

鋼製橋脚のハイブリッド実験と非線型動的応答解析の比較

高久達将*、池田茂**、岡本隆***、松田宏****、能登宥愿*****、川井豊*****

- *工博 日本鋼管(株) 鋼構造・機械システム本部 (〒230 神奈川県横浜市鶴見区末広町 2-1)
- **住友重機械工業(株) 鉄構・機器事業本部 技術部 (〒141 東京都品川区北品川 5-9-11)
- ***工博 日本鋼管(株) 基盤技術研究所 都市工学研究部 (〒210 神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-1 NKK京浜ビル)
- ****日本電子計算(株) 科学技術事業部 建設技術営業部 (〒135 東京都江東区東陽町 2-4-24)
- *****(株)宮地鐵工所 技術本部 先行技術研究室 (〒103 東京都中央区日本橋小伝馬町 15-18 SKビル)
- *****工博 川崎製鉄(株) 橋梁・鉄構事業部 橋梁・鋼構造部 企画開発室 (〒100 東京都千代田区内幸町 2-3-3 日比谷国際ビル)

兵庫県南部地震によって多くの道路構造物が、破壊的な損傷を受けたが、鋼製橋脚もその例外とはならなかった。いままで、許容応力度法にもとづいて設計されてきた鋼構造物にじん性を期待する設計法を取入れるべく、この地震後、多くの機関などで、崩壊に至るまでの載荷試験が行われてきた。また、平成8年11月に改訂された道路橋示方書において、非線型動的応答解析が鋼製橋脚などの設計法の有効な手段となってきた。一方、コンピュータによる微分方程式の計算と実験装置による供試体の復元力の計測をオンライン接続したハイブリッド実験が数年前より大学などのいくつかの研究施設で行われてきた。そこで、本論文では、繰り返し載荷実験などに基づいて設定した復元力特性を用いた非線形動的応答解析の信頼性を検証すべく、名古屋大学と日本鋼管(株)においてハイブリッド試験を行い、その成果と動的応答解析結果を比較している。また、その解析を行うにあたって、復元力特性をどのように設定すれば設計上安全性を確認できるかという観点でまとめた。

Key Words : Steel bridge pier, Pseudo-dynamic test, Non-linear behavior, Response analysis

1. はじめに

兵庫県南部地震によって多くの道路構造物が、破壊的な損傷を受けたが、鋼製橋脚もその例外とはならなかった。いままで、許容応力度法にもとづいて設計されてきた鋼構造物にじん性を期待する設計法を取入れるべく、この地震後、多くの機関などで、崩壊に至るまでの載荷試験が行われてきた。また、平成8年11月に改訂された道路橋示方書において、非線型動的応答解析が鋼製橋脚などの設計法の有効な手段となってきた。

単柱の鋼製橋脚を対象として、繰り返し載荷実験などに基づいて設定した復元力特性を用いる非線形動的応答解析の信頼性を高い方法によって検証しなければならない。しかし、振動台を用いた地震応答試験は、縮尺率の関係において部材の再現性が困難であり、また、大振幅の入力地震動に対して破壊までの実験を行うことは危険であるばかりでなくそのような試験設備も極めて希であるため、検証するに十分な実験を実施することは困難である。

一方、コンピュータによる微分方程式の計算と実験装置による供試体の復元力の計測をオンライン接続した実験が数年前より大学などのいくつかの研究施設で行われてきた。このハイブリッド実験は、時間軸を100倍以上に伸ばして慣性力を油圧ジャッキで与え、復元力を供試体より計測する擬似動的実験である。

本論文では、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)鋼材倶楽部および(社)日本橋梁建設協会による共同研究のひとつとして、名古屋大学と日本鋼管(株)の実験設備を使用して、このハイブリッド地震応答試験を行った成果と動的応答解析結果を比較している。また、非線形動的応答解析を行うにあたって、復元力特

性をどのように設定すれば設計上安全性を確認できるかという観点で、1自由度の動的応答解析結果をハイブリッド試験結果に対して比較している。

2. ベンチマークテスト

ここに示す解析は、(社)日本橋梁建設協会に設置された鋼製橋脚の耐荷力に関する研究ワーキンググループによって行われている。このため、解析手段が多様となることから、事前にベンチマークテストを行った。

この結果は、表-1 のようであり、1自由度のバイリニアモデルの場合、解析に用いたプログラムによってほとんど差のないことを確認した。また、積分法やその間隔などによって大きな誤差がないことがわかった。

なお、トリリニアの場合は、多くの設定法もあることなどのため、ばらつきが大きくなったと考えられる。

表-1 ベンチマークテスト結果 (平均値=1.000)

復元力特性	バイリニアモデル		トリリニアモデル		
	I種地盤	III種地盤	I種地盤	III種地盤	
入力地震波	兵庫県南部地震				
	最大値	1.012	1.012	1.139	1.224
	最小値	0.916	0.981	0.972	0.383
	標準偏差	0.030	0.007	0.053	0.172
変位	管理図				
加速度	最大値	1.013	1.006	1.208	1.073
	最小値	0.992	0.996	0.886	0.913
	標準偏差	0.004	0.002	0.075	0.030
	管理図				
反力	最大値	1.038	1.012	1.077	1.026
	最小値	0.967	0.995	0.974	0.917
	標準偏差	0.012	0.003	0.021	0.027
	管理図				
参加総数: バイリニア: 19 トリリニア: 16		プログラム: TDAP III, DYNA2E, RESP, COSMOS/M, Y-DYNA/NL, 自社開発			

3. 構造モデル

3.1 非線形動的応答解析モデル

1自由度の非線形動的解析の振動モデルの概要を図-1に示す。ここで、復元力を有する部材は、スカラーばね要素としている。また、質量などは、ハイブリッド試験のモデルに対して相似則を考慮した実橋モデルとする。

減衰定数として、ここでは $h=0.05$ を用い、剛性比例減衰として解析している。

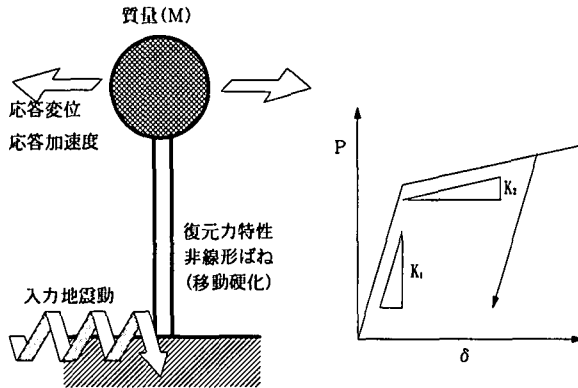


図-1 1質点非線形モデル

3.2 ハイブリッド試験モデル

ハイブリッド試験の振動モデルの概念は図-2 のようである。この試験では、供試体の頂部の変位とジャッキの力から復元力を測定し、1自由度の振動モデルを仮想して微分方程式を解いている。

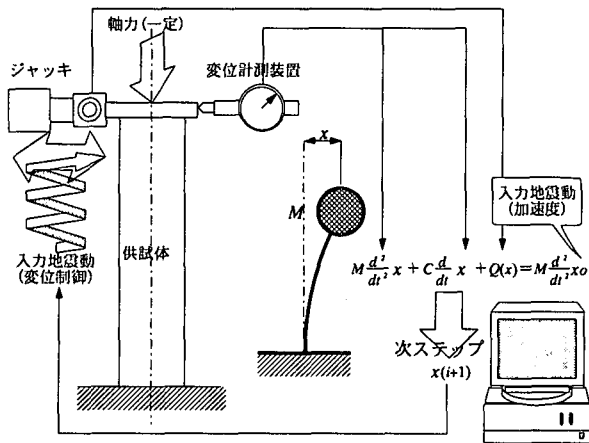


図-2 ハイブリッド試験概念図

ハイブリッド試験では、実橋脚モデルに対してその縮尺率を $1/8$ として試験している。この相似則は、長さ、質量、時間などについて、表-2 に示すようである。また、この相似則に基づいた実橋脚の質量、降伏水平力、降伏変位を表-3に示す。ここで、解析との比較においてはじん性の異なることで重要と考えられるため、供試体は、矩形断面と円形断面、また、それぞれの断面について補剛度の低い基本断面1と高い基本断面2に区分している。

表-2 ハイブリッド地震応答実験に用いる相似則

項目	次元	矩形断面	円形断面	S:縮尺率
長さ	L	S	S	
質量	M	S ³	S ²	
時間	T	S	√S	
応力度	ML ⁻¹ T ⁻¹	I	I	
速度	LT ⁻¹	I	√S	
加速度	LT ⁻²	1/S	I	
力	MLT ⁻²	S ²	S ²	
剛性	MT ⁻²	S	S	

表-3 相似則による実橋脚モデルの構造特性

モデル番号 (供試体)	質量 (tf・s/cm)	降伏水平力 (tf)	降伏変位 (cm)		
基本断面1	R-04	3.110	910.2	8.55	
	R-05	3.127	914.9	8.49	
	R-06	2.331	951.6	8.73	
	R-07	2.338	954.8	8.89	
	R-08	3.919	1153.5	4.88	
	R-09	3.916	1152.7	4.88	
	R-10	3.142	919.4	8.49	
	R-11	3.096	905.0	8.36	
	R-12	2.363	965.1	8.94	
	R-13	2.336	953.7	8.88	
	基本断面2	R-16	2.703	652.1	5.66
		R-17	2.706	652.8	5.65
		R-18	2.717	655.4	5.66
R-19		2.025	688.8	5.98	
円形断面		基本断面1	P-04	2.002	584.1
	P-05		1.974	574.8	6.30
	P-06		1.458	617.9	7.03
	P-07		1.445	612.0	6.90
	P-08		2.103	613.1	4.20
	P-09		2.090	609.1	4.13
	基本断面2	P-10	1.876	545.1	5.94
		P-11	1.797	521.8	5.85
		P-12	1.508	639.5	7.11
		P-13	1.518	643.6	7.07
		P-16	2.754	659.9	5.74
		P-17	2.106	741.4	6.35
基本断面2	P-18	3.167	755.6	3.94	
	P-19	2.806	672.8	5.80	
	P-20	2.049	721.2	6.24	

4. 入力地震動

動的応答解析およびハイブリッド試験に用いた地震動は、図-3 に最大加速度を 1.0 とした正規化をして示す免震マニュアル地震波¹⁾および兵庫県南部地震波のそれぞれⅠ種地震およびⅢ種地震に対する地震波を用いた。また、それぞれの加速度振幅については、表-4に示す倍率を掛けた値を用いる。

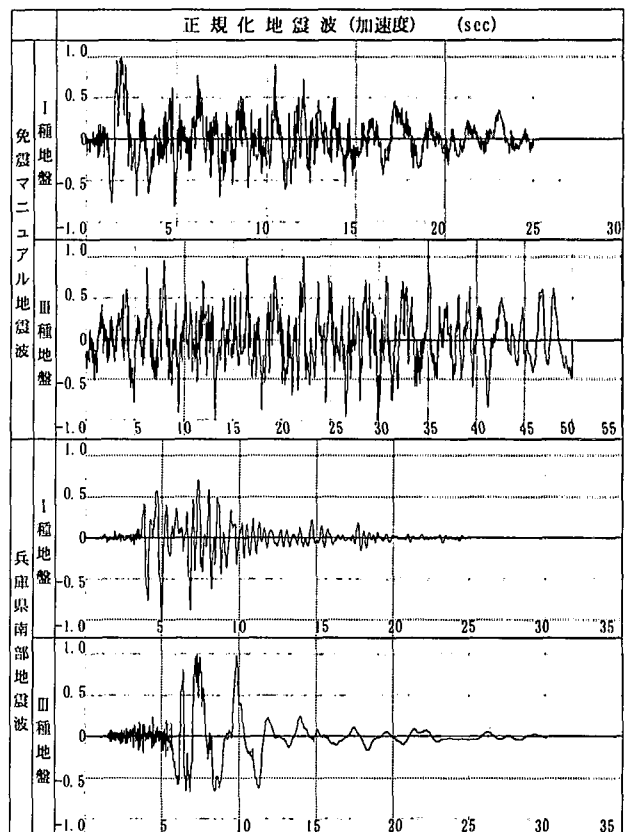


図-3 解析に用いる地震波 (正規化)

表-4 入力地震波の最大加速度振幅

	モデル番号 (供試体)	地震波タイプ		最大加速度 (gal)		
		地震波	地盤種別			
矩形断面	基本断面1	R-04	免震マニュアル	I種	360.0	
		R-05			540.0	
		R-06			442.9	
		R-07		III種	664.3	
		R-08			360.0	
		R-09			540.0	
	基本断面2	R-10	兵庫県南部地震	I種	818.0	
		R-11			1227.0	
		R-12			325.8	
		R-13			488.8	
		R-16		免震マニュアル	I種	360.0
		R-17			I種	818.0
		R-18			I種	1227.0
円形断面	基本断面1	P-04	免震マニュアル	I種	360.0	
		P-05			432.0	
		P-06			442.9	
		P-07		III種	606.8	
		P-08			I種	360.0
		P-09			I種	432.0
	基本断面2	P-10	兵庫県南部地震	I種	818.0	
		P-11			1227.0	
		P-12			325.8	
		P-13			488.8	
		P-16		免震マニュアル	I種	360.0
		P-17			III種	442.9
		P-18			I種	360.0
P-19	兵庫県南部地震	I種	818.0			
P-20		III種	325.8			

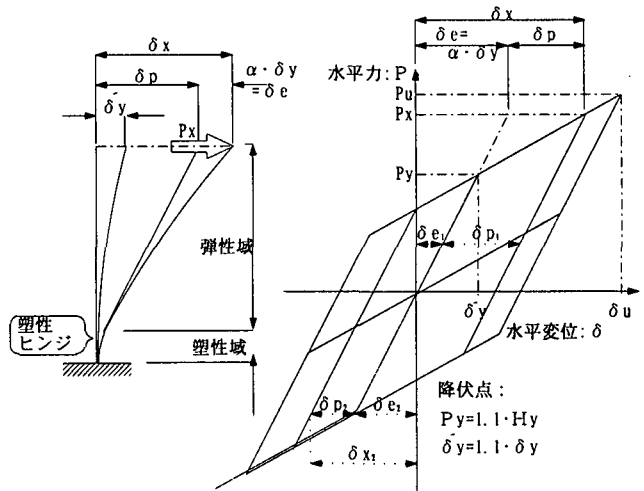


図-4 硬化型バイリニア復元力特性

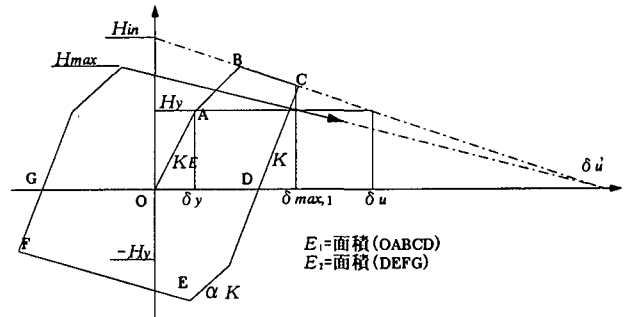


図-5 E-D履歴モデル復元力曲線

5. 復元力特性

5.1 復元力特性の比較

鋼製橋脚に利用できる復元力特性としては、バイリニアあるいはトリリニアなどのマルチリニア型モデルがある。これらの復元力特性の定義に際して、ハイブリッド試験結果に対していくつかのケースについて、適当なパラメータの設定を行い、比較した。

①硬化型バイリニアモデル

図-4 に示すような復元力特性

②完全弾塑性型バイリニアモデル

解析上の降伏点を適宜調整して、3 ケース行った。

③劣化型バイリニアモデル

劣化域を緩勾配で定義し1 ケース行った。

④トリリニアモデル

第3 勾配を劣化域とし、3 ケース行った。

⑤E-D履歴モデル

ハイブリッド試験に先立った同形供試体の繰り返し載荷試験によって得られる変位-荷重履歴曲線に沿った復元力特性を定義する方法として、進行性劣化(E-D)履歴モデル(Damage Index based on Evolutionary-degrading Hysteretic Model)²⁾を用いて復元力特性を定義した。損傷指数(Damage Index)を次のように定義する。

$$D = (1 - \beta) \sum_{j=1}^{N_1} \left(\frac{\delta_{max,j} - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} \right)^c + \beta \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_i}{H_y (\delta_u - \delta_y)} \right)^c$$

この損傷指数によって劣化する水平荷重と変位-荷重勾配を次式のように定義する。(図-5 参照)

$$H_{max} = H_{in} \cdot e^{-[ln(H_{in}/H_y)]D}$$

$$K = K_E \cdot e^{-[ln(H_{in}/H_y)]D}$$

これらの復元力特性の内①~④は、矩形・基本1断面の4地震波について行い、⑤は、円形・基本1断面について行った。この結果を図-8 に示す。

5-2 硬化型バイリニア復元力特性

設計手法の一部として考えるならば、解析結果が安定して得られ、断面の設定と解析の結果に連続的な関係があり、不十分な断面から設計上目標とする断面を推定できるのが望ましい。もちろん、安全性の確認ができなければならないし、過度な安全としない精度も必要となる。

このような観点に立ち、第2 勾配が初期勾配に比べ極度に小さくない硬化型バイリニアモデルでは、ベンチマークテストの結果から、ばらつきが小さく、前述の設計上の特性要求も満足できる。本モデルは、道路橋示方書の耐震設計編の解説に角補強構造の設定例としても示されており、静的な繰り返し載荷試験などによって得られる許容塑性率として制限される範囲を設定し、その範囲内での解析結果の妥当性が期待される。ここでは、この許容塑性率は、繰り返し載荷試験結果から得られる骨格曲線上で、最大荷重の97% まで劣化した水平荷重に相当する変位とした。

この定義方法を図-6 に示す。なお、この基準となる骨格曲線は、次の2 ケースとし、それぞれ矩形、円形断面の基本断面1と基本断面2について異なる。

- ①共同研究の静的繰り返し載荷試験の複数の結果から推定したもの
- ②ハイブリッド試験で同断面の繰り返し載荷試験を行い、その結果から得られたもの

6. 解析結果

解析結果をハイブリッド試験結果と比較した書式でまとめ、数値、履歴、時刻歴を記入した。³⁾

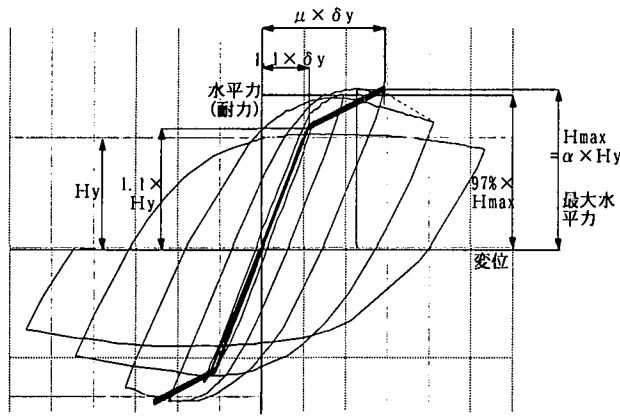


図-6 硬化型バイリニア復元力特性の定義方法

7. 解析結果とハイブリッド試験結果の比較

ハイブリッド試験の結果のうち、動的応答解析と比較したものの履歴図を一覧表にし、表-5 に示す。

解析結果のP- δ 履歴図の代表的なものをハイブリッド試験結果と併記して図-7 に示す。比較しやすさから鉛直軸に水平変位を、水平軸に水平荷重ととっている。

解析およびハイブリッド試験より得られた変位を許容変位(許容塑性率 \times 降伏変位 $=\mu \cdot \delta y$)との比で整理し、プロットする。図-9 は、水平軸をハイブリッド実験値、鉛直軸を動的応答解析による解析値とし、すべての結果をプロットしている。図-10 では、解析結果の数値が次式の範囲のもののみをプロットしている。

許容変位比：

$$\frac{|x|_{max}^A}{\mu \cdot \delta y} \leq 1.2 \quad \begin{array}{l} |x|_{max}^A \text{ 解析値に対する} \\ \text{変位の絶対最大値} \\ \mu \cdot \delta y \text{ 許容変位} \end{array}$$

つまり、図-10 は設計する場合に重要視される範囲の許容変位比を示している。

8. 考察

数種類の復元力特性を用いた解析とハイブリッド試験との比較において次のような考察をおこなった。

- ・試験の結果がある場合のように既知の履歴曲線に対して、完全弾塑性型バイリニアモデルでは、その降伏点高さのみが変数となっていることからこれを調整し設定することで最大変位などを比較的高い精度で計算できる。ただし、最小変位、残留変位などを同時に高精度に得ることは難しい。このように、調整した場合の解析による最大変位は、0.96~1.14(0.96~1.14)の範囲に、残留変位を0.69~1.19(0.97~1.19)の範囲にすることも可能である。{()内は大きな劣化の無い範囲のみに限定した数値を示す}
- ・劣化型バイリニアモデルでは、劣化が緩勾配である場合、完全弾塑性型にほぼ近い解析ができる。
- ・第3勾配を劣化型とした標準的なトリリニアモデルでは、比較的僅かな振幅増のケースで、発散してしまう場合がある。これは劣化勾配の程度に関係していると思われる。解析結果の最大変位は、発散しない場合では試験結果比で0.67~1.29(0.76~1.29)程度となる。
- ・E-D履歴モデルでは、十分なパラメータ設定のもとで、図-8 から分かるように、反力と変位の関係などをかなり高い精度な再現性を有している。ここに示した

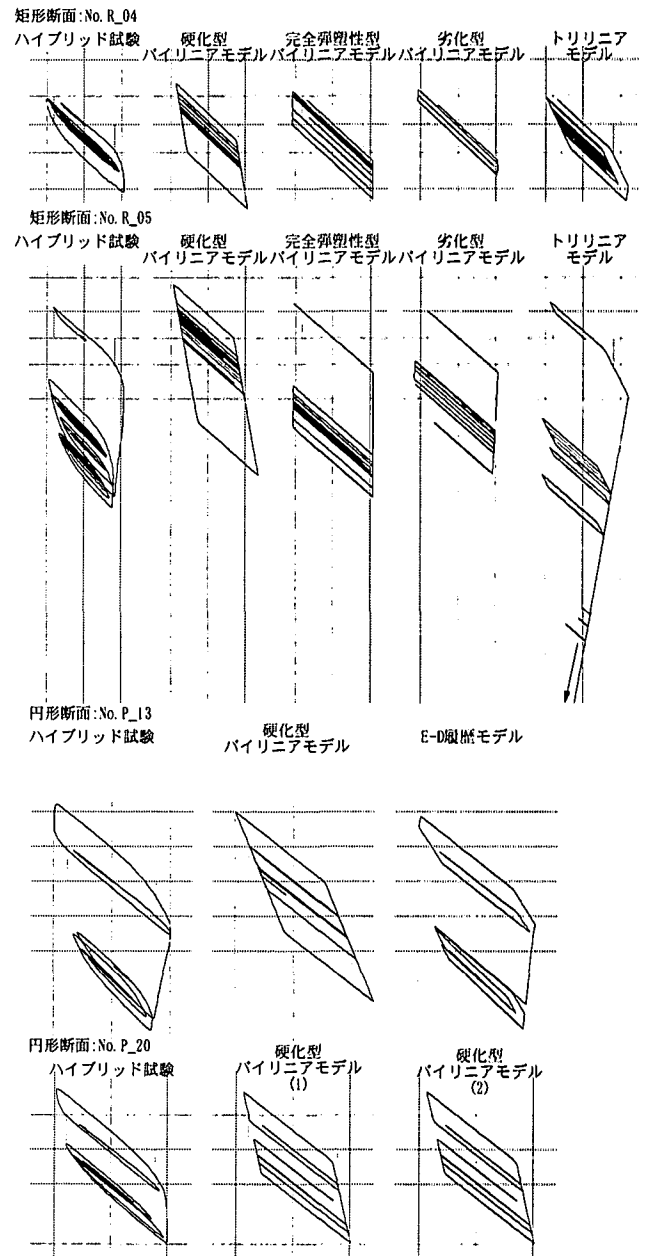


図-7 復元力に対する履歴図の比較

- 比較値において、最大変位は0.92~1.38(0.92)の範囲である。
- ・硬化型バイリニアモデルは、その供試体の材料降伏応力度と2ケース繰り返し載荷試験結果を用いて設定したが、ここに示した比較値において、最大変位は0.61~1.25(0.76~1.25)の範囲である。
- ・以上では最大変位のみに着目したが、水平変位-反力の履歴曲線の形状は劣化域までを考えれば、①E-D履歴モデル、②トリリニアモデル、③完全弾塑性型あるいは緩劣化型バイリニアモデル、④硬化型バイリニアモデルの順で再現性が高いといえる。しかし、最大荷重を越えない範囲では、完全弾塑性型を除き同様な設定が可能であることから、ここでは比較解析していないが、順位をつけにくいと思われる。

以上より復元力特性として、高度な設定をした場合と単純な場合では、最大変位のみに着目した場合、大差があると判断できない。勿論、それぞれの復元力特性に含まれるパラメータを最適に設定された場合には高度なものの精度がより高まるであろうことは推測できる。

表-5 ハイブリッド試験結果の概要

断面	供試体高 (mm)	番号 地震波 (gal)	試験結果 (大変位側を正符号で整理) 0 変位 (x/δy) +10
基本断面 1847	360.0	R_04 免震Ⅰ	
		R_05 免震Ⅰ	
		R_06 免震Ⅲ	
		R_07 免震Ⅲ	
		R_08 免震Ⅰ	
低補剛断面 1847	818.0	R_10 兵庫Ⅰ	
		R_11 兵庫Ⅰ	
		R_12 兵庫Ⅲ	
		R_13 兵庫Ⅲ	
		R_16 免震Ⅰ	
基本断面 1388	818.0	R_17 兵庫Ⅰ	
		R_18 兵庫Ⅰ	
		R_19 兵庫Ⅲ	
		P_04 免震Ⅰ	
		P_05 免震Ⅰ	
基本断面 1800	442.9	P_06 免震Ⅲ	
		P_07 免震Ⅲ	
		P_08 免震Ⅰ	
		P_09 免震Ⅰ	
		P_10 兵庫Ⅰ	
円形断面 1800	818.0	P_11 兵庫Ⅰ	
		P_12 兵庫Ⅲ	
		P_13 兵庫Ⅲ	
		P_16 免震Ⅰ	
		P_17 免震Ⅲ	
厚肉断面 1800	360.0	P_18 免震Ⅰ	
		P_19 兵庫Ⅰ	
		P_20 兵庫Ⅲ	

地震波は以下の記号で示す。
 免震Ⅰ：免震マニュアル標準地震波 / Ⅰ種地盤
 免震Ⅲ： " / Ⅲ種地盤
 兵庫Ⅰ：兵庫県南部地震波 / Ⅰ種地盤
 兵庫Ⅲ： " / Ⅲ種地盤

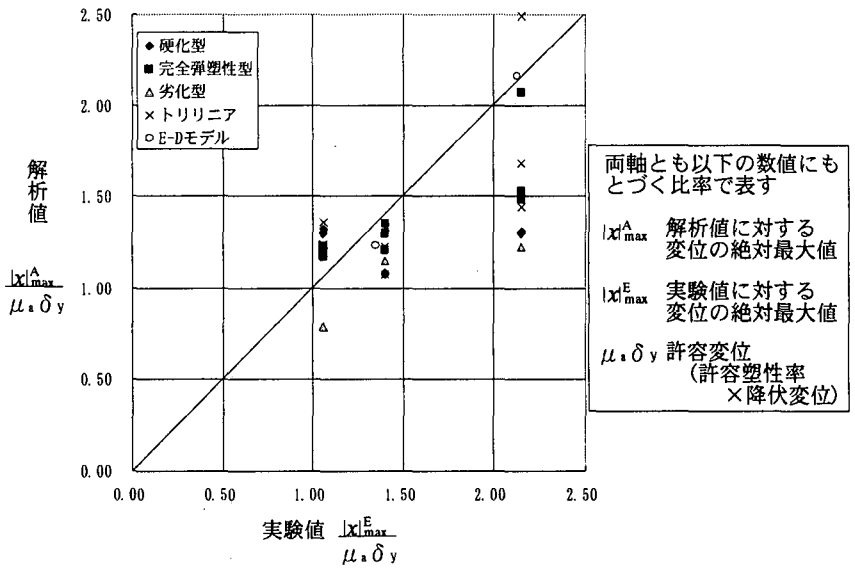


図-8 各種復元力特性に対する最大変位の実験値と解析値

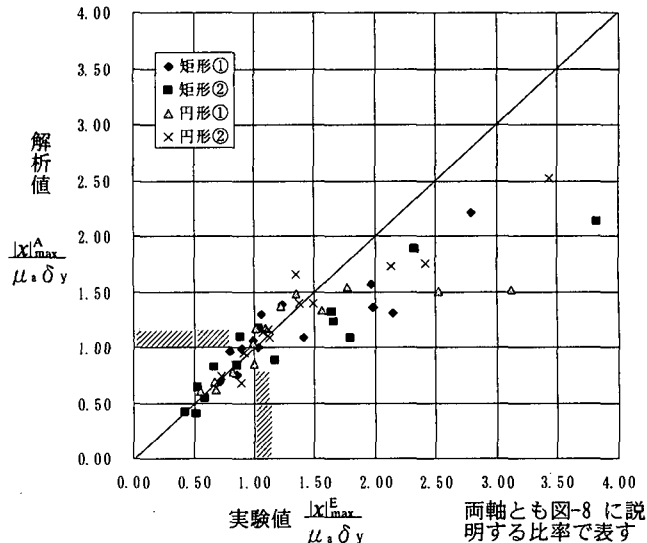


図-9 バイリニアモデルに対する最大変位の実験値と解析値(1)
(全解析データ)

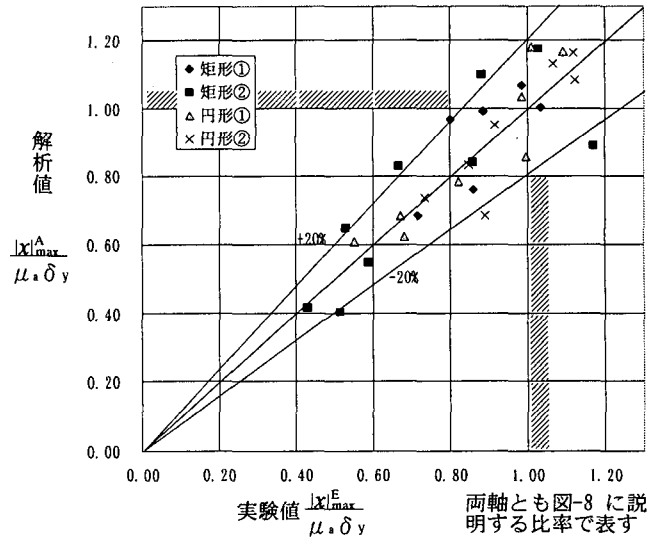


図-10 バイリニアモデルに対する最大変位の実験値と解析値(2)
(解析値が1.2以下のもの)

