

高耐久性 P I C 版を用いたアーチの 構造特性に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL EXPERIMENTAL TEST ON COLLAPSE BEHAVIOURS OF PIC TIED ARCH STRUCTURES

松田 浩* 鶴田 健** 森田 千尋*** 崎山 毅**** 原田哲夫*****

By H. Matsuda, K. Tsuruta, C. Morita T. Sakiyama and T. Harada

PIC (Polymer Impregnated Concrete) have high durability. Formworks 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 planks as embedded forms.

Two specimens, which consists of PIC having two types tie (steel and CFRP 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.

1. まえがき

近年, 土木構造物においても景観あるいは美観的な配慮から曲面を有する構造物が積極的に用いられるようになってきている。一般に, 曲面構造は曲率中心方向等分布荷重を受けた場合, 断面内には圧縮応力が作用し, 曲げによる引張応力は減少するから, コンクリート構造物のひびわれ防止に圧縮応力が有効となる。本研究は, 引張りに弱いというコンクリートの補強法として, 機械的に緊張材に引張力を与えることで部材に圧縮力を生じさせる《プレストレス》から, 荷重作用により板に圧縮力を作用させる《ポストストレス》的な点に着目して, 合成構造を開発することを意図したものである。すなわち, 高耐久性材料であるポリマー含浸コンクリート (Polymer Impregnated Concrete : 以下 P I C と称す) で製作された曲面構造部材をプレキャスト埋設型枠として用い, 現場打ちコンクリートとの組み合わせで構成される合成構造を開発することを最終目的としたものである。

P I C 版は, コンクリートの微細な空隙までポリマーで含浸されているため, 遮塩・遮水性, 耐凍害性,

*	工博	長崎大学助教授	工学部構造工学科	(〒852 長崎市文教町1-14)
**	工修	小沢コンクリート工業(株) 技術研究所 副部長		(〒168 東京都杉並区上高井戸1-7-16)
***	工修	長崎大学助手	工学部構造工学科	(〒852 長崎市文教町1-14)
****	工博	長崎大学教授	工学部構造工学科	(〒852 長崎市文教町1-14)
*****	工博	長崎大学助教授	工学部構造工学科	(〒852 長崎市文教町1-14)

耐摩耗性、化学抵抗性に優れており、さらに、表面を粗面処理すれば、現場打ちコンクリートとの付着性にも優れ、コンクリート構造物の有効断面として考慮できる特徴を有している¹²⁾。また、P I C 版は工場製作されるため、任意形状のパネルを作製することができる。

鋼製アーチ系構造物の耐荷力に関しては、実験的および理論的な研究が数多くなされてきているが、コンクリート系材料よりなるアーチ系構造物の破壊試験に関しては、大浦ら^{2,3)}が鋼管コンクリートアーチ構造をコンクリートアーチ橋架設用アーチ支保工へ適用するために破壊実験を行っている程度で、その他では国内ではほとんど見あたらない³⁾。また、解析的な研究では、大分自動車道の別府橋（コンクリートアーチ橋）に対して、終局限界状態の照査の一つとして、構造系全体の非線形性を考慮した耐荷性能について検討がなされている⁴⁾。

本論文は、曲面形状をしたP I C 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、まず、P I C で製作されたアーチ系構造物材の載荷実験を行い、その崩壊変形状や変形性能の基本的特性を明らかにしようとするものである。このような構造を実構造物との対応で考えるとき、極く小さな支承点の水平変位によって力学的特性が著しく変化するので、これに着目した構造処理をする必要がある。その処理方法として、アーチの下弦材（タイ材）に鋼棒、あるいは、CFRP ストランドを用い、水平推力を受け持たせる構造を用いた。

2. 実験供試体

2. 1 P I C 版

(1) 使用材料

P I C 版に用いた短繊維補強コンクリート（以下、基材）の配合、および、基材および基材に含浸させる使用材料を、それぞれ、表-1、および、表-2 に示す。

(2) P I C 版の製造方法

P I C 版は、図-1 に示すように、一般のコンクリートと同様の方法で製作した厚さ15～40mm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、ポリマー含浸材を含浸・重合させ充填し、緻密にした複合強化材料である。したがって、P I C は物理的強度（圧縮・引張り・曲げ強度等）などの飛躍的な向上によって、耐衝撃性、耐摩耗性に優れているだけでなく、塩素イオンなどの有害物質に対しても、十分な遮断能力を発揮し、耐久性・耐食性においても優れた特性を有している。

表-1 基材コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
			水	セメント	細骨材	粗骨材	短繊維	高性能減水材
10	38	56	190	500	892	756	5	5

表-2 使用材料

基 材	セメント 細 骨 材 粗 骨 材 短 繊 維 高性能減水剤	JIS R5210 の適合品（ポルトランドセメント） JIS に適合する堅硬な骨材を使用 同 上 SUS-304 (0.3×0.4×15mm) JIS A6204 に準拠（コンクリート用化学混和剤）
	ポリマー含浸材料	JIS R5210 の適合品（メタクリル酸メチル(MMA)） アゾビスイソブチロニトリル (AIBN) モノマー(MMA)：触媒(AIBN)=100：1

表-3 P I C および緊張材の物性試験結果

P I C		緊 張 材	
圧縮強度 (kg/cm ²)	1500		
曲げ強度 (kg/cm ²)	240	P C 鋼棒	CFRPストランド
引張強度 (kg/cm ²)	120	断 面 積 (mm ²)	415.2 76.0
弾性係数 (kg/cm ²)	3.5×10 ⁵	弾性係数 (kg/cm ²)	2.0×10 ⁶ 2.0×10 ⁶

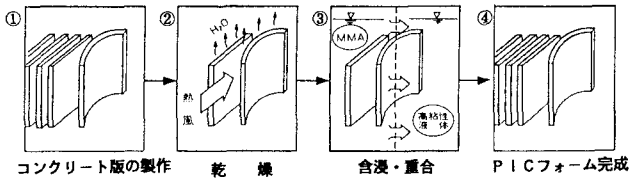


図-1 P I C 版の製造方法

2. 2 供試体の形状

本実験で用いた供試体は、図-2に示すように、スパン120cm、ライズ26cm、断面幅30cm、中央部の厚さ3cmおよび端部厚さ6cmの変断面放物線アーチ部材を作製した。水平推力の処理形式としては、鋼および高強度繊維からなる連続繊維緊張材（CFRPストランド）を緊張材として用い、アウトケーブル形式で受けもたせる自己つりあい形式の構造を採用した。表-3に、PIC、および、緊張材として用いた鋼棒およびCFRPストランドの物性値を示す。

緊張材の伸び剛性が非常に大きい場合は、2ヒンジャ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ストランドの定着には、現在、ハイテク繊維材の定着法として、研究開発が進められている方法、すなわち、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⁵⁾。

2. 3 荷重方法

荷重荷重方法は、アーチクラウン部にロードセルを介して、200ton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。また、支承部は、両端とも回転および移動を可能とし、軸方向の拘束の影響をなくした。図-3に荷重装置を示す。

実験に際しては、供試体のたわみ、水平反力、PIC版や緊張材各部のひずみ、および、緊張材の変位などを計測した。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図-3に示すように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。また、緊張材の変位は、緊張材の図-3に示す位置に、PC鋼棒の場合は鉄筋ゲージを貼付し、CFRPストランドの場合は伸び計を設置して測定した。

4. 実験結果および考察

PC鋼棒およびCFRPストランドを緊張材として用いた2供試体の荷重実験結果および数値解析結果について以下に示す。

PC鋼棒およびCFRPストランドを緊張材として用いた場合の荷重荷重と中央点のたわみの関係を、各々、図-4および図-5に示す。同図中において、実線は実験で得られた結果であり、点線の(0-a)部分はFEMによって計算された線形弾性計算結果である。実験結果より荷重荷重から約1tonまではわずかながらも下側凸状の曲線を示す。これは荷重荷重が1tonくらいまではまだ緊張材に作用する力は小さい(図6から読み取ると荷重荷重1tonのとき、緊張材1本当たり作用する力は約300kgである)ので、定着部での

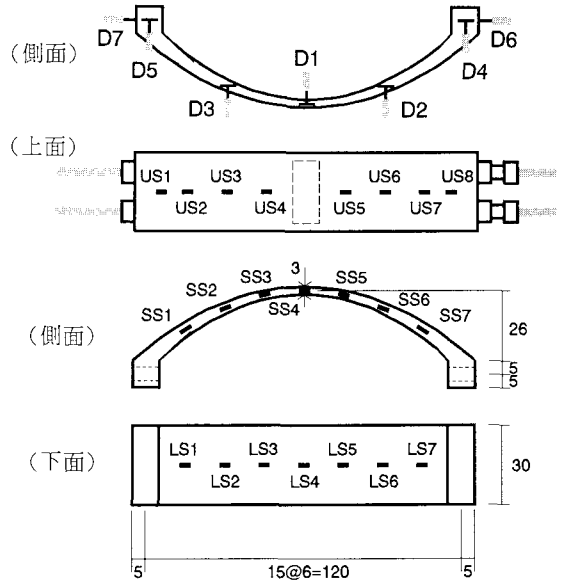


図-2 供試体形状 [単位：cm]

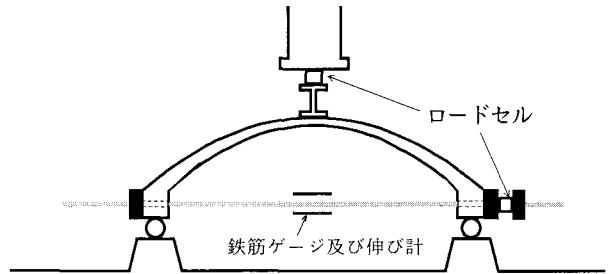


図-3 荷重装置

なじみなどによる影響と考えられる。荷重が1 tonを超えた付近からアーチクラウン部にひびわれが発生するまではほぼ直線を示している。線形弾性計算結果は実験結果と比較すると少し大きめの剛性を示すが、直線部分の傾きは線形弾性計算結果とほぼ一致していることがわかる。

緊張材の材料による挙動特性の違いを調べるため、PC鋼棒は両端ピン支持に近い挙動特性を示すように断面積が大きい剛な鋼棒を用いた。図-4、図-5および、図-7から明らかなように、CFRPストランドを用いた場合、中央点のたわみ、および、緊張材の変位がかなり増大することがわかる。

また、実験ではスパン中央部にひびわれが発生すると急激に断面中央部付近までひびわれが進行した。実験結果にもみられるように、そのときを境に構造系が変化したものと考えられる。したがって、計算では、中立軸より下縁の1/3での応力がP I Cの曲げ引張り強度(240 kg/cm²)に達したときの荷重値を、それ以上の荷重に対する構造系との限界荷重値とした。中央部にひびわれが発生した後の構造系の荷重とたわ

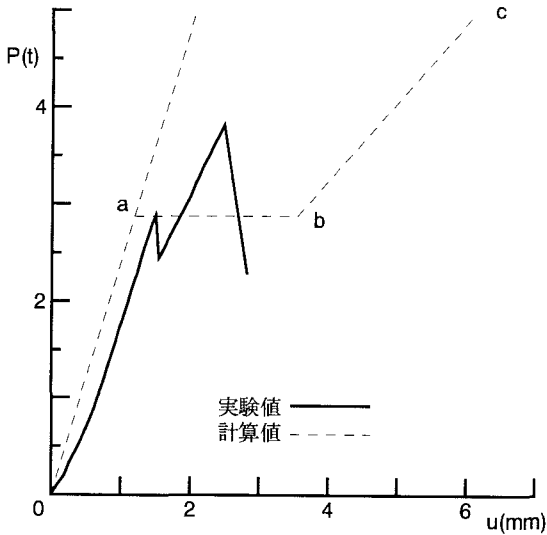


図-4 荷重-中央点たわみ曲線(PC鋼棒)

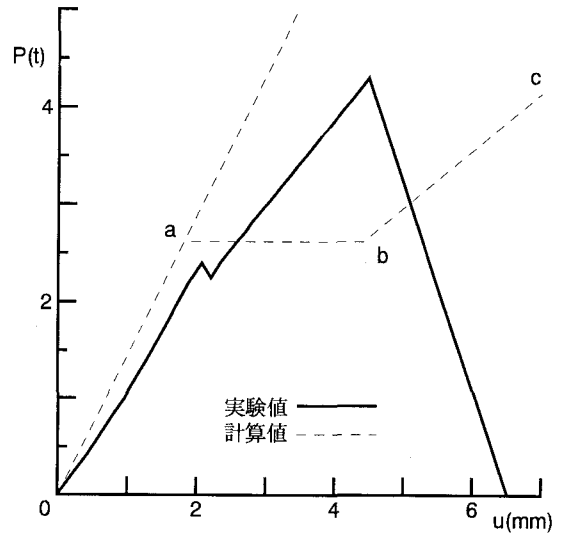


図-5 荷重-中央点たわみ曲線(CFRP)

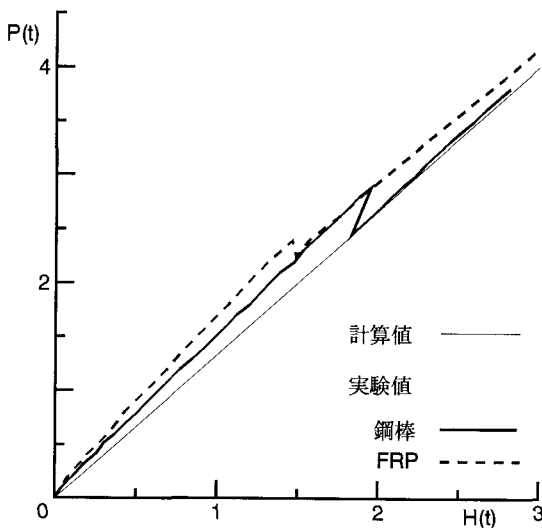


図-6 載荷荷重(P)-端部水平反力(H)曲線

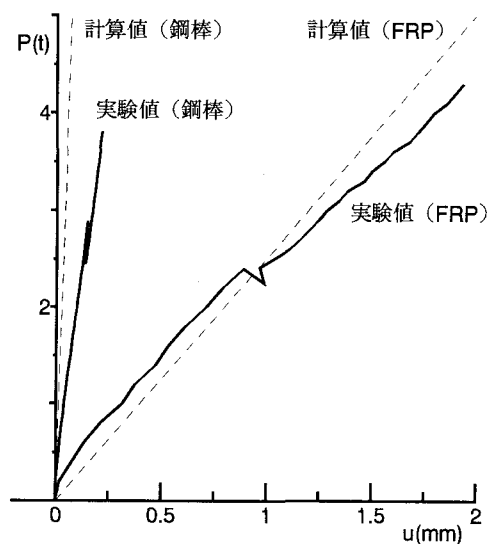
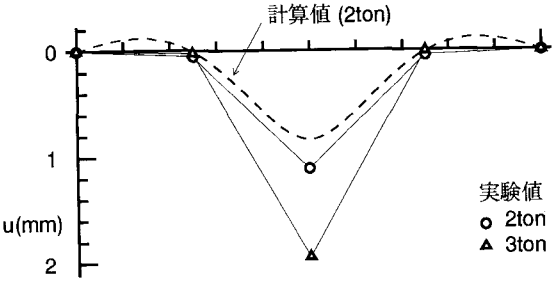
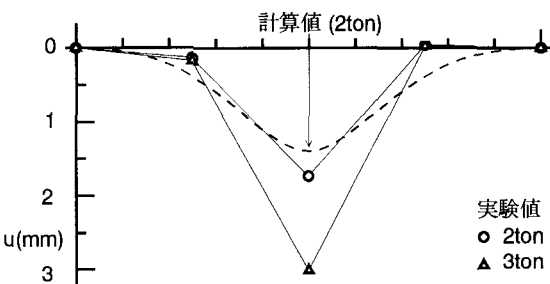


図-7 載荷荷重-緊張材変位曲線

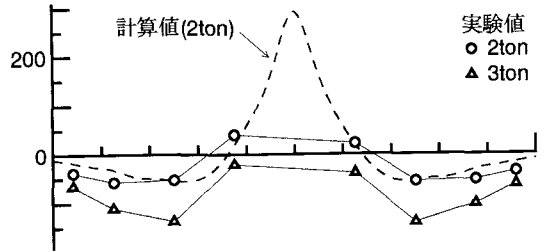
みの関係（実験結果）もほぼ直線を示している。点線(b-c)部分は、スパン中央点の回転が自由となるような塑性ヒンジが形成されたとした、すなわち、3 ヒンジャーチとして計算した線形弾性解析結果である。実験結果と比較すると、中央部にひびわれが発生した後の構造系は、2 ヒンジャーチと3 ヒンジャーチとの中



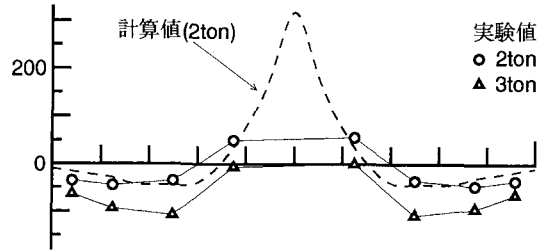
(a) たわみ分布曲線 (PC鋼棒)



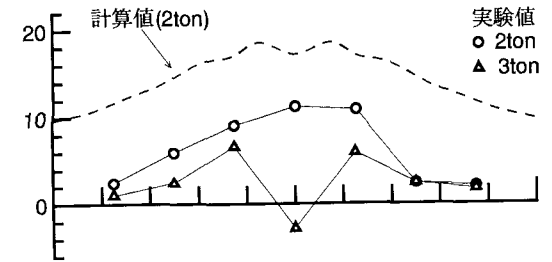
(a) たわみ分布曲線 (CFRP)



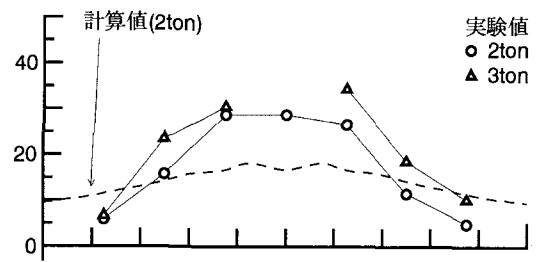
(b) 応力分布 (上面) 曲線 (PC鋼棒)



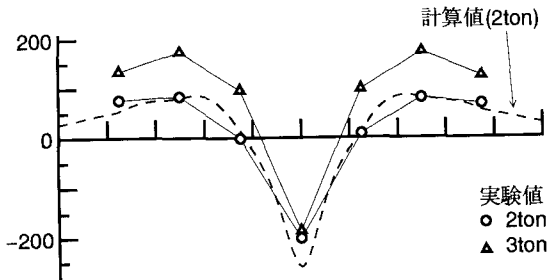
(b) 応力分布 (上面) 曲線 (CFRP)



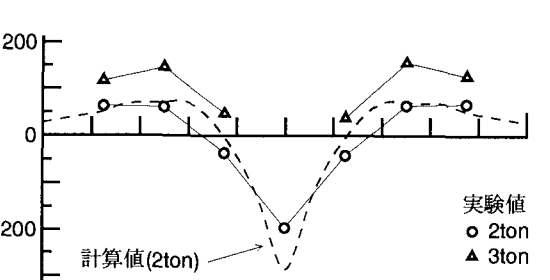
(c) 応力分布 (側面) 曲線 (PC鋼棒)



(c) 応力分布 (側面) 曲線 (CFRP)



(d) 応力分布 (下面) 曲線 (PC鋼棒)



(d) 応力分布 (下面) 曲線 (CFRP)

図-8 たわみおよび応力分布 (P C 鋼棒)

図-9 たわみおよび応力分布 (C F R P)

間程度（2 ヒンジアーチにより近い）の塑性ヒンジが形成された場合の挙動を示すことがわかる。P I C の圧縮強度が 1500kg/cm^2 と大きいので圧縮域でのアーチ作用を維持できるものと考えられる。

図-6 は載荷荷重と端部における水平反力との関係を示したものである。水平反力は、図-2 に示すように、緊張材の端部に設置した2 個のロードセルの実験値の和で表したものである。緊張材に鋼棒あるいはCFRP ストランドを使用した両試験体ともほぼ同じ水平反力を示すことが確認される。

図-7 は載荷荷重と緊張材（1 本）の変位との関係を示したものである。緊張材の変位は、PC 鋼棒を用いた場合には鋼材に貼付した歪ゲージの実験値を、また、CFRP ロッドを用いた場合には伸び計の実験値をもとにして算定したものである。限界荷重以下である $P = 2.0\text{ ton}$ のときのPC 鋼棒およびCFRP の伸びを、図-7 より、それぞれ、 0.1 mm 、 0.7 mm と読み取り、棒材の応力とひずみの関係式より緊張材に作用する力を計算すると、PC 鋼棒の場合 $H = 1.4\text{ ton}$ 、CFRP ストランドの場合 $H = 1.3\text{ ton}$ となる。この値は図-6 の結果とはほぼ一致している。

図-4 ～7 のいずれの図においても、緊張材としてPC 鋼棒を用いた場合には $P = 2.9\text{ ton}$ で、また、CFRP を用いた場合には $P = 2.4\text{ ton}$ で荷重が低下している。その荷重値のとき中央部下縁部にひびわれが発生し、いわゆる塑性ヒンジが形成された。しかしながら、中央部にひびわれが発生しても、上縁部のP I C は 1500kg/cm^2 の圧縮強度を有するので、まだ耐力を維持できる。これは中央部に塑性ヒンジが形成されてもまだ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であるからと考えられる。その後、PC 鋼棒を用いた場合 $P = 3.8\text{ ton}$ で、CFRP を用いた場合 $P = 4.3\text{ ton}$ で最大荷重に達した。この荷重のときアーチスパンの四分の一付近上縁にひびわれが発生し、破壊に至った。

緊張材としてPC 鋼棒を用いた場合の $P = 2\text{ ton}$ 、 3 ton におけるたわみ分布、および、アーチ上面、側面、下面における応力分布を、各々、図-8 (a)～(d)に示す。また、CFRP ストランドを緊張材として用いた場合の $P = 2\text{ ton}$ 、 3 ton におけるたわみ分布、および、アーチ上面、側面、下面における応力分布を、各々、図-9 (a)～(d)に示す。図-8 および図-9 とも、 $P = 2\text{ ton}$ （○印）のときはまだアーチクラウン下面にひびわれが発生していないときの挙動を示し、また、 $P = 3\text{ ton}$ （△印）はひびわれ発生後の挙動を示している。図-8 (a)および図-9 (a)の点線は、 $P = 2\text{ ton}$ のときのFEMによる線形弾性解析によるたわみ分布である。図-8 (a)より、PC 鋼棒を緊張材に用いた場合は、アーチスパンの $1/4$ 付近から端部側では負のたわみ、すなわち、浮き上がりに近い現象が生じていることがわかる。また、図-8 および図-9 の(b)～(d)の応力分布より、アーチ中央部下面では引張応力、上面では圧縮応力が作用し、 $1/4$ 部分より端部側では下面には圧縮応力が、上面には引張り応力が作用していることを示していることがわかる。図中の点線は $P = 2\text{ ton}$ のときの線形弾性解析結果より得られた断面力をもとにし応力値を計算したものである。実

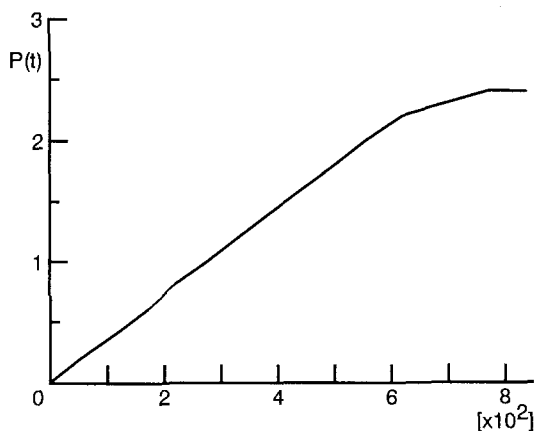


図-10 FRP：載荷荷重-下縁ひずみ曲線

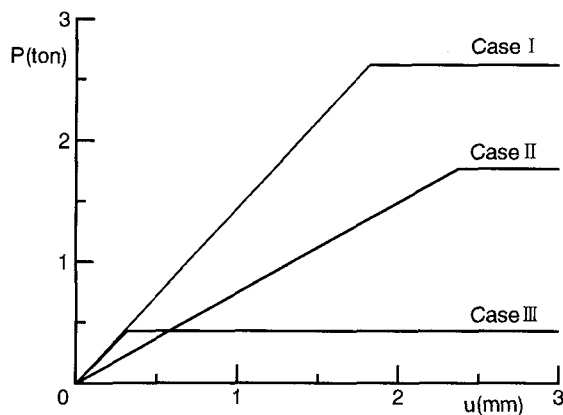


図-11 コンクリート系材料よりなるアーチ部材の耐力

験値と計算値はよく一致していることが認められる。

CFRPストランドを用いた試験体の実験では、アーチクラウン下面のひずみゲージ上にひびわれが入った。そのひずみゲージの荷重－下縁ひずみ関係を示したのが図－10である。同図より、P I Cの曲げ引張りに対する伸び能力は600 μ 程度あるものと推定される。この値を用いて曲げ引張り強度を計算すると $\sigma_b = 210 \text{ kg/cm}^2$ となり、表－3に示すP I Cの曲げ引張り強度(240 kg/cm^2)とほぼ一致する。

以上の結果より、計算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、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同様な試験を行った場合の計算結果について図－11に示す。緊張材としてCFRPストランドを用いるものとした。同図中、Case IはP I Cを用いた図－4の点線で示す計算結果、Case IIはP I Cを用いてアーチのライズをCase Iの1/2にした場合、および、Case IIIは通常のコンクリートを用いてアーチのライズはCase Iと同じにした場合の計算結果である。P I Cの曲げ引張り強度は240 kg/cm^2 とし、コンクリートの場合は圧縮強度 $\sigma_c = 300 \text{ kg/cm}^2$ 、曲げ引張り強度 $\sigma_b = 0.2\sigma_c = 60 \text{ kg/cm}^2$ として計算したものである。同図より、P I Cを用いた場合は、通常のコンクリートを用いた場合に比べて約6倍の耐力を示すことがわかる。

5. まとめ

高耐久性を有するP I C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P I C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、P I Cで製作されたアーチ系構造部材の載荷実験を行ったものである。実験結果より以下のことが明らかとなった。

- (1) 本実験で用いたようなP I C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。
- (2) 本実験で用いたような断面形状を有するP I C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 μ を超えるとひびわれが発生する。
- (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、P I Cでアーチ構造を製作すると耐力がかなり増大する。

6. あとがき

本研究ではP I Cアーチ系構造部材単体の中央点集中載荷実験を行ない、線形弾性解析結果と比較検討した。しかしながら、P I Cの有する高強度特性をアーチ系の構造部材に、より適確に反映させ、実構造に適用するためには、線形弾性解析にとどまらず、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と定量化のための非線形解析を充実すべきであると考えている。さらには、偏載荷重に対する検討、EPシェル、円筒シェルなどの種々の曲面形状を有するP I C版の挙動特性、および、曲面形状をしたP I C版を埋設型枠とした場合の合成構造の力学的特性を明らかにするために、耐荷力実験および耐荷力解析を行い、本研究の最終目的である曲面構造合成構造を開発するための基礎データを蓄積していく予定である。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費・奨励研究(A)(平成4年度)の補助の一部で行われたことを付記し、ここに謝意を表します。なお、実験およびデータ整理は長崎大学工学部大学院生瀬川兼二君をはじめ構造工学科当研究室の学生に手伝って頂きました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) ポリマー含浸コンクリートによる高耐久性埋設型枠材P I Cフォーム, 土木研究センター, 1990
- 2) 大浦隆・加藤雅史・田辺忠顕・島田静夫: コンクリートアーチ橋架設用アーチ支保工への鋼管コンクリート構造の適用に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, No. 84.12-1, pp.101-111
- 3) 島田静夫・加藤雅史・大浦隆・大下文則: 模型アーチの載荷破壊試験とその解析, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集, pp. 255-256, 1984
- 4) 坂手道明・一瀬久光・内藤静男・薦田敏郎: 長大コンクリートアーチ橋の耐荷性能に関する一考察, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, pp. 664-665, 1988
- 5) 原田哲夫・出光隆・渡辺明・高山俊一: 静的破砕剤を用いたF R P 緊張材の定着方法, プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 251-256, 1990

(1992年9月21日受付)