

ゴム支承を用いた地震時水平力分散構造の残留変位に関する一検討

大木 太¹・吉川 卓²・浦川 洋介³・角本 周⁴

¹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)

²正会員 工修 オリエンタル建設㈱ 第二技術部 (同上)

³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)

⁴正会員 工修 オリエンタル建設㈱ 福岡支店技術部 (同上)

1. はじめに

道路橋では、地震時に落橋に対する安全性を確保することに加えて、重要度の高い橋では応急復旧程度で橋としての機能を速やかに回復する必要があるという観点から目標とされる限界状態（損傷程度）が設定される。このうち、地震後の機能回復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や基礎の残留回転角が $1/100\text{rad}$ 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が、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波形に対する解析結果から評価するのが望ましい。一方、多くの波形を用いて動的解析を行い耐震性能の照査を行うことは、特に橋全体系を詳細にモデル化して解析する場合などでは、多大な解析時間が必要になるなどの実務上の問題が生じる。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、3波形程度に対する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比応答スペクトルの平均値（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、道路橋示方書に規定されている最大応答塑性率と残留変位との関係（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⁾、例えば、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2自由度系に対する検討は行われていない。

そこで、著者らは、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1自由度系と比較して検討を行っている³⁾。その結果、限定的な解析パラメータに対する結果ではあるが、2自由度系の残留変位比応答スペクトルの平均値は、同じ履歴復元力モデルを用いた場合、1自由度系に比べて大きくなる傾向が認められた。そこで、2自由度系の重量比や剛性比などのパラメータが残留変位比応答スペクトル等に与える影響について、さらに追加検討を行った。

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を用いて行った。2自由度系における重量比としては、実際の桁橋の上部構造と橋脚との重量比の範囲を参考にして $W_U:0.5W_P=9:1$, $7:1$ および $5:5$ の3ケースを設定した。重量比 $5:5$ のケースは、支間長と橋脚高が同程度の橋を想定している。また、バネはゴム支承および橋脚の剛性を想定し、固有周期およびその比率の影響を検討するために、支承が固定条件の場合の固有周期が0.3秒、0.5秒および0.7秒となるように橋脚の剛性を設定し、さらに、2自由度系の1次モードの固有周期がその2倍、3

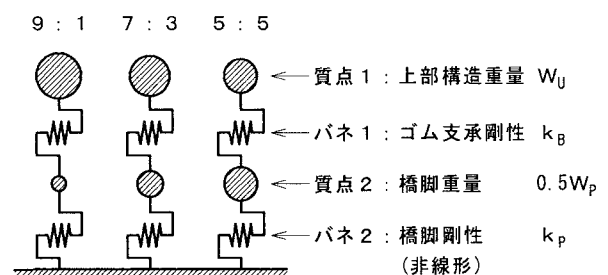


図-1 解析モデル

表-1 解析パラメータ

T_B (s)	重量比 $W_U : 0.5W_P$	T_1 (s)	$T_1 : T_2$	剛性比 $k_B : k_P$	μ_d
0.300	9 : 1	$T_B \times 2$	7.21 : 1	0.292 : 1	2, 4, 6
		$T_B \times 3$	10.01 : 1	0.111 : 1	
		$T_B \times 4$	13.02 : 1	0.060 : 1	
0.500	7 : 3	$T_B \times 2$	4.06 : 1	0.216 : 1	
		$T_B \times 3$	5.71 : 1	0.085 : 1	
		$T_B \times 4$	7.47 : 1	0.046 : 1	
0.700	5 : 5	$T_B \times 2$	3.06 : 1	0.146 : 1	
		$T_B \times 3$	4.37 : 1	0.059 : 1	
		$T_B \times 4$	5.75 : 1	0.032 : 1	

※ T_B は $k_B=\infty$ とした場合の固有周期。

倍および4倍となるようにゴム支承の剛性を設定した。以上の解析パラメータの組合せより、全解析ケースは27ケースとなり、1次モードの固有周期は0.6秒から2.8秒の範囲となる。表-1に解析パラメータおよびその固有周期比、バネ剛性比等を示す。

解析における減衰マトリックスは、初期剛性に対してRayleigh減衰により設定した。ここで、橋脚剛性の非線形化に伴い過大な粘性減衰力が解析上付加されないように^{4), 5)}、本検討ではRayleigh減衰の基準振動数に2自由度系の1次振動数とその50倍の振動数を用い、基準振動

数に対する減衰定数はいずれも5%とした。Rayleigh減衰の最小値は、1次振動数の約7倍の振動数において約1.4%となる。なお、本検討で用いたRayleigh減衰による解析結果は、基準振動数に2自由度系の1次振動数および2次振動数を用いた場合に比べて、橋脚の応答は大きく、ゴム支承の応答は小さくなる。

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、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

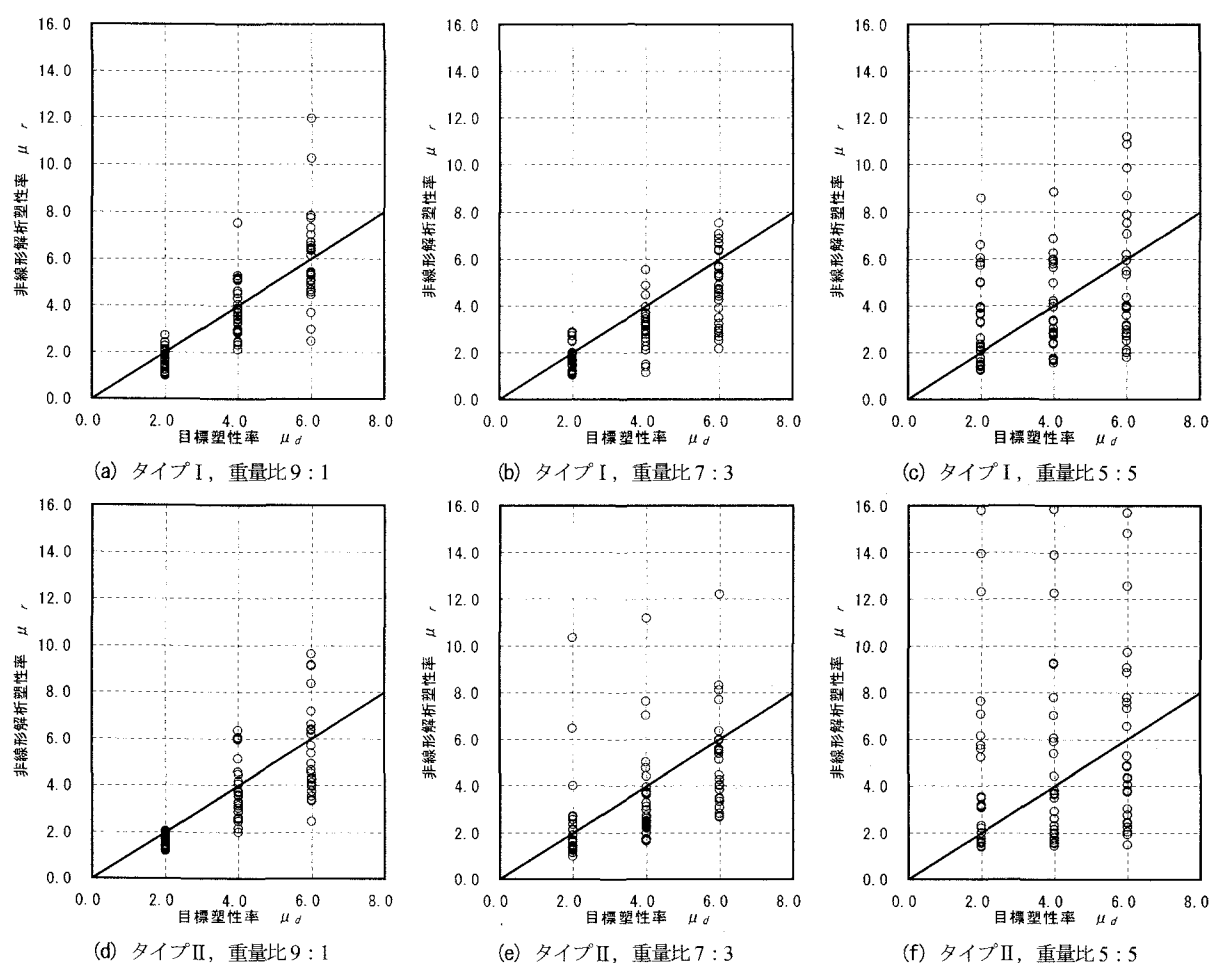


図-2 2自由度系の最大応答塑性率の目標値と非線形解析値

0.5) を用いた^{6)~8)}。ここで、骨格曲線の降伏変位 δ_y は、目標とする最大応答塑性率 μ_d に対して、各入力地震動を用いて等価線形化法により設定した^{9), 10)}。したがって、既往の研究にあるように^{2), 6)~8)}、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。等価線形化法の等価剛性 k_{eq} および等価減衰定数 h_{eq} は最大応答塑性率の 70% の変位に対して設定し、構成要素の構造減衰はゴム支承および橋脚とも 5% とした。ただし、前述した Rayleigh 減衰の設定などの影響により、等価線形化法により算出した最大応答値が非線形動的解析により算出した最大応答値を過小評価したことから、本検討では、その比率を 70% として降伏変位 δ_y を補正 (降伏変位 δ_y を $1/0.7$ 倍) して設定した。目標とする最大応答塑性率 μ_d は、2, 4, 6 の 3 つとした。本検討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 に示す。重量比が小さいケースほど、目標値に対する解析値のばらつきが大きい結果となっている。

(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Ⅰ地震動およびタイプⅡ地震動の加速度応答スペクトルの適合波を各地盤種別毎に 1 波形、合計 6 波形 (Ⅰ-Ⅰ-1, Ⅰ-Ⅱ-1, Ⅰ-Ⅲ-1, Ⅱ-Ⅰ-1, Ⅱ-Ⅱ-1, Ⅱ-Ⅲ-1) を用いた¹⁾。

3. 残留変位比の算定方法

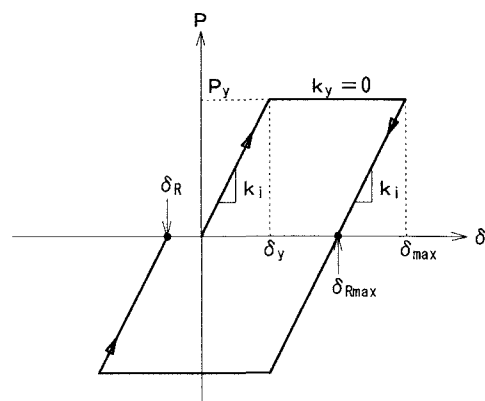
本検討で用いた Takeda 型の完全バイリニアモデルを、図-3 (b) に示す。また、道路橋示方書に規定された RC 橋脚の残留変位補正係数を算出するために用いられた標準型の完全バイリニアモデルを、図-3 (a) に示す¹⁾。標準型の完全バイリニアモデルで生じ得る可能最大残留変位 $\delta_{Rmax①}$ は式 (1) で、一方、Takeda 型の完全バイリニアモデルで生じ得る可能最大残留変位 $\delta_{Rmax②}$ は式 (2) で示される^{2), 6)~8)}。

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

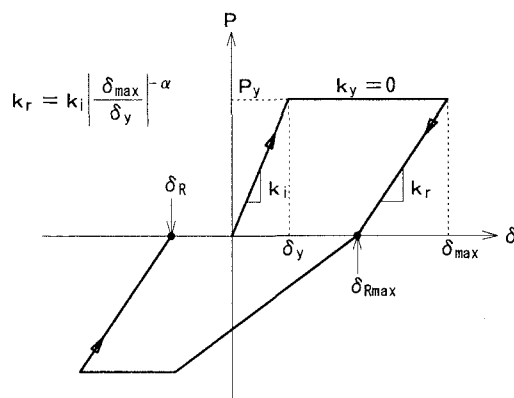
$$\delta_{Rmax②} = (\mu_r - \mu_r^\alpha) \delta_y \quad (2)$$

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。

残留変位比は、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で定義される²⁾。したがって、残留変位比は解析に用いた履歴復元力モデルに応じた可能最大残留変位を用いて算出するべきものであるが、本検討では道路橋示方書に規定された残留変位補正係数と比較するために、標準型の完全バイリニアモデル



(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-3 履歴復元力モデルと可能最大残留変位

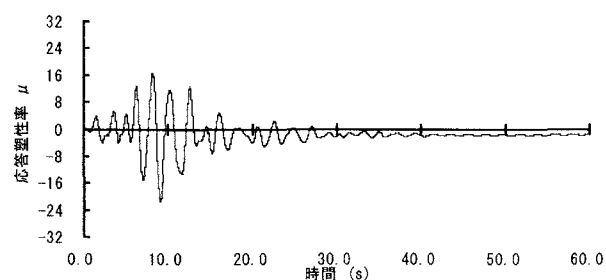
に対する可能最大残留変位 $\delta_{Rmax①}$ および Takeda 型の完全バイリニアモデルに対する可能最大残留変位 $\delta_{Rmax②}$ それぞれを用いて算出することとした。以下、本検討における残留変位比 $C_{R①}$ および $C_{R②}$ は、式 (3) および式 (4) で算出した値である。

$$C_{R①} = |\delta_R / \delta_{Rmax①}| \quad (3)$$

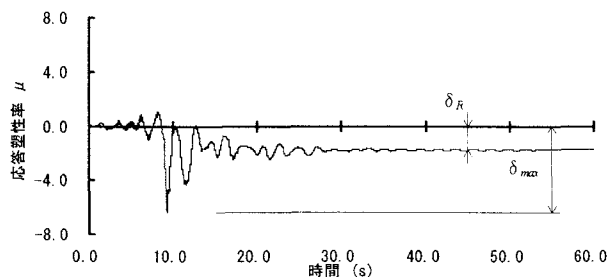
$$C_{R②} = |\delta_R / \delta_{Rmax②}| \quad (4)$$

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。

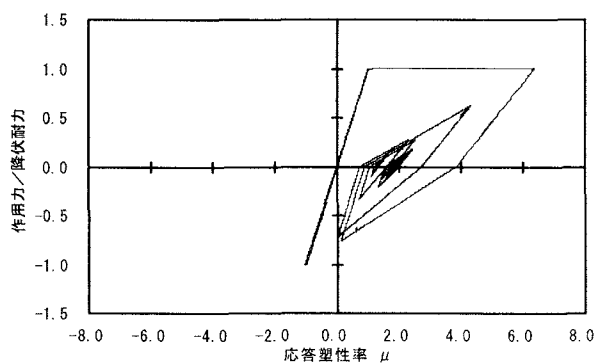
図-4 および図-5 に、解析結果の一例として、重量比 9:1 の解析ケースおよび重量比 5:5 の解析ケース (1 次周期 2 秒) における各質点の応答波形、橋脚剛性の履歴応答を示す。ここで、各図は橋脚の降伏変位および降伏耐力で正規化して示している。両ケースとも橋脚の応答塑性率の最大値は 6 程度であるが、上部構造の応答は重量比 5:5 のケースが 50% 程度大きい。また、橋脚の応答波形には、重量比 5:5 のケースに 2 次モードの成分がより多く含まれている。橋脚の履歴応答は重量比 9:1 のケースは 1 方向のみに塑性化が生じており、その結果として残留変位が大きくなっている。



(a) 上部構造（質点1）の応答波形

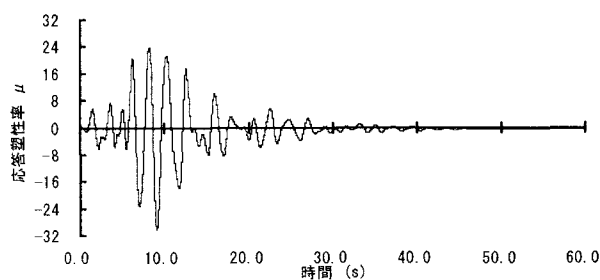


(b) 橋脚（質点2）の応答波形

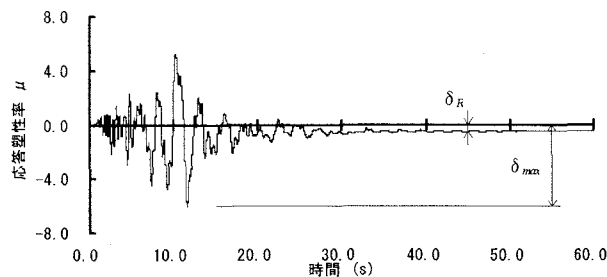


(c) 橋脚（パネ2）の履歴応答

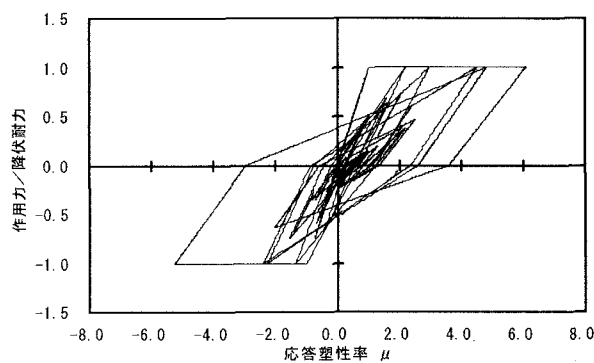
図-4 重量比9:1, $\mu_d=4$, 標準波II-II-1



(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（パネ2）の履歴応答

図-5 重量比5:5, $\mu_d=4$, 標準波II-II-1

4. 残留変位比の解析結果

式(3)および式(4)により算出した残留変位比を重量比毎に解析ケースの1次固有周期に対して整理した結果を、それぞれ図-6および図-7に示す。ここで、図-6中の「道示の残留変位補正係数」は、道路橋示方書で規定されるRC橋脚に対する残留変位補正係数0.6を示している。

標準型完全バイリニアモデルの可能最大残留変位を用いて算出した残留変位比 $C_{R①}$ は、最大値が0.4程度、平均値が0.1~0.3程度であり、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以下となっている。一方、Takeda型完全バイリニアモデルの可能最大残留変位を用いて算出した残留変位比 $C_{R②}$ は、最大値が0.6程度、平均値が0.2~0.5程度である。いずれの残留変位比も、タイプⅠ地震動およびタイプⅡ地震動ともに、固有周期に対する相関性は低く特定の傾向は認められない。また、残留変位比は、タイプⅠ地震動およびタイプⅡ地震動とも、上部構造と橋脚との重量比が小さくなるほど小さくなる傾向がある。

式(3)および式(4)により算出した残留変位比を重量比毎に最大応答塑性率に対して整理した結果を、それぞれ図-8および図-9に示す。ここで、図中の直線は、最大応答塑性率と残留変位比との関係を最小二乗近似した結果である。

いずれの残留変位比も、タイプⅠ地震動およびタイプⅡ地震動ともに、最大応答塑性率に対する相関性は低く特定の傾向は認められない。最小二乗近似した結果も、最大応答塑性率が増加すると残留変位比が増加するケースと減少するケースがあり、その重相関係数は、最大で0.5程度、平均で0.2程度である。

図-11および図-12には、上部構造と橋脚の最大応答値の比率 U_{Pmax}/U_{Gmax} を1次モードの比率 ϕ_{P1}/ϕ_{G1} で除した値を指標として、残留変位比を整理した結果を示す。ここで、最大応答値は同時に生じたものではないが、 $(U_{Pmax}/U_{Gmax}) / (\phi_{P1}/\phi_{G1})$ の値が大きいほど上部構造の最大応答値に対する橋脚の最大応答値の比率が1次モード形状の比率より大きいことになり、2次モードの影響程度を示した一つの指標となる。

いずれの残留変位比も、タイプⅠ地震動およびタイプ

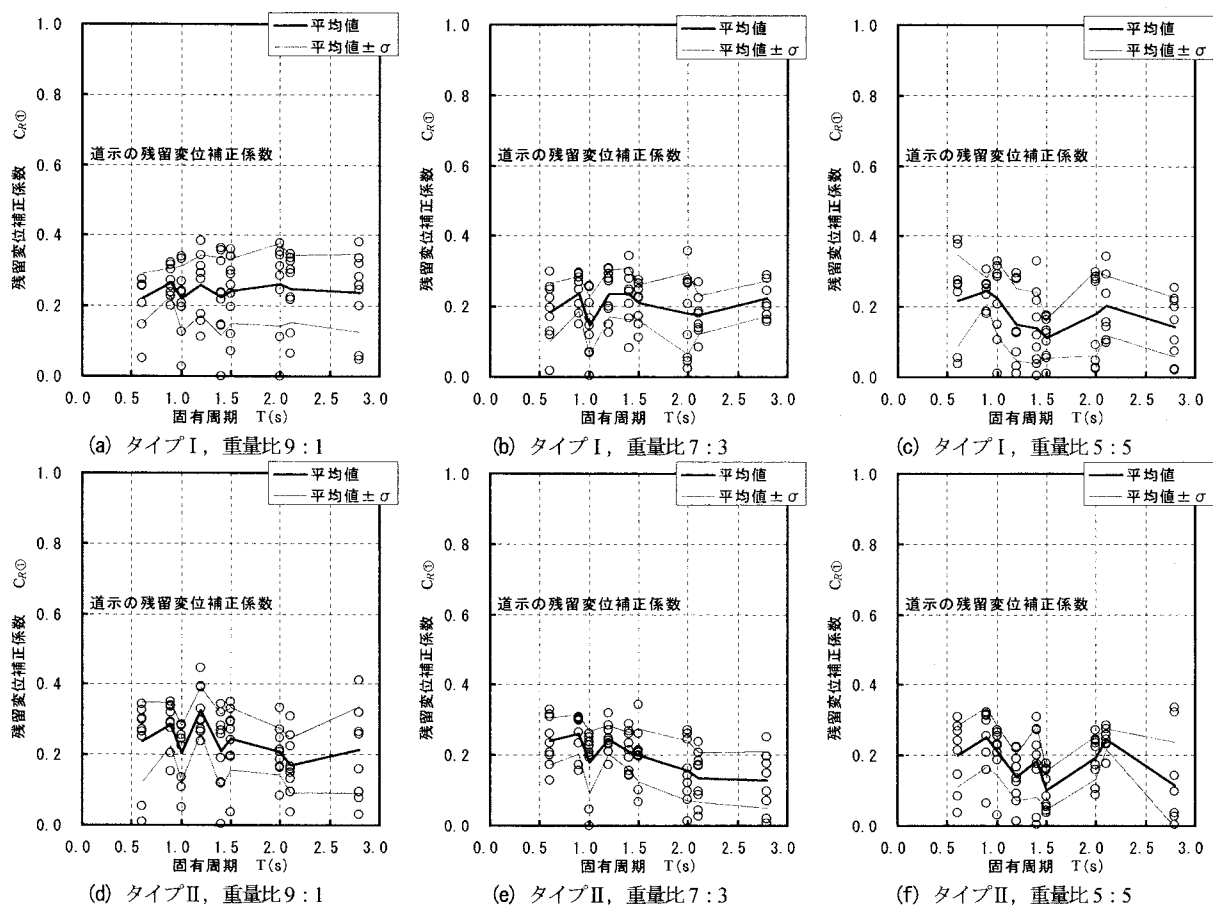


図-6 2自由度系の1次固有周期と残留変位補正係数 C_{R1}

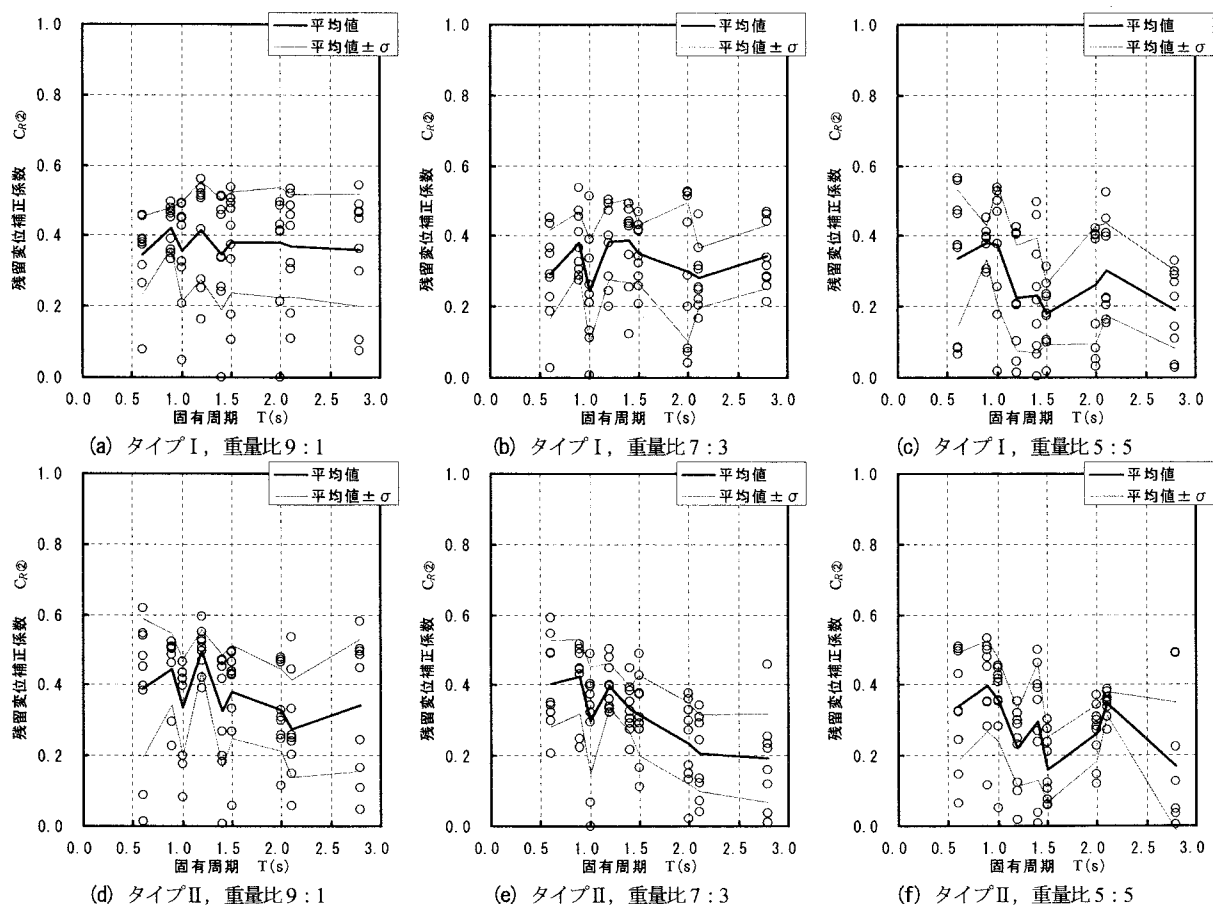


図-7 2自由度系の1次固有周期と残留変位補正係数 C_{R2}

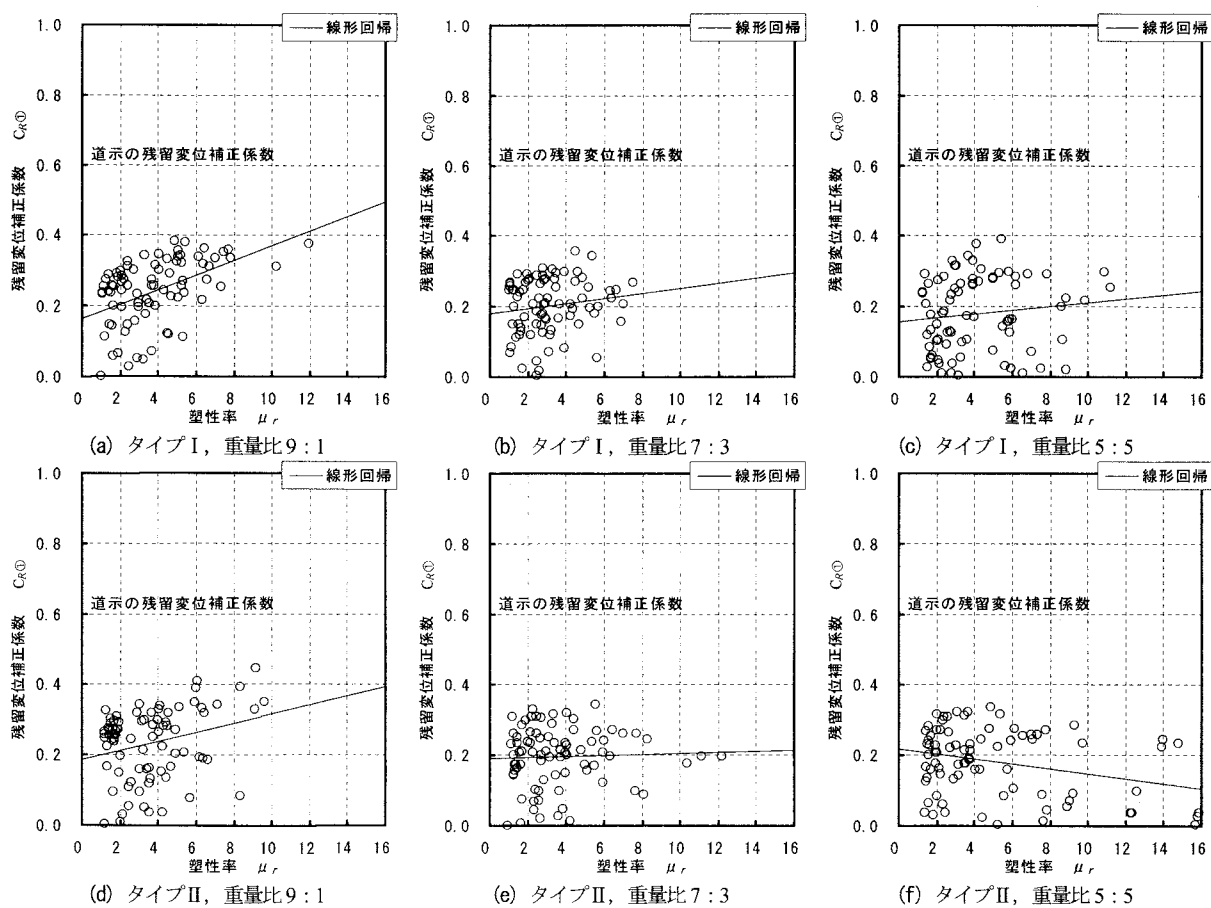


図-8 橋脚の最大応答塑性率と残留変位補正係数 C_{R1}

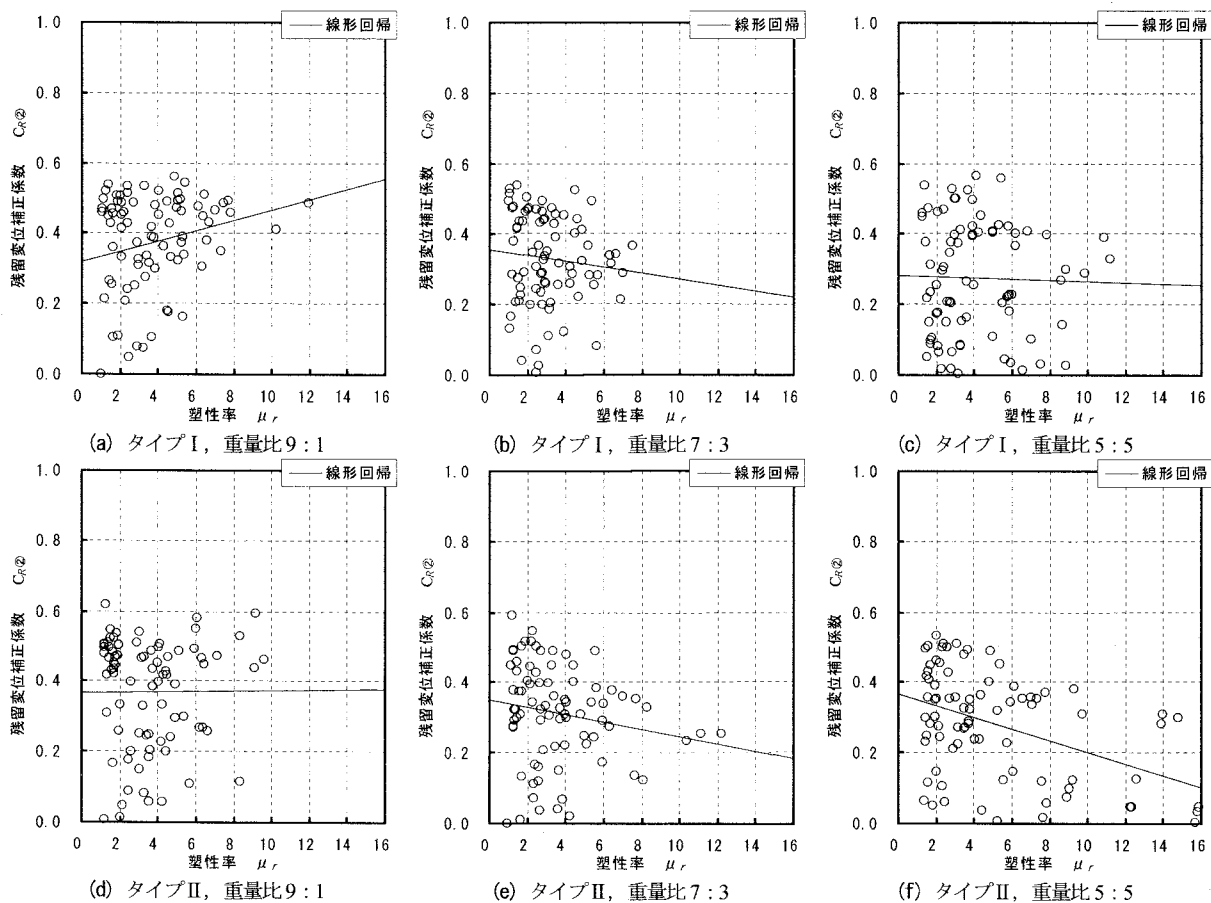


図-9 橋脚の最大応答塑性率と残留変位補正係数 C_{R2}

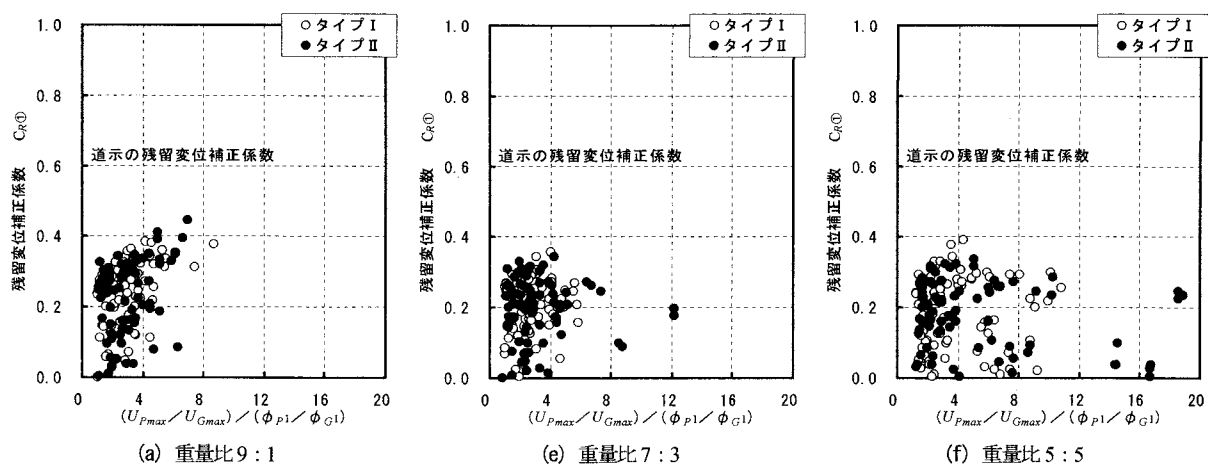


図-10 2次振動モードが残留変位補正係数 C_{R1} に与える影響

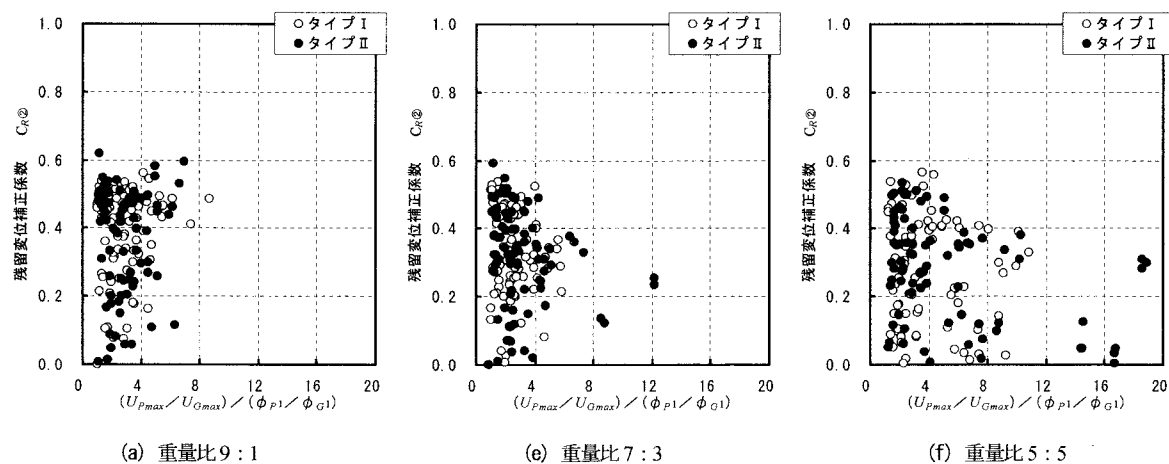


図-11 2次振動モードが残留変位補正係数 C_{R2} に与える影響

表-2 残留変位比の平均値と標準偏差

補正係数	地震波	重量比9:1		重量比7:3		重量比5:5	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
C_{R1}	タイプI	0.242	0.095	0.203	0.079	0.179	0.105
	タイプII	0.234	0.100	0.196	0.083	0.182	0.094
	合計	0.238	0.098	0.200	0.081	0.181	0.100
C_{R2}	タイプI	0.376	0.140	0.329	0.130	0.276	0.160
	タイプII	0.370	0.156	0.313	0.138	0.283	0.149
	合計	0.373	0.148	0.321	0.134	0.280	0.155

II地震動ともに、2次振動モードの影響に対する相関性は低く特定の傾向は認められない。

表-2に、それぞれの残留変位比を重量比毎に平均した結果を示す。残留変位比 C_{R1} の平均値は重量比9:1の場合0.24、重量比7:3の場合0.20、重量比5:5の場合0.18であり、重量比5:5の場合は重量比9:1の場合の75%程度の値となっている。一方、残留変位比 C_{R2} の平均値は重量比9:1の場合0.37、重量比7:3の場合0.32、重量比5:5の場合0.28であり、既往の研究で得られている Takeda 型完全パイリニアモデルの履歴復元力モデルを有する1自由度系の残留変位比0.2程度に比べて、2.0~1.5倍程度大きい結果となっている⁸⁾。

5. まとめ

本検討では、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自由度系の重量比や剛性比等をパラメータとして、最大応答塑性率と残留変位との関係を検討した。その結果をまとめると、次のとおりである。

- (1) 2自由度系の残留変位比は、今回の解析ケースの範囲では、固有周期や最大応答塑性率との間に優位な相関はみられない。
- (2) 2自由度系の残留変位比は、今回の解析ケースの範囲では、地震動のタイプによる相違はみられない。
- (3) 2自由度系の残留変位比は、上部構造と橋脚との

重量比が小さいほど小さくなる傾向がある。

(4) 2自由度系の残留変位比は、道路橋示方書に規定された残留変位補正係数の1/3程度の値となるが、既往の研究から得られている同じ履歴復元力モデルを有する1自由度系の残留変位比に比べて大きな値を示す。

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) 角本周，吉川卓，浦川洋介，大木太：動的解析の基づく残留変位の評価に関する一検討，第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.471-476，2004.1.
- 4) 松田泰治，大塚久哲，山田純司：ゴム支承を用いた反力分散構造の減衰設定に関する一考察，第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.411-416，2003.1.
- 5) 小倉裕介，運上茂樹：非線形動的解析における粘性減衰のモデル化に関する一考察，第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.155-162，2004.1.
- 6) 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.
- 7) 尾山靖史，矢部正明：剛性低下型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.
- 8) 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.
- 9) 西田秀明，運上茂樹：等価線形化法による地震応答変位の推定，土木技術資料，Vol.45，No.8，pp.62-67，2003.8.
- 10) 矢部正明：地震時水平力分散構造を有する橋梁の非線形応答と等価線形化法の適用性に関する検討，第28回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1005-1008，2001.8.