

論文

[2027] RC アーチ橋耐荷力解析

上田 芳夫 (阪神高速道路公団)

正会員 ○幸左 賢二 (同上)

正会員 宮本 文穂 (神戸大学土木工学科)

正会員 若狭 忠雄 (新構造技術)

1. まえがき

一般に構造物の設計は、種々の荷重によって生じる応力度、変形を許容値以下におさめる許容応力度法を用いてなされることが多い。許容応力度法によって設計された構造物は設計荷重に対しては十分抵抗することが出来るが、大地震のような設計を超える荷重が作用した場合にはどれだけの荷重に耐えうるかを許容応力度法で評価することは困難である。一般的に構造物の安全な設計を実施するためには、終局時に構造物がどのような挙動を示すか照査する必要がある。特に不静定構造物においては、ある部材が降伏点を超えて塑性変形を生じても、まだ応力度に余裕のある部材が塑性状態に入った他の部材の負荷能力を分担することによって大きな破壊耐力を持つ。このため弾性限界荷重を基準にして各部材ごとに一律の安全率を確保しても構造系全体として正しい安全率を確保したことにはならない。すなわち、構造物は極限強度に達すればその使用価値を失うから、構造物の設計は、極限強度に対してある一定の安全性が確保されるように行うのが合理的である[1]。解析対象橋梁は不静定次数の高い両端固定アーチ橋であり、モーメント再配分の影響が大きいと考えられる。そこでまず再配分の影響を考慮した非線形解析により構造系全体の破壊耐力、モーメント再配分率およびじん性等を検討した。その結果、地震時、活荷重時においてもアーチリング基部において最初に鉄筋降伏および破壊が生ずることが明らかになった。基部付近は拘束作用が生じること、鉄筋の抜け出しの影響等があり、解析手法のみで破壊形式、破壊領域を評価することは困難である。このため、実橋基部の1/10程度の供試体を作成し破壊耐力確認実験を実施した。ついで、実験で得られた基部付近のM- $\phi$ 曲線を用いて構造物全体系としての耐荷力の再評価を実施した(図-1)。

2. 耐荷力解析

2.1 解析モデル

対象橋梁は橋長440m,支間長150mの2径間連続固定対称アーチ橋である(図-2)。中間橋脚基礎は岩盤固定とみなすことができることから、その一連部についてモデル化を実施した。解析モデルは平面骨組モデルとし、鉛直材、補剛桁は剛性が小さく全体耐力に与える影響が小さいことから線形部材とし、アーチリングのみ非線形部材とした。

2.2 解析手法

数値計算は微小変形理論に基づくマトリクス変位法を用いた逐次荷重増分法により断面力の計算を行った。Mc(クラック発生),My(鉄筋降伏)後はM- $\phi$ 曲線の接線勾配から求めた剛性に逐次変更しながら平衡状態まで繰り返し計算した。荷重は自重(乾燥収縮を考慮)、地震水

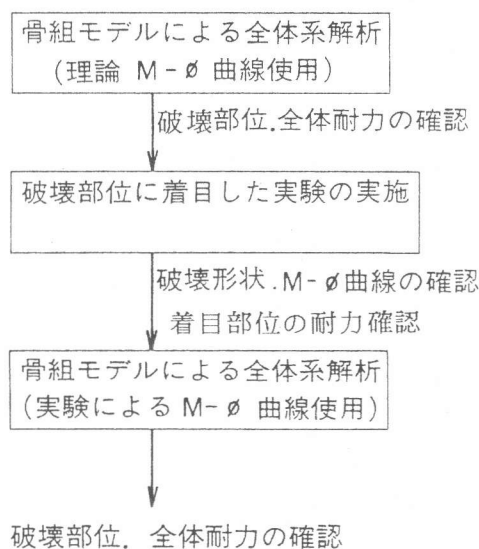


図-1 フローチャート

平荷重または活荷重を載荷し、各断面の $M_c, M_y, M_u$ （終局モーメント）時の荷重係数を求める。なお各断面の軸力がその断面の $N_u$ （軸力のみによる破壊耐力）値の0.5%変動（50t程度で耐力力への影響は小さい）するたびに $M-\phi$ 曲線を再計算して断面力を求めた。

### 2. 3 $M-\phi$ 曲線

前述の通り、各部材の $M-\phi$ 曲線を作成しておき、これを用いて剛性評価を行う。 $M-\phi$ 曲線の計算は、各断面におけるコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ曲線を仮定し、力の釣合条件から存在軸力( $N$ )における $M_c, M_y$ および $M_u$ と各々の曲率 $\phi$ を計算する。なお、 $M_u$ は圧縮コンクリート部において0.0035のひずみを生じたときのモーメントと定義した。

### 2. 4 材料強度

コンクリートの応力-ひずみ曲線は多数提案されているが、従来の研究からも耐力力に及ぼす形状の影響は小さいと考えられることから、道路橋示方書に示される曲線のみを採用した。

### 2. 5 解析パラメーター

解析パラメーターとしては次の項目について検討する。

1) 軸力変動（考慮するもの、軸力一定とするもの）：2) 鉄筋のひずみ硬化（考慮するもの、しないもの）：3) 曲率分布の分割長（ $l=d/4, l=d$ ）：4) 荷重組み合わせ（地震荷重、活荷重）  
解析ケースとしては標準ケース（軸力変動考慮、分割長 $l=d/4$ 、鉄筋のひずみ硬化考慮せず、地震荷重）に対して各項目のみを変化させた4ケースの合計5ケースについて検討を実施した。

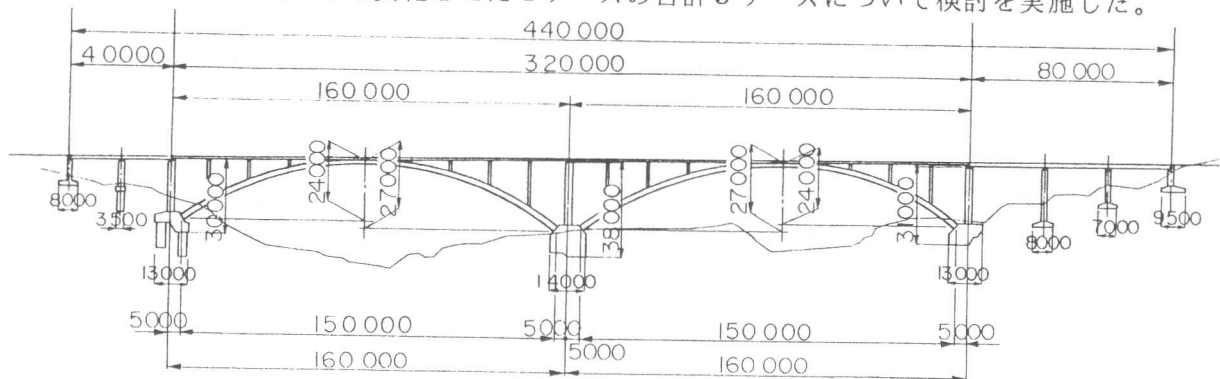


図-2 橋梁一般図

## 3. 耐力解析結果

### 3. 1 代表解析例

代表解析例として標準ケースの解析結果を示す。図-3に水平震度(荷重)の増加に伴う最大変位量の関係を示す。図-3において線形解析とは剛性を一定とし最大モーメントを生じる断面が $M_c, M_y, M_u$ に達した状態をいう。終局時最大変位量は、水平、鉛直方向とも中央点近傍31 $\phi$ イット付近に生じ水平変位137mm、鉛直変位304mmと線形解析値に比べて大きな変位量となる。しかしながら、終局時における長さ方向に対する最大横方向変形量は304/150000と小さい値となることから、全体座屈の問題は少ないと考えられる。クラック発生 ( $M_c=6321t \cdot m, \phi_c=1.502 \times 10^{-4}$ ) 鉄筋降伏 ( $M_y=8259t \cdot m, \phi_y=8.217 \times 10^{-4}$ ) 終局 ( $M_u=9162t \cdot m, \phi_u=179.54 \times 10^{-4}$ ) とともに左端基部(19断面)で最初に生じる。曲率じん性率 ( $\phi_u/\phi_y$ ) は22程度となり、多少小さめの値となった。これは基部付近では軸力が設計曲げ圧縮応力度(140kgf/cm<sup>2</sup>)の1/3程度と多少大きいためと考えられる。終局時地震荷重は $k_h=0.48$ となり、設計基準荷重( $k_h=0.22$ )の2.2倍となり非常に大きな耐力を有していることが分かる。図-4にアーチリング全体の曲げモーメント分布を示す。まず左端部において鉄筋の降伏が生じ塑性ヒンジを形成する。そのため剛性が低下し、回転能が増加するためにその後の左端部におけるモーメントの増加は少ない。これに対して右端付近は鉄筋降伏に達していないため

に、抵抗モーメントが増加しモーメントの再配分を促す結果となる。

### 3. 2 部材分割長の比較

本解析においてはひびわれ発生後区分間におけるM- $\phi$ 曲線は一定であると仮定している。このため、要素を大きく分割した場合、ひびわれ発生部以外に対しても断面の剛性低下を考慮することになり過小な部材剛性となる。本解析では大きなモーメントを生じる区間の分割長を変えた影響について照査した。解析結果を表-1、等価曲げ剛性低下の対比を図-5に示す。 $l=d$ と $d/4$ を比較すると、荷重係数は区分長 $l=d$ の場合の方が20%小さくなっている。これは分割長を小さくした場合、基部付近の回転能が大きくなるため右端部付近へのモーメントの再配分効果が大きくなるためと考えられる。しかしながら、後述するように実際の破壊試験では $d/4$ 程度の区間長で剛性低下が図-5のように連続的に生じることは困難である。このため分割長は $d$ 程度し、その区間の剛性低下を一定とみなす方が実際の挙動に近くなると考えられる。

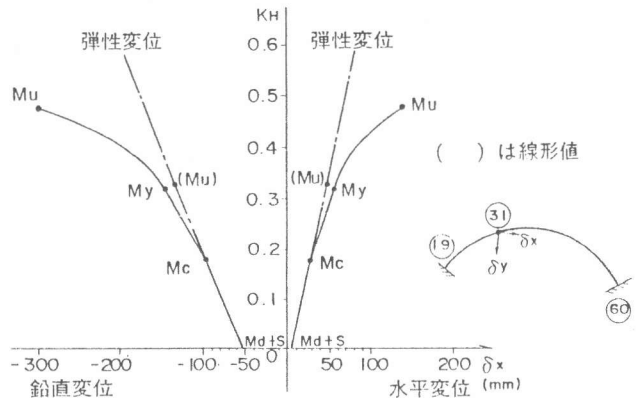


図-3 荷重-たわみ曲線

表-1 分割長影響解析結果

	水平震度	非線形/線形
基本震度	0.22	-
線形解析値	0.32	-
非線形( $l=2d$ ) *	-	1.12
非線形( $l=d$ )	0.40	1.25
非線形( $l=d/4$ )	0.48	1.49

\* 同種アーチ橋の解析結果

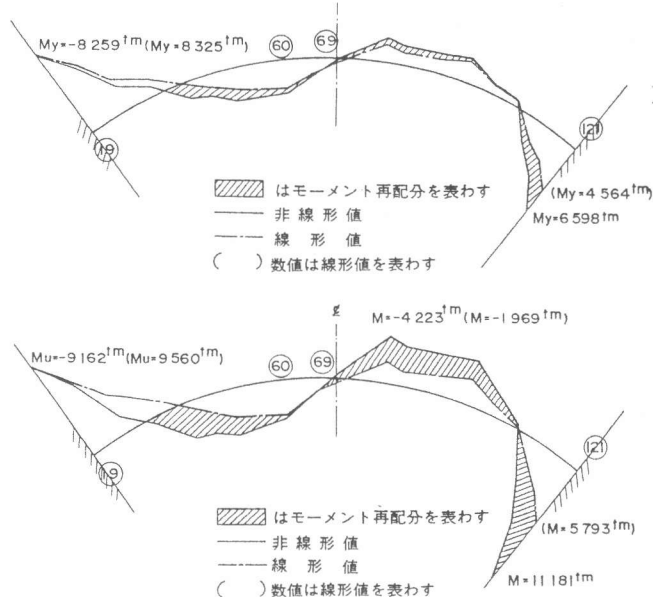


図-4 曲げモーメント図

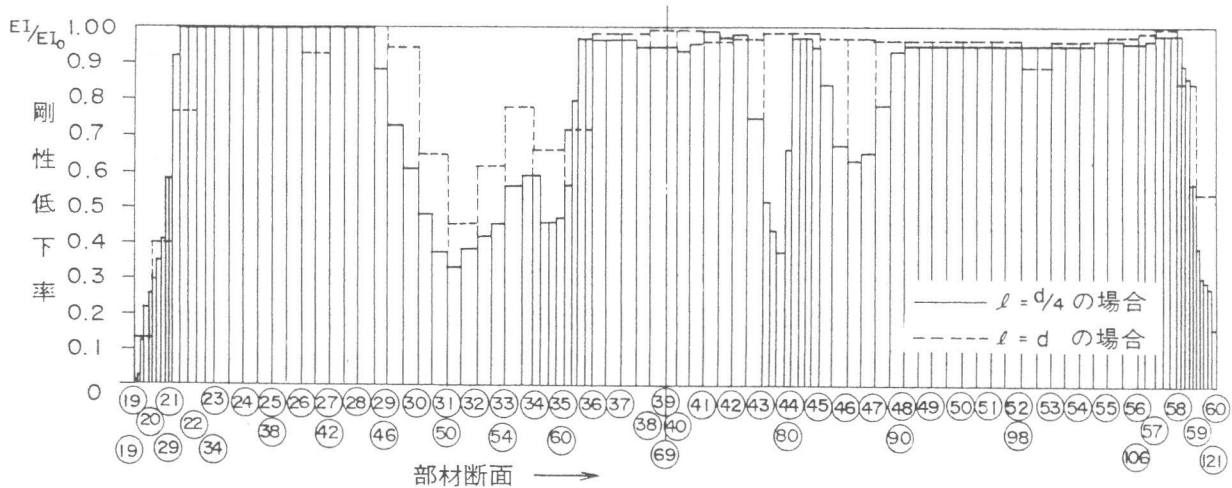
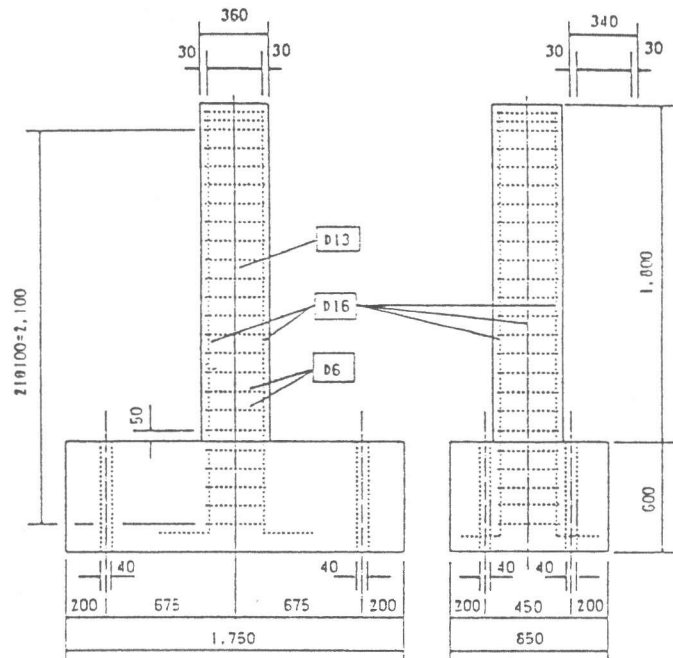
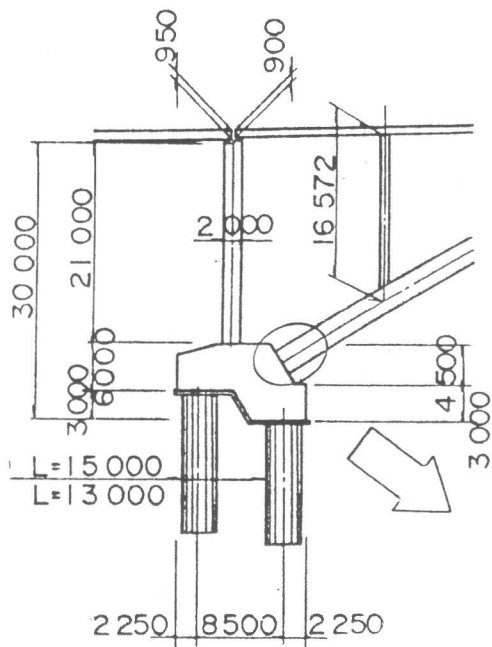


図-5 等価曲げ剛性低下の対比



#### 4. 耐荷力確認実験

図-6 基部モデル供試体図

##### 4. 1 実験目的

前述の解析方法により地震時、活荷重時とも設計荷重に対して大きな耐荷力をもつが、破壊はアーチリング基部で生じる結果となった。既往の基部に対する研究によると、軸力、せん断比、鉄筋比等により破壊形態、耐力は大きく異なることが明らかにされている。また、本対象橋梁は一般土木構造物に比べて軸力は基部で $45\text{kgf}/\text{cm}^2$ と大きく、せん断比も大きいことから、土木構造物としては特異な範疇に属すると考えられる。そこで、以下の性状を確認するため基部をモデル化した実験を実施した(図-6)。

1) 高軸力作用下における基部の耐荷力および破壊性状確認

2) 橋梁全体系耐荷力評価のために必要となる破壊位置、破壊領域、破壊部近傍の局率分布確認

##### 4. 2 試験方法

供試体は縮尺1/10程度の部分模型で、柱部 $340 \times 360 \times 1800\text{mm}$ 、基部 $850 \times 1750 \times 600\text{mm}$ とし、すべて同一配筋として3体製作した(R-N1:両振り, 軸力=設計荷重相当(40.55t) P-N1:片振り, 軸力=40.55t P-N2:片振り, 軸力=設計荷重の2倍相当(34.62t))。鉄筋は主要鉄筋としてはSD35を使用し、コンクリートは設計強度 $400\text{kg}/\text{cm}^2$ 、最大粗骨材寸法15mmとし、基部、柱部を一体打設した。載荷方法は軸力を定荷重保持した状態で、水平方向荷重を破壊時まで両振り(または片振り)暫増繰り返し載荷した。

##### 4. 3 鉄筋の抜け出しの影響を除いたM- $\phi$ 曲線の評価法

基部コンクリートからの鉄筋の抜け出し量は、基部コンクリート内の鉄筋ひずみの積分値であると考えられる。本解析では、島らの実験結果に基づき鉄筋抜け出し量を算定した[2]。基部近傍のひずみ分布は、鉄筋の抜け出しによる回転ひずみと曲げひずみの合成ひずみ分布であると考えられる。曲げひずみによる曲率を求めるためには、基部コンクリートからの鉄筋の抜け出しによる部材の回転の影響を除去する必要がある。本検討では、部材の回転中心と中立軸位置は一致すると仮定し、次の2つの手法を用いた。

1) 補正1: 圧縮縁変位と引張縁変位を用いて鉄筋の抜け出しによる回転中心を求め、引張縁変位を補正して曲率を求める。

2) 補正2: 基部直上20cmの断面  
 の中立軸を鉄筋抜き出し断面にお  
 ける中立軸位置と仮定し、引張縁変位  
 を補正して曲率を求める。

## 5. 実験結果解析

### 5.1 基部の拘束の影響

図-7に高さ変化に伴う曲率分布  
 を示すが、基部より30cmの高さにお  
 いてはM-φ曲線の硬化が認められ  
 るが、高さ40cmの位置においては、  
 一般断面の解析値と一致しており、  
 硬化は認められられない。基部コン  
 クリートの拘束の影響は、ほぼ供試  
 体の有効高さd(33cm)の範囲におよん  
 でいることが分かる。

### 5.2 破壊時曲率の評価

補正值1、2の破壊時局率は解析値と大きく異なる  
 結果となった。これは破壊面におけるM-φ曲線算定  
 において基部付近の引き抜けが大きく影響し、破壊面  
 付近での中立軸等の設定条件により解析結果が大きく  
 異なることを示している。また、破壊の範囲を検討す  
 るため、高さ-曲率分布を求めた(図-8)。曲率分  
 布の急変点の長さは約30cmと供試体の有効高さd(33cm)  
 よりもやや小さな範囲になることが分かる。

## 6. 全体耐荷力解析

### 6.1 解析手法

基部モデルによる実験結果は拘束効果によるひずみ  
 硬化や鉄筋の抜け出し効果により基部付近のM-φ曲  
 線は一般部と非常に異なる結果となった。そこで、基  
 部付近の影響を考慮したM-φ曲線を用いて橋梁全体  
 系としての耐荷力評価を実施した。なお実験結果によ  
 ると1d程度離れた部材におけるM-φ曲線は理論解析値と一致したことから、基部付近1dの  
 区間のみを実験から得られた以下のM-φ曲線を用い、他の部材は理論解析上のM-φ曲線を用  
 いた。

#### 1) 補正1により得られたM-φ曲線(ケース1)

抜け出しの影響を取り除き理論値よりも終局ひずみがかなり小さいと仮定したもの

#### 2) 補正2により得られたM-φ曲線(ケース2)

抜け出しの影響を取り除き理論値よりも終局ひずみがかなり大きいと仮定したもの

#### 3) 実験により得られたM-φ曲線(ケース3)

実橋においても実験と同程度の鉄筋の抜け出しが生ずると仮定したもの

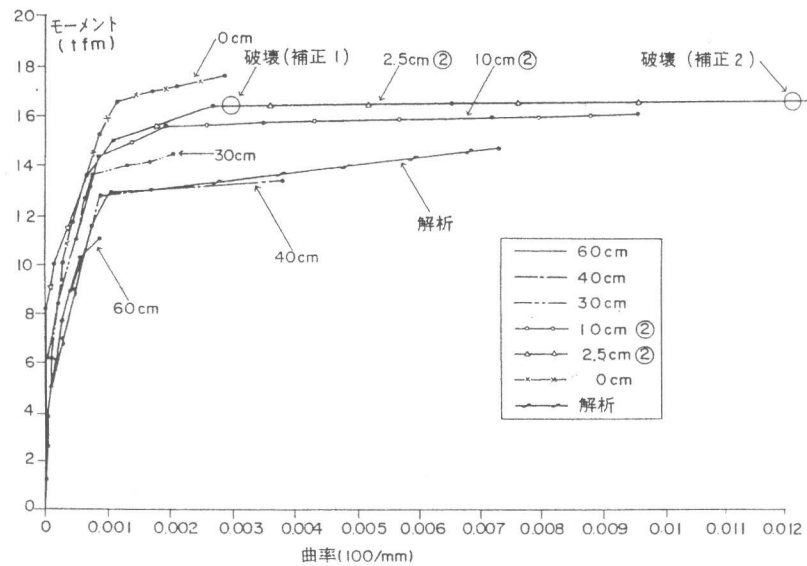


図-7 高さ方向によるM-φ曲線分布

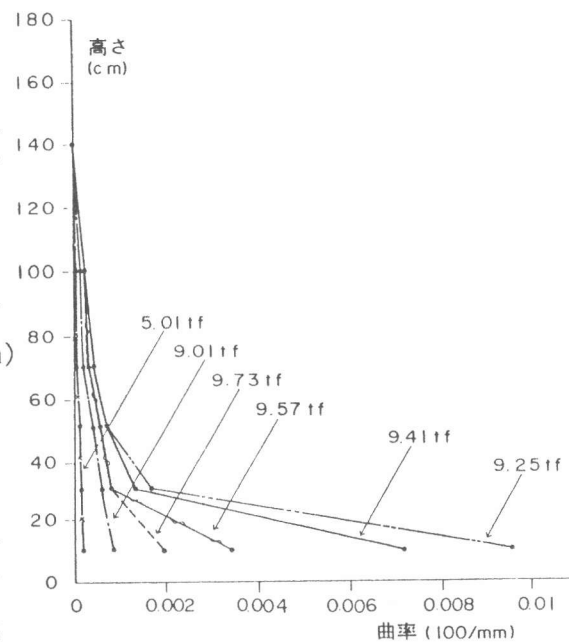


図-8 高さ-局率分布

## 6. 2 解析結果

解析結果を表-2、図-9に示す。ケース3の鉄筋抜け出し量考慮の場合、終局時の変形量、荷重係数とも理論解析値( $l=d$ )よりも大きくなる。これはMy発生時において基部付近に大きな変形能を生じるため、他の部材へのモーメント再配分効果が大きくなったためと考えられる。これに対してケース1、2は基部のM- $\phi$ 曲線が大きく異なるにもかかわらずほとんど同じ結果となった。この差が小さいのはM- $\phi$ 曲線の再配分効果に与える影響はM- $\phi$ 曲線のMy-Mu区間よりも、Mc-My区間の方が大きな影響を与えるためと考えられる。また、ケース1、2とも理論解析値にくらべても、基部付近の拘束効果により耐荷荷重係数、変形量ともに大きくなる。以上のことから、実験結果を用いた解析結果はいずれも理論値よりも1-2割程度さらに大きな耐荷荷重係数および変形性能を持つことが明らかになった。

表-2 全体耐荷力解析結果

解析ケース	荷重係数 Kh	曲げモーメント (t.m)		終局時最大たわみ	
		左端断面	右端断面	$\delta x$ (mm)	$\delta y$ (mm)
CASE 1	0.468	10.344	10.480	105	248
CASE 2	0.474	10.416	10.632	109	254
CASE 3	0.513	10.071	11.139	162	354
理論解析 $l=d/4$	0.477	9.162	11.181	137	304
" $l=d$	0.403	9.170	8.984	80	195
線形解析値	0.319	9.560	5.793	46	137

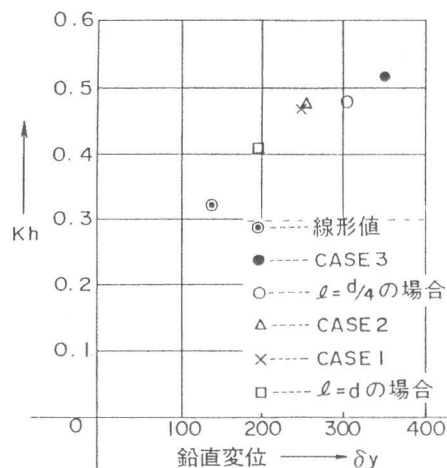


図-9 荷重-たわみ曲線

## 7. まとめ

コンクリートアーチ橋において実施した耐荷力解析及び実験の結果を以下にまとめる。

- 1) 地震作用時解析の結果は設計基準荷重に対して2.2倍程度の耐荷力を持つとともに破壊はアーチリング基部で生じた。また、線形解析との対比によるとモーメントの再配分効果により非線形解析結果は30-50%程度の耐荷力の増加が見込まれる。
- 2) 本解析では分割長および鉄筋ひずみ硬化等により10数%耐荷荷重が変動する可能性を示しており、今後特に分割長の取り方についてさらに検討する必要がある。
- 3) 実橋の1/10模型による耐荷力実験において、一般部におけるM- $\phi$ 曲線は理論解析曲線とほぼ同じ傾向となった。しかしながら、基部付近では拘束効果によるひずみ硬化、鉄筋の引き抜けの影響による回転ひずみを生じた。
- 4) 実験による破壊形式は曲げ破壊であり、終局破壊域は基部のd程度の範囲であった。また、基部付近の拘束の影響は $l=d$ の範囲に及んでいる。このことから基部dの範囲に破壊が集中し、様々な影響が作用すると考えられる。非線形解析においても分割長は $l=d$ 程度は確保しその破壊形態を考慮することが望ましい。
- 5) 実橋における詳細な耐荷力を予想することは困難さが伴うが、実験結果はいずれの要素も耐荷力が大きくなる可能性を示しており、非線形解析値程度は確保されていると類推される。

最後に本稿をまとめるにあたって貴重な助言を頂きました'阪神高速道路公団技術審議会コンクリート分科会(藤井学主査)'の各委員に深く謝意を表します。

参考文献:

1. 小西一郎他: 構造力学II
2. 島弘他: 異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性, 土木学会論文集, 第378号 /V-6, 1987.2.