

動的解析に基づく残留変位の評価に関する一検討

角本 周¹・吉川 卓²・浦川 洋介³・大木 太⁴

¹正会員 工修 オリエンタル建設㈱ 福岡支店技術部 (〒810-0001 福岡県福岡市中央区天神 4-2-31)

²正会員 工修 オリエンタル建設㈱ 第二技術部 (〒102-0093 千代田区平河町 2-1-1)

³正会員 工修 オリエンタル建設㈱ 第二技術部 (同上)

⁴正会員 工修 オリエンタル建設㈱ 第二技術部 (同上)

1. はじめに

道路橋に要求される耐震性能は、地震時の安全性に加えて、重要度の高い橋では地震後の供用性や修復性の観点から目標とされるレベルが設定される。このうち、地震後の修復性が要求される場合には、部材断面の残留損傷および部材の残留変位が比較的容易に修復可能であることを限界状態として設定しており、残留変位については橋脚の回転角が $1/100\text{rad}$ 以下となることを照査している¹⁾。

地震後に生じる残留変位は、非線形動的解析を行い、振動系の動的応答が収束した時の変位を残留変位とするのが一般的である。一方、非線形動的解析で算出される残留変位は、照査に用いる地震動の特性に大きく依存し、そのばらつきも大きい²⁾。したがって、耐震性能の照査に用いる残留変位は、できるだけ多くの地震動に対する解析結果から評価するのが望ましいが、多くの動的解析を行い耐震性能の照査を行うのは実務上煩雑となる。そこで、道路橋示方書では、動的解析を用いて耐震性能を照査する場合でも、動的解析から得られた最大応答塑性率より、我が国の地盤上で観測されたマグニチュード 6.5 以上の強震記録 63 成分に対して応答解析を行い算出された残留変位応答スペクトル（残留変位補正係数）を用いて残留変位を算出することとしている^{1), 2)}。しかしながら、道路橋示方書に示されている最大応答塑性率と残留変位の関係（残留変位補正係数）は、標準型のバイリニアモデルを有する 1 自由度系に対する解析結果に基づいて定められており²⁾、動的解析による照査が必要とされるゴム支承を用いた地震時水平力分散構造のような多自由度系や免震構造のようなマルチヒンジ系に対する検討は行われていない。

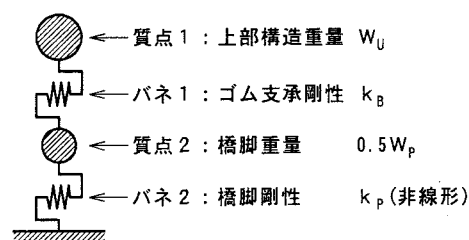
そこで、本検討では、動的解析による耐震性能の照査が必要とされる橋の形式のうち、ゴム支承を用いた地震

時水平力分散構造を想定した 2 自由度系について、最大応答塑性率と残留変位との関係を検討した。なお、本検討では、2 自由度系と 1 自由度系の相違、履歴復元力モデルの相違等が、最大応答塑性率と残留変位との関係に与える影響に着目した^{3)~5)}。

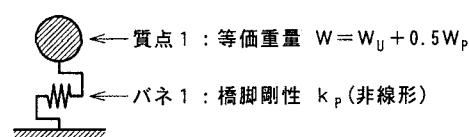
2. 解析モデルと解析条件

(1) 解析モデル

検討は、図-1 に示す 2 自由度系の解析モデルおよび比較としての 1 自由度系の解析モデルを用いて行った。ここで、2 自由度系の重量比は、一般的な桁橋の上部構造と橋脚との重量比を参考にして $W_U:0.5W_P=4:1$ とした。また、バネはゴム支承および橋脚の剛性を想定し、固有周期比の影響を検討するために剛性比を $k_B:k_P=0.25:1$ および $0.10:1$ とした。なお、橋脚の剛性は 3 段階に設定した。2 自由度系および 1 自由度系の解析ケー



(a) 2 自由度系



(b) 1 自由度系

図-1 解析モデル

表-1 2自由度系の解析ケース

解析ケース	重量比 $W_U : 0.5W_P$	剛性比 $k_B : k_P$	T_B (s)	T_1 (s)	T_2 (s)	$T_1 : T_2$	μ_d
Case 2A	4 : 1	0.25 : 1	0.346	0.713	0.141	5.05 : 1	2, 4, 6
Case 2B		0.10 : 1	0.346	1.053	0.151	6.97 : 1	
Case 2C		0.25 : 1	0.502	1.008	0.200	5.05 : 1	
Case 2D		0.10 : 1	0.502	1.490	0.214	6.97 : 1	
Case 2E		0.25 : 1	0.709	1.426	0.282	5.05 : 1	
Case 2F		0.10 : 1	0.709	2.107	0.302	6.97 : 1	

※ T_B は $k_B=\infty$ とした場合の固有周期.

表-2 1自由度系の解析ケース

解析ケース	T (s)	μ_d
Case 1A	0.500	2, 4, 6
Case 1B	1.000	
Case 1C	2.000	

すを、表-1 および表-2 に示す.

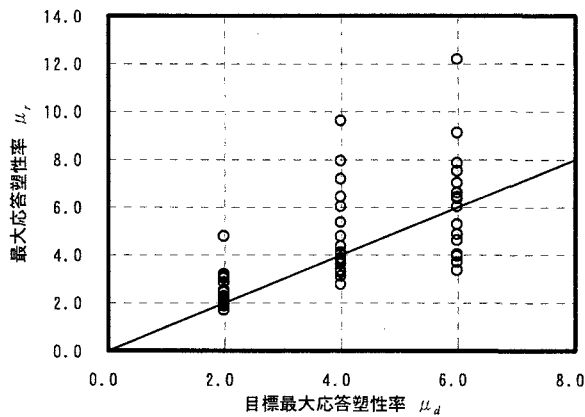
減衰マトリックスは、2自由度系では、1次振動数と2次振動数のモード減衰定数を5%としてRayleigh型で設定した. 一方、1自由度系では、減衰定数を5%として剛性比例型で設定した.

解析モデルでは、非線形性は橋脚剛性のみに生じるものとし、履歴復元力モデルとしては、標準型の完全バイリニアモデルおよび鉄筋コンクリート橋脚の履歴復元力モデルとして一般的に用いられるTakeda型の完全バイ

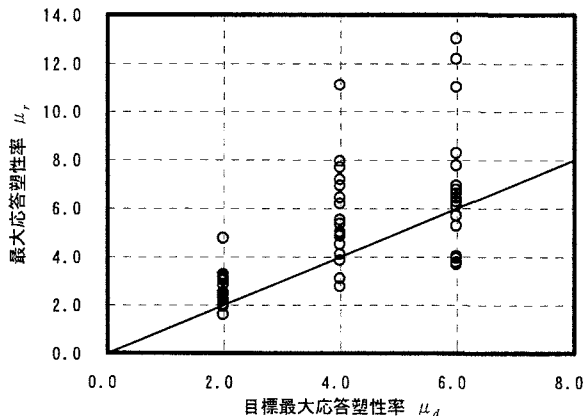
リニアモデル(除荷時剛性低下指数0.5)の2種類を用いた^{2)~5)}. ここで、骨格曲線の降伏耐力 P_y は、目標とする最大応答塑性率 μ_d に対して、2自由度系では著者らが地震時水平力分散構造の橋の耐震設計において初期値設定に用いている式(1)により設定した. また、1自由度系ではエネルギー一定則に基づいて式(2)により設定した値を用いた. 目標とする最大応答塑性率 μ_d は、2, 4, 6の3つとした.

$$P_y = \frac{S/g}{(2\mu_d-1)^{1/3}} (W_U+0.5W_P) \quad (1)$$

$$P_y = \frac{S/g}{(2\mu_d-1)^{1/2}} (W_U+0.5W_P) \quad (2)$$

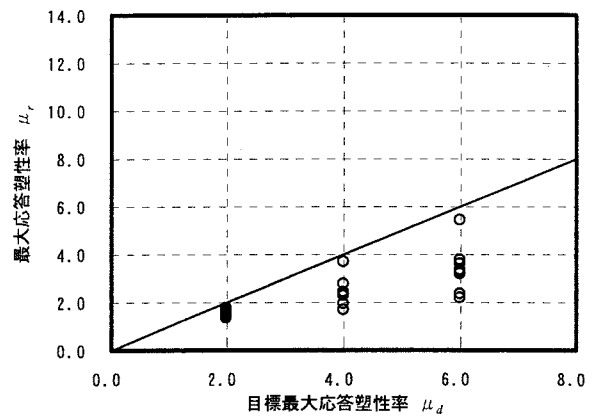


(a) 標準型バイリニアモデル

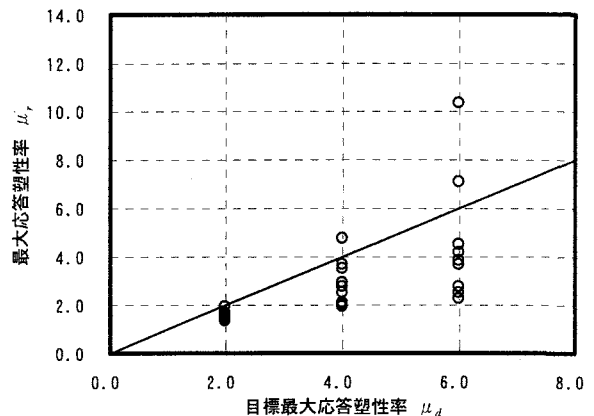


(b) Takeda型バイリニアモデル

図-2 2自由度系の最大応答塑性率の目標値と解析値



(a) 標準型バイリニアモデル



(b) Takeda型バイリニアモデル

図-3 1自由度系の最大応答塑性率の目標値と解析値

ここで、 S は1次固有周期に対する標準加速度応答スペクトルであり、 g は重力加速度である。したがって、既往の研究にあるように^{2) ~ 5)}、解析結果の最大応答塑性率が目標値に等しくなるようには設定していない。本検討の解析ケースにおける最大応答塑性率の目標値と解析値との関係を、図-2および図-3に示す。なお、同じ降伏耐力 P_y では、標準型完全バイリニアモデルのほうがTakeda型バイリニアモデルに比べて最大応答塑性率 μ_r は小さくなる傾向にある。

(2) 入力地震動

検討に用いた入力地震動には、道路橋示方書に規定されたタイプII地震動の加速度応答スペクトルの適合波3波形(II-I-1, II-II-1, II-III-1)を用いた^{1), 3)}。

3. 残留変位補正係数の算定方法

本検討で用いた履歴復元力モデルを、図-4に示す。また、図中に各履歴復元力モデルに生じ得る可能最大残留変位を示す。標準型完全バイリニアモデルで生じ得る可能最大残留変位 $\delta_{Rmax①}$ は式(3)で、Takeda型完全バイリニアモデルで生じ得る可能最大残留変位 $\delta_{Rmax②}$ は式(4)で示される。^{2) ~ 5)}

$$\delta_{Rmax①} = (\mu_r - 1) \delta_y \quad (3)$$

$$\delta_{Rmax②} = (\mu_r - \mu_r^\alpha) \delta_y \quad (4)$$

ここで、 μ_r は非線形動的解析から得られた最大応答塑性率であり、 δ_y は降伏変位、 α は除荷時剛性低下指数(本検討では0.5)である。

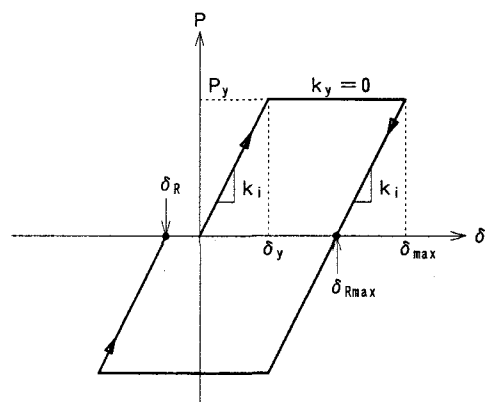
残留変位補正係数は、可能最大残留変位に対する非線形動的解析から得られる残留変位の比と定義される²⁾。そこで、本検討では、標準型完全バイリニアモデルで生じ得る可能最大残留変位 $\delta_{Rmax①}$ およびTakeda型完全バイリニアモデルで生じ得る可能最大残留変位 $\delta_{Rmax②}$ より、残留変位補正係数 $C_{R①}$ および $C_{R②}$ を式(5)および式(6)で算出した。

$$C_{R①} = |\delta_R / \delta_{Rmax①}| \quad (5)$$

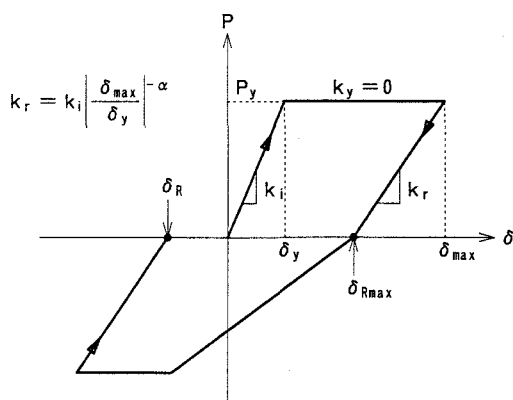
$$C_{R②} = |\delta_R / \delta_{Rmax②}| \quad (6)$$

ここで、 δ_R は非線形動的解析から得られた残留変位で、振動系の自由振動が一定値に収束した時の変位とした。

図-5および図-6に、標準型完全バイリニアモデルおよびTakeda型完全バイリニアモデルを用いた場合における2自由度系の各質点の応答波形、橋脚剛性の履歴応答を示す。ここで、各図は橋脚の降伏変位および降伏耐力で正規化して示している。各ケースとも降伏耐力 P_y



(a) 標準型完全バイリニアモデル



(b) Takeda 型完全バイリニアモデル

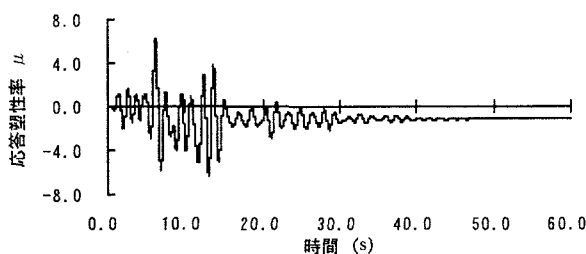
図-4 履歴復元力モデルと可能最大残留変位

は最大応答塑性率の目標値 μ_d を4として設定しているが、標準型完全バイリニアモデルを用いた場合はTakeda型完全バイリニアモデルを用いた場合に比べて、橋脚(質点2)の最大応答塑性率は小さいが、残留変位は大きい結果となっている。

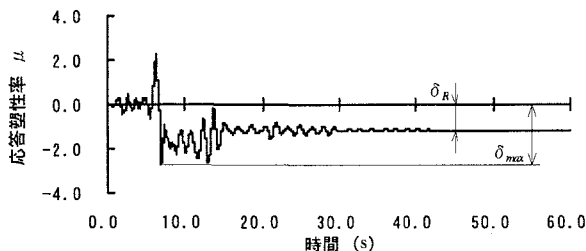
4. 残留変位補正係数の解析結果

2自由度系に対して、式(5)および式(6)により算出した残留変位補正係数を、図-7および図-8に示す。ここで、図-7では2自由度系の1次固有周期 T_1 を、図-8では最大応答塑性率 μ_r をパラメータとして整理している。なお、Takeda型完全バイリニアモデルを用いた場合の残留変位補正係数は、本来は式(4)で評価した可能最大残留変位に対して算出するものであるが、道路橋示方書に規定される残留変位補正係数との比較のため¹⁾、式(3)で評価した可能最大残留変位についても示した。

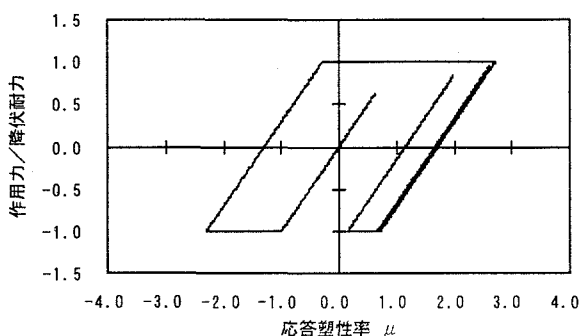
図-7より、履歴復元力モデルに標準型完全バイリニアモデルを用いた場合は、残留変位補正係数 $C_{R①}$ は固有周期との間に有意な相関は無く、ばらつきが大きく、道路橋示方書に規定された残留変位補正係数0.6より大きい傾向にある。一方、Takeda型完全バイリニアモデルを



(a) 上部構造（質点1）の応答波形

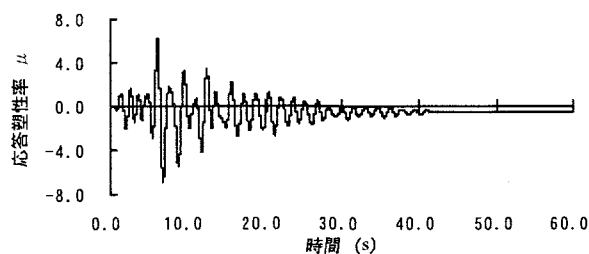


(b) 橋脚（質点2）の応答波形

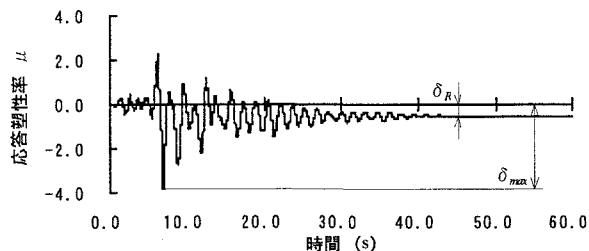


(c) 橋脚（バネ2）の履歴応答

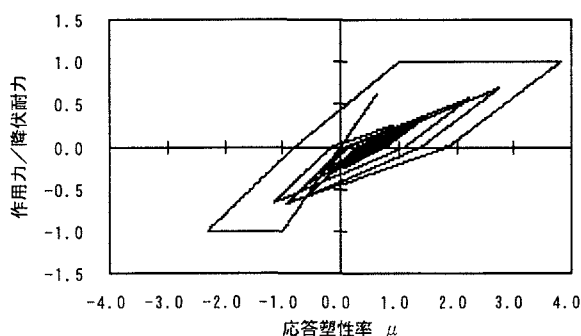
図-5 標準型バイリニアモデル（標準波Ⅱ-Ⅱ-1）



(a) 上部構造（質点1）の応答波形



(b) 橋脚（質点2）の応答波形



(c) 橋脚（バネ2）の履歴応答

図-6 Takeda 型バイリニアモデル（標準波Ⅱ-Ⅱ-1）

用いた場合も、残留変位補正係数 $C_{R①}$ および残留変位補正係数 $C_{R②}$ とともに固有周期との間に有意な相関は無いが、ばらつきは小さく、道路橋示方書に規定された残留変位補正係数 0.6 の $1/2$ 程度以下となっている。なお、今回の解析ケースでは、いずれの履歴復元力モデルを用いた場合でも、1次と2次の固有周期比が残留変位補正係数に与える影響は認められない。図-8より、2自由度系に対する残留変位補正係数は、1自由度系に対するの既往の研究と同様に^{2)~5)}、いずれの履歴復元力モデルを用いた場合でも最大応答塑性率との間に有意な相関がない結果となっている。

1自由度系に対して、式(5)および式(6)により算出した残留変位補正係数を、図-9および図-10に示す。ここで、図-9では固有周期 T を、図-10では最大応答塑性率 μ_r をパラメータとして整理している。

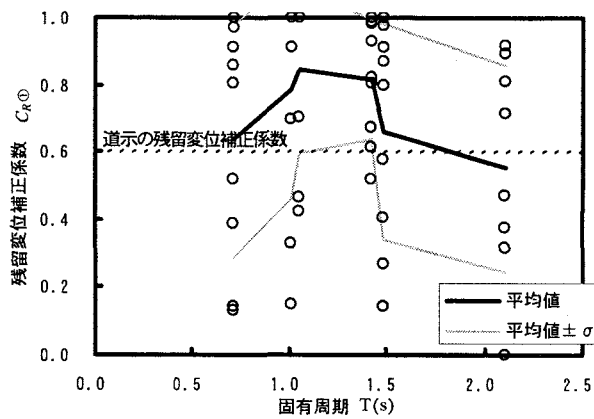
図-9より、履歴復元力モデルに標準型完全バイリニアモデルを用いた場合は、残留変位補正係数 $C_{R①}$ は道路橋示方書に規定された残留変位補正係数 0.6 と同程度の結果となっている。

表-3に、各自由度系にそれぞれの履歴復元力モデル

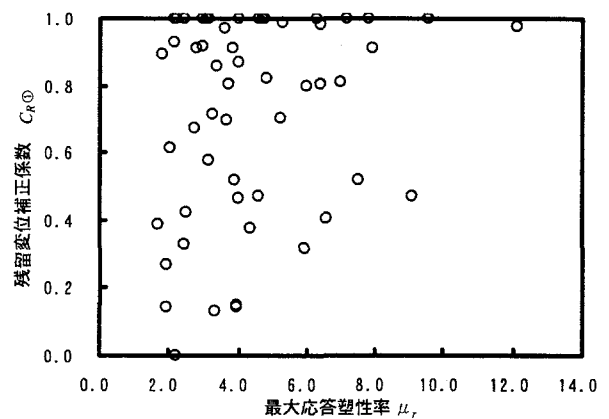
表-3 残留変位補正係数の平均値と標準偏差

自由度	復元力	補正係数	平均値	標準偏差
2自由度系	標準型	$C_{R①}$	0.715	0.300
		$C_{R②}$	0.214	0.087
	Takeda 型	$C_{R②}$	0.318	0.129
1自由度系	標準型	$C_{R①}$	0.646	0.322
		$C_{R①}$	0.109	0.076
	Takeda 型	$C_{R②}$	0.175	0.123

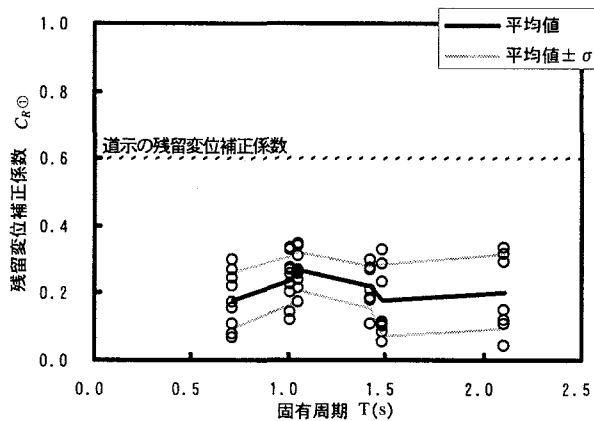
を用いた場合の、残留変位補正係数の平均値および標準偏差を示す。限られた解析ケースおよび入力地震動数ではあるが、1自由度系の残留変位補正係数は既往の研究と平均値、標準偏差とも同程度の値となっている^{2), 5)}。一方、2自由度系の残留変位補正係数は、いずれの場合も1自由度系で同じ履歴復元力モデルを用いた場合の残留変位補正係数より大きい値となっている。式(3)で評価した可能最大残留変位に対する残留変位補正係数は、標準型完全バイリニアモデルを用いた場合は平均値で 0.7 程度、標準偏差で 0.3 程度であり、Takeda 型完全バイリニアモデルを用いた場合は平均値で 0.2 程度、標準偏差で 0.1 程度である。



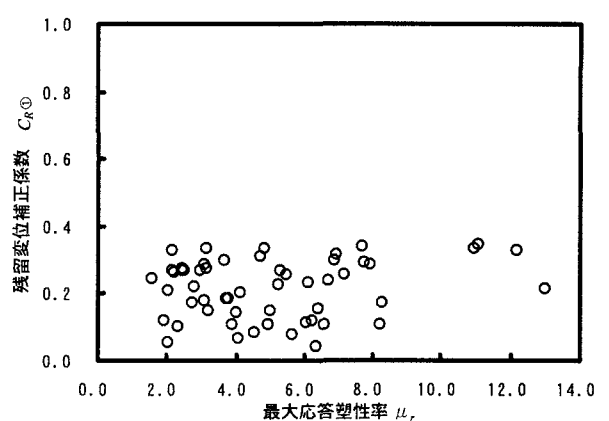
(a) 標準型バイリニアモデル (C_{R1})



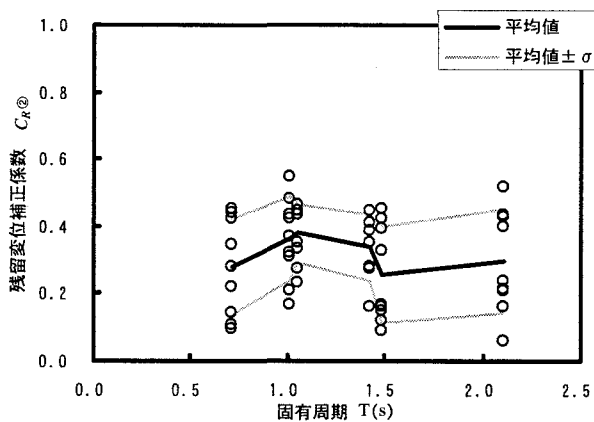
(a) 標準型バイリニアモデル (C_{R1})



(b) Takeda 型バイリニアモデル (C_{R1})

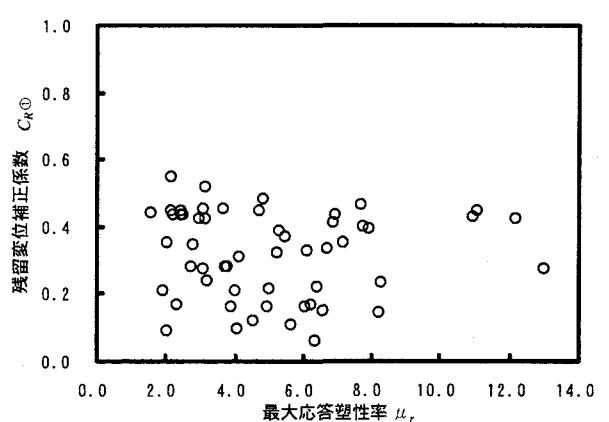


(b) Takeda 型バイリニアモデル (C_{R1})



(c) Takeda 型バイリニアモデル (C_{R2})

図-7 2自由度系の1次固有周期と残留変位補正係数



(c) Takeda 型バイリニアモデル (C_{R2})

図-8 2自由度系の最大応答塑性率と残留変位補正係数

5. まとめ

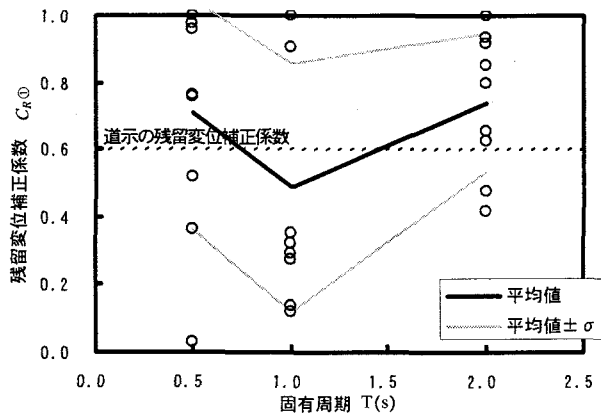
本検討では、動的解析により耐震性能の照査を行うゴム支承を用いた地震時水平力分散構造の橋を想定し、2自由度系の解析モデルで最大応答塑性率と残留変位と関係を検討した。その結果をまとめると、つきのとおりである。

- (1) 2自由度系の残留変位補正係数は、同じ履歴復元力モデルでは1自由度系に比べて大きい傾向にある。
- (2) 2自由度系においても、今回の解析ケースでは固

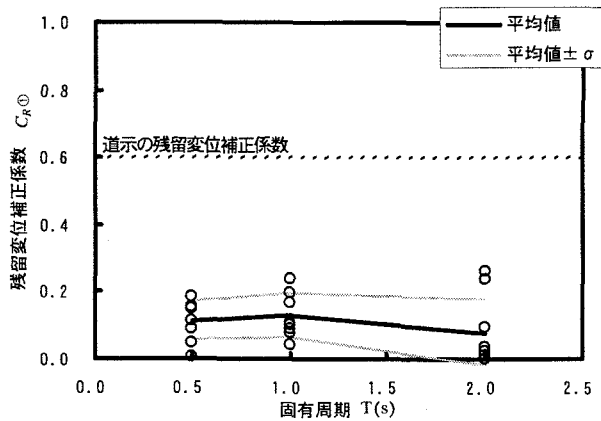
有周期や最大応答塑性率と残留変位補正係数の間に優位な相関はみられない。

(3) Takeda 型完全バイリニアモデルでは、式(3)で評価した可能最大残留変位に対する残留変位補正係数は0.2程度となる。

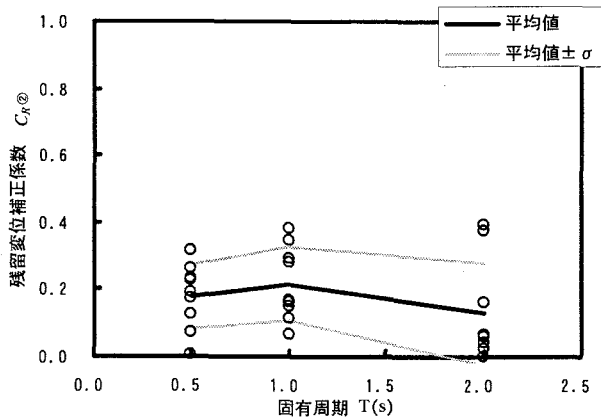
以上、限られた解析ケースおよび入力地震波数ではあるが、自由度系の相違により残留変位補正係数は異なるものと考えられる。今後は、より多くの解析ケースおよび入力地震動に対する動的解析結果を用いて、残留変位補正係数を評価する必要がある。



(a) 標準型バイリニアモデル (C_{R1})

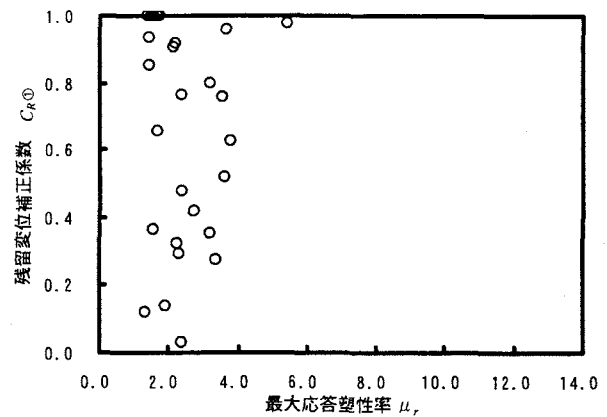


(b) Takeda 型バイリニアモデル (C_{RQ})

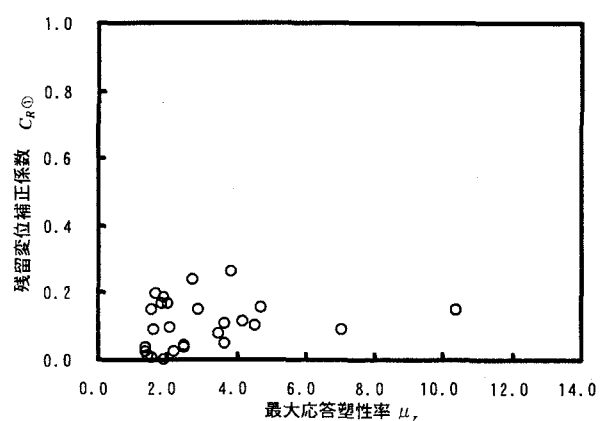


(c) Takeda 型バイリニアモデル (C_{R2})

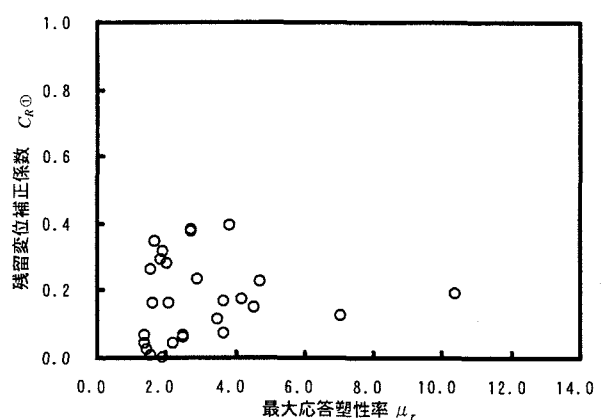
図-9 1自由度系の固有周期と残留変位補正係数



(a) 標準型バイリニアモデル (C_{R1})



(b) Takeda 型バイリニアモデル (C_{RQ})



(c) Takeda 型バイリニアモデル (C_{R2})

図-10 1自由度系の最大応答塑性率と残留変位補正係数

参考文献

- (1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，2002.3.
- (2) 川島一彦，Gregory A. Macrae，星隈順一，長屋和宏：残留変位応答スペクトルの提案とその適用，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.183-192，1994.10.
- (3) 尾山靖史，矢部正明：剛性低下型バイリニア履歴特性における残留変位に関する検討，第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，

pp.263-270，1998.12.

- (4) 尾山靖史，矢部正明：剛性低下履歴モデルの残留変位に関する検討，第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.333-339，1999.12.
- (5) 星隈順一，運上茂樹，長屋和宏：耐震設計における鉄筋コンクリート橋脚に生じる残留変位の評価，第5回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.399-404，2002.1.