

## ◆報文◆

## 鋼製橋脚の終局変位の算定方法に関する検討

運上茂樹\* 寺山 徹\*\*

## 1. はじめに

平成7年1月兵庫県南部地震による鋼製橋脚の被害の経験を踏まえ、鋼製橋脚の非線形域における動的耐力や変形性能について、各方面で模型供試体を使った正負交番載荷実験や解析的研究が行われ、研究成果が蓄積されつつある。鋼製橋脚の非線形域の挙動を考慮して大地震に対する耐震設計を行う場合には、鋼製橋脚の非線形履歴特性とともに終局状態を適切に与えることが最も重要になる。鋼製橋脚の終局変位の算定法については、塑性率と幅厚比パラメータや剛比、軸力比などの鋼製橋脚のパラメータとの関係を求める方法、終局状態と応力やひずみとの関係を求める方法など、各種の方法が提案されつつある<sup>1)</sup>。しかしながら、鋼製部材で構成される全体構造系の非線形解析や動的解析に活用可能な実務的な履歴モデルとしては必ずしも確立されていない。

本文では、構造全体系の非線形解析や動的解析を行う際に実務設計として使いやすい曲げモーメント-曲率( $M-\phi$ )関係あるいは曲げモーメント-回転角( $M-\theta$ )関係を基本とし、塑性ヒンジ部分のモデル化として、塑性ヒンジ領域と終局ひずみを用いた矩形断面鋼製橋脚の終局変位の算定方法について検討した結果を報告するものである。合計17体の鋼製橋脚模型の実験結果をもとに、鋼製橋脚の各種パラメータと終局ひずみとの関係を検討するとともに、実験から得られた終局変位と算定式から求めた終局変位を比較検討した。

## 2. 終局変位の算定方法

終局変位の解析方法としては、鉄筋コンクリート橋脚の変形性能の解析方法と同様に平面保持を仮定して断面の $M-\phi$ 関係を算出し、さらに終局状態では橋脚基部にある領域で損傷が生じるという塑性ヒンジを設定する手法を用いた<sup>2)</sup>。

基部固定で上部構造重心位置で水平力の作用を

受ける1本柱形式の鋼製橋脚の水平荷重-水平変位の骨格曲線を、図-1に示すように原点、降伏状態、終局状態を結ぶバイリニア型にモデル化した。このため、モデルを構築するときに必要とされるパラメータは、降伏変位 $\delta_y$ 、降伏荷重 $P_y$ 、終局変位 $\delta_u$ 、終局荷重 $P_u$ となる。

本研究では、実験から求められる終局状態としては、繰返し載荷において最大荷重に達したときと仮定した。終局点の定義方法には各種の考え方があり、変位の増加によって最大荷重に達し降伏荷重まで低下した時点、最大荷重の97%まで低下した時点など各種の考え方がある<sup>3)</sup>。ここでは、最大荷重を過ぎた時点で座屈等の変形が顕著に生じてくることと、終局点を理解しやすくすることを考慮して、水平荷重が最大荷重に達した時と設定して以下の解析を行った。ただし、これはあくまで定義上の問題であるので、終局点を他の定義とし同様に解析を行うことも可能である。

次に、解析に用いる材料非線形性については、降伏点以降を勾配0とする完全バイリニアと仮定した。ひずみの伸びによって強度が大きくなるひずみ硬化の影響等も考慮に入れるためにひずみ硬化モデルを用いることも可能であるが、ここでは簡単のために、完全弾塑性型とした。各断面の曲げモーメント-曲率関係は、図-2に示すように、降伏と終局を有するバイリニア型でモデル化した。

降伏状態と終局状態の断面内のひずみ分布としては、平面保持の仮定から、図-3に示すようにな

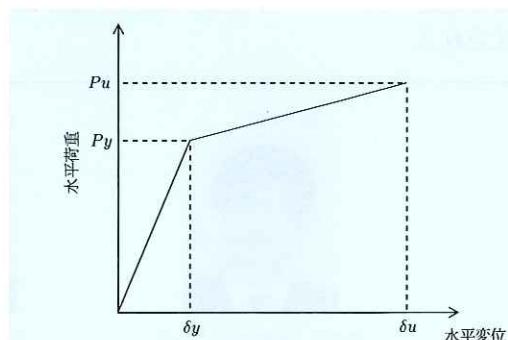


図-1 水平荷重-水平変位関係のモデル化

る。降伏時及び終局時ともにひずみ分布は直線分布となり、応力度は降伏時には弾性係数に比例した直線分布、終局時にはひずみ量に応じた応力度分布になる。

このような前提条件のもとでは、降伏変位 $\delta y$ 及び降伏荷重 $P_y$ は、弾性計算により次式により算出することができる。

$$\delta y = P_y \cdot h^3 / 3EI \quad (1)$$

$$P_y = 2(\sigma_y - N/A) \cdot I/bh \quad (2)$$

ここで、 $h$ ：橋脚基部から水平荷重作用位置までの距離、 $EI$ ：橋脚の曲げ剛性( $I$ ：断面二次モーメント)、 $\sigma_y$ ：降伏応力度、 $N$ ：軸力、 $A$ ：断面積、 $b$ ：断面幅、である。

終局変位 $\delta u$ については、図-4に示すように塑性ヒンジ領域を考慮して式(3)により、 $P_u$ については式(4)によりそれぞれ算出した。

$$\delta u = \delta y + (\phi u - \phi y) \cdot L_p \cdot (h - L_p/2) \quad (3)$$

$$P_u = (M_u - N \cdot \delta u)/h \quad (4)$$

ここで、 $\phi u$ ：断面の終局曲率、 $\phi y$ ：断面の降伏曲率、 $L_p$ ：塑性ヒンジ長、 $M_u$ ：断面の終局モーメント、である。

式(3)に示すように、塑性ヒンジ領域においてはある一定の終局曲率 $\phi u$ を有し、塑性ヒンジ領域の中心で回転性能を確保するという仮定から求められるものである。このため、終局変位を適切に求めるためには、終局曲率 $\phi u$ 及び塑性ヒンジ長 $L_p$ を正しく与える必要がある。本来ならば、鋼製橋脚の破壊モードなどから塑性ヒンジ領域の大きさとその中のひずみ分布、終局曲率をそれぞれ独立に定める必要があるが、両者を独立に与える方法については必ずしも十分に明らかになっていない。両者は、相互に関係する量であるので、一方を決めるともう一方がその影響を受けることになる。このため、鋼製橋脚に適用する $L_p$ として必ずしも明確な根拠があるわけではないが、終局状態においては基部周辺で損傷が生じ、この範囲はダイヤフラム間隔が影響するものと考え、ここでは、ダイヤフラム間隔の0.5倍と仮定した。なお、実際の損傷領域は、補剛材の剛度や細長比、降伏の発生領域など他の条件によっても大きく影響を受ける量であるので、これについてはさらに検討する必要があると考えられる。

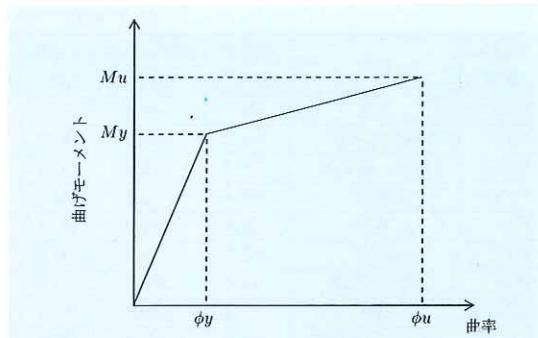


図-2 曲げモーメント-曲率関係のモデル化

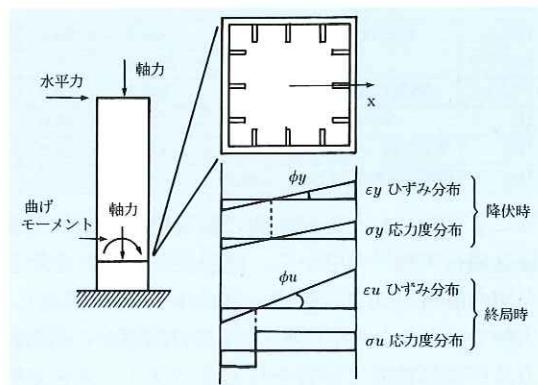


図-3 断面のひずみ分布と応力度分布

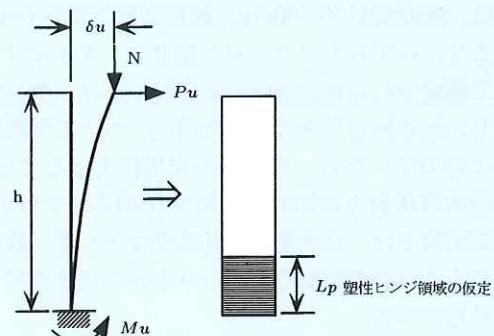


図-4 塑性ヒンジ領域を考慮した鋼製橋脚のモデル化

終局曲率については、ここでは断面の最外縁の圧縮フランジ位置における圧縮ひずみを終局ひずみとし、このときの曲率を終局曲率とした。前述のように塑性ヒンジ領域では同一の曲率を有すると仮定しているので、終局ひずみについても同様に塑性ヒンジ領域では一定となる。

### 3. 各種パラメータと終局ひずみの関係

#### 3.1 解析対象とした鋼製橋脚

解析対象とした実験データとしては、土木研究所

表-1 解析に用いた鋼製橋脚模型供試体

供試体番号	種類	断面積 A(cm <sup>2</sup> )	載荷点高さ h(cm)	断面幅 b(cm)	横リブ間隔 a(cm)	細長比 λ	軸力 (kN)	軸力比 (N/Ny)	幅厚比 R <sub>F</sub>	幅厚比 R <sub>R</sub>	降伏応力 σy(N/cm <sup>2</sup> )
No.2	基本	378.4	340.3	90.0	90.0	0.26	1,785	12.5%	0.56	0.59	379
No.3	縦リブ増設	455.2	340.3	90.0	90.0	0.26	1,785	10.7%	0.28	0.45	368
No.18	基本、軸力増	378.4	342.3	90.0	90.0	0.26	2,854	9.7%	0.57	0.59	382
No.20	基本	378.4	342.3	90.0	90.0	0.27	1,922	12.5%	0.59	0.61	408
T1	基本	378.4	500.0	90.0	84.0	0.39	1,785	12.1%	0.50	0.56	390
M8	基本	387.2	358.3	90.0	90.0	0.26	1,823	13.4%	0.65	0.85	352
M18	横リブ増設	378.4	358.3	90.0	25.0	0.26	1,783	13.3%	0.44	0.22	354
KD-1	基本	378.4	330.3	90.0	50.0	0.25	1,785	12.7%	0.45	0.45	372
KD-2	パラメータ制限	436.0	330.3	90.0	50.0	0.26	1,785	10.9%	0.45	0.26	377
KD-3	コンパクト断面	419.0	330.3	75.0	50.0	0.30	1,785	11.8%	0.46	0.27	360
KD-5	軸力増	419.0	330.3	75.0	50.0	0.30	2,432	16.6%	0.45	0.27	350
KD-6	細長比 up	282.7	330.3	60.0	40.0	0.39	1,206	10.9%	0.46	0.27	391
KD-7-1		256.4	330.3	54.6	36.4	0.42	902	9.4%	0.41	0.24	375
KD-10	補剛材入制限	467.4	330.3	72.0	36.0	0.30	2,197	14.8%	0.36	0.19	319
B1	基本	412.7	342.3	90.0	90.0	0.28	1,943	11.3%	0.59	0.49	415
H6	基本(横リブ増設)	386.0	600.0	81.8	37.0	0.55	1,285	7.9%	0.42	0.25	421
H8	剛比最適値の検討	386.0	600.0	81.8	64.0	0.55	1,285	7.9%	0.42	0.42	421

等により行われた矩形断面の鋼製橋脚の正負交番繰返載荷実験<sup>3)</sup>の中から、補強供試体などを除き今回の解析目的に合致する供試体17体を抽出し、実験で得られた水平荷重-水平変位関係から動的耐力及び変形性能に影響を与えるパラメータを分析した。表-1は、解析に用いた模型供試体の諸条件を示したものである。模型供試体の寸法条件としては、断面幅が50~90cm、載荷高さが3.3~6.0mであり、いずれもフランジと縦リブ、ダイヤフラムで構成される矩形断面鋼製橋脚であり、角補強などの補強構造等を付加した構造については解析には含めていない。実験時の作用軸力としては、断面の降伏耐力の約10%程度を作成させている。載荷実験では、降伏変位を基準変位として、載荷変位をこれの整数倍で増加させながら正負交番で載荷している。

なお、以下では、補剛材全体の幅厚比パラメータ R<sub>F</sub>、補剛材間の幅厚比パラメータ R<sub>R</sub>、補剛材の限界剛比 γ<sub>l</sub>/γ<sub>l\*</sub>、補剛材の必要剛比 γ<sub>l</sub>/γ<sub>l,req</sub>、軸力比、細長比入などの記号を用いているが、これらの定義はいずれも道路橋示方書Ⅱ鋼橋編<sup>4)</sup>に定義されているパラメータを用いている。

### 3.2 終局ひずみと各種パラメータとの関係

実験結果から求められた終局変位 δu をもとに模型供試体の終局ひずみ ε<sub>u</sub> と降伏ひずみ ε<sub>y</sub> の比 ε<sub>u</sub>/ε<sub>y</sub> (以下、終局ひずみ比という) を算出し、これと模型供試体の各種パラメータとの関係を検討した。終局ひずみは、次式により算出した。

$$\varepsilon u = \phi u \cdot y_{cp} \quad (5)$$

$$\phi u = \phi y + (\delta u - \delta y)/\{Lp(h - Lp/2)\} \quad (6)$$

$$\phi y = My/EI = 3\delta y/h^2 \quad (7)$$

ここで、φu : 終局曲率、y<sub>cp</sub> : 中立軸からの圧縮縁までの距離、φy : 降伏曲率、である。

降伏ひずみは、模型供試体の材料試験結果とともに、次式により算出した。

$$\varepsilon y = \sigma y/E \quad (8)$$

ここで、σy : 降伏応力度、E : 弾性係数、である。

図-5~10は、以上のようにして求めた終局ひずみ比、各種パラメータの値を示したものである。それぞれ、補剛材全体の幅厚比パラメータ R<sub>F</sub>、補剛材間の幅厚比パラメータ R<sub>R</sub>、補剛材の限界剛比 γ<sub>l</sub>/γ<sub>l\*</sub>、補剛材の必要剛比 γ<sub>l</sub>/γ<sub>l,req</sub>、軸力比、細長比入と終局ひずみ比 ε<sub>u</sub>/ε<sub>y</sub> の関係を図化したものである。

図-5によれば、終局ひずみ比と R<sub>F</sub> は、逆比例関係がみられ、R<sub>F</sub> が大きいと終局ひずみ比は小さく、R<sub>F</sub> が小さいと終局ひずみ比は大きくなる。R<sub>F</sub> が概ね 0.3 よりも小さいと終局ひずみ比は顕著に大きくなる傾向を示している。R<sub>F</sub> が 0.4 程度よりも大きいと終局ひずみ比は 5 度程、R<sub>F</sub> が 0.2~0.3 では 12~34 度程の値となっている。一般には、幅厚比パラメータが小さい範囲では弾性座屈による耐力の低下によりじん性が小さく、幅厚比パラメータが小さくなると非弾性座屈の発生、さらに幅厚比

パラメータが小さくなると座屈よりも鋼材の破断などによって終局状態が定まるようになりじん性が向上するが、こうした破壊モードの変化も終局ひずみ比との関係に現れていることがわかる。なお、図中には後述する回帰式も併せて示している。

図-6によれば、終局ひずみ比と幅厚比パラメータ $R_R$ の関係では $R_F$ と同様に逆比例関係があるよう見ることができるが $R_F$ ほど明確ではない。

図-7および図-8によれば、終局ひずみ比と剛比 $\gamma_l/\gamma_{l,req}$ には、比例関係が認められる。剛

比が大きくなると終局ひずみが大きくなり、結果として終局変位が大きくなる傾向を有している。特に、終局ひずみ比と $\gamma_l/\gamma_{l,req}$ には、 $R_F$ の場合と同様に良好な相関関係が認められる。これは、 $R_F$ と $\gamma_l/\gamma_{l,req}$ のパラメータは相互に関連したパラメータとなっているためである。なお、図-8中には後述する回帰式による結果も併せて示している。

図-9及び図-10によれば、細長比 $\lambda$ 及び軸力比 $N/N_y$ と終局ひずみ比の間には必ずしも明確な相関関係は認められない。

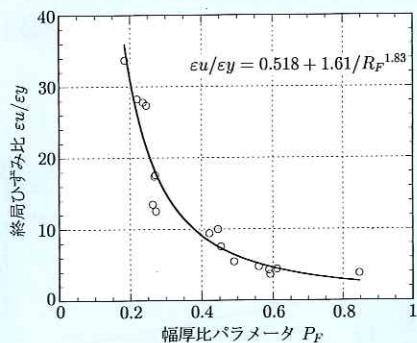


図-5 終局ひずみ比と幅厚比パラメータ $R_F$ の関係

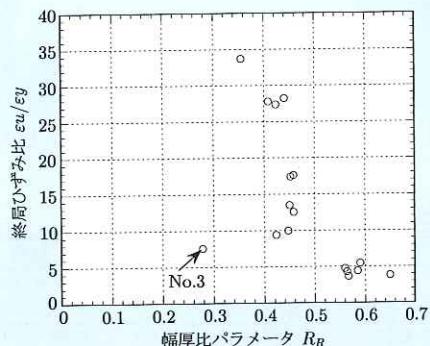


図-6 終局ひずみ比と幅厚比パラメータ $R_R$ の関係

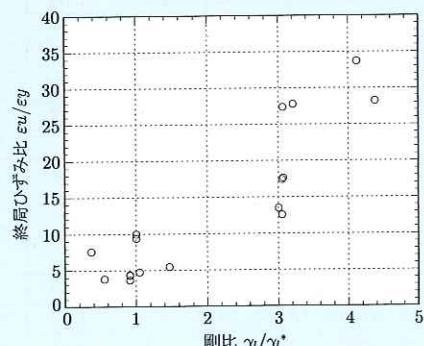


図-7 終局ひずみ比と剛比 $\gamma_l/\gamma_{l,req}$ の関係

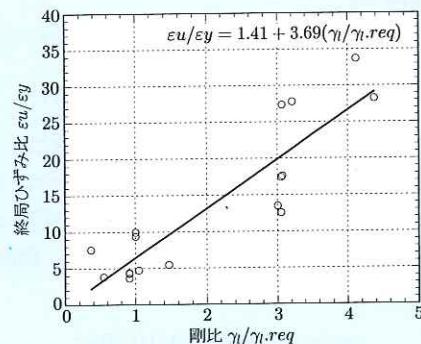


図-8 終局ひずみ比と剛比 $\gamma_l/\gamma_{l,req}$ の関係

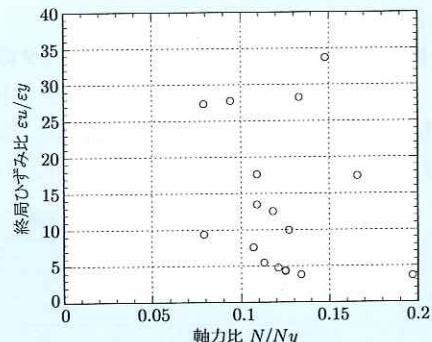


図-9 終局ひずみ比と軸力比の関係

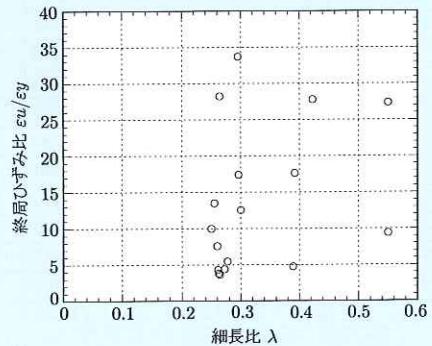


図-10 終局ひずみ比と細長比λの関係

### 3.3 終局ひずみの推定式

上記3.2の結果をもとに終局ひずみを設定するための実験式を求めた。上記に示したように終局ひずみ比と幅厚比パラメータ  $R_F$  もしくは剛比  $\gamma_l/\gamma_{l,req}$  の間に良好な相関関係が認められることから、これらを基本に実験式を求めてみた。各種の式形状を検討したが最終的に、 $R_F$ の場合には逆比例関係式を、 $\gamma_l/\gamma_{l,req}$ の場合には直線式をあてはめた。求められた回帰式は次式の通りである。いずれの回帰式も相関係数が0.95以上となり、相関関係は高い。

$$\varepsilon u/\varepsilon y = 0.518 + 1.610/R_F^{1.83} \quad (9)$$

$$\varepsilon u/\varepsilon y = 1.41 + 3.69(\gamma_l/\gamma_{l,req}) \quad (10)$$

なお、式(9)において、 $R_F$ のべき乗数は1.83であるので、これをさらに簡略化するために $R_F$ の二乗に逆比例する式を仮定すると次式が得られる。同様に相関係数は0.95以上で同様によい相関が認められる。

$$\varepsilon u/\varepsilon y = 1.47 + 1.19/R_F^2 \quad (11)$$

なお、いずれの回帰式も上記の実験データの範囲で求めたことに注意する必要がある。

### 3.4 終局曲げモーメントと断面パラメータの関係

図-11は、各模型供試体の終局曲げモーメント  $M_u$  と全塑性曲げモーメント  $M_p$ との比率  $M_u/M_p$  と幅厚比パラメータ  $R_F$  の関係を示したものである。

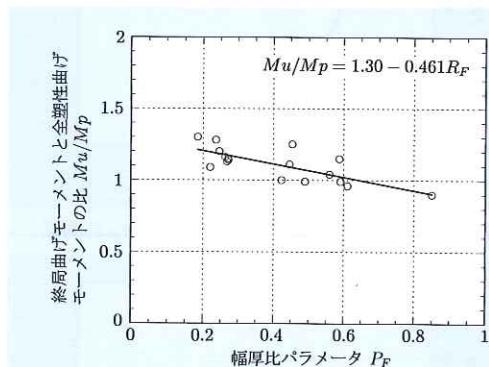
表-2 骨格曲線に関する実験結果と解析結果の比較

供試体番号	種類	実験値						計算値				比較	
		$R_F$	$Lp(cm)/a/2$	$P_u(kN)$	$\delta u(mm)$	$P_u/P_y$	$\varepsilon u/\varepsilon y$	$\phi u(1/m)$	$P_u(kN)$	$\delta u$	$P_u/P_y$	$P_u/P_y$ 計/実	$\delta m/\delta y$ 計/実
No.2	基本	0.588	45.0	1,530	29.0	1.47	4.92	0.0143	1,367	37.1	1.31	0.89	0.98
No.3	縦リブ増設	0.454	45.0	1,932	43.0	1.59	7.27	0.0206	1,685	47.7	1.39	0.87	0.88
No.18	基本、軸力増	0.594	45.0	1,275	23.6	1.33	4.88	0.0115	1,321	29.3	1.38	1.04	1.05
No.20	基本	0.611	45.0	1,373	32.2	1.23	4.67	0.0147	1,448	35.7	1.30	1.06	0.96
T1	基本	0.560	42.0	967	56.3	1.32	5.28	0.0160	984	67.2	1.32	1.00	0.99
M8	基本	0.846	45.0	1,089	25.3	1.10	3.14	0.0073	1,095	27.1	1.11	1.01	0.82
M18	横リブ増設	0.219	12.5	1,288	50.5	1.33	26.33	0.0650	1,421	47.4	1.47	1.10	0.83
KD-1	基本	0.446	25.0	1,491	36.3	1.41	7.48	0.0217	1,476	31.6	1.39	0.99	0.78
KD-2	パラメータ制限	0.263	25.0	1,795	46.7	1.46	18.72	0.0567	1,821	64.6	1.49	1.01	1.16
KD-3	コンパクト断面	0.272	25.0	1,344	48.2	1.46	17.63	0.0569	1,374	67.4	1.49	1.02	1.15
KD-5	軸力増	0.268	25.0	1,245	57.9	1.47	18.10	0.0515	1,299	58.3	1.53	1.04	0.91
KD-6	細長比 up	0.271	20.0	779	73.7	1.43	17.74	0.0798	797	79.5	1.47	1.02	0.94
KD-7-1		0.236	18.2	681	107.1	1.57	22.87	0.1131	637	90.0	1.47	0.94	0.80
KD-10	補剛材入制限	0.185	18.0	1,402	74.6	1.67	36.54	0.1012	1,305	78.4	1.56	0.93	0.93
B1	基本	0.491	45.0	1,540	39.1	1.26	6.43	0.0213	1,668	46.8	1.36	1.08	1.04
H6	基本(横リブ増設)	0.246	18.5	862	183.6	1.40	21.27	0.0885	873	148.1	1.42	1.01	0.81
H8	剛比最適値の検討	0.422	32.0	756	125.4	1.23	8.18	0.0340	819	111.3	1.33	1.08	0.89

$M_u/M_p$ の値は平均値としては1.1であり、大部分の模型供試体では1よりも大きくなっている。 $M_u/M_p$ の値が1よりも大きくなるのは、実際の鋼材の応力度-ひずみ関係にひずみ硬化が存在するためであり、実験における終局曲げモーメントは完全弾塑性型の応力度-ひずみ関係を用いて算出した全塑性曲げモーメントよりも大きくなる。

$R_F$ の値が大きくなると補剛板の局部座屈等の影響により、終局曲げモーメント  $M_u$  は全塑性曲げモーメント  $M_p$  に達する前に耐力が低下し始めることになり、 $M_u/M_p$  が1より小さくなっている。このような  $R_F$  と  $M_u/M_p$  の関係を最小二乗法により近似すると次式による。

$$Mu/M_p = 1.30 - 0.461R_F \quad (12)$$

図-11 終局曲げモーメント全塑性曲げモーメントの比  $M_u/M_p$  と幅厚比パラメータ  $R_F$  の関係

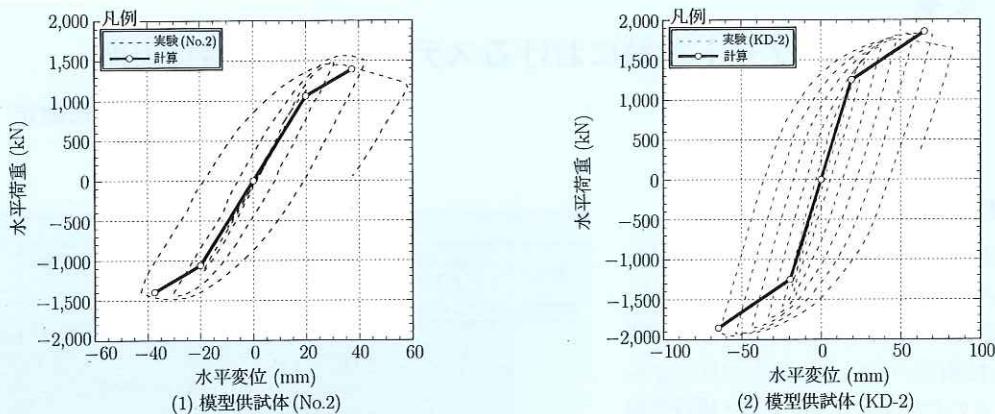


図-12 模型供試体の水平荷重-水平変位関係の比較

#### 4. 水平荷重-水平変位の骨格曲線の算出方法と実験結果との比較

上記3.で求められた終局ひずみ比 $\varepsilon_u/\varepsilon_y$ と $R_F$ の関係式(11)及び $R_F$ と $M_u/M_p$ の関係式(12)を用いて鋼製橋脚の水平荷重-水平変位関係を推定し、これと実験から求められた履歴曲線との比較を行った。

表-2は、推定結果と実験結果の比較を示したものである。これによれば、終局荷重については実験結果と推定値との比率が0.89~1.08の範囲、終局変位については実験結果と推定値との比率が0.78~1.16の範囲となっており、概ね実験値を再現できていると考えることができる。

図-12は、実験結果と推定結果の比較の一例を示したものであり、概ねバイリニア型の骨格曲線をモデル化できていると考えることができる。

#### 5. 結論

本文では、平面保持を仮定することにより算出する $M-\phi$ 関係に基づく変形性能解析法を検討するとともに、終局ひずみの与え方を実験結果とともに検討した。本研究の検討結果をまとめると以下の通りである。

##### (1) 終局ひずみと各種パラメータの関係

- 1) 終局ひずみ比と $R_F$ には逆比例関係が、終局ひずみ比と剛比 $\gamma_l/\gamma_{l,req}$ には比例関係が認められた。いずれも良好な相関を有しており、回帰式を求める式(9)及び式(10)、あるいは式(11)のようになる。
- 2) 幅厚比パラメータ $R_R$ 細長比 $\lambda$ 及び軸力比 $N/N_y$

と終局ひずみ比の間には必ずしも明確な相関関係は認められなかった。

##### (2) 水平荷重-水平変位関係

終局ひずみ比 $\varepsilon_u/\varepsilon_y$ と $R_F$ の関係式(11)及び $R_F$ と $M_u/M_p$ の関係式(12)を用いて鋼製橋脚の水平荷重-水平変位関係を推定し、これと実験から求められた履歴曲線との比較を行った結果、概ね実験値を再現できることがわかった。

##### (3) 塑性ヒンジ長

今回の検討では、終局変位を算定する塑性ヒンジ長としてダイヤフラム間隔の半分と仮定した。しかしながら、橋脚の降伏領域などをさらに考慮し、より合理的な塑性ヒンジ領域とひずみ分布を設定可能と考えられる。

#### 参考文献

- 1) 宇佐美勉：ハイダクティリティ鋼製橋脚、橋梁と基礎、Vol31, No.6, pp.30-36, 1997.6
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書Ⅴ耐震設計編、1996.12
- 3) 建設省土木研究所、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、名古屋高速道路公社、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会：道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書(I)～(VII)、第178～184号、1997.
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書Ⅱ鋼橋編、1996.12

運上茂樹\*



建設省土木研究所  
耐震技術研究センター  
耐震研究室長、工博  
Dr. Shigeiki UNJOH

寺山 徹\*\*



首都高速道路公団  
(前)耐震研究室主任研究員  
Toru TERAYAMA