

動的応答解析に用いる鋼管柱の復元力モデルについての検討

安波博道¹・名取 嘉²・村越 潤³

¹正会員 工修 新日本製鐵株式会社 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町2-6-3)

²正会員 株式会社横河ブリッジ 技術本部 技術開発室 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町27)

³正会員 工修 建設省土木研究所 構造橋梁部 橋梁研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1)

本稿は、1質点系構造物の非線形動的応答解析に用いる復元力特性について、模型実験結果に基づきバイリニアモデル、2パラメータモデルのそれぞれを円形断面鋼製橋脚（鋼管柱）に適用する場合の適切なモデル設定法を検討したものである。検討の結果、バイリニアモデルにおいては、繰り返し載荷実験の履歴吸収エネルギーと近似するように降伏点座標を設定することにより、また、2パラメータモデルにおいては、繰り返し作用によるひずみ硬化の影響を考慮した復元力モデルのタイプを適用することにより、ハイブリッド地震応答実験の結果に近似する解が得られた。

Key Words : steel pipe bridge pier, dynamic response analysis, restoring force model

1. 緒言

平成8年12月に発行された道路橋示方書¹⁾では、コンクリートを充填しない鋼製橋脚は、非線形動的解析を行って耐震性を判定するのがよいとされており、動的解析に用いる諸数値は、同等の構造細目を有する供試体の繰り返しの影響を考慮した載荷実験データに基づいて定めることを原則としている。そして、復元力モデルとしては、最大耐荷力をほぼ維持する変位領域までの応答を許容することを前提として、水平荷重と水平変位との関係を硬化形のバイリニアモデルで表示する事例が示されている^{1), 2)}。しかしながら、耐荷力上昇率がこの事例とは大きく異なる場合の取り扱いについては言及されてなく、第1折れ点（降伏点座標）等、詳細なモデル設定に関する検討が必要であると思われる。

また、橋脚の耐震性能評価において、応答が最大耐荷力以下の領域に制限することが可能な場合は、照査手段としてバイリニアモデルのような比較的簡単な復元力モデルの適用が可能であるが、最大耐荷力を越える応答に対しては、バイリニアモデルでは再現精度の上で適用に無理がある。さらに、応答が最大耐荷力以下に収まる場合においても、終局状態を数値解析によって明らかにすることができない。したがって、応答が最大耐荷力を越えて強度が低下していく領域におよぶ場合に対して、ある程度の精度で再現できる動的応答解析用の復元力モデルの構築が望まれる。このような課題に対して、最大耐荷

力を越える変位領域の荷重一変位関係の復元力特性に関して、繰り返し荷重による強度劣化と剛性低下の規則性（履歴法則）を定式化する試みがなされている^{3)~5)}。このうち鈴木、宇佐美らが提案する2パラメータモデルは、これまでに主に矩形断面に対して、多数の繰り返し載荷実験データに基づき構造諸元を用いた定式化を行い、汎用的に使用できる手法がほぼ確立されている³⁾。しかし、円形断面については実験データが少ないとこと等から適用に関する十分な検討が行われていない。

そこで本稿では、1質点系構造物の非線形動的応答解析に用いる復元力特性について、バイリニアモデルと2パラメータモデルのそれぞれを円形断面鋼製橋脚（鋼管柱）に適用する場合の適切なモデル設定法を検討するものである。特に、バイリニアモデルについては降伏点座標の与え方による応答の相違、2パラメータモデルについては文献3)に示される3つの復元力モデルタイプの適用性に着目する。そのため、ここでは実構造物を想定して設計された鋼管柱の縮小模型供試体による繰り返し載荷実験結果に基づいて、実際に復元力モデルを作成し、これを用いた動的応答解析と、繰り返し載荷実験と同一諸元の供試体を用いて行われたハイブリッド地震応答実験結果とを比較して、それぞれのモデルの適用精度を判定している。

なお、本文では繰り返し載荷実験およびハイブリッド実験については結果のみを示しており、詳細は文献6)を参照されたい。

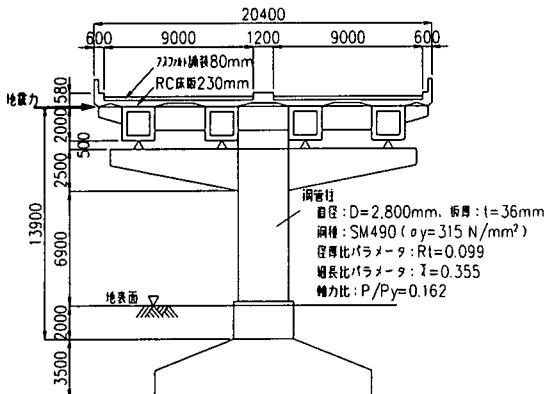


図-1 対象実構造物

2. 対象構造物と繰り返し載荷実験

想定した対象実構造物を図-1に示す。橋脚は鋼管柱のT形一本柱形式であり、橋脚が支持する上部構造の重量は $P=15,950\text{kN}$ である。地震荷重は橋軸直角方向について考え、そのときの上部構造の水平地震力は橋脚基部から13.9mの位置に作用するものとする。地盤種別はI種とする。これらの前提条件に基づいて、橋軸直角方向に震度法レベルの地震力(設計水平震度 $kh=0.20$)が作用したときに、着目部位である橋脚の基部の断面構成を道路橋示方書⁷⁾に準じた許容応力度法により算定した。鋼管柱の断面諸元およびパラメータを図中に示す。

実験は、算定された鋼管柱を1/4.12に縮小した片持ち柱の供試体(A1C-ST)に対し、柱頂部に橋脚が支持する上部構造の重量に相当する軸力を載荷した状態を保ちつつ、同じく柱頂部に地震荷重を想定した繰り返し水平変位を載荷するものである。図-2に実験から得られた供試体の柱頭部における水平荷重-水平変位履歴曲線を示す。また、履歴曲線に基づき、耐荷力と塑性率について整理したものを表-1に示す。ここで、 H_y は供試体から切出した試験片の引張試験結果(図-3)を用い、供試体基部の最外縁が降伏する時の荷重(降伏荷重)であり、 δ_y は実験における初期弾性勾配を用いて算出した H_y に対応する降伏水平変位である。また、 H_m は実験の最大耐荷力、 δ_m は最大耐荷力に対応する水平変位である。

3. 動的応答解析

解析モデルとしては基礎を完全固定とし、上部構造の慣性力作用位置に質量を持つ1質点系の振動モデルを仮定する。運動方程式を式(1)に示す。

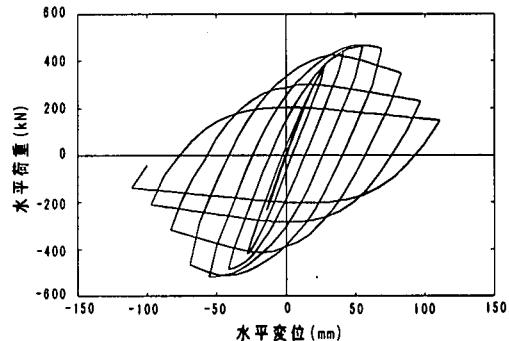


図-2 水平荷重-水平変位履歴曲線(A1C-ST)

表-1 実験結果

供試体名	構造諸元、パラメータ						実験結果				
	D (mm)	t (mm)	σ_y (N/mm ²)	Rt	$\bar{\lambda}$	$\frac{P}{P_y}$	H_y (kN)	δ_y (mm)	H_m (kN)	δ_m (mm)	$\frac{\delta_m}{\delta_y}$
A1C-ST	680	9.1	341	0.103	0.362	0.138	282	18.1	1.67	3.0	

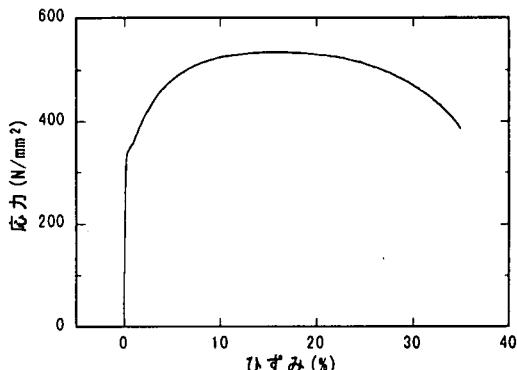


図-3 鋼材の引張試験結果(SM490, t=9mm)

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Q(x) = -m\ddot{z} \quad (1)$$

ここに、 m は上部構造質量、 c は減衰率、 $Q(x)$ は復元力、 x は相対変位、 \ddot{z} は地動加速度である。ここで減衰率(c)は、 $c=2h\sqrt{k \cdot m}$ で表わされ、減衰定数(h)は5%とする。

入力地震波は、文献8)に示されるI種地盤の動的解析用地震波(本稿では実験供試体との組合せでこれをA1C-L2と呼ぶ)および兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の記録波(同、A1C-HN)を用いる。

また、以降の動的応答解析において、バイリニアモデルの検討では上述の条件をそのままとし、2パラメータモデルの検討では、より大きな変位を生じさせるため、上部構造の重量を1.3倍とした構造モデルを想定している。ハイブリッド実験についてもそれぞれ同一の条件としている。

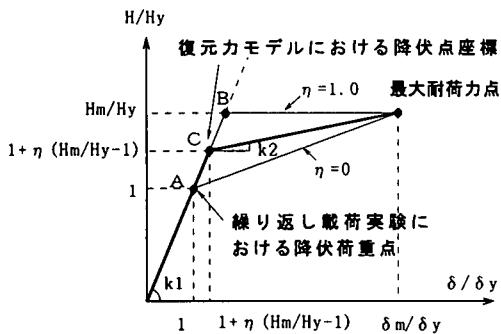


図-4 バイリニアモデル

4. バイリニアモデルについての検討

バイリニアモデルの模式図を図-4に示す。ここでは弾性域における応答の精度を確保するため、繰り返し載荷実験の初期弾性勾配を復元力モデルの一次勾配（初期剛性： k_1 ）とし、そして、一次勾配の延長線上において、載荷実験の降伏荷重 H_y と最大耐荷力 H_m のそれぞれに相当する座標（図-4中のA、B点）の中間に復元力モデルの降伏点座標（C点）を設定する。ここでC点の位置を定義する指標を η （ $0 \leq \eta \leq 1.0$, A点： $\eta = 0$, B点： $\eta = 1.0$ ）と置くと、降伏点座標と最大耐荷力点を結ぶ二次勾配（硬化域剛性： k_2 ）は次式で表される。

$$k_2 = \frac{H_y}{\delta y} \cdot \frac{(1-\eta)(H_m/H_y - 1)}{\delta m / \delta y - \eta(H_m/H_y - 1) - 1} \quad (2)$$

ケーススタディーとしてA点とB点の間を5等分し、計6ケース（ $\eta = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ ）のバイリニアモデルを設定する。 $H_y, H_m, \delta y, \delta m$ は表-1に示す数値を用いる。そして各モデルについて繰り返し載荷実験と同一の水平変位を与えたシミュレーション解析を行う。解析結果の例（ $\eta = 0.6$ ）を図-5に、また履歴曲線に基づく各変位ループごとの吸収エネルギーを実験結果と比較して図-6に示す。図-6より、最大耐荷力に至るまでの領域（ $\delta \leq 55\text{mm}$ ）においては $\eta = 0.4$ あるいは 0.6 が実験結果に近似している。

次に、それぞれの降伏点座標を有するバイリニアモデルを用いて動的応答解析を行った。その結果を図-7に示す（ $\eta = 0, 0.2, 0.8$ は紙面上割愛する）。図-7より、応答の周波数特性ならびに応答変位の振幅にはケース間で大きな相違がみられないが、降伏点を低めに設定すると地震波に含まれる比較的小さな波形に対しても弾塑性の変位が生じている。また、残留変位に各ケースで差異が生じているが、降伏点が高い場合には振り戻しが小さくなることから、残留

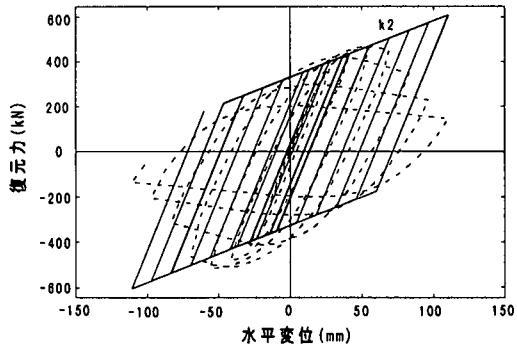


図-5 バイリニアモデルによる
シミュレーション結果（ $\eta = 0.6$ ）

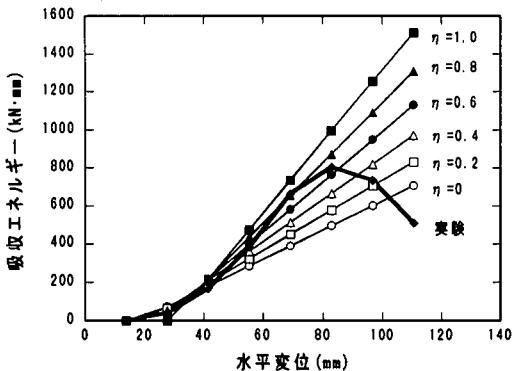


図-6 履歴吸収エネルギー

変位が大きく算定される傾向が伺える。一方、これらの結果を図-8に示すハイブリッド実験結果と比較すると、復元力-変位履歴や時刻歴応答変位における全体的な傾向、ならびに最大応答変位において、解析モデルケースのうち $\eta = 0.6$ が比較的よく実験結果に近似している。ただし、残留変位については繰り返し作用下で生じる降伏点座標の移動等の細部の履歴特性を探り入れていないため、実験結果との間に多少の差異が生じている。

以上より、バイリニアモデルにおいては、繰り返し載荷の履歴吸収エネルギーが実験結果に近似するように降伏点座標を設定することにより、応答解析結果はハイブリッド実験結果に近似することがわかった。本稿で定義した降伏点座標の指標 η は、本モデル構造に対して $\eta = 0.6$ が適当であり、道路橋示方書¹¹に示される矩形断面の事例（ $\eta = (1.1-1)/(1.4-1) = 0.25$ ）より多少大きい。これは、円形という断面形状の影響に加え、鋼管柱においては製造プロセスに起因して鋼材の応力-ひずみ関係が降伏棚のないラウンド形となっている（図-3参照）ことが、繰り返し漸増の荷重に対してひずみ硬化の影響が現れやすくなつたものと考えられる。

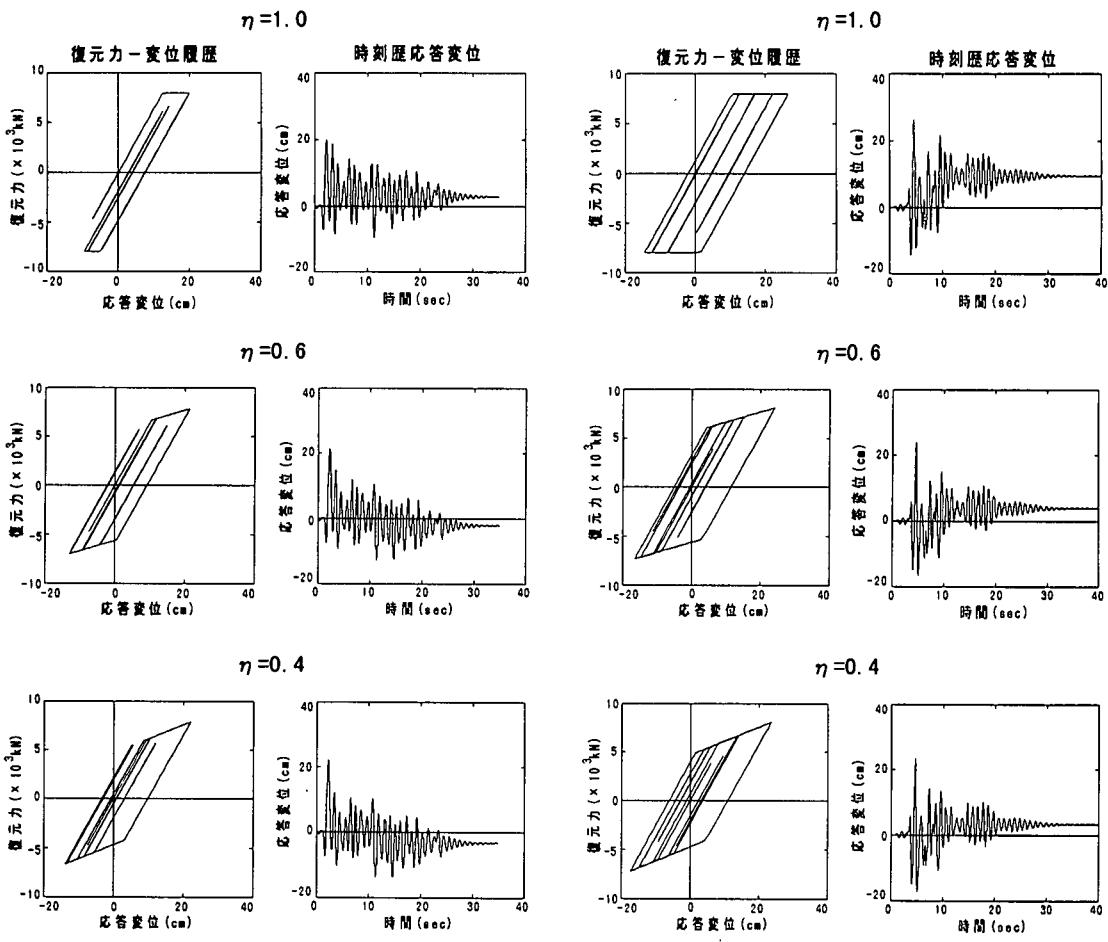


図-7 バイリニアモデルを用いた動的解析結果

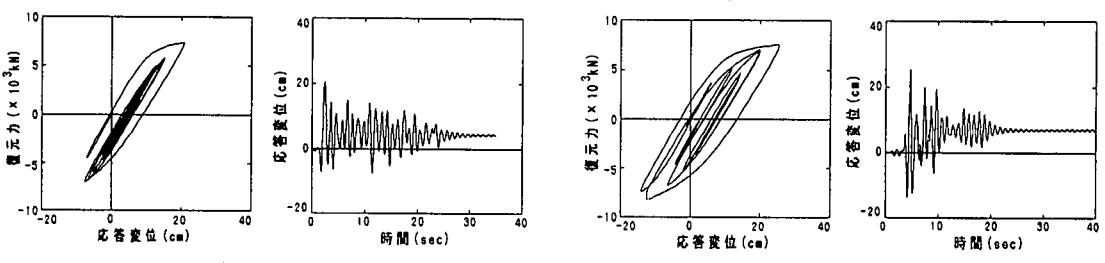


図-8 ハイブリッド実験結果

5. 2パラメータモデルについての検討

図-9に2パラメータモデルの模式図を示す。2パラメータモデルは負勾配をもつトリニアの骨格曲線で構造特性を定義し、これと繰り返し作用による強度劣化と剛性低下の規則性(履歴法則)を表す2つのパラメータ(α , β)を組合せて、大変位領域

までの復元力-変位関係を表現する復元力モデルである。モデルの構成については文献3)に詳述されている。ここでは、本モデルの構築にあたり、前章と同様に繰り返し載荷実験と同一の水平変位を与えたシミュレーション解析を行い、復元力-水平変位関係と各ループの吸収エネルギーの両方が実験に近似するように骨格曲線、ならびに α 、 β ($\alpha=60$ 、 $\beta=$

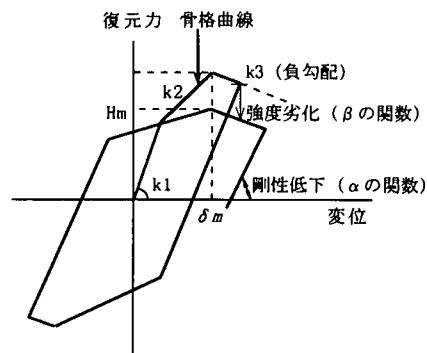
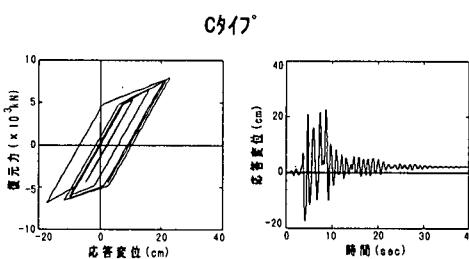
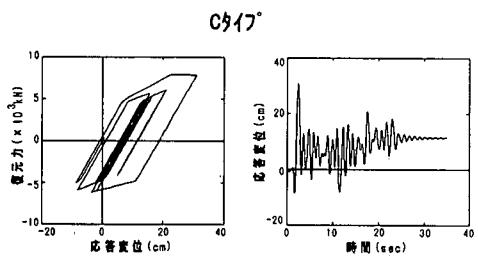
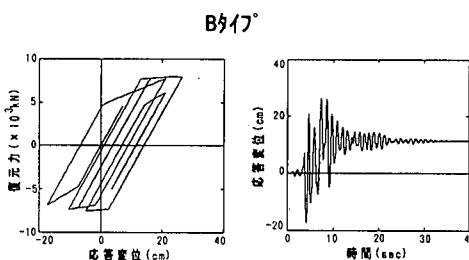
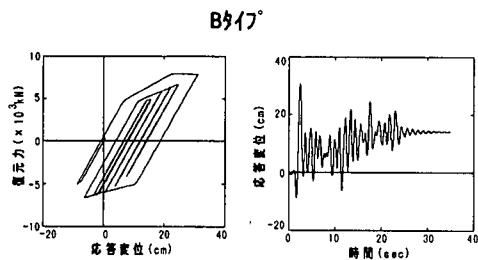
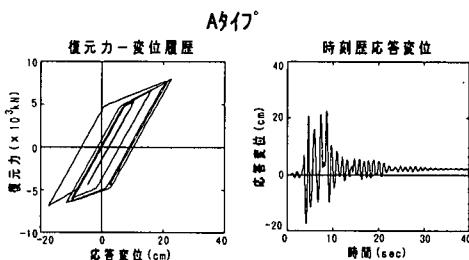
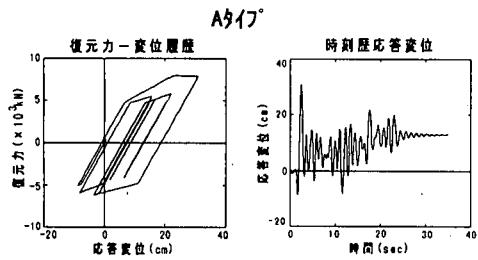


図-9 2パラメータモデル



(a) A1C-L2

(b) A1C-HN

図-10 2パラメータモデルを用いた動的解析結果 ($m \times 1.3$)

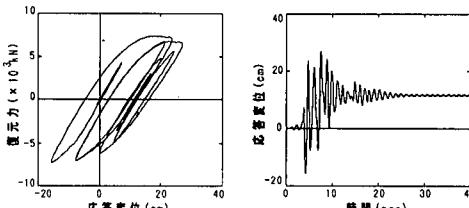
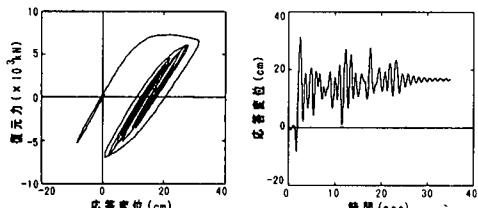


図-11 ハイブリッド実験結果 ($m \times 1.3$)

0.5) を設定した。文献3)では、さらに復元力特性として繰り返し作用によるひずみ硬化の影響や、局部座屈、P-△効果の影響を受ける程度を考慮してモデルを3つのタイプ (A, B, C) に分類している。ここでは、これらの影響の有無を把握するため全タイプを適用して復元力モデルを作成し、それぞれの復元力モデルを用いた応答解析結果とハイブリッド実験結果とを比較する。解析結果を図-10に、またハイブリッド実験結果を図-11に示す。

今回の構造と地震波の組合せでは、最大耐荷力を若干越える程度の応答であった。これらをハイブリッド実験結果と比較すると、A1C-L2では、3つのタイプ間の差異は小さく、いずれもハイブリッド実験結果とほぼ同一の挙動を示している。一方、A1C-HNではBタイプが復元力-変位履歴や応答変位の推移、ならびに最大応答変位、残留変位のいずれに対しても実験結果とよく近似している。これは、A1C-HNでは最大耐荷力に至るまでに弾塑性域での正負反復の応答が数回発生しており、3タイプのうち、Bタイプのみが H_y から H_m の間の応答において、ひずみ効果の影響を考慮し降伏点を履歴に基づいて変更するモデルであることから、4章で述べたように鋼管柱の材料特性に起因する現象を反映したものと考えられる。ちなみに、Aタイプ、Cタイプは主に最大耐荷力以降の強度劣化の特性、すなわち粘りの優劣で区分されるが、今回のように応答が大きな変位領域に至らない場合には有意な差違は生じていない。

以上より、鋼管柱に対しては最大耐荷力に到達する以前に生じるひずみ硬化の影響を考慮できるBタイプを用いれば、最大耐荷力を若干越える応答に対して比較的よい精度で解析結果が得られることがわかった。

6. 結論

バイリニアモデルについては降伏点座標、2パラメータモデルについては文献3)に示される3つのタイプ分類に着目してケーススタディーを行い、鋼管柱の復元力モデルの設定方法について今回の実験の範囲に対して以下の検討結果が得られた。

- (1) バイリニアモデルにおいては、繰り返し載荷の履歴吸収エネルギーが実験結果に近似するよう降伏点座標を設定することにより、より信頼性の高い動的応答の解が得られる。そして鋼

管柱の場合、断面形状およびひずみ硬化の影響を考慮して、降伏点座標を多少高め（本例では $\eta = 0.6$ ）に設定するのがよい。

- (2) 2パラメータモデルについては、鋼管柱に対しては最大耐荷力に到達する以前に生じるひずみ硬化の影響を考慮できるBタイプを用いれば、最大耐荷力を若干越える応答に対して比較的よい精度で解析結果が得られる。

なお、地盤種別としてⅢ種地盤についても本稿と同様の検討を行い、同様の結果が得られたことを付記しておく。ただし、これらの検討結果は一例に過ぎず、汎用性のあるモデル構築に向けて、径厚比、細長比等の構造パラメータと履歴特性との関係を復元力モデルの構成式に採り入れ、その適用性をハイブリッド実験で検証していく必要がある。

謝辞：鋼管柱の2パラメータモデルの作成に際し、愛知工業大学 鈴木森晶講師のご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編，1996. 12.
- 2) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997. 3.
- 3) 鈴木森晶, 宇佐美勉, 寺田昌弘, 伊藤努, 才塚邦宏：鋼製箱形断面橋脚の復元力モデルと弾塑性地震応答解析, 土木学会論文集, NO. 549/I-37, pp. 191-204, 1996. 10.
- 4) Kummar,S. and Usami,T.: An Evolutionary-degrading Hysteretic Model for Thin-walled Steel Structure, Engineering Structure, 1996.7.
- 5) 依田照彦, 松尾礼子, 春日清志：簡易非線形動的応答解析による鋼製橋脚の耐震性評価, 鋼製橋脚の非線形数值解析と耐震設計に関する論文集, pp. 51-58, 1997. 5.
- 6) 株式会社横河ブリッジ, 新日本製鐵株式會社：鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験報告書, 1996. 10.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説II 鋼橋編, 1994. 2.
- 8) 建設省：道路橋の免震設計法マニュアル(案), 土木研究センター, 1992. 12.

(1998. 6. 15 受付)

INVESTIGATION OF THE RESTORING FORCE MODEL OF A STEEL PIPE COLUMN USED FOR DYNAMIC ANALYSIS

Hiromichi YASUNAMI, Tohru NATORI and Jun MURAKOSHI

This paper investigated appropriate model-establishment methods for applying a bi-linear model and a two-parameter model to a circular-section steel bridge pier (steel pipe column), respectively, regarding the restoring force characteristics used for nonlinear dynamic analysis. By this investigation, we obtained a solution which approximates the results of a pseudo-dynamic test by establishing, in the case of the bi-linear model, yield point coordinates approximating the hysteresis absorption energy in a quasi-static cyclic loading test and, in the case of the two-parameter model, by applying the type of the restoring force model, which takes into account the effect of the strain hardening due to cyclic loading.