

PICタイドアーチ構造の非線形挙動特性とその道路橋床版への応用に関する研究

松田 浩^{*1}・崎山 毅^{*1}・林山 豊^{*2}
平嶋健太郎^{*2}・松田 貴志^{*3}・鶴田 健^{*4}

Nonlinear Behavior Analysis of PIC Tied-Arch and Its Application to Slab of Composite Girder

by

Hiroshi MATSUDA^{*1}, Takeshi SAKIYAMA^{*1}, Yutaka HAYASHIYAMA^{*2}

Kentaro HIRASHIMA^{*2}, Takashi MATSUDA^{*3} and Ken TSURUTA^{*4}

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 the lower surface of arch crown, next in the upper surface in a quarter of arch span, and then the specimens are failed. Two and three dimensional FEM analytical results were compared with the experimental results. Furthermore, application of shallow hybrid structure to RC slab in composite two plate girder bridge are discussed.

1 はじめに

筆者らは、ここ数年来、アーチリブにポリマー含浸コンクリート(以後、PICと略)製の薄板を使用したタイドアーチを製作し、実験および解析的な研究を行ってきた [1] [2]。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、耐磨耗性、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徴を有していることが明らかとなっている。しかし、圧縮強度に比べ、引張強度には大幅な増大は見られず、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。また、松井 [3] [4]、町田 [5] により、カナダで使用実績のあるストラップ付きRC床版(鉄筋なしコンクリート床版)が紹介されているとともに、松井らはストラップ付き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実験結果 [6] を報告している。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、PIC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2次元FEM解析および3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

平成13年4月20日受理

^{*1} 構造工学科 (Department of Structural Engineering)

^{*2} 長崎大学大学院生産科学研究科環境システム工学専攻 (Graduate Student, Dept. of Structural Engng.)

^{*3} 日立情報ネットワーク (研究当時:長崎大学大学院)

^{*4} 小沢コンクリート工業 (株)

用性について検討したものである。

2 タイドアーチ実験およびFEM解析

2.1 実験概要

図1に示すに示すように、スパン1200mm、ライズ高260mm、幅300mm、中央部厚さ30mmおよび端部厚さ60mm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、CFRPをタイ材として用いた自碇式のタイドアーチ構造とした。表1に、PIC版、およびタイ材として用いたPC鋼棒、CFRPの物性値を示す。タイ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。載荷方法は、中央点集中荷重とした。実験に使用した載荷装置を図2に示す。実験に際しては、供試体のたわみ、タイ材の水平反力、水平変位などを計測した。

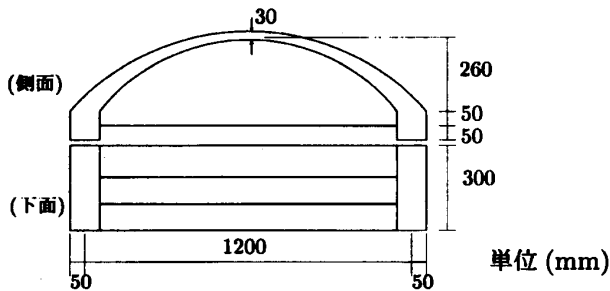


図1 実験供試体

表1 使用材料物性値

(a) PIC版

PIC	
圧縮強度 (MPa)	150
曲げ引張強度 (MPa)	24
弾性係数 (MPa)	3.5×10^5

(b) タイ材

タイ材	断面積 (mm ²)	弾性係数 (MPa)
PC 鋼棒	415.5	2.02×10^5
CFRP	76.0	1.41×10^5

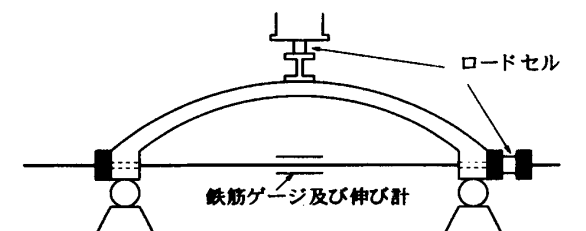


図2 載荷装置

2.2 解析概要

図3に解析モデルを示す。(a)図は、2次元解析モデル、(b)図は、3次元解析モデルを示している。2次元モデルにおいては、アーチリブをシェル要素、タイ材をトラス要素とし、3次元モデルにおいては、アーチリブを立体要素、タイ材をトラス要素とした。非線形解析は荷重制御型の弧長増分法を用いた。解析に用いたPIC版の構成則を図4に示す。構成則において、引張軟化域を直線軟化とし、引張軟化係数を $E/2=17500\text{MPa}$ として、FEM解析を行った。なお、3次元モデルによる解析は、合成桁道路橋へ使用する場合の主桁・床版作用による影響を検討するにあたり、3次元解析の妥当性を検討するためである。

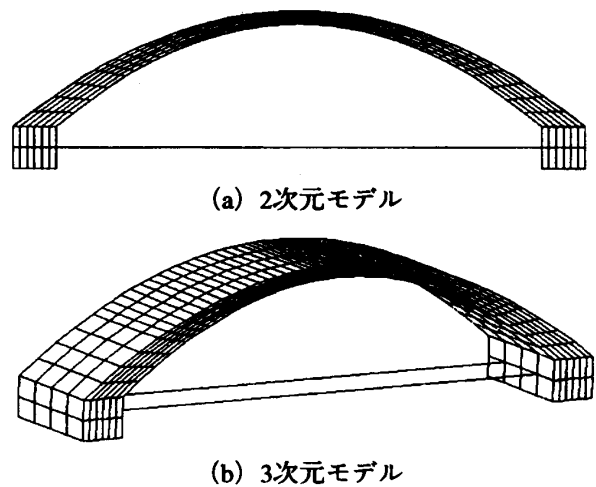


図3 FEM解析モデルメッシュ分割図

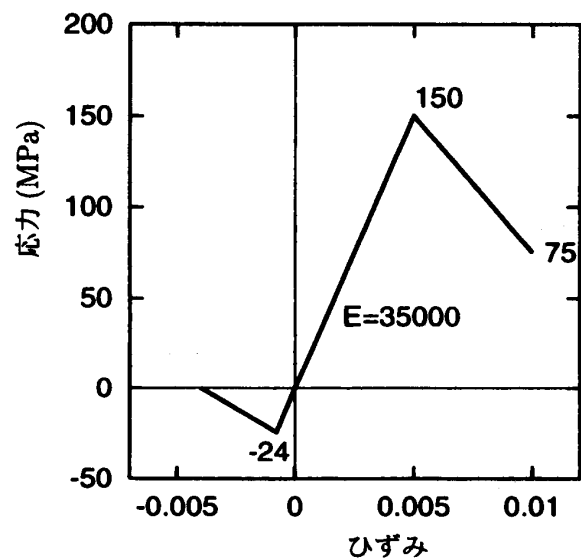


図4 PIC版の構成則

2.3 実験および解析結果

実験では、載荷後まずアーチリブ中央部下縁にひび割れが発生し、その部分が塑性ヒンジ的な役割を果た

し、続いてアーチリブ1/4付近左右いずれかに上縁ひび割れが発生し、破壊に至った。実験で得られたPICタイドアーチのひび割れ発生状況を図5に示す。

解析によって得られたアーチ中央部下縁にひび割れが発生したときの変形状況を図6に、アーチリブ1/4部の上面にひび割れが発生し、破壊に至ったときの変形状況を図7に示す。図6、7において、(a)図は、2次元解析によって得られた解析結果、(b)図は、3次元解析によって得られた解析結果である。ただし、タイドアーチの変形図は実際の変位の40倍の倍率にて表している。

荷重-変位関係を図8に示す。(a)図は、タイ材にPC鋼棒を使用した場合の荷重-変位関係、(b)図は、タイ材にCFRPを使用した場合の荷重-変位関係をそれぞれ示している。アーチリブ中央下縁のひび割れ発生荷重は、(a)図の28kN付近の折点、(b)図においては、24kN付近の折点に相当する。解析結果と実験結果を比較すると、剛性に差異が現れたが、ひび割れ発生荷重はほぼ一致した。

タイ材の荷重-水平変位関係および荷重-水平反力関係をそれぞれ図9、10に示す。(a)図は、タイ材にPC鋼棒を使用した場合、(b)図は、タイ材にCFRPを使用した場合の荷重-水平変位関係および荷重-水平反力関係である。図9、10より、解析結果は、実験結果をほぼ再現していることが確認できる。

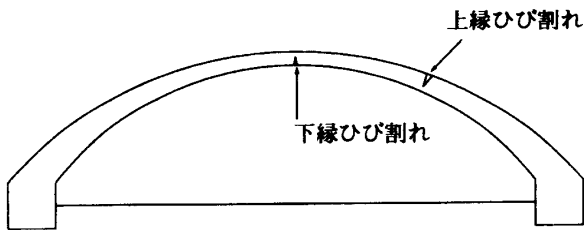
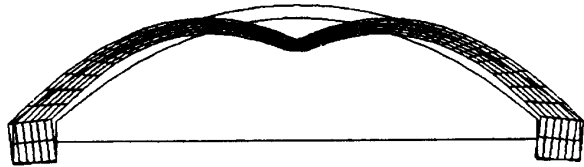
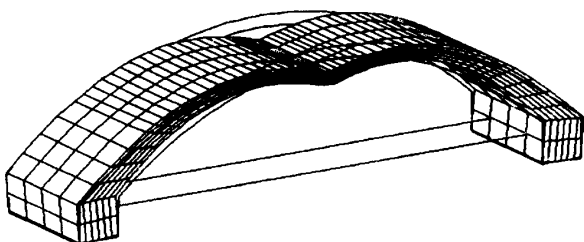


図5 PICタイドアーチ破壊状況

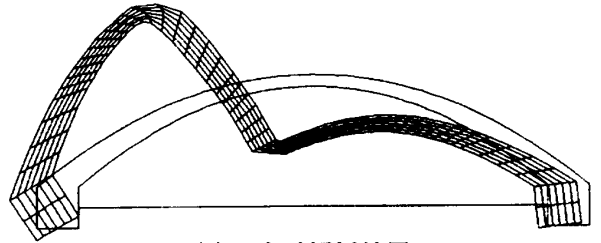


(a) 2次元解析結果

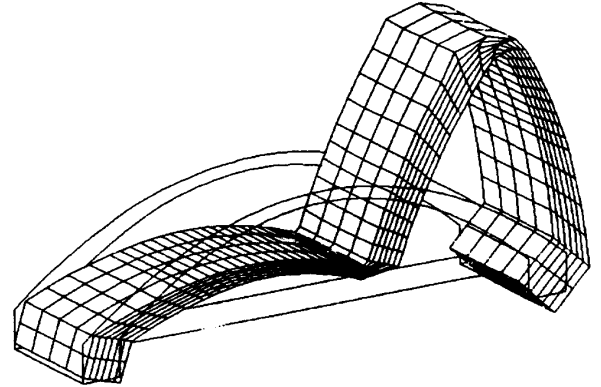


(b) 3次元解析結果

図6 変形状況 (中央下縁ひび割れ発生時)

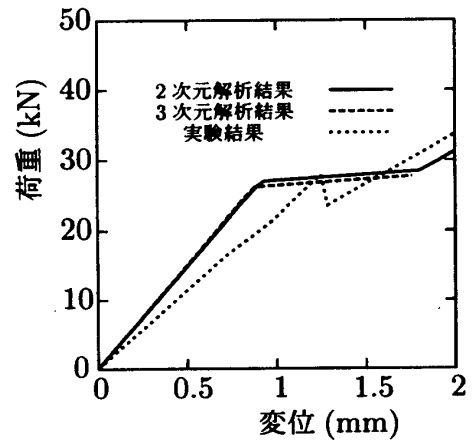


(a) 2次元解析結果

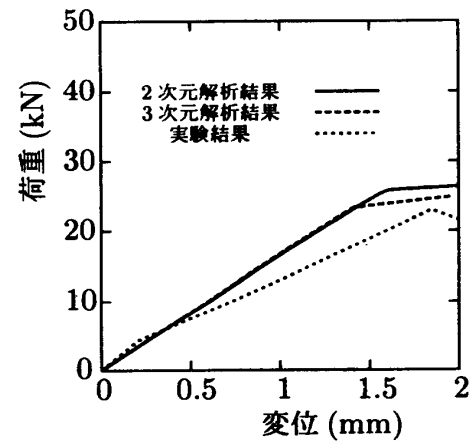


(b) 3次元解析結果

図7 破壊状況 (解析)

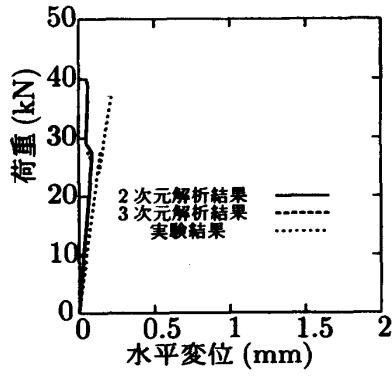


(a) PC鋼棒

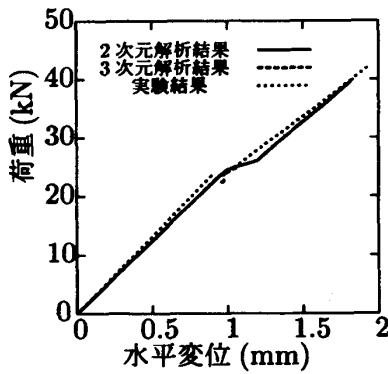


(b) CFRP

図8 PICタイドアーチの荷重-変位関係

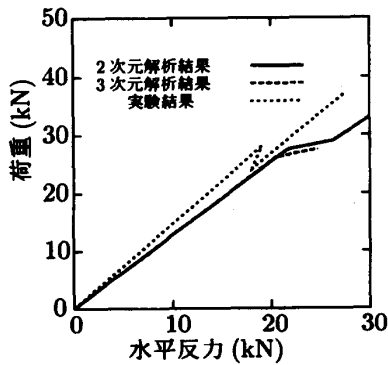


(a) PC鋼棒

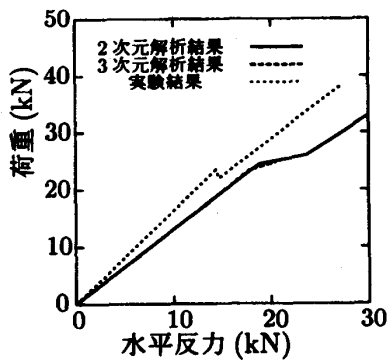


(b) CFRP

図9 タイ材の荷重-水平変位関係



(a) PC鋼棒



(b) CFRP

図10 タイ材の荷重-水平反力関係

3 パラメトリック解析

3.1 解析概要

前節まで、PICタイドアーチの載荷実験をシミュレートすることにより、本解析手法の妥当性を確認してきた。解析結果から、本解析手法によって実験をシミュレートできるものと考えられる。

しかし、アーチ構造は、ライズ高が大きくなればより大きなアーチ効果が期待できる反面、実構造物への応用を考える際、アーチのライズ高が問題点の1つとなる。このため、アーチのライズ・スパン比の変化による影響を検討する必要がある。

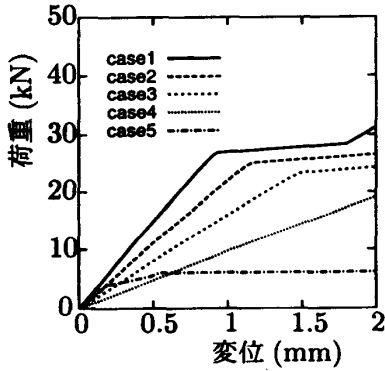
表2に示すように、アーチ部材のライズ・スパン比をパラメータとした場合、また、普通コンクリートをアーチリブの材料として用いた場合の2次元解析モデルを作成し、FEM解析を行った。普通コンクリートの材料特性は、圧縮強度 $\sigma_c = 30\text{MPa}$ 、曲げ引張強度 $\sigma_b = 0.2 \sigma_c = 6\text{MPa}$ 、弾性係数 $E = 3.0 \times 10^4 \text{MPa}$ とした。前節で用いた2次元解析モデルと同様に、アーチリブをシェル要素、タイ材をトラス要素とし、荷重制御型の弧長増分にて解析を行った。

表2 ライズ・スパン比のパラメータ

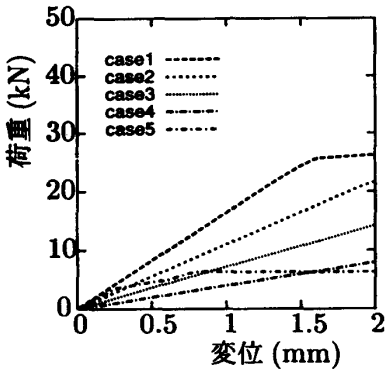
供試体名	ライズ・スパン比	使用材料
case1	0.2	PIC
case2	0.15	PIC
case3	0.1	PIC
case4	0.05	PIC
case5	0.2	普通コンクリート

3.2 解析結果

パラメトリック解析によって得られた解析結果を図11に示す。同図において、(a)図は、タイ材にPC鋼棒を使用した場合、(b)図はタイ材にCFRPを使用した場合のパラメトリック解析による荷重-変位関係である。PC鋼棒およびCFRPともにライズ・スパン比を大きくすると耐力が向上することが確認できる。また、PICをアーチリブに用いた場合は、普通コンクリートを用いた場合に比べて3~4倍の耐力を示すことがわかった。このことから、普通コンクリートよりも曲げ引張強度が向上したPICはタイドアーチ部材には有効であると考えられる。



(a) PC鋼棒



(b) CFRP

図11 パラメトリック解析結果

4. 床版への応用

4.1 解析概要

本節では、変断面アーチを道路橋床版の橋軸直角方向への適用について検討する。PC床版が応力制御機構であるのに対し、アーチやシェルの場合には荷重作用による圧縮応力が作用する。この圧縮応力が下縁部のひび割れ防止に有効である。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もできる。

しかし、今回検討するようなコンクリート系材料を使用する場合、緊張力による逆モーメントを与えることによって上縁に負曲げが生じ、ひび割れを発生することがあるので大きな緊張を導入できないことに注意しなければならない。

主桁間隔6000mm、床版の最小全厚は道路橋示方書の最小全厚の規定(単純版)から350mmとして、タイドアーチ式床版と従来のRC床版の2主桁橋断面を製作し、2次元FEM解析を行った。図12に解析モデルを示す。(a)図は、鉄筋コンクリート床版または鉄筋なし床版、(b)図は、(a)図にタイ材を設置したもの、(c)図は、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。また、

(c)図のタイ材は(b)図と同量のものを使用した。ライズ・スパン比は、0.1または0.2を採用した。また、PIC版厚を50mmまたは、100mmとし、タイ材は前節までに用いたPC鋼材とCFRP(断面積2000mm²)を使用する。表3に解析パラメータを、表4に使用材料の材料定数を示す。ここで、NC-1およびNC-2は鉄筋なし床版、RCは鉄筋コンクリート床版、AR-1~AR-3はタイドアーチ式床版である。

これらのモデルの中央部にT荷重(B活荷重)を載荷した。

表3 解析パラメータ

解析モデル	床版形式	PIC版厚	ライズ・スパン比	タイ材
NC-1	(a)	100mm	-	なし
NC-2	(b)	100mm	-	PC鋼材
RC	(a)	-	-	なし
AR-1	(c)	50mm	0.1	PC鋼材
AR-2	(c)	100mm	0.1	PC鋼材
AR-3	(c)	100mm	0.2	PC鋼材
AR-4	(c)	100mm	0.1	CFRP

表4 材料定数

使用材料	弾性係数 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	曲げ引張強度 (MPa)	断面積 (mm ²)
PIC	3.5×10 ⁴	150	24	-
コンクリート	3.0×10 ⁴	30	6	-
PC鋼材	2.02×10 ⁵	-	-	2.0×10 ³
CFRP	1.41×10 ⁵	-	-	2.0×10 ³

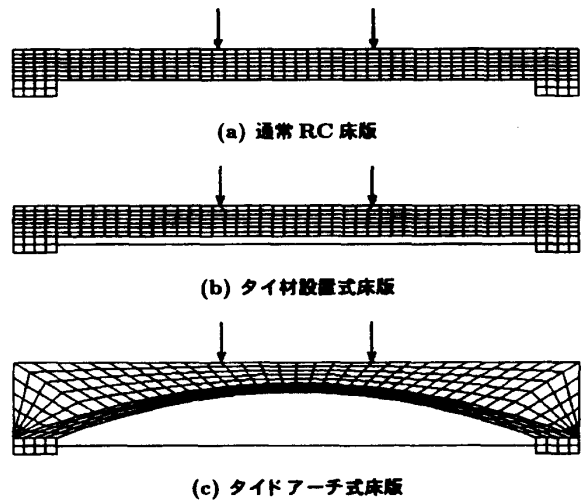


図12 解析モデル

4.2 解析結果

各解析モデルの解析結果を表5に、また載荷後の変形状況を図13に示す。ただし、変形状況は実際の変位の30倍で表している。

表5 解析結果

モデル	中央点 変位 (mm)	中央部 下縁応力 (MPa)	タイ材 引張応力 (MPa)
NC-1	8.12	12.8	-
NC-2	7.61	10.6	21.9
RC	6.80	9.0	27.9
AR-1	2.99	6.9	24.1
AR-2	1.64	4.3	21.7
AR-3	3.43	8.0	19.7



NC-1



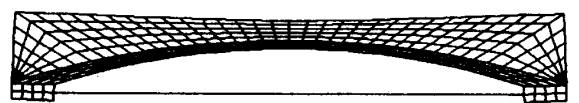
NC-2



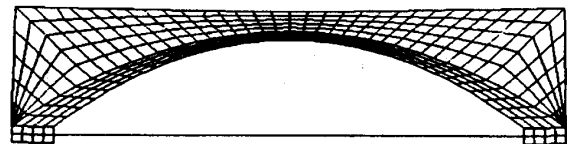
RC



AR-1



AR-2



AR-3



AR-4

表5において、アーチ床版(AR-1~AR-4)は全てのケースにおいて、NC-1、NC-2およびRCよりも最大変位を1/2~1/3程度に抑えることができた。また、PIC版に生じるスパン中央部下縁部に生じる引張応力も軽減することができた。さらに、引張強度がコンクリートに比べて大きなPIC版を用いることにより、さらにひび割れが発生しにくくなるという効果も現われるものと考えられる。

AR-2とAR-4の比較、すなわちタイ材の材料の変化によるアーチへの影響を考えると、タイ材の弾性係数が弱ければ床版への負担が増大することがわかる。このことから、床版の規模や使用条件によって適切なタイ材を使用しなければならないことがわかる。ただし、本解析のようなモデルではタイ材が空気中に晒されいるため、実構造物として設置する場合にはPC鋼材のような鋼製のタイ材を使用するのは腐食の面から考えても必ずしも適切であるとは言えない。そのため、鋼材をタイ材として使用する場合は、表面被覆などの防食処理を施す必要がある。

解析モデルでは、同一のライズ・スパン比(0.1)ではPIC版の薄いモデルがアーチ効果がより大きいという結果になった。本解析モデルを製作するにあたり、PIC版の中立軸からライズを求めている。そのため、PIC版の最小板厚を増加させると、PIC版の下縁の高さが低くなってしまふ。そこで、PIC版の下縁の高さを変えずにPIC版の板厚を増加させて計算を行うと、板厚の増加に伴って剛性も高くなるという結果を得た。すなわち、ライズ・スパン比が大きくなるほど、床版の剛性が大きくなると考えられる。しかし、解析モデルAR-3のようにライズ・スパン比を大きくするほど床版全体の厚さが大きくなり、橋梁として不経済になるおそれがある。

以上から、主桁間隔を大きくしたい橋梁にはタイドアーチ式床版は非常に有効であり、かつ経済的な床版であると思われる。ただし、橋梁の規模や用途に合わせて適切な断面形状や使用材料を選定しなければ、かえって従来の床版よりも不経済になってしまうおそれがある。また、PIC版をプレキャスト部材として製作する場合、本解析のような長大スパンの床版を設置現場まで運搬することは場合によっては困難ではないかと思われる。そのため、アーチ床版を数ブロックに分ける必要があり、アーチ床版の接着部分についても解析を行うことも重要である。

図13 床版モデル変形図

5 まとめおよび今後の課題

本論文では、アーチリブに高強度のPICを使用したタイドアーチの載荷実験を解析的にシミュレーションするとともに、少数主桁橋などの広幅員橋梁の床版への適用性について検討した。解析結果は以下のよう

にまとめられる。
(1) PICタイドアーチの載荷実験を解析的にシミュレーションするために、2次元および3次元FEM解析を行った。2次元および3次元FEM解析結果は、実験のひび割れ発生から崩壊に至るまでの非線形挙動をよくシミュレートできることが確認できた。

また、PICタイドアーチ構造の構造特性を明らかにするために、タイドアーチのライズ・スパン比やタイ材の種類を変化させパラメトリック解析を実施した。解析の結果、

- ・PICを用いると耐力が大幅に増加する、
 - ・スパン比が増大するにつれタイドアーチの耐力は増大するが変形能は減少する、
- ことなどが明らかになった。

これらのひび割れ発生から終局破壊に至るまでの非線形挙動は、鉄筋コンクリートの曲げ破壊やせん断破壊の破壊メカニズムとの関連づけられるものと考えられるので、その点に注目した解析を行なっていく予定である。

(2) 実際の床版への適用を解析的に検討するために、PICタイドアーチの上部に現場打ちコンクリート

を打設したタイドアーチ式合成床版に対する2次元FEM解析を行うとともに、通常の鉄筋コンクリート床版、カナダで開発された鉄筋なし床版等の解析結果と比較した。その結果、タイドアーチ式床版は、中央点下縁応力、中央点変位ともに低減できることが確認できた。今後、アーチ式床版を橋軸直角方向および橋軸方向での使用、プレストレスの導入等について検討するために、3次元FEM解析を実施し検討を重ねて行く予定である。

参考文献

- [1] 松田浩ほか：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
- [2] 松田浩ほか：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，pp.47-52，1995
- [3] 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
- [4] 松井繁之・西川和廣・大田孝二：鋼橋の床版①，鋼橋床版の各国での取組みとこれからの床版，橋梁と基礎，99-3，pp.37-44，1999
- [5] 町田篤彦：鉄筋コンクリート床版，橋梁と基礎，99-11，p.1 1999%
- [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%