

## 論文 全体系模型による RC アーチ橋耐荷性状確認実験

幸左賢二\*1・渡辺尚夫\*2・徳山清治\*3

要旨：細長比 $\lambda=75$ のRCアーチ橋の耐荷性状を1/15縮尺模型実験より調べた。実験では実橋の活荷重半載荷を模擬した載荷を行った。試験体は2ヒンジのアーチに移行して破壊した。実験結果を材料および幾何学的非線形性を考慮した複合非線形解析と比較して、解析で予測されたとおりのモーメント再配分が生じていることが明らかになった。また、細長比が不安定な座屈破壊と2次モーメントによる曲げ破壊に位置しているため、試験体は両者の破壊性状を伴って破壊したことが推察されたが、破壊耐力は複合非線形解析によって評価できることがわかった。

キーワード：RCアーチ橋，座屈，複合非線形解析

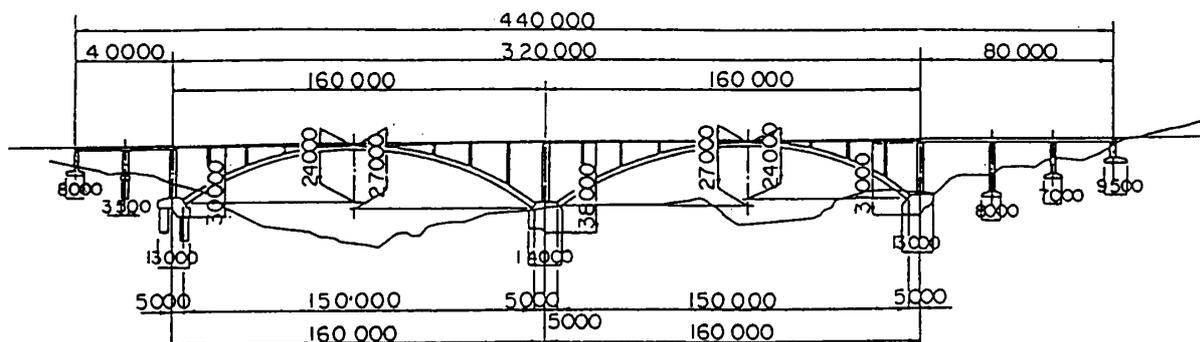
## 1. はじめに

一般に長大RCアーチ橋では、経済性などを考慮して両端固定アーチ形式が多く採用されている。両端固定アーチは不静定次数が高く、終局時の破壊耐力はひびわれ発生後の剛性低下に伴うモーメント再配分により、弾性解とは大きく異なることが明らかにされている[1]。このため、再配分の影響を考慮して構造系の耐荷力を評価する必要があるが、RC構造物における再配分、とくに軸圧縮力作用下の挙動について実験的に検討された例は少ない。

また、細長比 $\lambda$ が大きい同タイプの橋梁においては、面内座屈に関する検討が必要となってくる。道路橋示方書ではDINの規定を引用して、以下のように $\lambda$ の値で照査法を区分している。

20 <  $\lambda$  ≤ 70 : 有限変形による二次モーメント、いわゆる幾何学的非線形性を考慮した曲げ耐荷力照査

70 <  $\lambda$  ≤ 200 : 有限変形に加えて、鉄筋コンクリート部材の材料非線形性による影響を考慮した座屈照査



単位 (mm)

図-1 一般構造図

\* 1 阪神高速道路公団 工務部設計課技術係長、Ph.D (正会員)

\* 2 阪神高速道路公団 神戸第一建設部設計課 (正会員)

\* 3 鹿島技術研究所 第一研究部第1研究室長、工修 (正会員)

同基準によると、図-1に示す本研究対象橋梁である阪神高速道路北神戸線の水晶山橋（ $\lambda = 75$ ）では、規定上は不安定な座屈に対する検討が必要であるが、曲げ耐荷力照査と不安定座屈照査の境界付近に位置している。現在まで、不安定座屈に対する検討例が少なく、また解析の妥当性についても必ずしも明らかとはいえないため、場合によっては不安定な座屈破壊が曲げ破壊よりも大きく先行して生じることも考えられる。以上の観点から、本橋における耐荷力を評価するために、実橋を単純化した1/15縮尺模型の耐荷力実験を行い、モーメント再配分および破壊耐力についての検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験体

表-1に実験条件を示す。試験体（図-2）は実橋のアーチリング部のみを摘出した。

アーチリングのアーチスパン、アーチライズは実橋の縮尺1/15とし、断面は実橋と同じ $\lambda = 75$ となる矩形断面とした。また、軸方向鉄筋はDINの座屈照査断面である実橋のL/4点断面と同一鉄筋比の量を配置した。使用した材料は実橋と同様に、鉄筋は降伏強度 $3,800\text{kgf/cm}^2$ 、ヤング係数 $2.1 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$ のSD345相当品を用いた。コンクリートは設計基準強度 $400\text{kgf/cm}^2$ （実験時強度 $473\text{kgf/cm}^2$ ）、Gmax.20mmの早強セメントを使用した。

### 2.2 加力方法と測定項目

実橋の終局抵抗モーメント照査では、地震時荷重係数（破壊時水平震度を設計水平震度で割ったもの）が1.5と活荷重半載荷時係数8.0に比べて安全度が低い。しかし、実験で地震時を模擬した載荷方法には制約があるため、実験では活荷重半載荷を模擬して載荷した。

載荷は最初に8本の油圧ジャッキを用いて実橋の自重相当分（6.44tf/本）を加力し、その後、片側4本の自重相当分荷重を維持しながら（以下自重載荷側）、半載荷重として残り4本の荷重を均等に増加させた（以下半載荷側）。これら荷重は実橋と同じ鉛直材位置に載荷した。また、試験体が急激に破壊した場合を想定して、載荷は試験体を水平に寝かした状態で行ったが、試験体と床面との摩擦の影響をなくすため、摩擦抵抗が無視できるエアバッグとベアリングを組み合わせた支持装置を用いて試験体自重を7点で支持した。試験体のアバットは、P C鋼棒で床面に緊張して固定した。測定項目はアーチリング変位、実験の事前解析で予測されたひびわれ発生断面や破壊断面などの主要断面のコンクリートと鉄筋のひずみ、アーチリング基部の回転などである。

表-1 実験条件の一覧

	実 橋	実 験
形 式	2径間連続固定式 RCアーチ橋	実橋の単径間アーチリング
縮 尺	1/1	1/15
細 長 比 $\lambda$	75 (L/4点断面)	75
断 面 形 状	2室箱桁の変断面	矩形断面
主 筋	L/4断面；鉄筋比 $P = 0.54\%$	全断面；鉄筋比 $P = 0.54\%$
コンクリート	設計基準強度； $400\text{kgf/cm}^2$	実験時強度； $473\text{kgf/cm}^2$
鉄 筋	SD345	SD345相当
自重の影響	L/4点断面の圧縮応力度； $63\text{kgf/cm}^2$	L/4点断面の圧縮応力度； $63\text{kgf/cm}^2$ (自重相当分の載荷時)
検 討 荷 重	橋軸方向地震、活荷重半載荷	活荷重半載荷を模擬

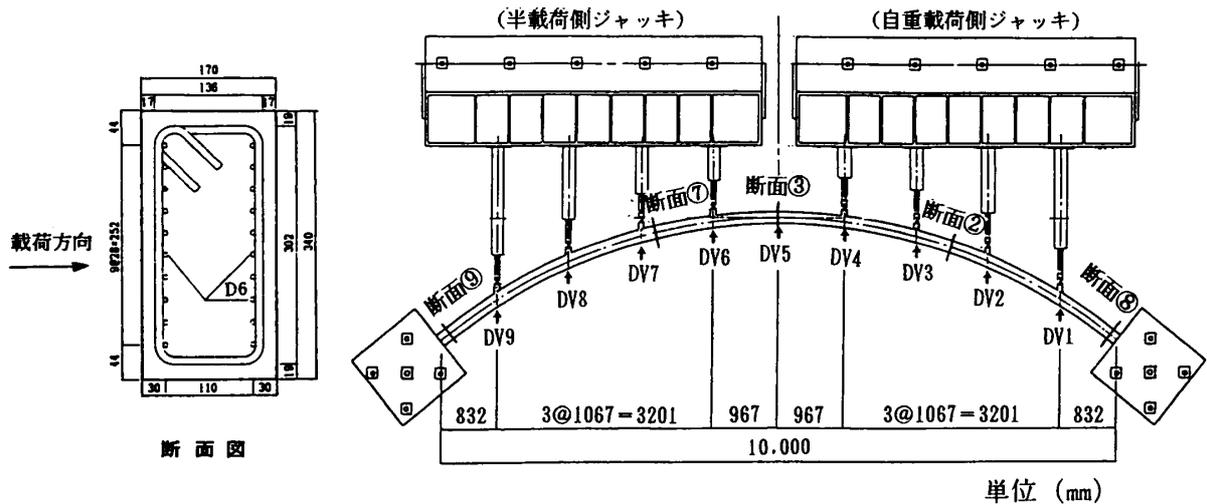


図-2 試験体形状図

3. 実験結果

表-2 に試験体に発生したイベントと推定される構造系の変化を示す。また、図-3 にL/4点近傍の断面⑦における荷重-たわみ変位の関係を示す。荷重（以下半載荷側ジャッキの荷重平均値）7.6tfで断面⑦にひびわれが発生した。その後、荷重8.0tfで断面⑧（自重載荷側のスプリング部）、8.4tfで断面⑨（半載荷側のスプリング部）に順次ひびわれが発生した。最初の塑性ヒンジは荷重10.2tfで断面⑦に形成されたが、わずかな荷重上昇のあと、荷重10.3tfで断面⑧が塑性ヒンジ化し、構造系としては1ヒンジから2ヒンジのアーチへと移行したと推定される。その後の荷重増加はほとんどなく、試験体はたわみや水平変位が増大して断面⑦の上縁コンクリートが3,200~4,300 $\mu$ （図-4）で圧壊して破壊した。

図-5 に試験終了後の試験体の半載荷側ひびわれ状況を示す。半載荷側では最初にひびわれ発生および塑性ヒンジが形成された断面⑦付近、および断面⑧に続いてひびわれが発生した断面⑨付近に、ひびわれが集中した。また、自重載荷側では塑性ヒンジが形成された断面⑧にひびわれが集中した。

表-2 試験体の変状挙動

半載荷側の荷重平均値 tf	断面⑦の鉛直変位 mm	試験体事象	構造系の変化
7.6	8.0	断面⑦ ひびわれ発生 ( $\epsilon_c \approx 100\mu$ )	半載荷側 自重側
8.0	9.9	断面⑧ ひびわれ発生 $\epsilon_c = 100\mu$	
8.4	12.4	断面⑨ ひびわれ発生 $\epsilon_c = 100\mu$	
10.2	29.6	断面⑦ 鉄筋降伏 ( $\epsilon_{sy} = 2,000\mu$ )	
10.3	33.1	断面⑧ 鉄筋降伏 ( $\epsilon_{sy} = 2,000\mu$ )	
10.3前後	53.3	断面⑦ コンクリート圧壊 $\epsilon_c = -3,200 \sim -4,300\mu$	

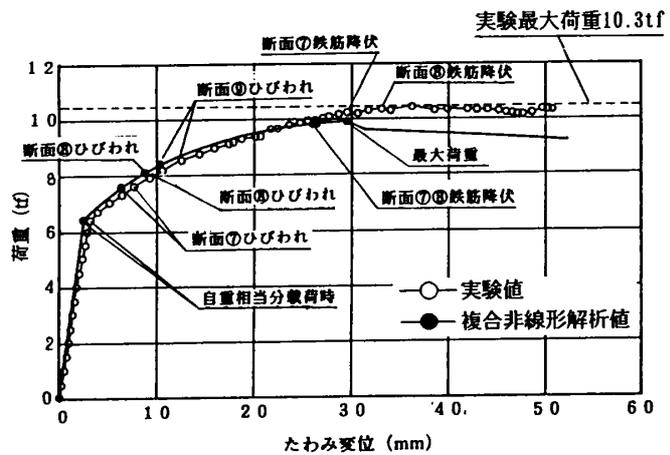


図-3 荷重-たわみ変位 (DV7) の関係

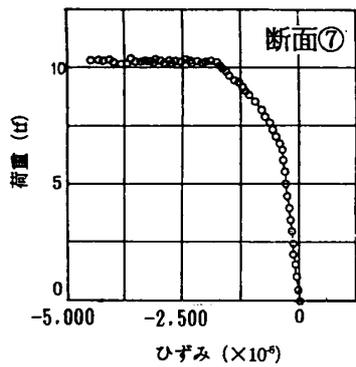


図-4 荷重-コンクリート圧縮ひずみ

4. 考察

4.1 鉄筋の抜け出し

アーチリング主筋のアバットからの抜け出し量によっては、最大荷重や変形、および塑性ヒンジの形成が異なることが考えられる。このため、抜け出しの影響を後述する複合非線形解析から検討した。解析では、主筋の抜け出しを、スプリング部の軸力は自重相当分の一定値とし、アバット内の主筋ひずみを三角形分布とし、また主筋降伏後は抜け出しが急増すると仮定して、図-6に示すモデルで評価した。図-7の解析結果に示すとおり、塑性ヒンジの形成に違いがあったものの、最大荷重や変形に抜け出しの有無による大きな影響はみられなかった。

また、図-6の実測値と解析モデルを比較して、実測値は解析モデルよりも抜け出しによる回転角が小さいことがわかった。また、この実測値は、スプリング部の主筋とアバットとの相対変位を計測して求めたため、実測値にはスプリング基部の曲げ変形を含んでおり、実際の主筋抜け出しによる回転角は実測値よりもさらに小さかったと考えられる。

このことから、実験の最大荷重に与える抜け出しの影響は少なかったと考えられる。なお、自重側と半載荷側のスプリング部で主筋抜け出しによる回転角が異なっていたが、これは半載荷重の増加に伴い半載荷側のスプリング部の軸力が大きくなったためと考えられる。

主筋の抜け出しは鉄筋径の影響を受けるが、試験体の主筋径 (D-6鉄筋) は、実橋の鉄筋径

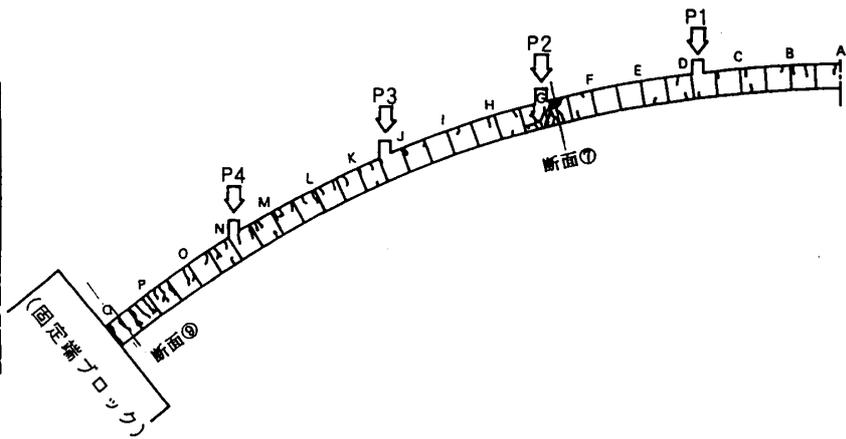


図-5 破壊後のひびわれ状況 (半載荷側)

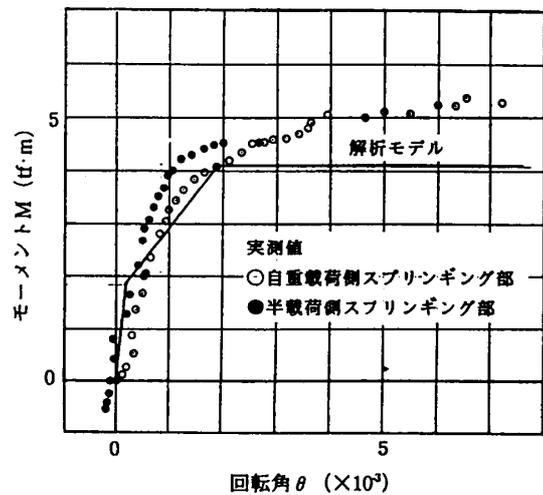


図-6 スプリング部のM-θ

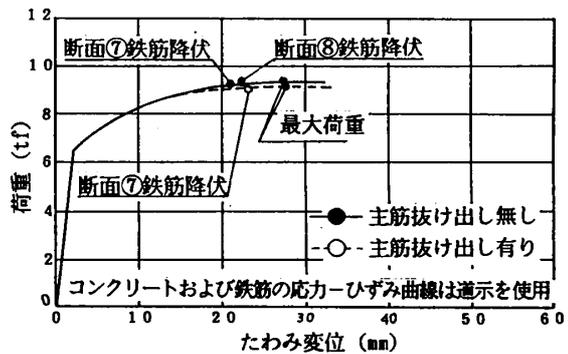


図-7 荷重-たわみ変位 (DV7) の関係

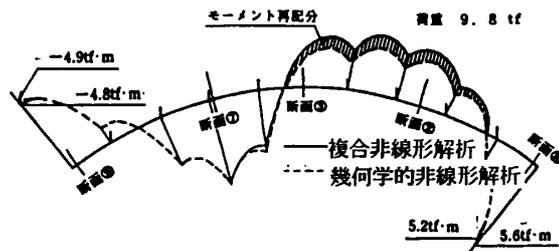


図-8 モーメント分布図

を模型縮尺でスケールダウンしたものよりも数倍も大きく、定性的には抜け出し量は実橋の方が小さくなると考えられる。このことから、実橋での抜け出しの影響はより小さいと思われる。

4. 2 モーメント再配分

材料非線形性によるモーメント再配分の効果を調べるために、幾何学的非線形を考慮した弾性解析と、さらに材料非線形を考慮した複合非線形解析を行った。

解析手法にはマトリックス変位法[2]を用い、試験体を軸線に沿った梁要素、断面をファイバー要素にモデル化した。複合非線形解析でのコンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮部には野口らによって提案されているモデル[3]、引張り部には岡村らの提案式[4]を用い、鉄筋は材料試験結果をもとに弾塑性モデルでモデル化した。また、アバットからの主筋抜け出しの影響は小さいと考えられたので、抜け出しの影響は考慮しなかった。

図-8に破壊直前でのモーメント分布を示す。モーメント再配分は破壊した断面⑦では少なく、自重載荷側のL/4点(断面②)やアーチクラウン部(断面③)で顕著である。断面②、③、⑦での荷重-モーメント関係について、解析結果と測定結果を図-9に示す。実測値として示した曲げモーメントは測定した断面内ひずみ分布(図-10)をもとに、ひずみ分布を最小二乗法により直線分布として求め、コンクリートおよび鉄筋の材料試験から得られた応力-ひずみ曲線を用いて応力分布に変換し、ついでこの応力を積分して求めたものである。

断面内のひずみはひずみゲージ、断面⑦、⑧、⑨についてはひびわれが集中すると考えられたので断面の有効高さ間の相対変位からの平均ひずみ測定を併せて実施した。また、曲げモーメントの測定は、コンクリートひずみや鉄筋ひずみがそれぞれ材料試験の最大応力、降伏応力に達するまでとした。

複合非線形解析値と測定値は良く一致しており、また再配分は断面⑨のひびわれ発生後に大きく表われたことが分かる。このことから、試験体には複合非線形解析で予測したとおりのモーメント再配分が生じたと考えられる。

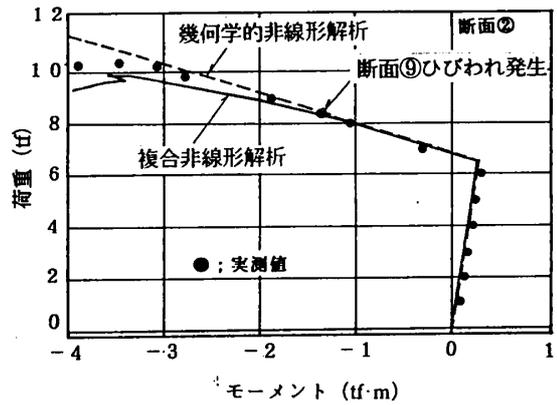


図-9(a) 荷重-モーメントの関係(断面②)

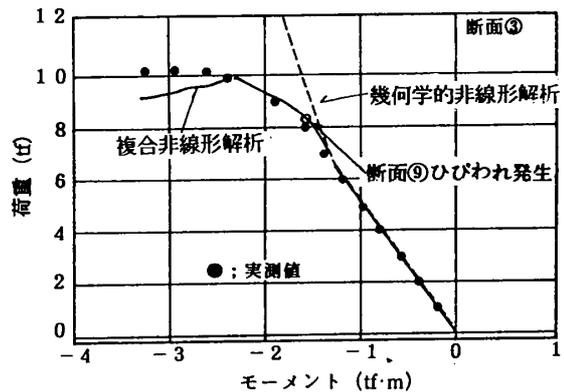


図-9(b) 荷重-モーメントの関係(断面③)

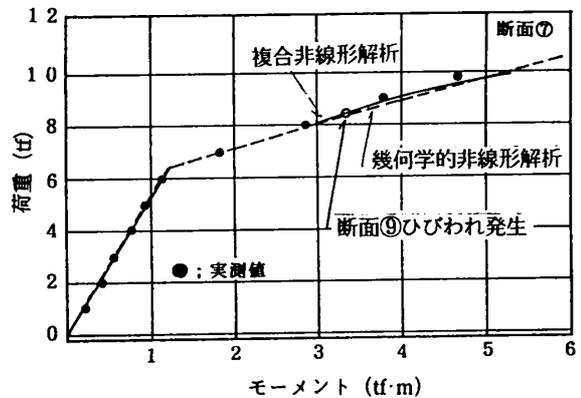


図-9(c) 荷重-モーメントの関係(断面⑦)

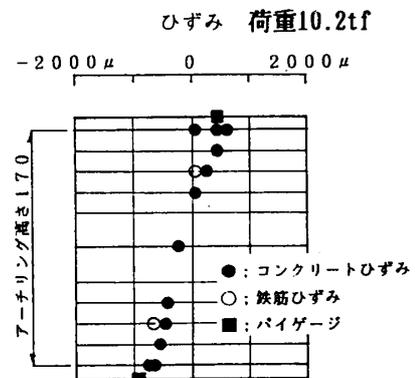


図-10 断面③のひずみ分布

#### 4. 3 破壊性状と破壊耐力

一般には、不安定な座屈破壊では安定なつり合い状態から不安定なつり合い状態に移行して破壊し、荷重は安定から不安定に移行する極限つり合い状態で最大荷重を示すと考えられる。

試験体は2ヒンジのアーチに移行してから一定荷重を保持しながらたわみや断面内のモーメントが増大して破壊した。荷重に明瞭なピーク値が認められず、不安定な座屈破壊を起こしたか、あるいは2次モーメントによって曲げ破壊したかの判別は困難であった。

断面⑦における荷重-たわみ変位について、実験結果と前述した複合非線形解析結果との比較を前掲の図-3に併記した。解析結果はひびわれ発生、鉄筋降伏のイベント順序が実験値と一致しており、荷重-たわみ変位ともほぼ対応していた。

解析結果の最大荷重は、構造全体の接線剛性マトリックスに負の固有値を有する特異点であり、最大荷重は不安定な座屈破壊耐力を表わす[5]。しかし、この後の荷重が急減しているとおろ、最大荷重後には断面⑦の圧縮部コンクリートが軟化域に入っており、不安定な座屈破壊と曲げ破壊が近接していたことが考えられる。

これら実験および解析結果から、試験体はDINの規定に示されるとおり2次モーメントによる曲げ破壊と不安定な座屈破壊の境界付近に位置しているため、両者の性状を伴って破壊したと考えられる。なお、複合非線形解析結果では不安定な座屈破壊が先行する結果となったが、最大荷重は破壊の種別にかかわらずほぼ同等と考えられるため、実橋の破壊耐力は複合非線形解析で評価できると考えられる。

#### 5. まとめ

RCアーチ橋を対象とした、実橋の1/15縮尺の模型実験および複合非線形解析を実施し、その結果以下のことが明らかになった。

- 1) 試験体の最大荷重に与えるアバットからの主筋抜出しの影響は少なく、実橋においても同様と考えられる。
- 2) ひびわれ発生後に、アーチクラウン部や自重載荷側のL/4点近くの断面でモーメントの再配分が認められ、またこれら断面内のモーメントは複合非線形解析結果とよく一致することが明らかとなった。
- 3) 試験体は最終的に2ヒンジのアーチに移行して、半載荷側のL/4点近くの断面でコンクリートの圧壊により破壊した。試験体は2次モーメントによる曲げ破壊と不安定な座屈破壊の境界付近に存在しているため、両者の性状を伴って破壊したと窺われるが、最大荷重は複合非線形解析により評価できることが分かった。

#### 参考文献

- 1) 上田芳夫・幸左賢二ほか：RCアーチ橋の耐荷力および破壊性状に関する研究、土木学会論文集、No.472/V-20、pp.29-38、1993.8
- 2) 沖見芳秀・右近八郎：複合非線形フレーム解析システムの開発、土木学会誌 技術最前線、Vol.80, No.1、pp.14-17、1995.1
- 3) 飯塚崇文・野口博：普通強度から高強度コンクリートまでを対象とした圧縮特性の定式化、構造工学論文集、Vol.37B、pp.329-338、1991.3
- 4) 出雲淳一・島弘・岡村甫：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル、コンクリート工学論文集、Vol.25、No.9、pp.107-120、1987.9
- 5) 福本嘯士ほか：座屈設計ガイドライン、土木学会、pp.31-32、1987.10