついで、PC板に型枠・支保工の役目をさせて、現場打ちコンクリートを打設する(図-1(c)). コンクリート硬化後にはそれらは一体となり合成床版を構成する⁴⁾. この工法によれば、煩雑な型枠・支保工工事を省略できるから大幅な省力化、工事の迅速化を図ることができるだけでなく、高所の危険な作業も少なくなるので、安全性についても従来の工法に比べ著しく向上する.

3. PC板の製作

PC板の製作には2つの方法がある。すなわち、プレンションベンチでスライディングフォームを用いて60~70mを連続して打設、成形し、任意の長さにカットする方法と当初から所定の長さに仕切って製作する方法である。本実験では前者の方法を採用した。PC板表面には現場打ちコンクリートとの付着をよくするために、松本、J.M. Barkerらの研究を参考にして30mmピッチで5mm程度の凹凸を付けた⁵⁾。ベンチでの成形の際、この粗面仕上げ作業はφ16の丸鋼32本を取り付けたローラーを用いて行われた。PC板には図-2に示す3種類があり、支間が2~3mではa)の平板、支間が3~4mではb)のリブ付き平板、支間5~6m程度まではc)のチャンネル板がそれぞれ用いられる。本研究では主桁間隔が2m程度の橋梁を想定したので、a)タイプの平板を採用し、幅1m、板厚6cmのPC板を作製した。鋼材の種類、量、導入プレストレス量等は研究の進行に伴って設計の原則を適切なものへと変更していくため、その都度、変えることになった。したがつて断面の詳細については適当なところで説明することにする。通常、PC板はプレストレス導入後、所定の長さにカットされる。その際、カットした部材端から所定の

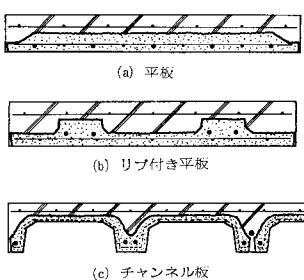


図-2 PC板の種類

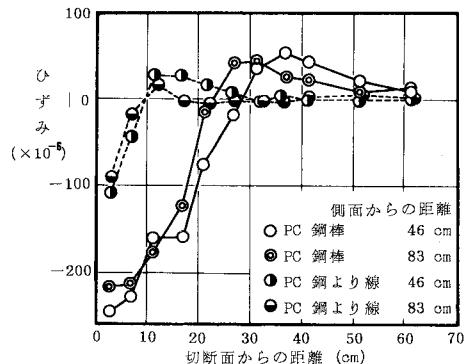


図-3 PC鋼材の伝達長

プレストレスの入る箇所までの長さ、すなわち伝達長を求めるため、コンクリート表面にワイヤストレインゲージを貼付して、軸方向のひずみを測定した。図-3はカット後のPC鋼材の伝達長測定の一例である。伝達長はPC異形鋼棒で20~30cm、PC鋼より線で10cm程度で、PC異形鋼棒の方が長くなっている。これはPC鋼より線が凸形の表面形状を有しているのに対し、PC異形鋼棒の表面が凹形の溝であるため、その付着特性の差異が現われたものと考えられる。しかしながら、施工時の荷重に対する検討を行った結果、PC板は主桁付近でフルプレストレスの条件を満足しており、伝達長に30cm程度の長さを要しても問題ないと判断される。

4. PC板合成はりの合成効果に関する実験

PC板合成はりの試験では、主にPC板と現場打ちコンクリートとの水平打継面の付着、PC鋼材とコンクリートとの付着等に着目し、合成部材として十分挙動するか否かを調べるとともに、Ⅲ種PC部材としての設計の可能性についても検討した。

(1) はり供試体および載荷方法

はり供試体断面の形状寸法を図-4に示す。厚さは17cmと一定にしたが、幅は配筋の都合上60cm以下とした。a)は二等橋に用いる一方向版で、RC部材とみなして設計したものである。b)は同一条件で設計したRCはりである。合成床版の設計は当初、以下の原則に従って行った。「自重および施工時の荷重についてはPC板がⅢ種PCとして負担する。現場打ちコンクリートが硬化した合成後に加わる荷重に対しては合成床版全体が鉄筋コンクリート部材として抵抗する。」(現在までに、わが国で実施されたPC板埋設型枠工法の例では、この原則によって設計されたものが多い。)しかしながら、この方法によると、設計にはPC鋼材のプレストレス力を考慮しないことになるので、実際の耐力は必要以上に大きなものとなる。そこで、本実験では現場打ち

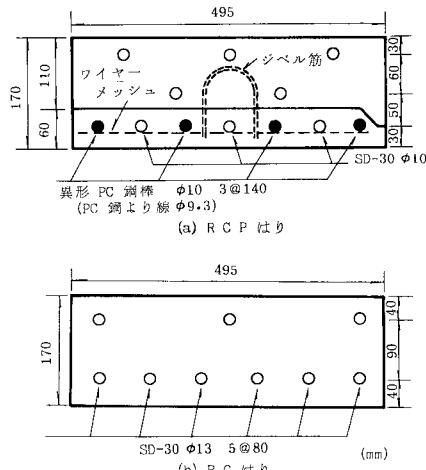


図-4 はり供試体断面図

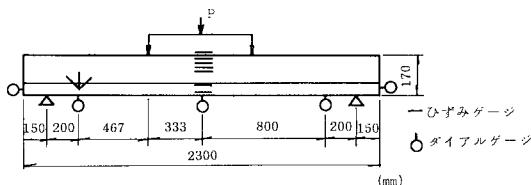


図-5 はり供試体の載荷方法

部分の鉄筋量 D 13@100 を D 10@200 とし、設計上必要な量の 30 % 程度まで減少させることにした。PC 板には幅 1 m 当たり $\phi 10$ mm の PC 異形鋼棒 8 本、D 10 の異形鉄筋 7 本を用い、等布プレストレス 60 kgf/cm^2 (5.9 MPa) を導入した。なお、比較のため PC 鋼より線を用いたものも製作した。以後この設計法によるものを RCP と略称する。はり供試体の種類を表-1 に示す。B, C, E シリーズのジベル筋は図-4 に示すように $\phi 13$ mm の馬てい形異形鉄筋を両端部から 30 cm の位置に埋め込んだ。C シリーズは現場で PC 板の上面が油、泥などで著しく汚れた場合を想定し、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。なお、コンクリートの設計基準強度は PC 板で 500 kgf/cm^2 (49 MPa)、現場打ちコンクリートで 240 kgf/cm^2 (23.5 MPa) である。

はりの載荷試験方法を図-5 に示す。はりの曲げ強さ、水平打継目のせん断強さ、PC 鋼材の付着強さ等を確かめる目的で、載荷方法は三等分点二点載荷とした。静的載荷試験では各荷重段階ごとに、たわみ、コンクリートのひずみ、ひびわれの伸び、ひびわれの幅、PC 鋼材のすべり込み、および打継面のずれなどを測定した。疲労試験では静的破壊強度の 45 ~ 80 % を上限荷重、8 % (1.75 t) を下限荷重として繰り返し載荷を行った。所定の回数を繰り返したのち、静的載荷によって諸測定を

表-1 はり供試体の種類

供試体の記号	鋼材量 (1 m当たり)	ジベル筋	合成面	設計様式
A	$\phi 10$ 異形PC鋼棒 8 本 $\phi 10$ 異形鉄筋 7 本	0	合成	RCP
B	$\phi 9.3$ PC鋼より線 8 本 $\phi 10$ 異形鉄筋 7 本	2	合成	RCP
C	$\phi 10$ 異形PC鋼棒 8 本 $\phi 10$ 異形鉄筋 7 本	2	はく離剤	RCP
D	$\phi 13$ 異形鉄筋 12 本		RC 一体	RC
E	$\phi 10$ 異形PC鋼棒 8 本 $\phi 10$ 異形鉄筋 7 本	2	合成	RCP

表-2 はりの静的試験結果

供試体の記号	ひびわれ発生曲げモーメント ($t \cdot m$)		破壊曲げモーメント ($t \cdot m$)		破壊形式
	測定値	計算値	測定値	計算値	
A	5.02	5.17	14.75	12.67	PC鋼材の降伏による曲げ破壊
B	4.38	5.17	14.83	12.81	打継目による離
C	4.04	5.17	12.13	12.67	打継目による離
D	1.01	1.04	9.10	6.27	降伏による曲げ破壊

実施した。

(2) 合成はりの耐力および打継目の付着性状

RCP はりの静的載荷試験は表-1 に示す A ~ D シリーズについて実施し、PC 鋼材、合成面の相違、ジベル筋の有無による耐力および水平打継面の付着性状について検討した。E シリーズは疲労試験のみ実施した。静的試験結果を表-2 に示す。合成はりのひびわれ発生曲げモーメントは RC はり、D シリーズに対し、4 倍以上で、設計曲げモーメント $2.12 \text{ t} \cdot \text{m}/\text{m}$ (3.2 t) の約 2 倍である。合成はりの A, B シリーズ供試体はいずれも $14.8 \text{ t} \cdot \text{m}/\text{m}$ (22 t) 前後で PC 鋼材の降伏破壊により破壊しており、打継面および PC 鋼材の付着には全く問題は生じなかった。RC はり供試体は $7.75 \text{ t} \cdot \text{m}/\text{m}$ (11.5 t) で鉄筋の降伏とみられる急激なたわみの増加があった後、 $9.10 \text{ t} \cdot \text{m}/\text{m}$ (13.5 t) で破壊した。離型剤を塗布した C 供試体は、 $12.13 \text{ t} \cdot \text{m}/\text{m}$ (18 t) まで荷重を上げたとき、突然、打継面がはく離し、ジベル筋が PC 板から引き抜け破壊した。これは、RC はりの破壊曲げモーメント $9.10 \text{ t} \cdot \text{m}/\text{m}$ (13.5 t) の 1.3 倍、設計曲げモーメントの 5.6 倍に相当する。また、A, B シリーズの終局耐力はジベル筋の有無にかかわらず、ほとんど同じで設計曲げモーメントの約 7 倍であった。E シリーズの終局耐力も A シリーズのそれと等しくなると考えられるので、疲労試験では、A シリーズの終局耐力を用いて上限荷重を定めた。

合成はりの疲労試験結果を図-6 に示す。A シリーズの上限荷重 17.5 t ($11.80 \text{ t} \cdot \text{m}/\text{m}$) (静的破壊荷重の 80 %) および 16.4 t ($11.05 \text{ t} \cdot \text{m}/\text{m}$) (70 %) の供試体は PC 鋼材のすべり込みによる付着疲労破壊が生じた。離

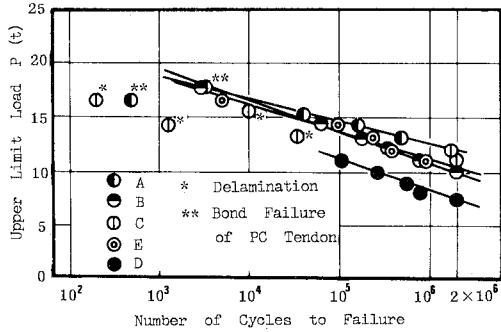


図-6 S-N 線図

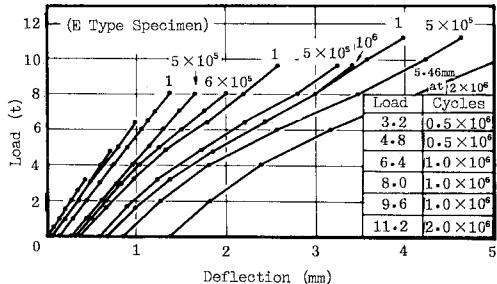


図-7 繰り返し載荷時の荷重-たわみ曲線

型剤を塗布したCシリーズは13.2 t (8.90 t·m/m) (60%)以上で打継面がはく離して破壊した。上記以外の合成はり供試体はいずれもPC板中の鉄筋が疲労破断し、引続きPC鋼棒が疲労破断した。DシリーズのRCはりもすべて鉄筋の疲労で破壊した。合成はりの200万回疲労限は10~11.5 t (6.6~7.3 t·m/m)であり、これはRCはりの疲労限7.4 t (4.9 t·m/m)の約1.4倍、設計荷重3.2 t (2.1 t·m/m)の約3.5倍に相当する。以上の結果より、PC板と現場打ちコンクリートとの打継面の付着はPC板表面が粗面仕上げされておれば、ジベル筋がなくても実用上十分であり、仮にPC板上面の汚れ等により付着が悪い場合でも、本供試体のように吊筋程度のジベル筋が配置されておれば、十分な耐力を期待できることが明らかとなった。

次に、Eシリーズ供試体を用いて段階的に荷重レベルを増加させながら、繰り返し載荷試験を行った。荷重-たわみ曲線を図-7に示す。設計曲げモーメントに相当する3.2 tを上限荷重、0.5 tを下限荷重とした低荷重レベルの繰り返し載荷試験において、50万回まで荷重-たわみ曲線にはほとんど変化はみられず、弾性的に挙動した。ひびわれが発達して、荷重-たわみの直線関係が失われたのは設計曲げモーメントの2.5倍に相当する8 tの荷重で、60万回の繰り返しを行った時点である。また、残留たわみは8 t-100万回の繰り返しにおいても0.5 mm以下であり、合成はりは繰り返し荷重を受けて

も良好なたわみ性状を示した。

(3) 合成はりのPC部材としての計算法に関する検討

合成はりはPC板にのみ部分的にプレストレスが導入されており、ひびわれ発生後もプレストレスが有効に作用し、PCとしての特性を示している。そこで、この合成はりをPC部材として設計することとし、①、②の2つの場合について、計算方法を比較検討する。

① 残留プレストレスはPC板のみに分布していると考える方法

② 始めから一体のPC部材であったものと単純化して計算する方法

①および②の方法で計算したPC鋼材の荷重による増加応力を図-8に、上縁コンクリートの応力を図-9にそれぞれ示す。また、同図にはEシリーズ供試体について、繰り返し載荷10回後のひびわれの入った状態における実測値も示している。①と②の計算方法による差は小さく、実用上、②の方法で計算しても差し支えないと考えられる。同図からⅢ種PC部材としてPC鋼材の増加応力度1000 kgf/cm² (98 MPa)を許す場合、荷重は約8.0 t/0.5 m (5.39 t·m/m)となる。この値は設計曲げモーメントに相当する荷重3.2 tの約2.5倍に

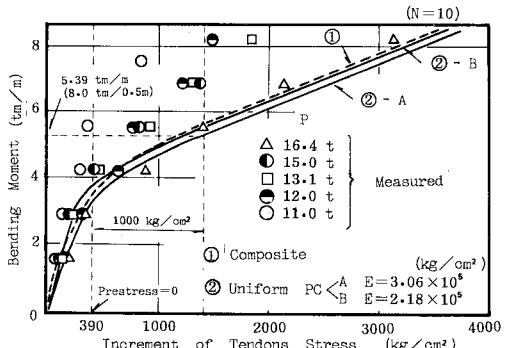


図-8 荷重による鋼材の増加応力

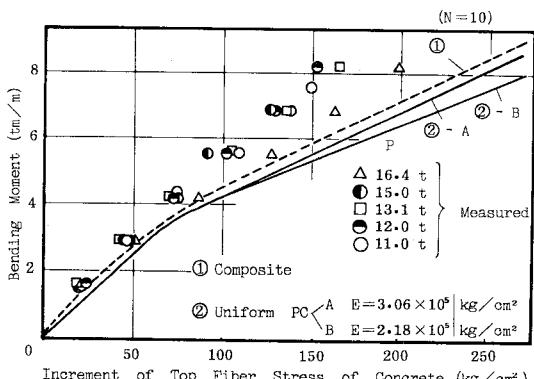


図-9 荷重による上縁コンクリートの増加応力

相当し、実際に、この荷重を繰り返しても疲労破壊は生じなかっただ。以上の結果から、この合成はりの設計にあたっては単なる RC 部材として設計することは安全すぎ、不経済であり、合成はりを一体の PC 部材と考え、Ⅲ種 PC 部材として通常の計算法^{6),7)}を適用する方が妥当であると考えられる。

(4) Ⅲ種 PC 部材として設計した合成はりの試験結果

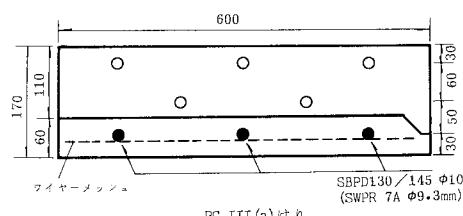
合成床版は RC 部材として設計するときわめて安全すること、また、この種の床版は PC 部材とみなして差し支えないことなどが明らかとなった。そこで、「自重および施工時の荷重については PC 板がⅡ種 PC 部材として負担する。現場打ちコンクリートが硬化した合成後は合成床版全体をⅢ種 PC 部材とみなす」という設計原則のもとに、実際にはり供試体を設計製作し、実験的検討を行った。施工時に PC 板をⅡ種 PC 部材とした理由は、PC 板の曲げ試験の結果、ひびわれ発生モーメントから終局モーメントまでかなりの余裕があり、もしひびわれが生じても急激に破壊することができないからである。

表-3 に 4.(1)と同じ条件のもとでⅢ種 PC 部材(鋼

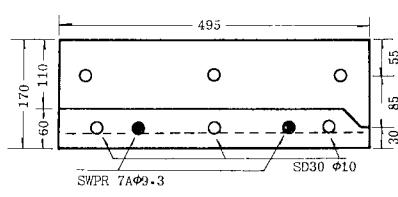
表-3 Ⅲ種 PC はり供試体の種類

供試体の記号	鋼材量 (1m当たり)	PC板の プレストレス (kgf/cm²)	設計様式	備考
			施工時 便用時	
A	φ10異形PC鋼棒8本 φ10異形鉄筋7本	60	I種PC	RC床版に使用
F	φ10異形PC鋼棒5本	37.3	II種PC	III種PC
G	φ9.3PC鋼より線5本	37.3	II種PC	III種PC PC III(a)床版に使用
H	φ9.3PC鋼より線4本 φ10異形鉄筋6本	33	II種PC	III種PC PC III(b)床版に使用
I	φ10異形PC鋼棒5本	37.3	—	III種PC — 一体の PCはり

*活荷重に対してのみ



PC III(a)はり



PC III(b)はり

図-10 合成はり供試体

材の許容增加応力度 $\Delta\sigma_p=1000 \text{ kgf/cm}^2$ (98 MPa)) として設計した合成はり供試体の種類 (F~I) を示す。また、合成はりの形状寸法を図-10 に示す。F, G シリーズは上記の設計原則を PC 鋼材のみで満足させたものである。すなわち、PC 板には幅 1 m 当たり、φ9.3 mm の PC 鋼より線 5 本を使用し、37.3 kgf/cm² (3.66 MPa) の等布プレストレスを導入している。以後、この設計法によるものを PC III (a) と略称する。これに対し、H シリーズはひびわれ特性改善のため、PC 鋼より線と鉄筋を併用したものである。以後、PC III (b) と略称する。PC 板には 1 m 当たり、PC 鋼より線 4 本、D 10 異形鉄筋 6 本を用い 33 kgf/cm² (3.23 MPa) の等布プレストレスが導入されている。ただし、製作の都合上、鉄筋量が計算値より約 20 % 多くなっている。I シリーズは PC 鋼材量を F シリーズと同じにした通常のⅢ種 PC はりである。静的載荷試験結果を表-4 に示す。RC 部材とみなして設計した A シリーズ合成はりの破壊曲げモーメントと設計曲げモーメントとの比は、 $M_u/M_d=7.0$ であり、きわめて不経済な設計となっているが、Ⅲ種 PC 部材として設計した F, G シリーズの M_u/M_d はそれぞれ 3.6, 4.2 と前者の 7.0 に比べかなり減少している。合成はり F シリーズのひびわれ発生モーメントと一体のはり I シリーズのそれを比較すると、後者の方が若干大きいが、現場打ち部のコンクリート強度の差を考慮するとほとんど同程度と推測される。鉄筋を入れた H シリーズのひびわれ発生モーメント M_c は同種の PC 鋼材を用いた G シリーズに比べてかなり大きくなっている。図-11 に G および H シリーズのひびわ

表-4 Ⅲ種 PC はりの静的試験結果

供試体の種類 モーメント	A	F	G	H	I
	設計曲げモーメント $M_d (t \cdot \text{mm})$	2.12	2.12	2.12	2.12
ひびわれ発生曲げモーメント $M_c (t \cdot \text{mm})$	5.02	3.33	3.35	4.72	3.89
M_c/M_d	2.4	1.6	1.6	2.2	1.8
破壊曲げモーメント $M_e (t \cdot \text{mm})$	14.75	7.67	8.81	10.04	9.03
M_e/M_d	7.0	3.6	4.2	4.7	4.3

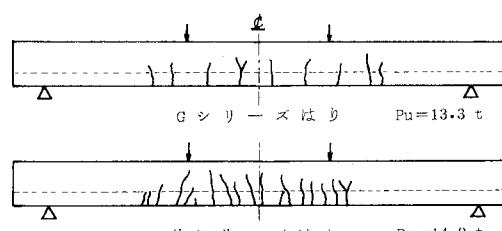


図-11 合成はりのひびわれ性状

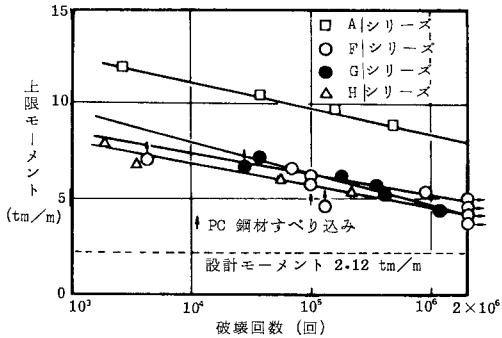


図-12 疲労試験結果

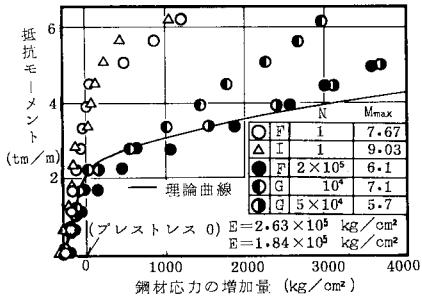


図-13 曲げモーメント～鋼材応力の増加量曲線

れ分布図を示す。Hシリーズにひびわれを分散させる目的で入れた鉄筋の効果が現われている。疲労試験結果を図-12に示す。合成はりの200万回疲労限はAシリーズが8 t·m/m, F, GおよびHシリーズはおのおの5 t·m/m, 4.3 t·m/mとなっており、それぞれ設計曲げモーメントの3.8倍, 2.4倍および2.0倍である。以上の結果から、疲労の面からも合成はりを単なるRC部材として設計することは安全すぎ、III種PC部材とみなして設計するのが妥当と考えられる。

PC鋼材のみを用いる場合(PC III(a)), すなわちF, Gシリーズでは設計曲げモーメントでの付着応力度は $\tau_0 = 17 \text{ kgf/cm}^2$ (1.67 MPa) で許容付着応力度 $\tau_{0a} = 20 \text{ kgf/cm}^2$ (1.96 MPa) 以下であるが、異形PC鋼棒を用いたFシリーズでは200万回疲労限度程度の荷重で

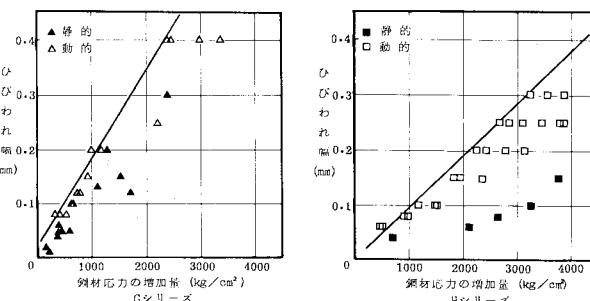


図-14 鋼材応力增加量とひびわれ幅との関係

付着疲労破壊を生じたものがあった。したがって、活荷重の影響が大きい場合は緊張材にはPC鋼より線を利用する方が望ましいと判断される。PC鋼材と鉄筋を併用する場合(PC III(b)), すなわちHシリーズでは鋼材の周長が約2倍となるから、付着応力度の値は約半分となり、付着疲労破壊の心配はない。したがって、この場合はPC鋼材として異形PC鋼棒を用いても差し支えないと考えられる。図-13は曲げモーメントと鋼材応力の増加量との関係を示したものである(鋼材応力はコンクリートのひずみ分布から推定した)。プレストレスの範囲内では鋼材応力度の増加は小さく、それを越えると急増している。静的試験の結果は理論値のそれと合っていないが、その原因是計算で無視した引張側コンクリートが外力に抵抗するためである。しかしながら、Fシリーズの実験値とIシリーズのそれとがきわめてよく合っていることから、合成はりは一体のPCはりと同じ挙動をしているものと考えられる。繰り返し載荷試験の場合、付着特性の優れたGシリーズでは鋼材応力の増加量が1000 kgf/cm² (98 MPa) 以下で実験値と理論値がほとんど一致している。異形PC鋼棒を用いたFシリーズでは合っていないが、これは繰り返し荷重の最大値が設計荷重の2倍程度と大きいためであり、付着が十分な設計荷重程度であれば計算値に合ってくるものと考えられる。

図-14にGおよびHシリーズの鋼材応力の増加量と最大ひびわれ幅との関係を示す。Gシリーズの場合(PC III(a)), 底面での許容ひびわれ幅0.1 mmに対する鋼材の増加応力は静的および動的載荷に対して、それぞれ900 kgf/cm² (88.2 MPa), 500 kgf/cm² (49 MPa), ひびわれ幅0.2 mmに対してはそれぞれ1600 kgf/cm²

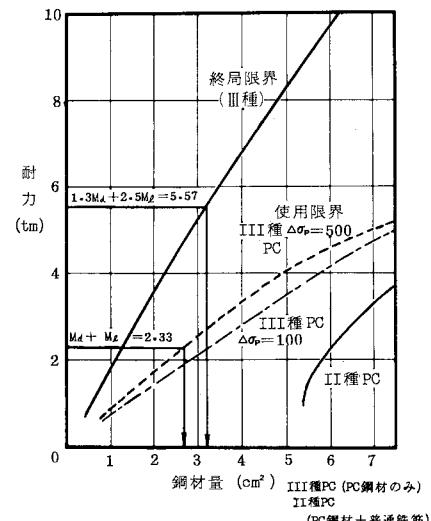


図-15 鋼材量と耐力との関係

(157 MPa), 1 000 kgf/cm² (98 MPa) である。これに対し異形鉄筋を併用した H シリーズの場合 (PC III (b)) は、ひびわれ幅 0.1 mm に対してそれぞれ 2 500 kgf/cm² (245 MPa), 1 000 kgf/cm² (98 MPa), ひびわれ幅 0.2 mm に対してそれぞれ 4 000 kgf/cm² (392 MPa) 以上, 2 000 kgf/cm² (196 MPa) と G シリーズのそれらに比べて著しく大きくなり、ひびわれ幅制御のために異形鉄筋を用いることの有利性が定量的に明らかにされた。G シリーズの設計では許容ひびわれ幅 0.1 mm に対する許容增加応力として 1 000 kgf/cm² (98 MPa) をとったが、実際には静的、動的結果ともそれより小さな値しか得られなかった。そこで、設計条件を変えて、鋼材の増加応力度を 500 kgf/cm² (49 MPa) として計算してみたところ、結果は同じ断面でよいこととなった。これは図-15 に示すように、鋼材増加応力度約 100 kgf/cm² (9.8 MPa) 以上では終局状態の安全度の方から所要鋼材量が決まってしまうからである。PC 鋼材と異形鉄筋を併用する場合、PC 鋼材のみの場合に比べ鋼材量が多くなり、PC 板の製作にも余分な手間を要する。したがって、現行の示方書に規定されてはいないが、環境、荷重条件などの許される範囲では鋼材の増加応力度 500 kgf/cm² (49 MPa) 程度で、PC 鋼材のみのⅢ種 PC 部材として設計してもよいと考えられる。

5. 合成床版の疲労試験

合成はりの試験結果から、この PC 板を用いた合成床版はⅢ種 PC 部材として設計するのが合理的で、かつ経済的であることが明らかになった。そこで、実際に合成床版を作製し、合成版としての挙動、バットジョイントの剛性への影響、ひびわれ性状などを検討した。

(1) 版供試体と載荷方法

合成床版は二等橋床版を想定し、スパン 2 m, 幅 1.8 m, 版厚 17 cm の一方向版とし、通常の RC 床版 (RC), 合成後の活荷重のみに対し、RC 部材として設計した合成床版 (RCP)，およびⅢ種 PC 部材として設計した PC 鋼材のみを用いた合成床版 (PC III (a)) および PC 鋼材と異形鉄筋を併用した合成床版 (PC III (b)) の 4 種類を製作した。PC III (a), (b) の PC 鋼材には合成はりの試験結果を考慮して付着のよい PC 鋼より線を用いた。それぞれの形状寸法を図-16 に示す。スパン直角方向の配筋は RCP の場合、現場打ち部の厚さを床版厚として、従来の設計法に準じて定め、PC III (a), (b) では AASHTO の規定に準じて単位幅 1 m 当たり 5.3 cm² を断面中央に配置した。合成床版はバットジョイントの影響を調べる目的で、40, 50, 60 cm 幅の PC 板 4 枚を用いて構成した。バットジョイントは通常、单

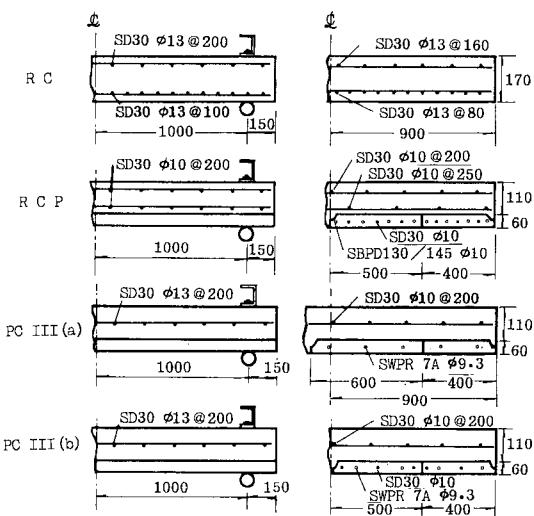


図-16 版供試体断面図

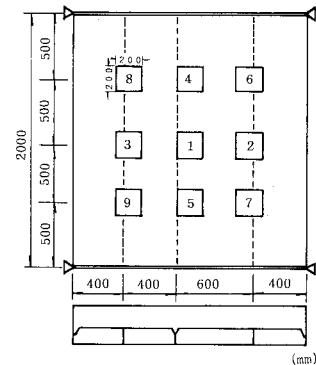


図-17 版供試体の載荷位置

に PC 板を突き合わせただけで、モルタル、樹脂などの目地充てんは行ないので、本実験もそれに準じた。供試体の製作は支承条件を良好にするため、まず支承上に 4 枚の PC 板を並べ、その上に現場打ちコンクリートを打設して、1か月間養生を行った後、疲労試験を実施した。

版供試体の載荷方法を図-17 に示す。載荷は実際の状態をシミュレートして、9 点の移動載荷方式⁸⁾とした。荷重は T-20 の後輪荷重に相当する 8 t とし、20×20 cm の載荷板を介して載荷した。載荷点は 1 万回載荷するごとに順次移動させ、合計 200 万回に達するまで繰り返し載荷した。支点上は供試体が浮き上がりないように溝形鋼で押された。1 サイクルの載荷（9 点の載荷）が終了した時点でたわみ、ひずみ、ひびわれの伸び、および合成床版底部のバットジョイントの開きなどを静的載荷で測定した。8 t-200 万回の載荷後、さらに荷重を 12 t に上げ、同様に試験を行った。下限荷重は 8 t 載荷で 0.5 t, 12 t 載荷で 1.0 t とし、繰り返し速度は 1~2 Hz とした。

なお、コンクリートの設計基準強度はPC板で500 kgf/cm² (49 MPa), RC床版および現場打ちコンクリートで240 kgf/cm² (23.5 MPa)とした。現場養生コンクリートの強度は260~270 kgf/cm²であったが、RCPの場合は他のものに比べ2割程度小さな値であった。

(2) 合成床版の疲労試験結果および考察

a) たわみ

図-18に繰り返し回数と中央点たわみの関係を示す。8t載荷の段階ではPC III (a), (b)とRCPの場合はほとんど同じたわみ量を示しており、それらはRC床版の約1/3程度である。RCPの値には現場打ちコンクリートの強度が小さいことが影響しているので、条件が他の床版と同じであれば、これよりさらに小さな値になるものと推察される。荷重を12tに上げ200万回載荷した場合、たわみはRC, PC III (a), PC III (b), RCPの順に小さくなり、鉄筋の入っていないPC III (a)は他の合成床版に比べてRCに近い値を示している。

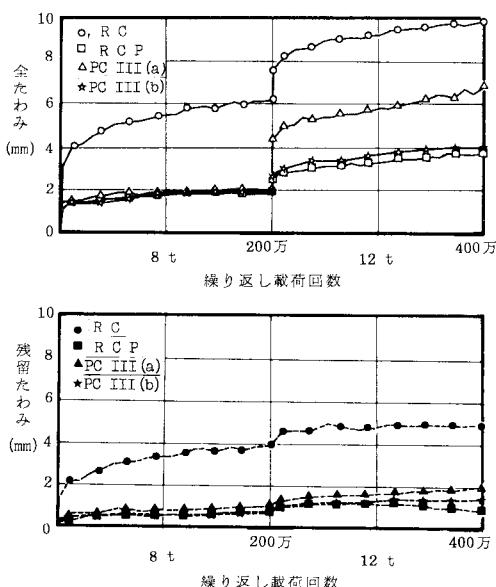


図-18 繰り返し回数と中央点たわみとの関係

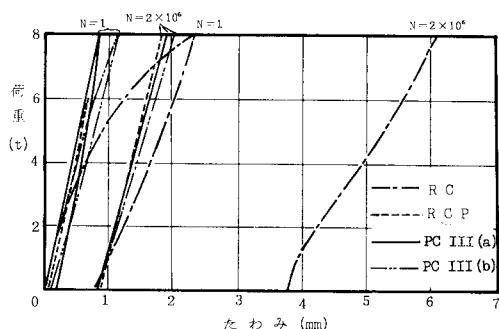


図-19 荷重-中央点たわみ曲線

また、RCの残留たわみは他のそれに比べて著しく大きく、疲労による剛性低下の大きいことがわかる。

図-19は各床版における8tの1回目の載荷および200万回載荷後における荷重-中央点たわみの関係を示したものである。RCP, PC III (a), (b)はRCに比べ直線的な動きを示しており、200万回載荷後においてもその傾きはほとんど変化していない。残留たわみも1回目の載荷ではRCに比較して合成床版の場合小さく、200万回載荷後でもRCP, PC III (a), (b)は0.8 mm程度となっている。これに対しRCの場合、1回目の載荷でひびわれが進み、荷重-中央点たわみの関係は曲線的となっている。残留たわみは最初の載荷で約0.8 mmとなり、繰り返し載荷が進むとともに増加し、200万回載荷後約3.8 mmに達した。

図-20にPC III (a), (b), RCP, およびRC床版の8t-200万回、12t-200万回載荷後の静的載荷によるスパン方向およびスパン直角方向のたわみ状況をそれぞれ示す。8t-200万回載荷後の曲率はRCの1/2以下であり、合成床版の下部にバットジョイントの切れ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確認された。PC III (a)は12t-200万回載荷後ではひびわれが進行しており、RCに近い状態となっている。

b) バットジョイントの影響

PC III (a)下面のバットジョイントの影響を調べるために、載荷点下の理論たわみと実測値とを一致させるという条件のもとで等方性版としてFEM解析したスパン直角方向のたわみ曲線を図-21, 22に示す。8t-200万回載荷後も1回目の載荷と同様に計算値と理論値はきわめてよく一致している。このことから、繰り返し載荷後もバットジョイントが床版の剛性に与える影響はきわめて小さいと考えられる。荷重を12tに上げるとスパン方向の剛度がやや大きい異方性版の挙動を示している。

PC III (a), (b)底部のバットジョイントの開きをク

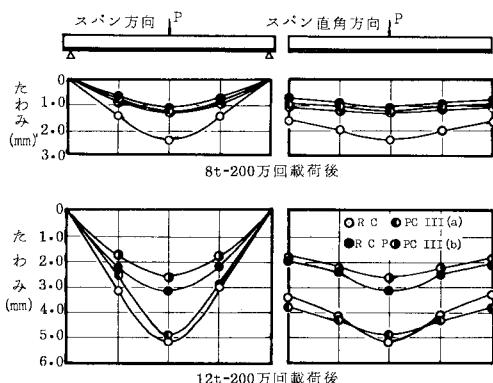


図-20 荷重-たわみ曲線

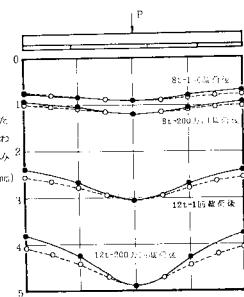


図-21 FEM 解析した理論たわみと実測値
(載荷点 1)

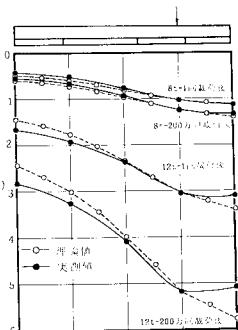


図-22 FEM 解析した理論たわみと実測値
(載荷点 2)

ラックメーターで測定したところその値は 8t-200 万回、12t-200 万回載荷後においても底面の最大ひびわれ幅と大差なかった。

c) 貫通ひびわれ

RCP では 8t-200 万回載荷後、荷重を 12t に上げ、100 万回を経過した時点から現場打ちコンクリート上面に微細なひびわれが発生し始め、その後急速に進展して、12t-200 万回終了時には約 0.5 mm に達した。このひびわれはスパン方向、スパン直角方向とともに生じた。また、RC 床版にも、8t 載荷の段階で同様なひびわれがみられた。これらのひびわれの深さおよび PC 板と現場打ちコンクリートとの打ち継ぎ面の付着状態を調べるために、パットジョイント部、スパン直角方向の鉄筋上および鉄筋の入らないコンクリート部分から、12t-200 万回繰り返し後、それぞれの床版から 4~6 個のコアを採取した。PC 板と現場打ちコンクリートとの打継面は各合成床版のどのコアについても、境界がわからない程度に一体化しており、PC 板を粗面に仕上げるだけで、繰り返し荷重に対しても十分な付着を示すことが明らかとなった。合成床版上面に発生しているひびわれは、いずれも現場打ちコンクリート部に配置した上側鉄筋から表面に伸びていた。また、パットジョイント部から採取したコアではひびわれはジョイント部から進展し、上下両鉄筋位置を通り上面まで達している。一方、PC III の場合、(a) では 8t-200 万回、12t-200 万回載荷後も床版上面にはひびわれは発生しなかった。(b) の場合も乾燥収縮によるヘーキラックと区別できない程度のものがみられるだけで RCP のような貫通ひびわれは発生しなかった。PC III と RCP との相違は図-16 に示すように現場打ちコンクリート中のスパン直角方向の鉄筋を中層に一段に配置し、かぶり厚さを大きくすることによりほぞ作用の効果をより期待した点にある。以上の結果は、PC III (a), (b) の場合、版上面および PC 板の継目から生じるひびわれに対して期待どおりの効果が現われた

ことを示している。しかしながら、スパン直角方向の鉄筋量の理論的根拠は必ずしも明らかでないので、今後検討の必要がある。

d) ひびわれ性状

各合成床版および RC 床版の 8t-200 万回載荷後の底面のひびわれ状況を図-23 に、また、繰り返し回数と床版底部の最大ひびわれ幅との関係を図-24 に示す。RC 床版のひびわれ幅はかなり大きくなっているが、これは各床版のひびわれ特性が顕著に現われることを意図して、荷重を設計後輪荷重の 1.4 倍の 8t、載荷面積を後輪接地面積の 2/5、移動載荷など条件を厳しくしたためである。ひびわれはいずれの床版も 1 回目の静的載荷の段階で発生している。8t-200 万回載荷後のひびわれは、RC の場合ほぼ全面に分布しているのに対し、RCP の場合は床版の中央にわずかにみられるだけで最大ひびわれ幅も 0.1 mm 以下である。ひびわれ本数は

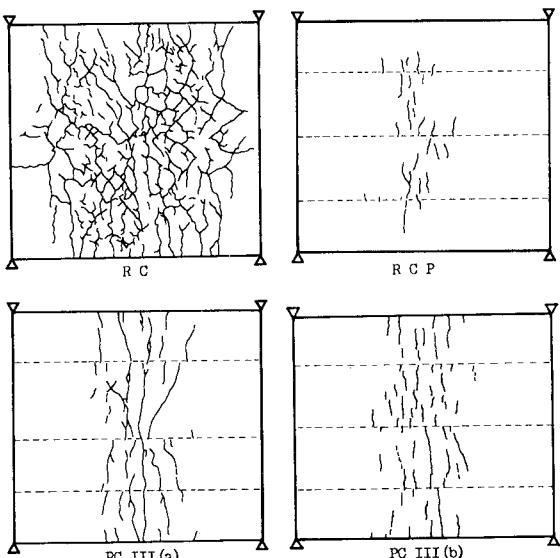


図-23 各種床版下面のひびわれ状況 (8t-200 万回終了時)

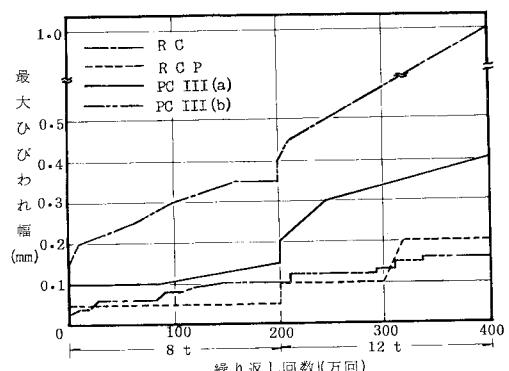


図-24 各床版の繰り返し回数と最大ひびわれ幅の関係

PC III (a), (b) では RCP より多いものの、RC に比べると著しく少なく、最大ひびわれ幅も PC III (a) および PC III (b) でそれぞれ 0.15 mm, 0.1 mm で RC の 0.35 mm に比べて著しく小さかった。12 t-200 万回載荷後では最大ひびわれ幅はそれぞれ RC で 1 mm, RCP で 0.2 mm, PC III (a) および PC III (b) でそれぞれ 0.4 mm, 0.16 mm であった。PC III (a) は PC 鋼材のみしか用いていないので、ひびわれ分散性は他の合成床版に比べやや劣っているが、プレストレスが導入されているため 12 t-200 万回載荷後でも除荷後はひびわれはほとんど閉塞した。

6. 結 言

(1) PC 板は薄板部材であるが、異形 PC 鋼棒、PC 鋼より線とも付着は良好で十分なプレストレスを導入することができる。しかしながら、活荷重の影響が大きい場合には付着疲労特性の点で PC 鋼より線の使用が望ましい。

(2) PC 板と現場打ちコンクリートとの付着は PC 板表面が凹凸に粗面仕上げされておれば、ジベル筋がなくても実用上十分である。仮に、PC 板上面が油、泥等で汚れ、付着がやや劣る場合でも、吊筋程度のジベル筋が配置されておれば十分な耐力が期待できる。

(3) PC 板埋設型枠合成床版の設計にあたって、現行の「自重および施工時の荷重については PC 板が I 種 PC 部材として負担し、現場打ちコンクリートが硬化した合成後に加わる荷重に対しては合成床版全体が RC 部材として抵抗する」という設計法は不経済である。「自重および施工時の荷重については PC 板が II 種 PC 部材として負担し、現場打ちコンクリートが硬化した合成後は合成床版全体を III 種 PC とみなす」という設計法をとる方が適当である。

(4) 異形鉄筋と PC 鋼材を併用する III 種 PC 合成部材では、許容ひびわれ幅 0.1 mm および 0.2 mm に対する鋼材の増加応力度をそれぞれ 1 000 kgf/cm² (98 MPa), 2 000 kgf/cm² (196 MPa) としてよい。PC 鋼材のみの場合はそれらの 1/2 程度が適当と考えられる。

(5) III 種 PC 部材として設計した PC 板埋設型枠合成床版は RC 床版に比べて、ひびわれ、たわみ性状がはるかに優れており、合成床版底部にバットジョイントがあるにもかかわらず、等方性版として十分挙動する。

(6) スパン直角方向の鉄筋は AASHTO に規定された 5.3 cm²/m 程度をより完全なほど作用を期待して現場打ち部中央に配置すれば、貫通ひびわれの防止に効果的で、十分、せん断力に対して抵抗することが裏付けられた。しかしながら、その量を求める理論的根拠につい

ては検討する必要がある。

7. 本工法の実施例と今後の展望

本工法は土木面で東関東自動車道、中央自動車道などの橋梁に適用され、また建築面でも厚木スカイハイツ、東陽町団地などのマンションの床組みに利用され、安全迅速なる施工が達成された。ちなみに、東関東自動車道の場合、RC 床版で 32 日要したところを、この合成床版では 20 日間で完成した。

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できる（下階の工事が済んで支保工が必要になった段階で、それを上階に運搬し再用する必要がない）利点は著しい。また、チャンネル板を用いればスパン 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、たとえば倉庫などの床版に一層偉力を発揮しよう。

そして、長期たわみが非常に小さく、プレストレスの効果で、床版下面のひびわれが従来の RC 床版のそれに比べて格段に少ないことは、橋梁や建物の RC 床版の過大たわみ、ひびわれ問題に永年頭を痛めてきた関係者に対し、朗報となり得よう。

本工法の積極的活用が願わしく、このほかにも、さらに広い範囲への利用価値があると確信する。

参 考 文 献

- 1) Barnoff, R. M. et al. : Full scale test of a prestressed bridge with precast deck planks, PCI Journal, Vol. 22, No. 5, pp. 66~83, Sept. ~Oct. 1977.
- 2) Kelly, John B. : Application of stay-in-place prestressed bridge deck panels, PCI Journal, Vol. 24, No. 6, pp. 1~8, Nov. ~Dec. 1979.
- 3) 松本 進：プレキャスト PC 素材で補強したコンクリート合成構造の力学的特性に関する基礎研究、土木学会論文報告集、No. 246, pp. 117~130, 1976 年 2 月。
- 4) 渡辺 明・出光 隆・原田哲夫・村上義彦：PC 板埋設型枠の道路橋床版への利用に関する基礎的研究、セメント技術年報、第 33 卷、pp. 563~566, 1979.
- 5) James, M. Barker : Reserch, Application and Experience with Precast Prestressed Bridge Deck Panels, PCI Journal, Vol. 20, No. 6, pp. 66~85, Nov. ~Dec. 1975.
- 6) 土木学会：プレストレストコンクリート標準示方書、昭和 53 年。
- 7) 猪股俊司：III 種 PC 部材の設計計算、コンクリートライブラー、第 44 号、pp. 77~84、昭和 54 年 7 月。
- 8) 江本幸雄・出光 隆・松田 浩：III 種 PC として設計した PC 埋設型枠合成床版の力学的特性、第 4 回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1982。

(1983.5.23・受付)