

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

江 本 幸 雄*
出 光 隆**
渡 辺 明***

1. はじめに

近年、工事の大型化、複雑化に伴い、型枠、支保工工事の占める割合が高くなっているにもかかわらず、現場における鉄筋工、とび職などの熟練労働者は逆に減少する傾向にある。この現状打開策として、安全、迅速、省力の観点から型枠、支保工工事の簡略化が各方面で図られている。その一つとして、最近、プレキャスト PC 板を埋設型枠として用いる工法が土木、建築両分野で積極的に利用され始めている。土木学会においては昭和 59 年、PC 合成床版工法に関する委員会が設けられて設計指針の作成作業が進められ、近く刊行の予定である。また、建築学会でも同様の機運があると聞きおよんでいる。

この PC 板は単なる型枠としての役割だけでなく、現場打ちコンクリートの硬化後には床版断面の一部として PC 埋設型枠合成床版を構成し、一体となって外力に抵抗する。本工法を道路橋床版に適用すれば、施工性の改善のみならず、交通量の増大や車両の大型化に伴い急増している RC 床版の過大なたわみやひびわれ損傷に対しても有効な手段になるものと期待されている。さらに、最近では、交通量の多い主要幹線道路の交通を遮断しないで施工できる安全、迅速な打ち替え工法としても検討されている。

筆者らは数年来、道路橋床版を想定した PC 埋設型枠合成床版の力学的特性を検討してきたが、その結果、本合成床版は RC 床版に比べてひびわれ、たわみ性状などがはるかに優れており、Ⅲ種 PC として設計しても十分な耐力を有していることが明らかとなった。

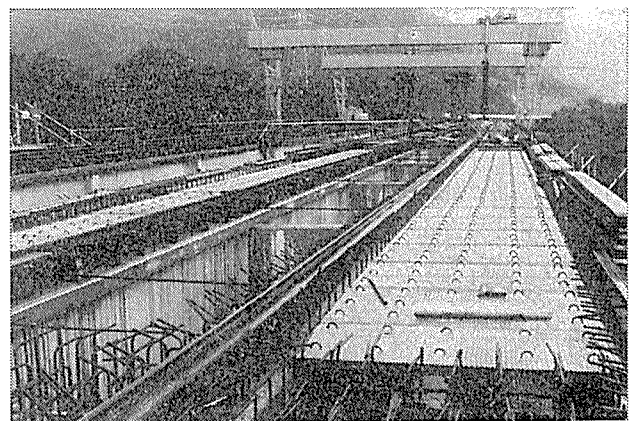
PC 合成床版では、PC 板と現場打ちコンクリートとの水平打継ぎ面のせん断強度は十分であり、両者は完全に一体化して合成部材として挙動する^{1),2)}。しかしながら、橋軸方向の鉛直断面には、PC 板の突き合わせ継手が存在するため、合成床版には PC 板の幅ごとに、底部

に切れ目が残ることになる。繰返し荷重等を受けると条件次第ではその部分が弱点となって版として挙動しなくなる可能性も考えられる。この点に関しては、すでに研究が進められており、現場打ちコンクリートの厚さが PC 板の厚さの約 1.8 倍以上の場合には、PC 合成床版を等方性で見なせることが確かめられている¹⁾。しかしながら、「PC 合成床版工法設計施工指針(案)」(以下、指針(案)と略称)で規定されている現場打ちコンクリートの厚さが、PC 板の厚さの 1.5 倍以下の場合については、まだ十分なデータは得られていない。

本研究では、それらの事情に鑑み、現場打ちコンクリートの厚さが指針(案)よりさらに薄い場合、すなわち、現場打ちコンクリートの厚さと PC 板の厚さが等しい PC 合成床版について、移動載荷方式により繰返し荷重を載荷し、その版としての挙動、耐疲労性を検討したものである。

2. PC 板埋設型枠工法

図—1 および写真—1 に PC 板埋設型枠工法の概略および施工例を示す。主桁架設作業の終了後、その間にプレキャスト PC 板を敷設する。次に、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。コンクリート硬化後、PC 板と現場打ちコンクリートは一体となり合成床版を構成する。この合成床版は PC 鋼材による偏心プレストレスによって、PC として



写真—1 施工例

* 福岡大学工学部土木工学科
** 九州工業大学開発土木工学科
*** 九州工業大学開発土木工学科

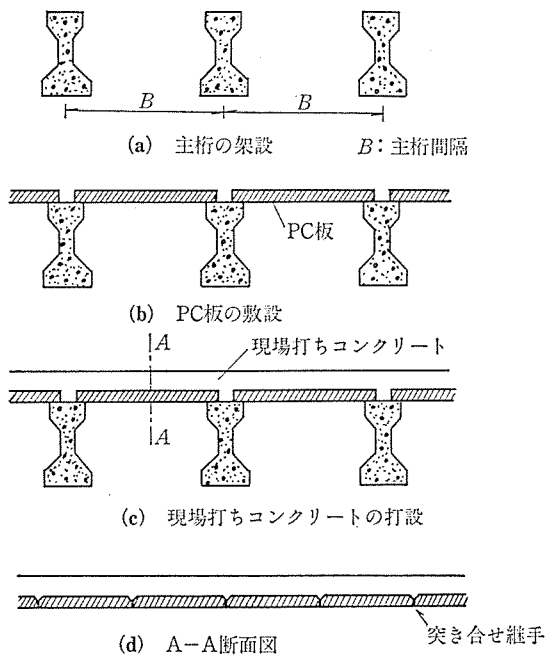


図-1 PC板埋設型枠工法

の特徴を有するため、道路橋のひびわれや建築物の長期たわみが軽減されるなど利点が多い。また、煩雑な型枠・支保工工事を省略できるため大幅な省力化が可能ならばかりでなく、安全かつ迅速な施工ができる。

3. PC板の種類と製作方法

PC板の種類を図-2に示す。(a)の平板は支間が2~3mの比較的短いスパン用で橋梁に多く用いられる。(b)のリブ付き平板は支間が3~4m程度のスパン用でリブ間隔、リブ高を変更することにより曲げ強さを増すことも可能である。(c)のチャンネル板は通常、支間が

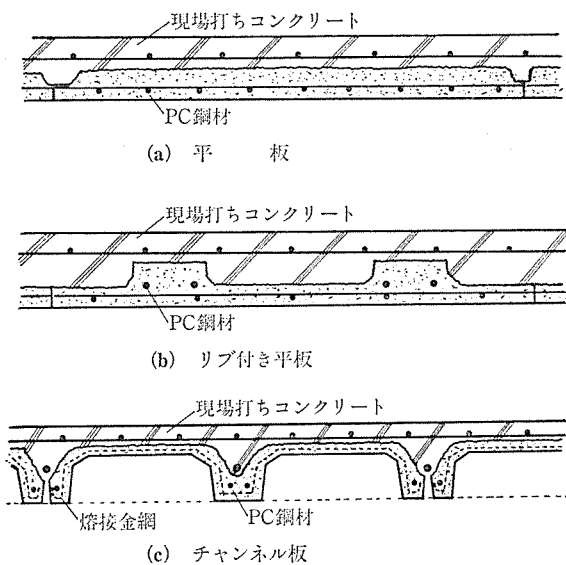


図-2 PC板の種類

5~6m程度の比較的長スパン用で、鋼材の有効高さを大きくとることにより10m程度のスパンまで施工が可能なものであり、主に、建築の床スラブで使用されている。本研究では、主桁間隔が2m程度の橋梁を想定したので、(a)の平板を使用した。

PC板の製作には2つの方法があり、その一つは工場のプレテ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を連続して製造し、任意の長さにカットされるものであり、他方は、当初から所定の長さに仕切って製作する方法である。各PC板の上面には現場打ちコンクリートとの付着をよくするため、30mmピッチで5mm程度の凹凸を付けた粗面仕上げがなされている。

4. 実験概要

4.1 PC合成床版供試体

本実験で用いたPC板の形状寸法を図-3に示す。指針(案)ではPC板の最小版厚は7cm、板の幅の標準は1.0mとなっており、同板はそれに準じている。コンクリートの設計基準強度は $\sigma_{ck}=500 \text{ kgf/cm}^2$ とした。PC板には、1m当たり $\phi 2.9 \text{ mm}$ のPC鋼より線22本およびD13異形鉄筋6本を使用し、偏心プレストレスが導入されている。有効プレストレスは、スパン2mの中央部に5.4tが作用したとき、PC合成床版がII種PC部材(コンクリートの許容引張応力度 $\sigma_{ta}=18 \text{ kgf/cm}^2$)とみなせる程度である。

合成床版の形状寸法および配筋等を図-4に示す。合成床版供試体は道路橋床版を想定して、スパン2m、幅1.8mの一方向版として設計製作した。床版厚さはPC板の厚さ7cm、現場打ちコンクリート厚さ7cmの計14cmとした。同供試体は、試験機の都合上、幅47.5cmおよび42.5cmに縦割したPC板を2枚ずつ使用し、支承条件を良好にするため支承上に直接並べ、その上で現場打ちコンクリートを打設して製作された。PC板はなるべく継手部の現場打ちコンクリート厚さを大きくとれるように配慮し、その両側面の版厚を1/2程度まで薄くしている(図-3)。図-4(a)に示す継手②は、通常の継手であるが、①および③はPC板を縦割りにしたものを突き合わせただけであるから、継手部の現場打ちコンクリート厚さが通常のものより薄くなって

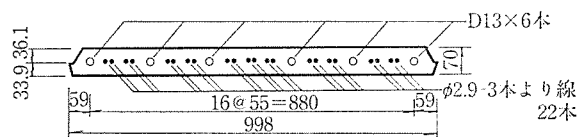
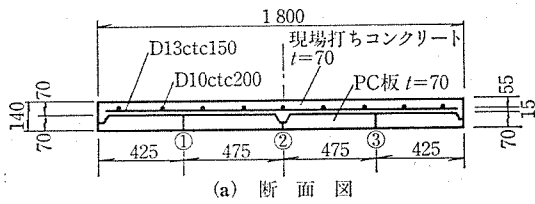
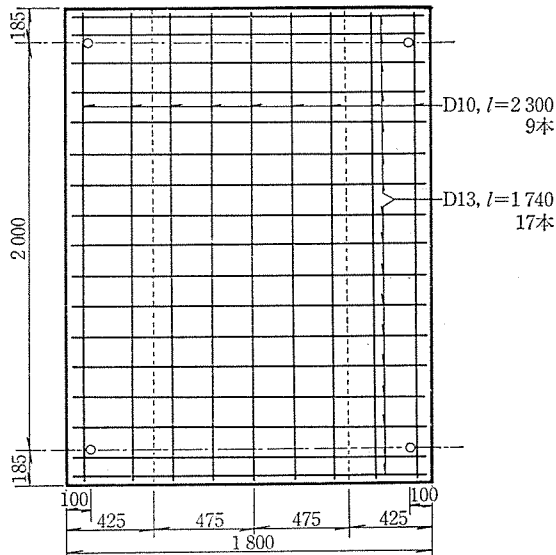


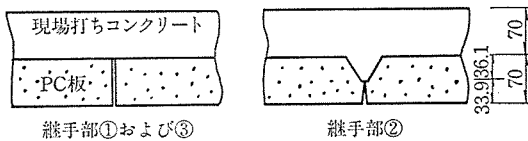
図-3 PC板の形状寸法



(a) 断面図



(b) 平面図



(c) 継手部の詳細図

図-4 PC 合成床版供試体の形状寸法および配筋図

いる。

配力鉄筋量は指針(案)の構造細目に準じて求めた。同図では、PC板と配力鉄筋との間にすき間があるようになっているが、実際にはPC板上面に凹凸があるため、鉄筋はPC板上に直に置かれている。

現場打ちコンクリートの設計基準強度は $\sigma_{ck}=240$ kgf/cm² とした。試験時におけるコンクリートの圧縮強度および弾性係数は、それぞれ現場打ちコンクリートで 311 kgf/cm², 3.0×10^5 kgf/cm², PC板用で 585 kgf/cm², 2.9×10^5 kgf/cm² であった。PC板用コンクリートの弾性係数が低いのは、若干比重の小さな玉砂利碎石を用いたためである。疲労試験は1か月養生後に実施した。

4.2 荷重方法

実橋の床版では、活荷重の荷重位置は一定ではない。PC合成床版では、輪荷重が通過する度に、突き合わせ継手部の現場打ちコンクリートには、図-5に示す交番せん断応力が作用する。そこで、本疲労試験は、実際の

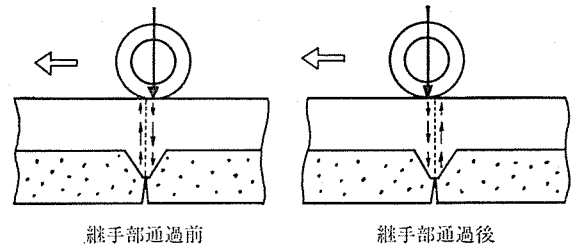


図-5 輪荷重通過によるせん断応力の交番

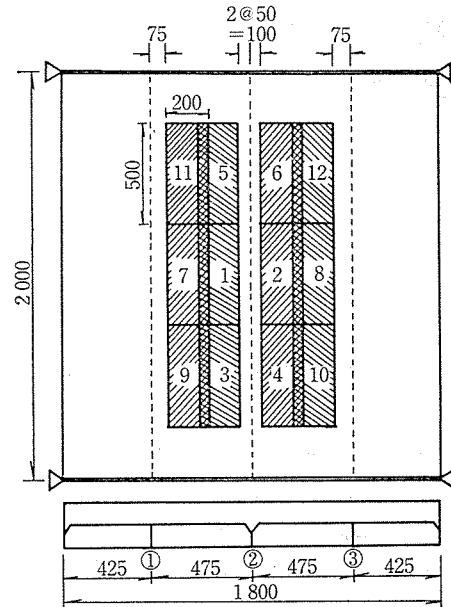


図-6 荷重順序

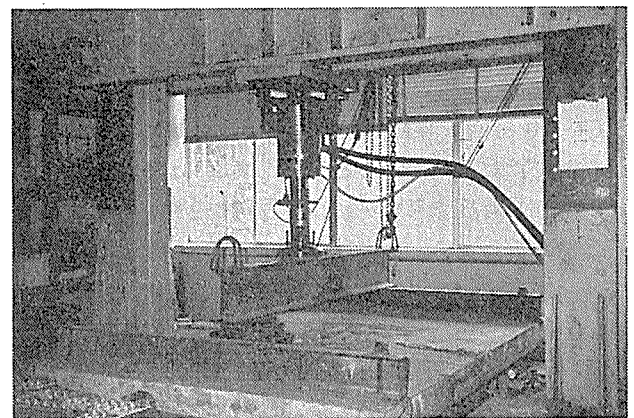


写真-2 荷重状況

荷重状態に近い移動荷重方式で実施することとした。荷重点は図-6に示す12点とし、各点を1万回荷重毎に番号順に移動させた。荷重状況を写真-2に示す。荷重点7,8は実橋の床版と同程度の引張応力が、それぞれ突き合わせ継手①,③の上面のスパン直角方向に生じるよう配慮して定めた。

繰返し荷重の大きさは、前記した5.4tが2等橋T荷重の後輪荷重5.6tに近いことから示方書どおり20cm×50cmの荷重板を介して5.6tを荷重することに

◇論文報告(投稿)◇

定めた。5.6t-200 万回載荷後、さらに荷重を T-20 の後輪荷重の 8.0t に上げて 200 万回まで繰返し載荷した。下限荷重は 5.6t 載荷、8.0t 載荷とも 0.5t とし、繰返し速度は 2Hz とした。

1 サイクルの移動載荷が終了した時点で、たわみ、コンクリートの上縁ひずみ、配力鉄筋のひずみ、 π ゲージによる継手部貫通ひびわれのチェックおよび底面のひびわれ観察などを静的載荷で行った。

5. 結果および考察

5.1 たわみ性状

図-7 は荷重-中央点たわみの関係を示したものである。同図には、これまで実施してきたⅢ種 PC として設計した合成床版(床版厚さは PC 板 6cm, 現場打ちコンクリート 11cm の計 17cm) および通常の RC 床版(床版厚さ 17cm) の移動繰返し載荷試験の結果も比較のためプロットした¹⁾。薄い PC 合成床版は 5.6t-200 万回載荷後でも直線的な動きを示しており、8t に荷重を上げて 200 万回載荷した後もほとんど変化は見られない。また、薄い PC 合成床版の荷重-中央点たわみ曲線は 8t-200 万回載荷後でも版厚の大きいⅢ種 PC 合成床版とほとんど同様な傾向を示しており、版厚による影響は認められない。さらに、RC 床版と比較すると、残留たわみも小さく、プレストレスの効果が十分に発揮されていることがわかる。

図-8 は薄い PC 合成床版におけるスパン方向およびスパン直角方向の 5.6t-1 回、5.6t-200 万回および 8t-200 万回載荷後の静的載荷によるたわみ曲線を示す。5.6t-200 万回載荷後においても 5.6t-1 回目の載荷と比較してたわみはほとんど変化しておらず、また、8t-200 万回載荷後でもスパン直角方向の曲率にもあまり変化は認められない。このことから、版厚の薄い合成床版であっても剛性低下はほとんどなかったものと考えられる。

図-9 は薄い合成床版の静的載荷時のたわみを 1 とし

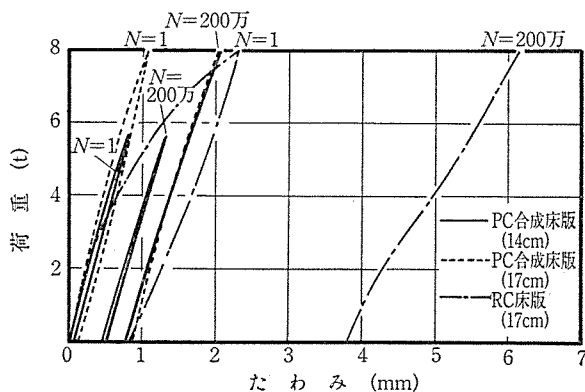


図-7 荷重-中央点たわみの関係

たときのたわみ比と繰返し回数との関係を示したものである。比較のため、Ⅲ種 PC 合成床版および RC 床版の実験結果も同図に示した。全たわみの場合、最初の繰返し回数 200 万回までは、PC 板を用いた合成床版のたわみ比は 2 以下で RC 床版のそれに比べて 2/3 程度の値

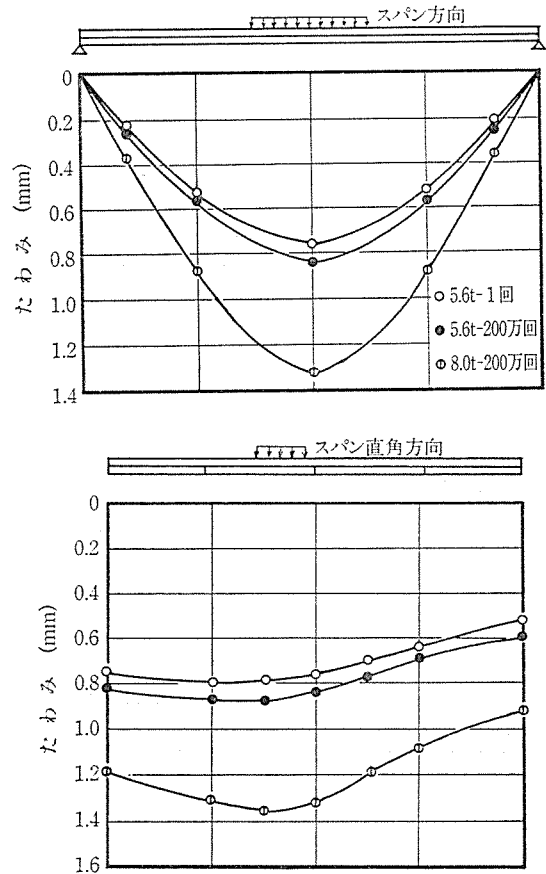


図-8 合成床版のたわみ曲線

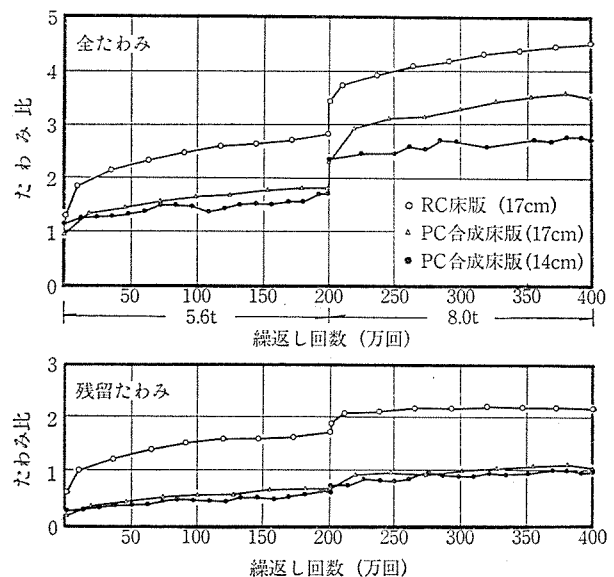


図-9 静的載荷時のたわみを 1 としたときのたわみ比

であり、荷重をさらに約5割増して200万回繰り返した後もRC床版が4.5であるのに対して、2.5~3.5とかなり小さな値となっている。残留たわみは最初の200万回載荷までは3床版とも漸増の傾向にあるが、静的載荷に対するたわみ比はRC床版で1.8、Ⅲ種PC合成床版および薄いPC合成床版で0.7程度で、RC床版に比べPC板を用いた合成床版は1/3程度であった。さらに、荷重を上げて繰返し載荷をした後のたわみ比は載荷初期に増加がみられるが、その後はほぼ一定の値になり、RC床版で2.2、PC板を用いた合成床版で1.1程度であった。したがって、PC板を用いた合成床版の剛性低下はほとんどなく、版厚による影響も小さいと考えられる。

5.2 合成床版の異方性に関する検討

PC板を用いた合成床版をRC床版と同様に取り扱ってよいかどうかをFEM解析によって検討した。

実測値とFEM解析による計算値との比較は図-6に示す載荷位置1の場合について行った。その場合、構造モデルは対称型となるため図-10に示すように床版の半分を要素数72、節点数91に分割して計算を実施した。以下、説明の都合上、スパン直角方向をX方向、スパン方向をY方向と呼ぶことにする。なお、コンクリートの弾性係数には床版と同時に打設した円柱供試体から求めた $3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ を、ポアソン比には0.17をそれぞれ用いた。

まず、等方性としての計算では、床版はX、Y方向とも等厚という条件で、最大たわみが実測値と一致する床版厚さを求めた。次に、異方性の計算では、X方向とY方向で床版厚さを違わせることで両者の剛性を変えることとし、X方向にはPC板を無視した現場打ちコンクリート厚さと等しい7cmを、Y方向には等方性の場合で求めた床版厚さをそれぞれ用いて計算を行った。

合成床版の5.6t-1回、5.6t-200万回および8.0t-200万回載荷時のスパン中央部・X方向のたわみ曲線、コンクリート上縁の応力分布を図-11、12および13にそれぞれ示す。

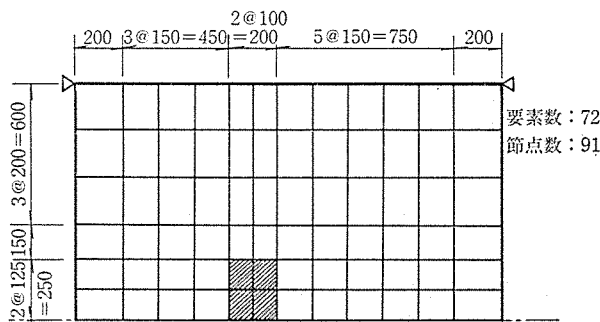
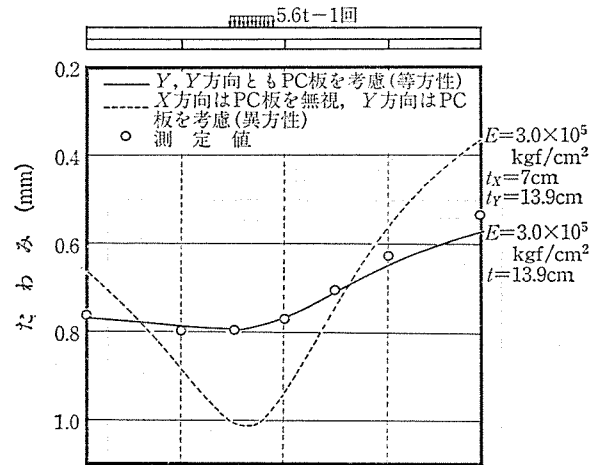
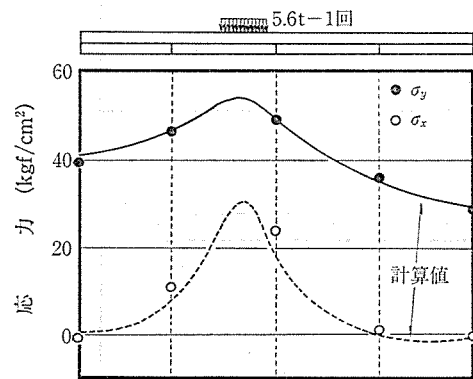


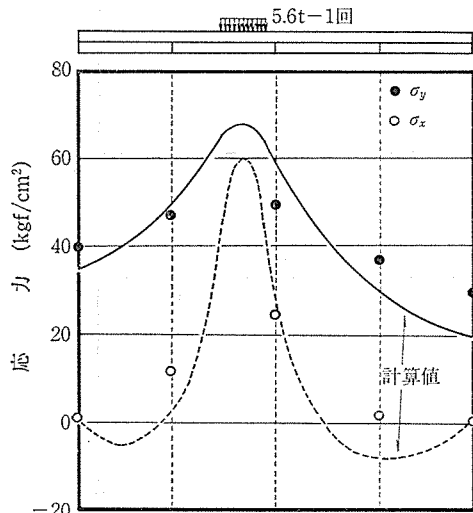
図-10 要素分割



(a) たわみ曲線



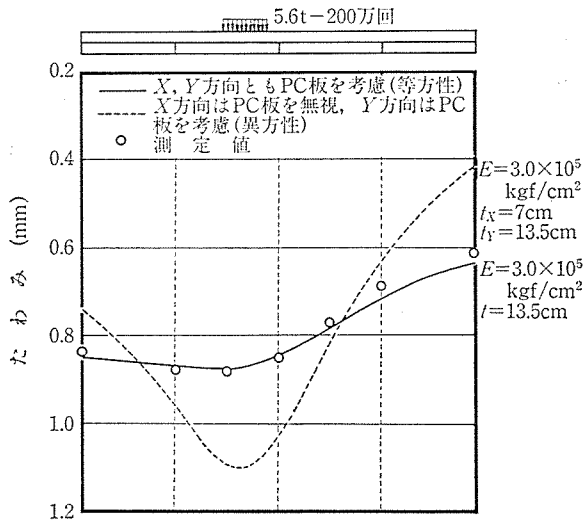
(b) 上縁コンクリートの応力分布(等方性)



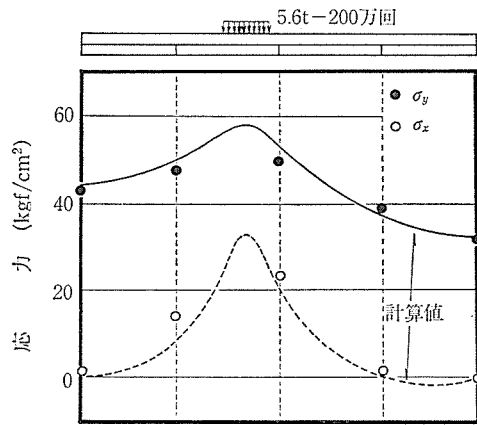
(c) 上縁コンクリートの応力分布(異方性)

図-11 載荷試験結果(5.6t-1回, 載荷点1, スパン中央・配力鉄筋方向)

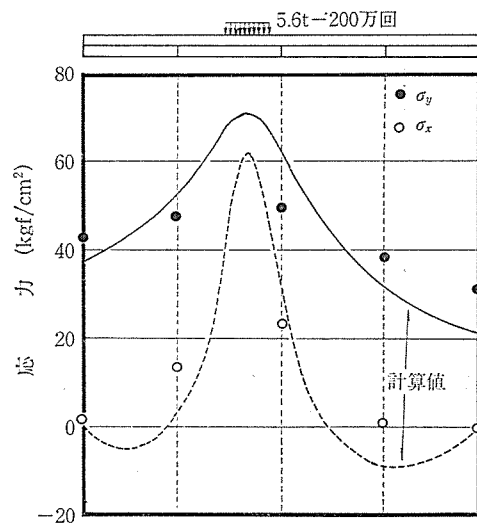
各図の(a)に示したたわみ図において、等方性版として実測たわみと計算値とを一致させるための床版厚さは、5.6t-1回および5.6t-200万回載荷後でそれぞれ13.9cmおよび13.5cmとなった。5.6t-200万回載荷後においては、目視では床版下面にひびわれは見られなかったが、下縁コンクリートには許容値以上の引張応力



(a) たわみ曲線

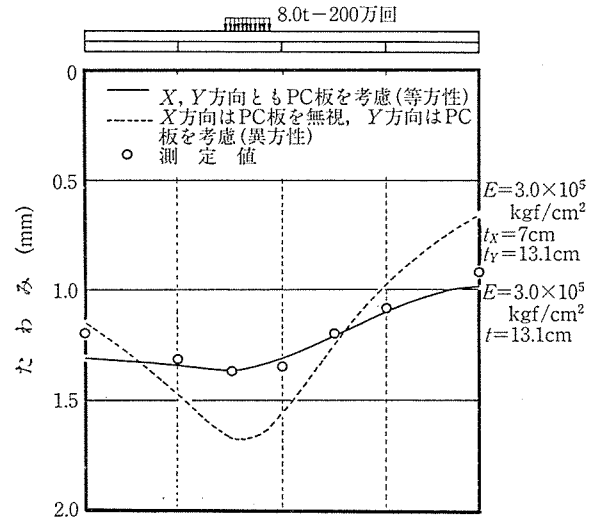


(b) 上縁コンクリートの応力分布(等方性)

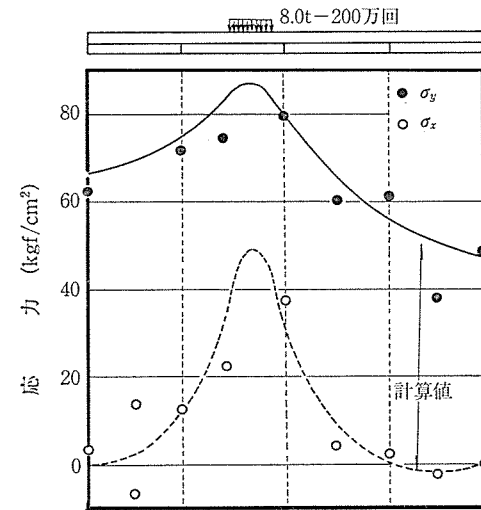


(c) 上縁コンクリートの応力分布(異方性)

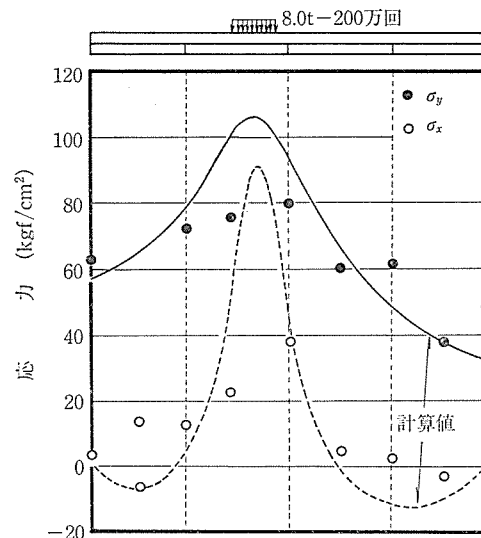
図-12 載荷試験結果(5.6t-200万回, 載荷点1, スパン中央・配力鉄筋方向)



(a) たわみ曲線



(b) 上縁コンクリートの応力分布(等方性)



(c) 上縁コンクリートの応力分布(異方性)

図-13 載荷試験結果(8.0t-200万回, 載荷点1, スパン中央・配力鉄筋方向)

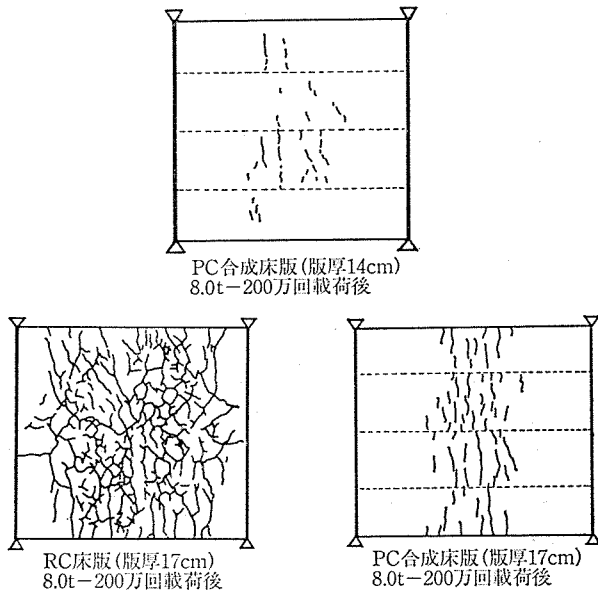


図-14 各床版下面のひびわれ状況

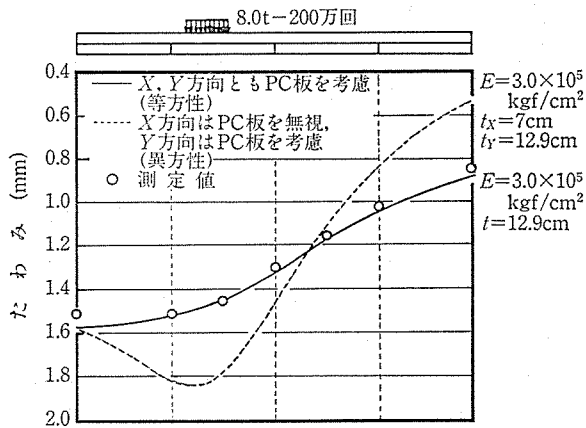


図-15 たわみ曲線(8.0 t-200 万回, 載荷点 7, スパン中央・配力鉄筋方向)

が繰返し作用したためマイクロクラックが生じたと考えられる。8.0t-200 万回載荷後では、図-14 に示すように底面に 0.05 mm 以下のヘアークラックがわずかに見られ、計算による床版厚さは 13.1 cm に低下していた。等方性として計算した場合、いずれのたわみ曲線においても実測値は極めて近い値となっている。これに対し、X 方向の PC 板の厚さを無視して計算した異方性の場合、いずれのたわみ曲線も実測値から大きく外れている。また、No. 7 に載荷した場合も、図-15 に示すように異方性とみなしたたわみ曲線は実測値と大きく相違しており、No. 1 に載荷した場合と同様に等方性に近い値となっている。このことから、PC 合成床版は底部に突き合わせ継手があっても、荷重の横分配は現場打ちコンクリートを通して十分に行われ、等方性版として挙動していると考えられる。

次に、コンクリート上縁の応力分布は 5.6t-1 回、

5.6t-200 万回および 8.0t-200 万回載荷とも各図(c) に示したように異方性の計算結果は実測値から外れているが、各図(b)の等方性の計算結果は実測値に極めて近い値となっている。等方性の場合、計算で求めた 5.6t 載荷時の最大圧縮応力度は 56 kgf/cm² となっているが、その値は、指針(案)構造解析[解説](現コンクリート標準示方書の方法を採用)に準じて、一方向版の有効幅を求めて計算した最大圧縮応力度とほとんど等しくなった。各図(b)で、X 方向の実測値が計算結果より若干大きくなっているのは、継手部への応力集中の影響が現われたものと考えられるが、それでも、その値は Y 方向の値の 6 割弱でしかなく、使用時に作用する通常の荷重に対して、X 方向の応力が Y 方向の最大圧縮応力度を超えることはないものと考えられる。

5.3 移動繰返し載荷による継手部の挙動

図-16 は継目を跨いで PC 合成床版下面に添付した π ゲージのひずみを示したものである。継手部の現場打ちコンクリート断面に、貫通ひびわれ等の異常が生じると π ゲージのひずみは急増する。PC 合成床版下面の中央部継手(図-4 の②)に添付したゲージから求めた全ひずみ、残留ひずみとも極めて小さく、荷重を 8.0t まで上げて繰返し載荷した場合でも、測定ひずみは 100~150 μ の間で安定しており、継手部に異常は見られなかった。特に、通常の継手部より条件の厳しい継手①、③においても貫通ひびわれ等の異常は生じなかった。

図-17 は同様に設計製作した PC 合成床版の 8.0t-200 万回載荷後のスパン中央部における配力鉄筋応力を

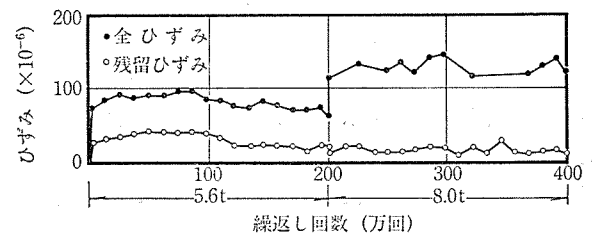


図-16 π ゲージのひずみ

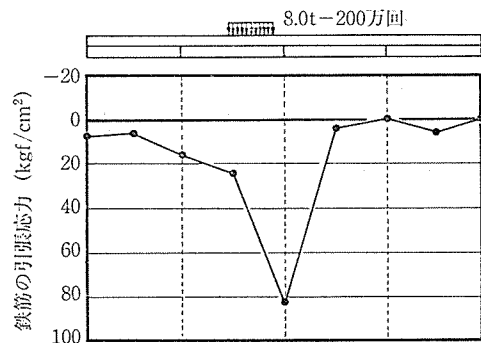
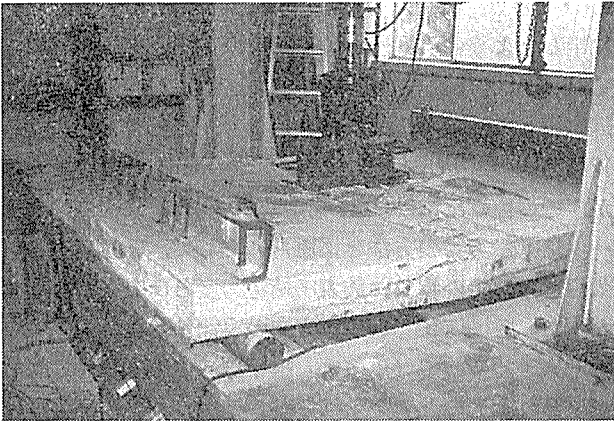


図-17 配力鉄筋の応力(8.0 t-200 万回, 載荷点 1, スパン中央)



写真—3 破壊状況

示したものである。配力鉄筋のひずみゲージは PC 板継手上および PC 板の中央部の位置にそれぞれ添付した。中央部継手②上の配力鉄筋には、5.6t-200 万回、8.0t-200 万回載荷後においてもわずか 80 kgf/cm² 程度の引張応力しか生じておらず、他の 2 個所の継手部においても応力分布に急変は認められない。このことは、言い換えれば、配力鉄筋が効果的に働かなくても、PC 合成床版は等方性版として挙動することを示すものである。したがって、配力鉄筋量は本指針(案)より少なくできる可能性があるものと考えられる。

8.0t-200 万回載荷した後、中央部継手②で最もせん断力が大きくなることを考慮して載荷点 1 において静的載荷試験を行ったところ、45t で圧縮破壊とせん断破壊がほとんど同時に起こった(写真—3)。合成床版下面の最大ひびわれ幅は 8.0t で 0.05 mm、12t で 0.1 mm、20t で 0.2 mm と荷重の増加とともに増大していったが、貫通ひびわれは、載荷板付近の中央部継手②はもちろん、通常の継手より条件の厳しい継手①③においても全く生じなかった。また、FEM 解析から計算した 8.0t-200 万回載荷後の継手部に生じるせん断応力は 4 kgf/cm² 程度であった。以上のことから、設計荷重程度の繰返し荷重では、継手部から貫通するようなせん断ひびわれは発生しないと考えられる。

6. ま と め

現場打ちコンクリート厚さと PC 板厚さが同程度の薄い PC 合成床版の繰返し載荷試験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) PC 板厚さと現場打ちコンクリート厚さが共に 7

cm の薄い PC 合成床版であっても、たわみ性状は現場打ちコンクリート厚さが PC 板厚の 1.8 倍程度の PC 合成床版の場合とほとんど変化は認められない。

- 2) 現場打ちコンクリートの厚さが PC 板厚さと同程度に薄い PC 合成床版の実測たわみは、5.6t-200 万回、8.0t-200 万回載荷後においても異方性とみなして計算したたわみ曲線から大きく外れており、等方性の結果に極めて近い値である。
- 3) PC 合成床版上面に添付したひずみゲージから求めたスパン方向およびスパン直角方向の応力は 5.6t-200 万回、8.0t-200 万回載荷後も等方性版として FEM 解析した計算値と極めて良く一致しており、薄い PC 合成床版であっても T-20 程度の輪荷重の繰返しに対して、十分等方性版として挙動する。
- 4) PC 合成床版の現場打ちコンクリート中に入れた配力鉄筋には、8.0t-200 万回載荷後においてもわずか 80 kgf/cm² 程度の小さな引張応力しか生じていない。このことは、配力鉄筋が効果的に働かなくても、本合成床版は等方性版として挙動することを示す。
- 5) PC 合成床版継手部の現場打ちコンクリートに生じる最大圧縮応力は、現コンクリート標準示方書に示されている通常の一方版の計算方法で求めた値とほとんど等しくなる。
- 6) 現場打ちコンクリートの厚さが PC 板厚さと同程度に薄い PC 合成床版であっても、変位および応力ともに極めて等方性版に近い挙動を示すことから、本 PC 合成床版は等方性とみなして設計しても差し支えないものと考えられる。

なお、本研究の一部は昭和 60 年度斎藤記念プレストレストコンクリート技術研究奨励基金により実施したものである。ここに、記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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, 第 360 号/V-3, 1985 年 8 月
- 2) 今井宏典, 園田恵一郎, 水元義久, 正田正一: PC 埋設型枠を用いた道路橋床版の特性, 土木学会論文集, 第 356 号, 1985 年 4 月

【昭和 61 年 10 月 20 日受付】