

## 偏平タイドアーチ構造の鋼 2 主桁橋梁床版への適用について

### Application of shallow hybrid structure to RC slab in composite two plate girder bridge

松田 浩\*<sup>1</sup>, 松田 貴志\*<sup>2</sup>, 鶴田 健\*<sup>3</sup>, 岳尾弘洋\*<sup>4</sup>, 上阪康雄\*<sup>5</sup>

Hiroshi MATSUDA, Takashi MATSUDA, Ken TSURUTA, Koyo TAKEO and Yasuo KOHSAKA

*1	工博	長崎大学工学部構造工学科	(〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)
*2		長崎大学大学院生・工学研究科	(〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)
*3	工修	小沢コンクリート工業(株)技術研究所	(〒 168-0074 東京都杉並区上高井戸 1-7-6)
*4	博士(工学)	ショーボンド建設 技術本部 技術部	(〒 101-8468 東京都千代田区神田錦 3-18)
*5	Dipl.Ing.	コサカ設計・アソシエーツ	(〒 141-0031 東京都品川区西五反田 2-11-15)

PIC (Polymer Impregnated Concrete) have a high durability. Form works of concrete structure can be deleted by using PIC as embedded forms. This paper deals with the collapse behaviours and deformation capacity of PIC tied arch structures in order to use PIC boards as embedded forms. Three specimens, which consists of PIC having three types tie (steel, steel strand and FRP rod), are tested up to the failure under the monotonic loading condition. Test results show that load-deformation curves are linear, crack is first generated in lower surface of arch crown, next in upper surface in a quarter of arch span, and then the specimens are failed. Two dimensional FEM analysis results were compared with the experimental results. Furthermore, application of shallow hybrid structure to RC slab in composite two plate girder bridge are discussed.

key words : tied arch, polymer impregnated concrete, embedded forms, RC slab

#### 1. まえがき

合理化橋梁として復活のきざしがある鋼 2 主桁橋梁では床版支間が長くなり、プレキャスト PC 床版や合成床版が用いられる場合が多い。また、都市部の高架橋建設現場では工期短縮と工費節減を目的として、梁、床版等に埋設型枠を使用したハーフプレキャスト工法が採用される場合が多い。しかし、型枠スパンが長くなると、コンクリート打設時荷重を負担するためにサポートが必要となったり、作業用機械の重量制限などの問題が生じてくる。

筆者らは、これまで、ポリマー含浸コンクリート(以後:PIC と略記)を埋設型枠としての利用に関する研究を行ってきた。PIC 版は、コンクリートの微細な空隙までポリマーで充填されているため、遮塩・遮水性、耐凍害性、耐摩耗性、化学抵抗性に優れており、さらに、表面粗面処理により有効断面として考慮できる特長を有していることなどが明かになった<sup>1)2)3)</sup>。しかし、圧縮強度に比べ引張強度には大幅な増大はみられず、コンクリート系材料に特有な曲げひび割れが生じ易い材料である。したがって、材料強度の面からだけでなく、構造的な観点からも高強度材料の高付加価値を追究すべき余地が残されているものと考えられる。

このような考え方にに基づき、アーチリブにコンクリート系の高耐久性材料を、タイ材に CFRP などの新素材を用いたタイドアーチを製作し実験的および理論的な研究を行ってきた<sup>4)5)</sup>。平成 10 年度の土木学会全国大会において、カナダで考案されたストラップ付 RC 床版はアーチ効果が期待でき疲労特性が格段に向上するという報告が行われた<sup>6)</sup>。2 主桁などは桁間隔が広くなり、床版作用による曲げ応力も大きくなるので、プレストレスとともにアーチ効果を積極的に期待する構造も検討する必要があるものと考えられる。

本研究では、偏平タイドアーチ構造部材を永久型枠として使用することを目的として、これまで行ってきた実験結果を踏まえ、高強度コンクリートからなるアーチのひび割れ発生から崩壊に至るまでに変化する構造系のモデル化と定量化のための非線形二次元 FEM 解析を行うとともに、偏平タイドアーチ構造の鋼 2 主桁橋梁などの長支間床版への適用性について検討したものである。タイドアーチは、自定式の外的静定構造で主桁への負担も軽減できる。さらに、タイを緊張することによりアーチリブに負曲げが作用することになり、応力制御機構としてのプレストレス、および、形態抵抗機構としてのアーチ構造の両面の長所が発揮できるものと考えられる。

## 2 PIC タイドアーチ供試体

### 2.1 PIC タイドアーチ試験体

PIC 版は、図 1 に示すように、通常のコンクリートと同様の方法で製作した厚さ 15 ~ 50mm 程度の短繊維補強コンクリート板の微細な空隙あるいは局部欠陥に、ポリマーを含浸・重合させ充填し、緻密にした複合強化材である。したがって、PIC は物理的強度 (圧縮・引張り・曲げ強度) の飛躍的な向上によって、遮塩・遮水性、耐凍害性、耐磨耗性、化学抵抗性に優れており、さらに表面を粗面処理すれば現場打設コンクリートとの付着も十分で、コンクリート構造物の有効断面として考慮できることが、今までの研究でも十分に確認されている<sup>1)2)3)</sup>。

図 2 に示すように、スパン 120cm、ライズ高 26cm、幅 30cm、中央部厚さ 3cm および端部厚さ 6cm の PIC 製の変断面放物線アーチ部材を製作した。水平推力を処理するために、PC 鋼棒、PC 鋼より線、CFRP より線をタイ材として用いた自旋式のタイドアーチ構造とした。表 1 に、PIC 版、および緊張材として用いた鋼棒、鋼より線、CFRP より線の物性値を示す。

緊張材の伸び剛性が大きい場合は、2 ヒンジアーチに近い挙動を示すことを考慮して、断面積が大きい鋼棒を用いた。また、CFRP より線の定着には、鋼製スリーブ内に定着用膨張材 (静的破砕材) を充填して、その膨張圧により定着する方法を用いた。

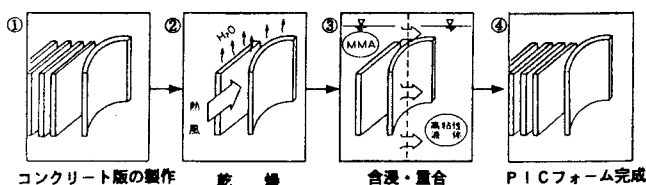


図 1 PIC 版の製造方法

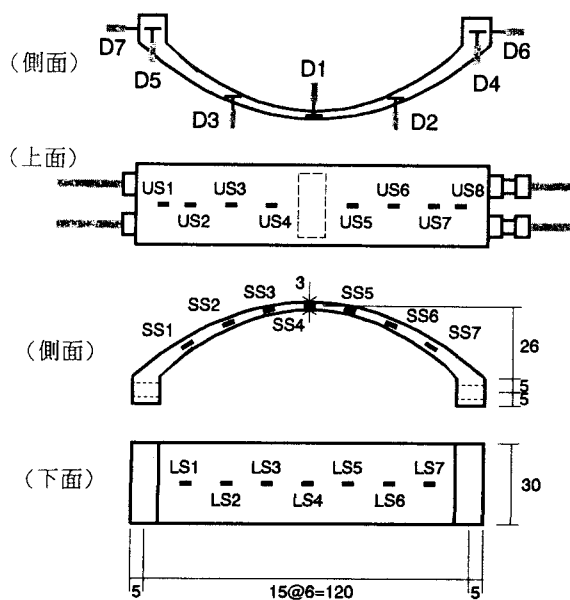


図 2 供試体形状 (単位 cm)

表 1 PIC 版および緊張材の物性値

PIC	圧縮強度	150 MPa		
	曲げ強度	24 MPa		
	引張強度	12 MPa		
	弾性係数	$3.5 \times 10^4$ MPa		
緊張材		断面積 (mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (MPa)	
		PC 鋼棒	415.5	$2.02 \times 10^5$
		PC 鋼より線	51.6	$1.97 \times 10^5$
	CFRP	76.0	$1.41 \times 10^5$	

### 2.2 実験概要

荷重載荷方法は、中央点集中荷重、等分布満載荷重、および、等分布半載荷重とした。集中荷重載荷はアーチクラウン部に荷重計を介して 2000kN 万能試験機による一点集中方式の荷重制御により行った (図 3)。また、コンクリート系材料は変形性能が小さく、圧縮・引張り材料特性も異なり、引張り側ではひび割れが発生しやすく鋼アーチの座屈特性とは異なる力学特性を示すことが考えられるので、アーチ構造では最も不利な状態となる半載分布荷重の載荷実験も行った。載荷はセメント袋及び砂袋を用いて行った。ただし、分布荷重載荷では載荷装置の関係上破壊までには至らせてない。図 3 に載荷装置を示す。さらにタイ材の緊張によるプレストレスの導入は、アーチリブ上面にひびわれが発生しないような量とした。この程度のプレストレス量は定着ナットの手締めにより導入することができる。

実験に際しては、供試体のたわみ、水平反力、PIC 版のひずみなどを計測した。供試体に設置したひずみゲージおよび変位計等の設置状況は図 2 に示すとおりである。水平反力の測定にはセンターホール型の荷重計を試験体端部に設置して測定した。

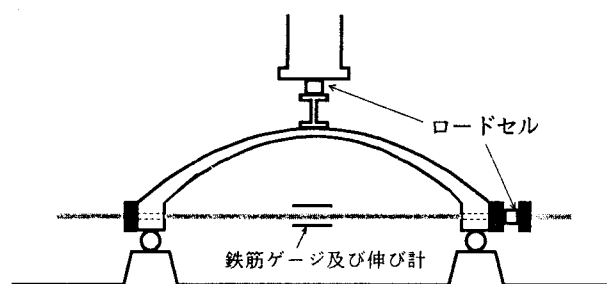


図 3 載荷装置

## 3 実験結果および解析結果

アーチ部材には PIC を用い、緊張材として PC 鋼棒、PC 鋼より線、CFRP より線を用いた供試体の載荷実験結果について以下に示す。以下の図では PC 鋼棒を○印、PC 鋼より線を□印、CFRP より線を△印で表し、白抜き、および、実印は、それぞれプレストレス無し、および、プレストレス有りの場合を示す。

### 3.1 ひび割れ発生前の挙動

#### 3.1.1 集中荷重

図4はCFRPより線を用いた供試体における緊張力導入前後(△:緊張力導入前, ▲:緊張力導入後)のたわみ分布を示したものである。P=5.9kNのとき緊張力導入の有無に注目すると、緊張力を導入した場合変形が小さくなることが確認できる。これは緊張力の導入によりアーチに逆モーメントを与えるためである。なお、同図中の点線は緊張力導入前の線形弾性解析結果であり、実験結果はこれとほぼ一致している。

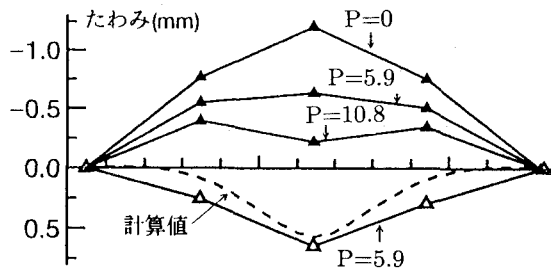


図4 たわみ分布 (集中荷重) P[kN]

#### 3.1.2 分布荷重

図5および図6は、各々、緊張力導入前後の半載および満載荷重によるたわみ分布を示したものである。半載荷重の場合はアーチに特徴的な逆対称モードの変形が進行していることがわかる。

このような変形モードが進行すると分岐座屈などの座屈安定性が重要になってくるが、コンクリートには鋼のような変形性能はなく、また、コンクリート自体が圧縮には強く引張りには弱いという材料特性を示すため、コ

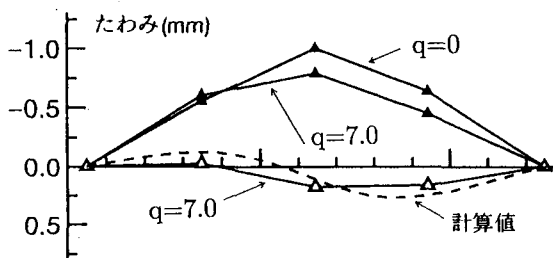


図5 たわみ分布 (半載荷分布荷重) q [kN/m]

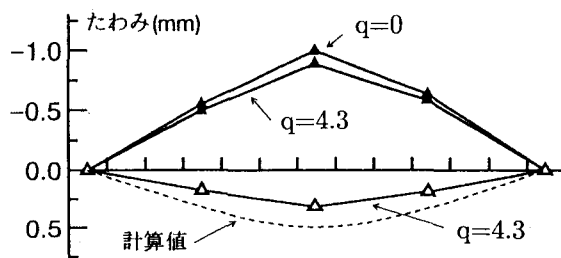


図6 たわみ分布 (満載荷分布荷重) q [kN/m]

ンクリートアーチの座屈特性は鋼アーチとは異なった座屈特性を示すことが考えられる。実験ではごく小さな分布荷重強度しか載荷してないので、終局強度の評価のためには、半載荷重に対するコンクリート系タイドアーチ構造のひびわれ発生から崩壊に至るまでに変化する構造系の合理的なモデル化について考察するとともに、このようなハイブリッド構造の耐荷力特性の定量化のための実験および弾塑性有限解析を行う必要がある。

### 3.2 破壊挙動

図7は、緊張材にPC鋼棒、PC鋼より線、および、CFRPより線を用いた場合の中央点集中荷重載荷による破壊試験における荷重と中央点のたわみの関係を示したものである。同図中において、実線は実験で得られた結果であり、点線は最初の折れ曲り点までは2ヒンジアーチとしての構造系による線形弾性計算結果である。同図から明らかなように、断面積が小さい鋼より線、弾性係数が小さいCFRPより線を用いると、中央点のたわみがかなり増大することがわかる。

図7に示すように、PC鋼棒の場合にはP=29 kN、また、PC鋼より線およびCFRPより線の場合にはP=24 kNで、荷重が低下するとともにアーチスパン中央下縁にひび割れが発生し、急激に断面中央部までひび割れが進行した。しかしながら、中央部下縁にひび割れが発生しても、上縁部のPICは150MPaの圧縮強度を有するので、まだ耐力を維持することができる。また、たとえ中央部上縁部までひび割れが進展しても(塑性ヒンジ的な構造モデル)、2ヒンジアーチと3ヒンジアーチの中間程度の構造系として安定性を維持することができる。荷重低下後の点線は3ヒンジアーチとしての構造系による線形弾性計算結果である。

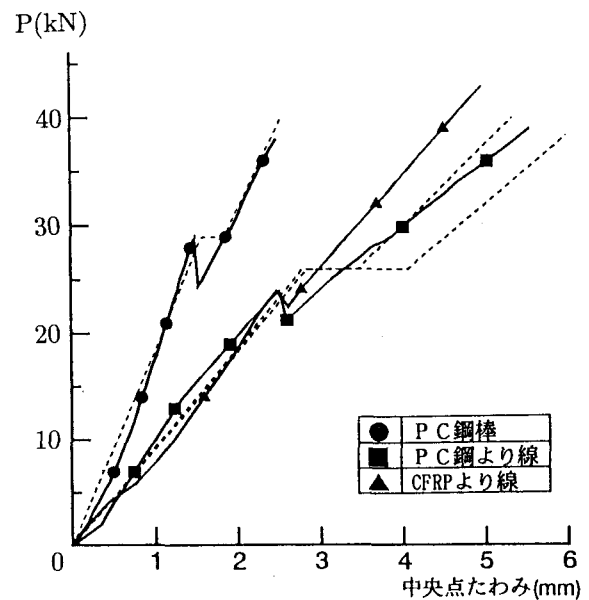


図7 載荷実験結果 (荷重-たわみ曲線)

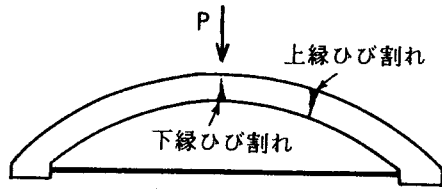


図8 破壊形状図

さらに荷重を続けると、PC鋼棒および鋼より線の場合  $P=38\text{kN}$  で、CFRPより線の場合  $P=43\text{kN}$  で最大荷重に達した。このときアーチスパンの1/4付近(左右いずれか1箇所)上縁部にひびわれが発生し破壊に至った(図8参照)。

### 3.3 二次元FEM解析

前記の実験結果をさらに詳細にシミュレートするため二次元FEM解析を実施した。PICアーチ部材はシェル要素、緊張材はトラス要素を用い、弧長増分法で非線形解析を行った。FEM解析でのメッシュ分割図を図9に示す。解析では、PICの引張強度12MPaを用いて解析すると、PIC下縁にひび割れ発生荷重が半分程度となった。曲げ引張強度24MPaを用いると、実験結果とほぼ一致した。荷重-下縁ひずみ関係から、PICの曲げ引張りに対する伸び能力は $600\mu$ 程度であった。この値を用いて曲げ引張り強度を計算すると $\sigma_b=21\text{MPa}$ となり、表2に示すPICの曲げ引張り強度(24MPa)とほぼ一致する。PIC版の構成則は、図10を用いて解析を行った。なお、PICの引張域においては、テンション・ソフトニング係数 $E_2$ を変化させて解析を行った結果、図11に示すようにテンション・ソフトニング係数 $E_2$ が荷重変位曲線に与える影響が大きいことがわかる。実験結果と比較すると、 $E_2 = \frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$  のときほぼ実験結果と一致する解析結果が得られる。

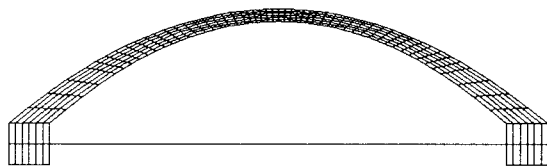


図9 FEMメッシュ分割図

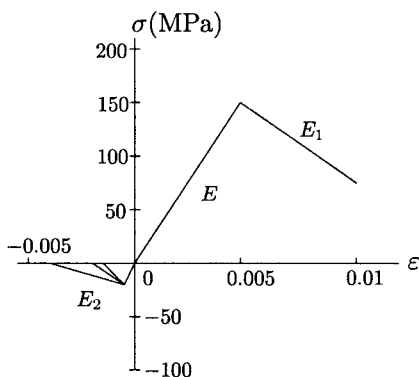


図10 PIC構成則

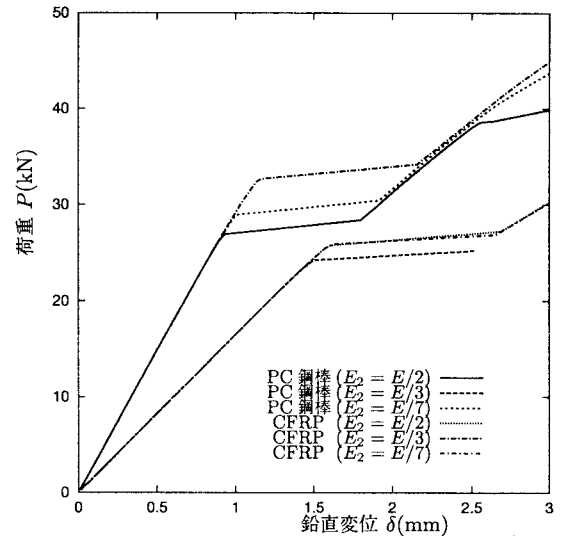


図11 二次元FEM解析結果

### 3.4 パラメトリック解析

解析結果は実験結果をほぼ推測できるものと考えられるので、次に実験で行ったアーチのライズを変えた場合、および通常のコンクリートで供試体を製作した場合の解析結果について図12に示す。緊張材としてCFRPより線を用いるものとした。解析パラメータを表3に示す。PICの曲げ引張り強度は24MPaとし、コンクリートは圧縮強度 $\sigma_c = 30\text{MPa}$ 、曲げ引張強度 $\sigma_b = 0.2\sigma_c = 6\text{MPa}$ 、弾性係数 $E = 3.0 \times 10^4\text{MPa}$ として計算した。同図より、PICを用いた場合は、普通コンクリートを用いた場合に比べて約3~4倍の耐力を示すことがわかる。

表2 解析パラメータ

解析ケース	アーチ部材	ライズスパン比	タイ材
case ①	PIC	0.2	CFRP
case ②	PIC	0.1	CFRP
case ③	PIC	0.05	CFRP
case ④	普通コンクリート	0.2	CFRP

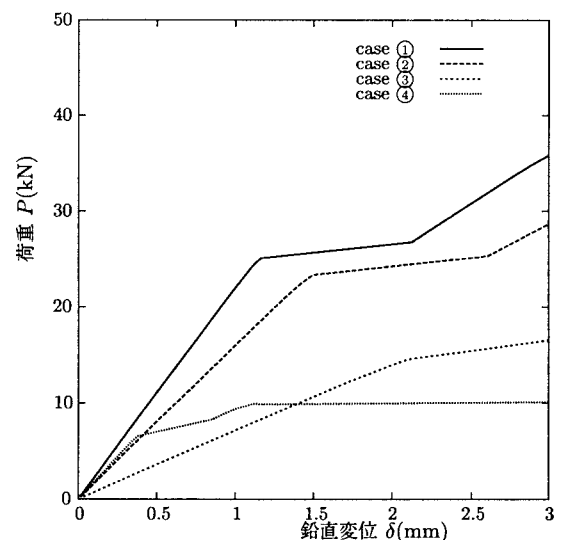


図12 コンクリート系材料からなるタイドアーチ構造部材の耐荷力

## 4 床版への利用

以上のタイドアーチ構造の実験および解析結果より、PIC などの高強度コンクリートからなるアーチ形状埋設型枠を RC 床版への適用性について検討する。

鉛直分布荷重を支配的荷重とする大スパン構造を実現するための方法には、

- ① 形態抵抗による曲げ応力の排除
- ② 部材の交差配置による立体抵抗
- ③ 高性能な構造要素や部材の使用
- ④ 主部材へのプレストレスの導入
- ⑤ 主構造部材への中間支点の挿入

などが考えられる。床版の技術開発において、プレキャスト床版は③、床版へのプレストレス導入は④、ロビンソン型床版、突起付き T 形鋼ジベル合成床版、3次元トラスジベル合成床版などの合成構造床版は、上記の②および③を考慮して開発されたものである。床版の技術開発において、①アーチやシェルの形態抵抗機構や⑤中間支点の導入を考慮した床版は、カナダの道路橋示方書にある鉄筋無し床版についての規定、戦前鉄道橋に用いられたバックルプレートなどに見られる程度であり、積極的に形態抵抗機構や中間支点の導入を考慮した床版の開発はまだ行われていないようである。

カナダの道路橋示方書にある鉄筋無し床版はある条件を満足すれば、床版はタイドアーチとして挙動し、押抜きせん断によって耐力を失うことを考慮したものである。町田<sup>7)</sup>は、「工夫次第では鉄筋無し床版を主桁間隔が 10m を超えるような 2 主桁橋にも適用可能性があり経済性が図れる」と述べている。さらに、RC 床版の代わりに、ポリプロピレン繊維補強コンクリート (PPFRC) を床版に適用し、橋軸直角方向のアーチ効果を得るために隣接する鋼主桁上フランジをストラップと呼ばれるタイ材で連結する橋梁床版に対して、移動輪荷重疲労試験が実施した結果され、通常の RC 床版より疲労耐久性が向上すると報告されている<sup>6)</sup>。

現場打ち床版では、主桁上でハンチを付けるのが一般的であるが、プレキャスト床版では型枠の関係から省略したいと言われている。しかし、ハンチの役目は、桁上の負曲げモーメントに対して少しでも床版厚を大きくして余裕を確保すること、横断勾配をハンチで調整できること、支持桁の製作精度による不等天場高さを調整できること、さらには床版のせん断破壊耐力を向上させているなど、重要とされている<sup>8)</sup>。したがって、このハンチ高さに相当するライズスパン比を有し、端部で厚くなる変断面アーチの床版構造も一考に値するものと考えられる。

### 4.1 橋軸直角方向

橋軸直角方向は、通常の PC 床版が応力制御機能であるのに対して、アーチやシェルの場合には荷重作用によ

り圧縮応力が作用する。この圧縮応力がひび割れ防止に有効となる。さらに、橋軸直角方向へはタイ材を緊張することによってもプレストレスを導入することができる。しかし、本論文で取り扱うようなコンクリート系材料では、緊張力により逆モーメントを与えることにより、上縁に負曲げが生じ、ひび割れ発生するので大きな緊張力は導入できないので注意を要する。

RC 床版への適用例として、主桁間隔 6m、最小床版厚 (スパン中央部) を 25cm として、活荷重 (10kN/m<sup>2</sup>) を与えて簡易計算を行った。その結果を図 13 に示す。同図中 (a) は鉄筋無し床版、(b) は鉄筋無しで (a) と同面積量の PC 鋼材をアウトケーブルとして使用したものの、(c) は PIC 版を埋設型枠として使用し、その上に無筋で現場打ちコンクリートを打設したものである。(c) の緊張材断面積は (b) と同量である。解析結果より、(c) の PIC アーチを埋設型枠として利用することにより、コンクリート合成後もアーチ効果が十分に表われていることがよくわかる。

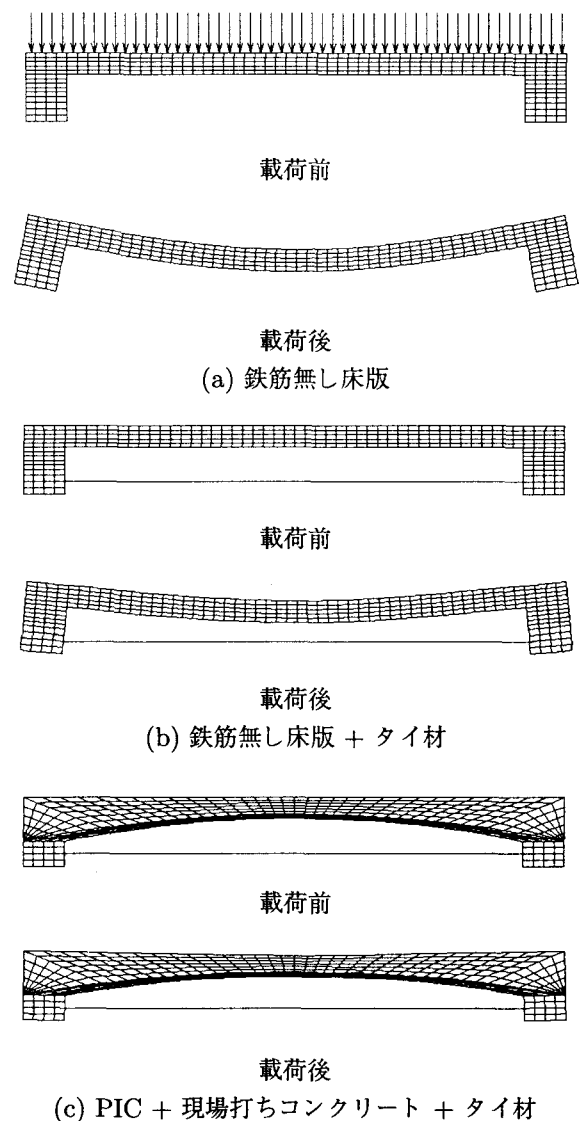


図 13 RC 床版への適用例

## 4.2 橋軸方向へのプレストレスの導入

橋軸方向へのプレストレスの導入すると、疲労耐久性が確実に向上する<sup>8)</sup>。プレストレスの導入方法は、インナーケーブル方式、外ケーブルのポストテンション方式、プレテンション方式がある。アーチ状の部材を橋軸方向に並列配置後、橋軸方向にプレストレスを導入すれば、シェルとしての機能も併わせもつことも期待される。シェル構造はアーチ構造よりも、面内圧縮状態を実現しやすく、圧縮応力状態であることがひび割れ防止に有効となる。また、曲げモーメントの減衰機能があり、例えば、シェル境界端部は横桁で周辺部の曲げモーメントを処理するようにすればシェル構造の特徴が生かせるものと考えられる。

## 5 まとめ

高耐久性を有する PIC 版を曲面構造とすることにより、断面内に圧縮応力が作用し、曲げによる引張り力は減少するから、コンクリート構造物のひびわれ防止に圧縮力が有効となる。本研究では、曲面形状をした PIC 版を永久型枠として使用する場合の力学的特性を明らかにするために、PIC で製作されたアーチ系構造部材の載荷実験と非線形二次元 FEM 解析を行うとともに、鋼コンクリート合成桁の RC 床版への適用可能性について検討した。本研究で得られた結果は次のようにまとめられる。

1. 本実験で用いたような PIC アーチ系構造は、まずアーチクラウン下面にひびわれが発生し、その後、アーチスパン 1/4 付近上面にひびわれが発生し破壊に到る。その破壊挙動は、下面にひび割れが発生するまでは 2 ヒンジアーチ、下面にひび割れ発生後は 3 ヒンジアーチに近い構造系の挙動を呈する。
2. 本実験で用いたような断面形状を有する PIC アーチの荷重-たわみ曲線はほぼ線形的に変化する。
3. アーチクラウン下面の曲げ引張りひずみが  $600\mu$  を超えるとひびわれが発生し、そのときの引張強度は 21MPa 程度であり、これは曲げ強度に相当する。
4. 通常のコンクリートでアーチ構造を製作した場合に比べて、PIC でアーチ構造を製作すると耐力がかなり増大する。また、アーチ構造とすることによりその耐力が大幅に向上する。
5. 主桁間隔 6m、最小床版厚(スパン中央部)を 25cm として、等分布荷重を与えて簡易計算を行った結果、アーチ形状の PIC 版を埋設型枠として使用し、その上に無筋で現場打ちコンクリートを打設した RC 床版は、通常の RC 床版に比べて作用応力及び

変形が小さく、アーチ効果が十分発揮されていることがわかった。

## 6 あとがき

本研究では PIC アーチ系構造部材単体の中央点集中載荷実験を行ない、線形弾性解析結果および二次元 FEM 解析結果と比較検討した。まだ、具体的な床版を設計するまでには至ってはいないが、アーチ構造や張弦梁などを利用することにより、床版構造の新たな構造形式が考え出される可能性があるものと思われる。

## 7 謝辞

本研究は平成 11-12 年度文部省科学研究費補助金 (C) (2) (研究代表者:長崎大学松田 浩) の補助の一部で行ったものである。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 内藤隆史・松岡康訓・進藤竹文・小沢満三・鶴田健: ポリマー含浸コンクリートによる高耐久性埋設型枠の開発, 土木学会論文集, No.435/VI-15, pp21-23 1991
- 2) K.Tsuruta, M.Ozawa and T.Naito: Bond behavior of polymer impregnated concrete permanent forms for prestressed concrete beams, ISAP Technical Committee 52, Adhesion between Polymers and Concrete, 1986
- 3) 松田浩・鶴田健・出光隆・崎山毅: PIC 版 RC 部材の力学的性状と高耐久性埋設型枠の設置間隔に関する研究, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.85-96, 1993
- 4) 松田浩・鶴田健・森田千尋・崎山毅・原田哲夫: 高耐久性 PIC 版を用いたアーチの構造特性に関する基礎的研究構造工学論文集, Vol.39A, pp.97-104, 1993
- 5) 松田浩・鶴田健・崎山毅・原田哲夫: プレストレスを導入した PIC タイドアーチの力学特性コンクリート工学年次論文報告集, 第 17 巻, 第 2 号, pp47-52, 1995
- 6) 東山・松井ほか: PPFRC 床版の疲労耐久性に関する実験的研究, 土木学会第 53 回年次学術講演会, CS, pp.34-35 1998
- 7) 町田篤彦: 鉄筋コンクリート床版, 橋梁と基礎, 99-11, p.1 1999
- 8) 松井繁之: 床版の技術開発 - 耐久性の向上, 施工合理化 -, 橋梁と基礎, 97-8, pp.84-94 1997