

P-Δ効果が1自由度解析モデルの損傷度指標に与える影響

島袋武* 山下典彦**

Influence of P-Δ effect on Damage Index of SDOF Model

Takeshi SHIMABUKURO* Norihiko YAMASHITA**

ABSTRACT

Response of structures during earthquakes is complex. A damage index of inelastic structures was proposed to quantitatively represent the damage of structures threatened by earthquakes. However, it failed to consider the P-Δ effect that measures the decline of the restoration force that might cause structures to collapse. Thus, we analyzed the elasto-plastic earthquake response using five SDOFs of models and considered the influences of the P-Δ effect and the damage index by changing the yielding strength, the post yielding stiffness, and the differences of the each SDOF.

Keywords : damage index, P-Δ effect, yielding strength, ductility factor, post yielding stiffness

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震の発生を契機に、橋梁の耐震性能評価の必要性が認識された。翌年1996年12月の道路橋示方書・同解説、Ⅴ耐震設計編では、性能照査型設計が部分的に取り込まれた。さらに、2002年3月には、仕様規定型から性能規定型に改訂された。このように、現行の構造物の耐震設計⁽¹⁾は、性能照査型設計が採用されている。しかしながら、その具体的方法や性能の規定方法は、対象とする構造物により差異がみられるのが現状で、構造物に要求される性能水準の明確化及び構造物の保有する性能の評価手法の開発並びにそれらの具体的設計法への展開が必要となってきた。

一方、それは、塑性域の変形性能に期待しながらも、残留変位規定や慣性力の下限值規定によってある程度の変形性能と耐力を有するような橋脚が得られるようになっており、P-Δ効果の影響を無視できる領域で設計している。しかしながら、塑性応答は複雑であり、P-Δ効果の影響で構造物が倒壊する危険性がある。

そこで本論文では、地震時の構造物の損傷度を数値的に表現する損傷度指標へのモデル化の影響を検討す

る。まず初めに、損傷度指標と現行の耐震性能規定の関係について述べる。次に、損傷度指標などを算出するため、5種類の解析モデル(P-Δ効果の影響の有無を含む1自由度系)を設定し、弾塑性地震応答解析を行う。この解析結果を用いて、応答塑性率や損傷度指標が、降伏強度と解析モデルの差異によって、どのような影響を受けるかを検討する。また、2次剛性比と解析モデルの差異による影響も検討する。さらに、それぞれの過程で算出された損傷度指標の値が、目標値として設定された損傷度指標を満足するかについても検討する。

2. 損傷度指標と弾塑性地震応答解析

2.1 損傷度指標 本論文では、式(1)に示す家村ら⁽²⁾の損傷度指標 DI を用いた。

$$DI = \frac{\mu_d - 1}{\mu_u - 1} + \frac{\beta \cdot \mu_h}{\mu_u} \quad (1)$$

ここに、 μ_d 、 μ_w 、 μ_h はそれぞれ応答塑性率、終局変位靱性率、エネルギー靱性率であり、下式のように定義されている。また、 β は家村ら⁽²⁾によると、部材の断面特性等に依存した正の係数であり、広域な範囲を持つ値なので、その平均値 $\beta=0.15$ とした。

$$\mu_d = \frac{\delta_{\max}}{\delta_y} \quad (2)$$

* 専攻科 都市工学専攻

** 都市工学科 教授

$$\mu_u = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (3)$$

$$\mu_h = \frac{E_h}{P_y \cdot \delta_y} \quad (4)$$

ここに、 δ_{max} 、 δ_y 、 δ_u はそれぞれ最大変位、降伏変位、終局変位であり、 E_h 及び P_y は、それぞれ履歴吸収エネルギー及び降伏強度である。さらに、 μ_u は道路橋示方書における曲げ破壊型の許容塑性率の算定式⁽¹⁾から式(5)のように定義されている。ここでは、「橋脚の致命的な損傷に対しての安全性が確保される塑性率」を許容塑性率とするため、許容塑性率 μ_a は5.0と想定し、 $\mu_u=7.0$ を用いた。

$$\mu_a = 1 + \frac{\delta_u - \delta_y}{\alpha \cdot \delta_y} = 1 + \frac{\mu_u - 1}{\alpha} \quad (5)$$

ここに、 α は安全係数で、 $\alpha=1.5$ とした⁽¹⁾。

式(1)の損傷度指標 DI の値と構造物の損傷状態及び構造物の被害の外観の関係は、Ghobarah ら⁽³⁾によって、実在する鉄筋コンクリート構造物の地震後の被害状況を鑑みて設定されている。さらに、道路橋示方書⁽¹⁾は、目標性能は想定地震動に応じて次の3段階に設定しており、①耐震性能Ⅰ：地震によって橋としての健全性を損なわない性能、②耐震性能Ⅱ：地震による損傷が限定的なものに留まり、橋としての機能が速やかに行い得る性能、③耐震性能Ⅲ：地震による損傷が橋として致命的とならない性能、としている。家村ら⁽²⁾は、これらの耐震性能とそれに対応する損傷度指標の値の関係を提案した。以上の損傷度指標と構造物の損傷状態及び耐震性能の関係を組み合わせたものが表1である。

表1 損傷状態と損傷度指標の関係

損傷状態	損傷度指標の値	耐震性能	構造物の外観
無損傷	0.00	耐震性能Ⅰ	ひび割れなし
使用可能	0.08		
修復可能	0.18	耐震性能Ⅱ	中程度のひび割れ
修復不可能	0.36		
崩壊	0.60		
		耐震性能Ⅲ	鉄筋剥き出し
			せん断耐力・軸耐力の損失

2.2 解析モデル 解析モデル⁽⁴⁾は、図1に示す一般的な水平振動を扱った水平モデル(以下、水平モデルと呼ぶ。)、微小変形を対象とした回転近似モデル(以下、回転近似モデル(P-Δ効果なし)と呼ぶ。)と大変形を対象とした回転厳密モデル(以下、回転厳密モデル(P-Δ効果なし)と呼ぶ。)、そして、それぞれの回転モデルに質点の高さの変化に伴う復元力の低下を引き起こすP-Δ効果を考慮したモデル(以下、それぞれ、回転近似モデル(P-Δ効果あり)、回転厳密モデル(P-Δ効果あり)と呼ぶ。)の5種類とした。

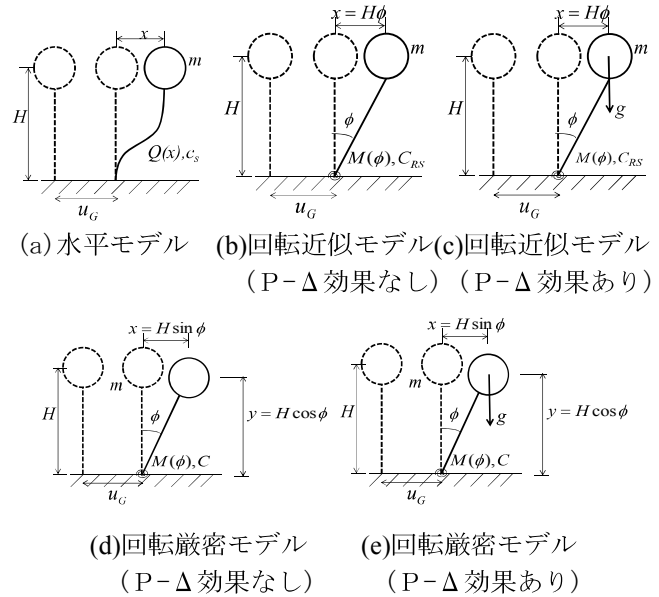


図1 解析モデル

2.3 損傷度指標を用いた弾塑性地震応答解析の流れ

損傷度指標を用いた弾塑性地震応答解析は、図2のような流れで行う。まず、5種類の解析モデルの構造パラメータの値を設定する。弾塑性地震応答解析によって与えた入力地震動に対する個々のモデルの挙動を解析する。解析時に応答塑性率なども算出し、それらの値から損傷度指標の値を求める。そして、求められた損傷度指標などの値を表1の値と比較し、目標(要求)性能を満足するかについて検討する。

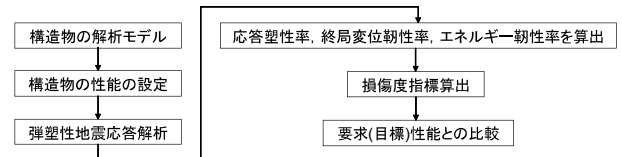


図2 損傷度指標を用いた弾塑性地震応答解析の流れ

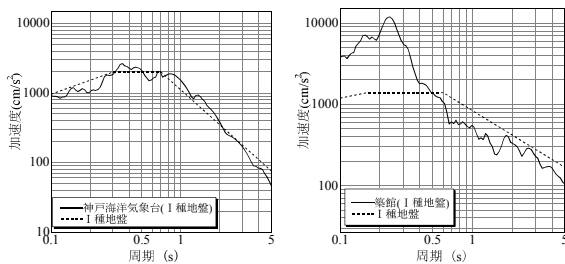
3. 弾塑性地震応答解析

3.1 構造パラメータ 降伏強度 P_y を0.2~1.0 gの0.2刻みで5通り、許容塑性率は2.1で述べた通り $\mu_a=5.0$ とし、減衰係数 h は0.05とした。2次剛性比 n は完全弾塑性型($n=0.0$)とし、2次剛性比 n の影響を検討するときのみ $n=0.05, 0.10, 0.15$ に変化させている。また、周期 T は0.1~5.0 sの範囲とし、高さ H は10 mに設定した。

3.2 入力地震動 ここでは、入力地震動として、現在の耐震基準への移行のきっかけとなった内陸直下型地震である兵庫県南部地震において最大加速度を記録した神戸海洋気象台の記録(以下、神戸海洋気象台と呼ぶ。)と、海溝型地震である東北地方太平洋沖地震において最大加速度を記録した築館の記録(以下、築館と呼ぶ。)を用いた。

図3に、 $h=0.05$ のときの神戸海洋気象台及び築館の絶対加速度応答スペクトルを示している。破線は、道路橋示

方書⁽¹⁾が設定した耐震設計のための絶対加速度応答スペクトルで、大型の内陸直下型地震を想定したレベル2・タイプIIのスペクトルと、大型の海溝型地震を想定したレベル2・タイプIのスペクトルである。ここで、I種地盤とは、道路橋示方書によって定義された地盤特性値 T_g によって地盤を区別したもので、 $T_g < 0.2$ の条件を満たす地盤である。図3(a)のI種地盤は、兵庫県南部地震において地盤上で観測された強震記録に基づいて設定されており、神戸海洋気象台に沿うような形になっている。図3(b)のI種地盤は、東海地震等の地震動予測結果等を踏まえて定められており、築館の短周期側にみられる非常に大きなピークよりはるかに小さい値が設定されている。



(a)兵庫県南部地震 (b)東北地方太平洋沖地震

図3 絶対加速度応答スペクトル

4. 解析結果

4.1 入力地震動と降伏強度が応答塑性率に及ぼす影響

神戸海洋気象台及び築館の応答塑性率のスペクトルをそれぞれ、図4(a), (b)に示す。

全ての図面で、降伏強度が大きくなるにつれて、応答塑性率が低減されていることがわかる。

図4(a)の周期－応答塑性率関係をみると、図3(a)の絶対加速度応答スペクトルのピークがある約0.3～0.5sにおいて、全ての解析モデルで降伏強度0.8, 1.0gの曲線は応答塑性率の値のピークを示している。0.2～0.6gでは、短周期側で応答塑性率の値が小さくならない結果が得られ、許容塑性率 $\mu_a=5.0$ を確保するためには、周期によりその値は異なるが、最大で0.7g程度の降伏強度が必要であると考えられる。

図4(b)の周期－応答塑性率関係をみると、周期が短くなるに従って応答塑性率が大きくなる傾向がみられた。これは、図3(b)の絶対加速度応答スペクトルの短周期側が非常に大きな値を示しているためであると考えられる。しかし、絶対加速度応答スペクトルのピークである周期約0.2～0.3sで、応答塑性率が最大になるような特徴はみられなかった。構造物の損傷への影響が大きい周期帯域である約1.0～2.0sでは、約0.2～5.0の応答塑性率を示しており、これは、落橋などの致命的な被害が少なかったことと一致している。

図5に、図4の応答塑性率について、それぞれの解析モデルの大小関係を把握するため、水平モデルの値と回転近似・厳密モデルの比のスペクトルを示す。

図5(a)において、回転近似(P-Δ効果あり)/水平と回転

近似(P-Δ効果なし)/水平では、周期約0.9sまでは、回転近似モデル(P-Δ効果あり)の方が値が大きく、約1.4s以降では、回転近似モデル(P-Δ効果なし)の方が大きくなる。回転厳密(P-Δ効果あり)/水平と回転厳密(P-Δ効果なし)/水平も同様に、回転厳密(P-Δ効果あり)/水平の値が、周期約0.7sまで回転厳密(P-Δ効果なし)/水平の値より大きく、約0.7sを超えると、逆になることがわかった。一方、回転厳密(P-Δ効果あり)/水平と回転近似(P-Δ効果あり)/水平の値を比較すると、短周期側で、回転厳密(P-Δ効果あり)/水平の方が大きくなり、それ以降ではほぼ同値であった。

図5(b)において、回転近似(P-Δ効果あり)/水平は、降伏強度0.2gを除いて、ほぼ1.0であった。回転厳密(P-Δ効果あり)/水平の値は、短周期でどのモデルと比較しても大きくなっており、その周期範囲は、降伏強度が大きくなるに従って短くなっている。回転厳密(P-Δ効果あり)/水平と回転厳密(P-Δ効果なし)/水平では、短周期側では、回転厳密(P-Δ効果あり)/水平の値が大きくなっており、それ以降はほぼ同値である結果が得られた。

4.2 入力地震動と降伏強度が損傷度指標に及ぼす影響

図6に5種類の解析モデルの損傷度指標の値のスペクトルを示す。

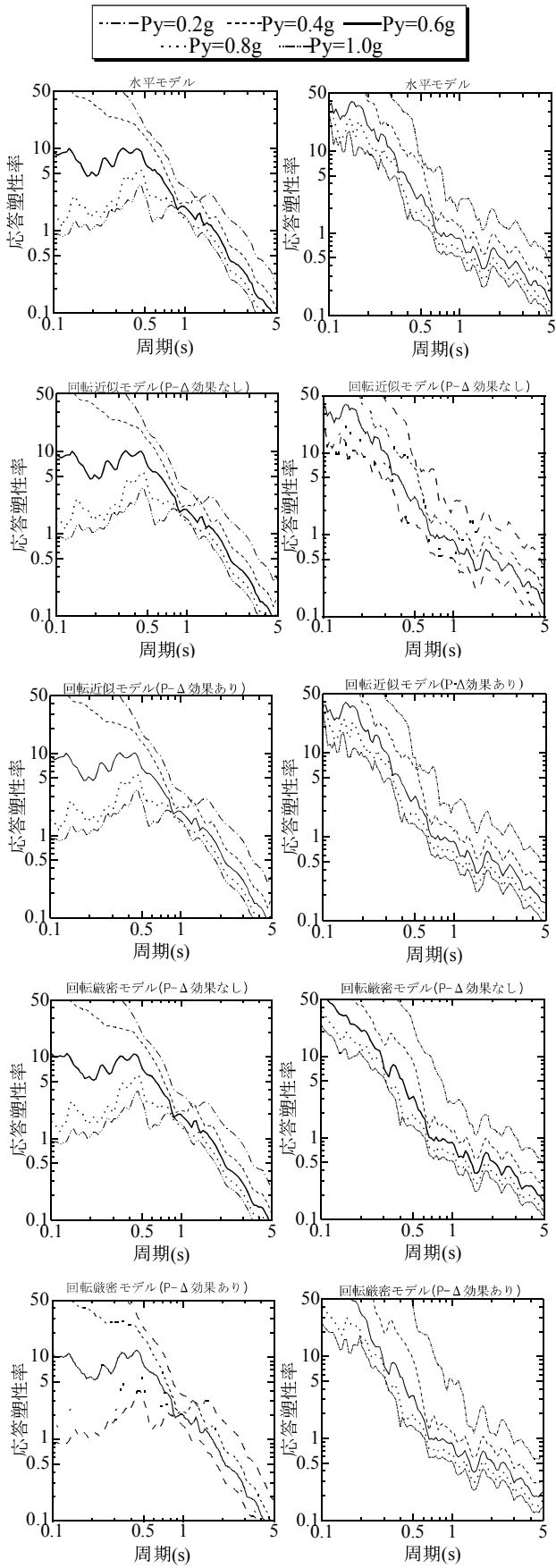
図6(a)において、降伏強度が小さくなるに従って、損傷度指標の値が小さくなっており、上に凸の曲線を描いている。表1の耐震性能Ⅲ($DI=0.6$)と比較すると、降伏強度1.0gの場合ほどの周期でも $DI < 0.6$ を満足しているが、降伏強度0.8gになると周期約0.35～0.5sの範囲において損傷度指標の値が0.6を超えている。さらに降伏強度の値が小さくなると、 $DI=0.6$ を超える周期が短周期側に増えてくることがわかる。

図6(b)において、短周期側でも損傷度指標の値が小さくならないことが読み取れる。これは、図6(b)の絶対加速度応答スペクトルの短周期側が非常に大きな値を示しているためであると考えられる。また、4.1で述べた構造物の損傷への影響が大きい周期帯域では、損傷度指標の値は、回転近似モデル(P-Δ効果あり)と回転厳密モデル(P-Δ効果あり)の降伏強度0.2gのときを除いて、耐震性能Ⅲ($DI=0.6$)以下であることを満足しており、落橋などの致命的な被害が少なかったことと合致する。

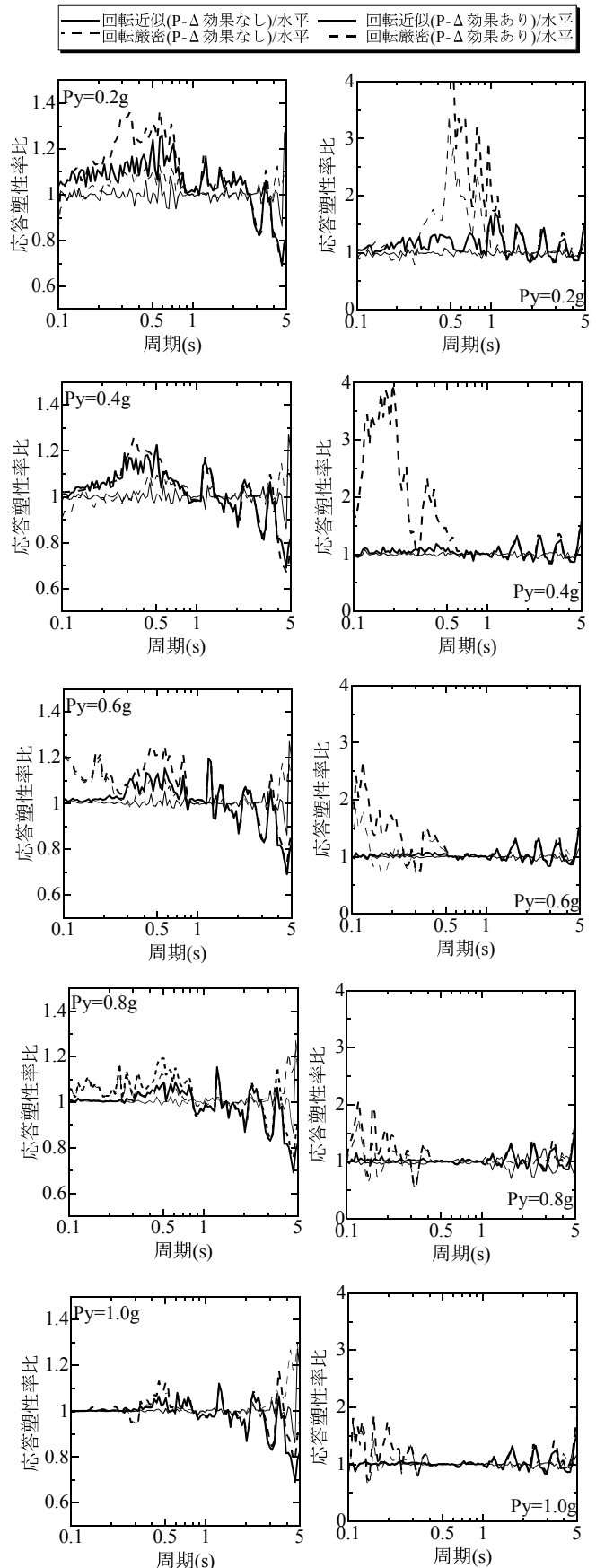
4.3 2次剛性比が損傷度指標に及ぼす影響

2次剛性比が損傷度指標に及ぼす影響を検討するため、降伏強度 $P_y=0.8g$ のときの2次剛性比ごとの損傷度指標の値をプロットしたものを図7、2次剛性比 $n=0.0$ に対する他の2次剛性比の損傷度指標の割合を図8に示す。

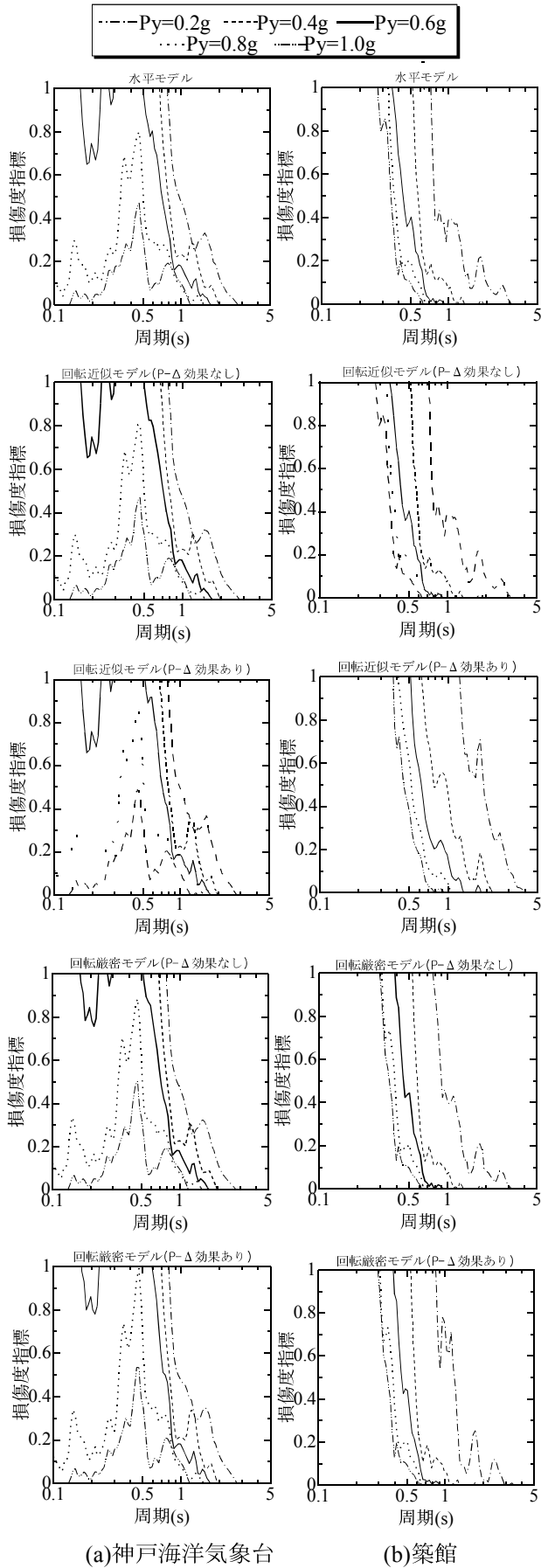
図7(a)の損傷度指標スペクトルにおいて、2次剛性比 n が大きくなると損傷度指標の値が小さくなっており、 $n=0.0$ では崩壊を表す $DI=0.6$ に達するものが、 n を大きくすると、周期により異なるが修復可能を表す $DI < 0.36$ に損傷度指標が低減されているのがわかる。図7(b)においても、2次剛性比 n が大きくなると損傷度指標の値が小さくなる傾向



(a)神戸海洋気象台 (b)築館
図4 周期—応答塑性率関係

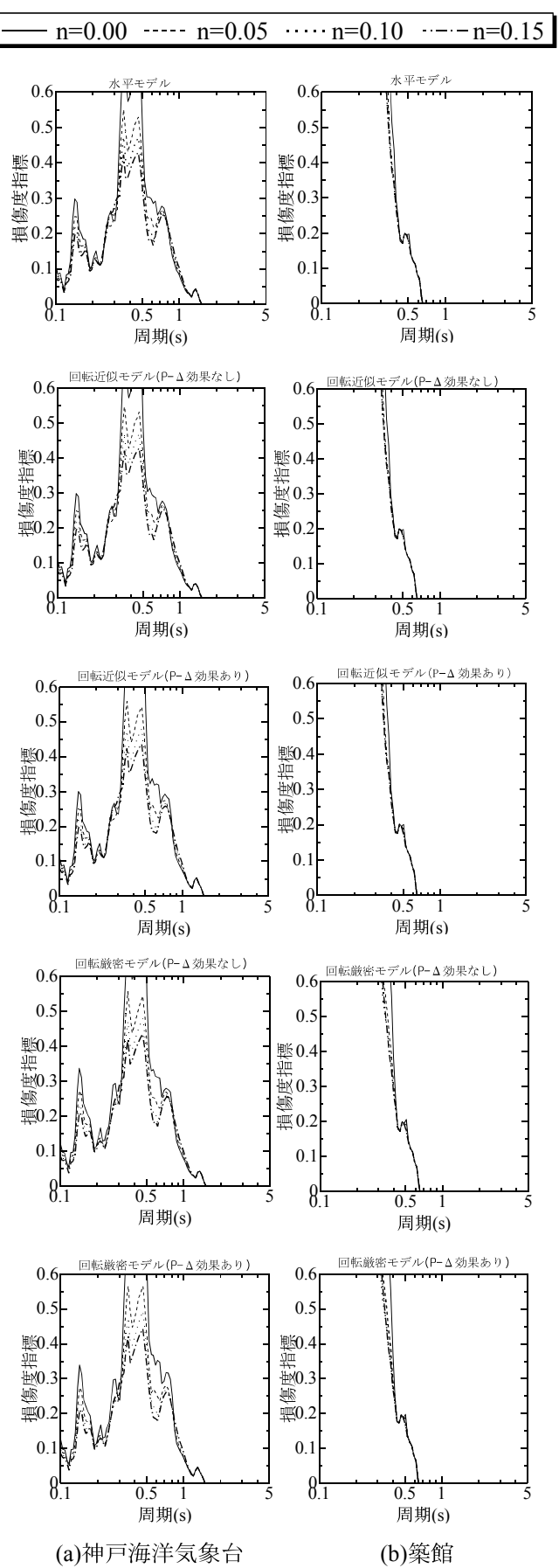


(a)神戸海洋気象台 (b)築館
図5 周期—応答塑性率比関係



(a)神戸海洋気象台 (b)築館

図6 周期-損傷度指標関係



(a)神戸海洋気象台 (b)築館

図7 損傷度指標スペクトル

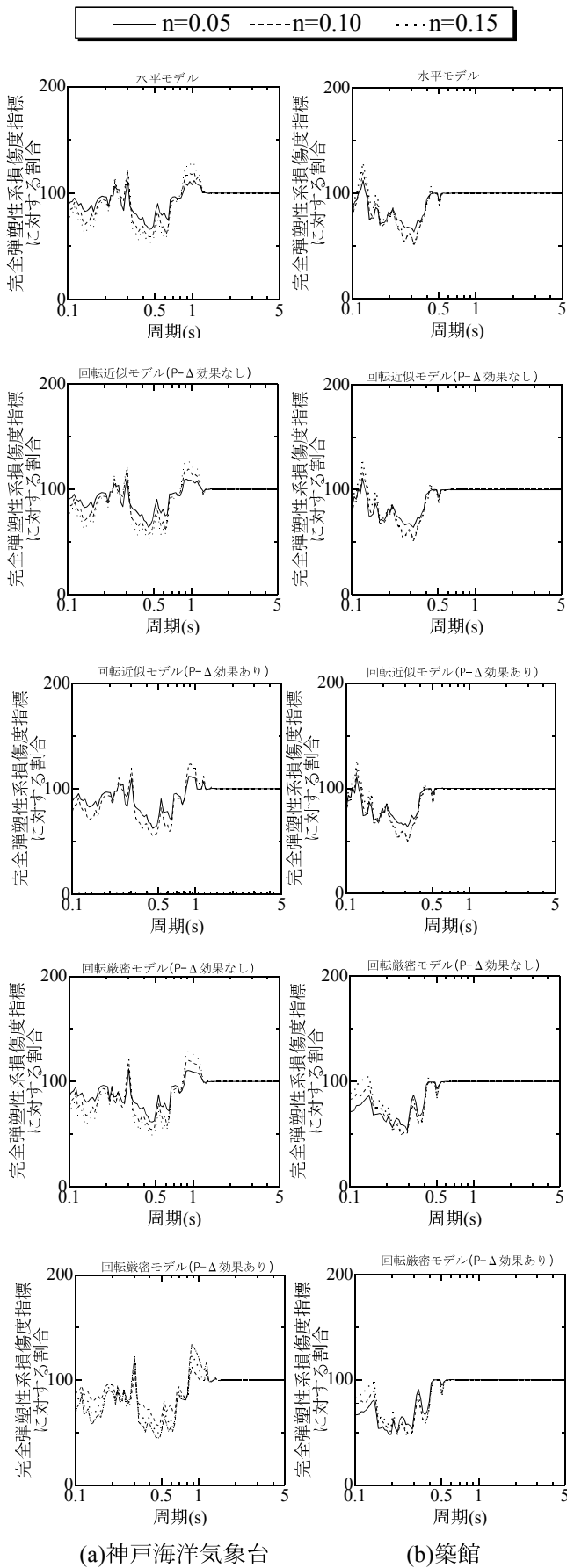


図8 完全弾塑性系損傷度指標に対する割合

がみられる。また、4.1 で述べた構造物の損傷への影響が大きい周期帯域では、損傷度指標の値が0となっていることがわかる。図7より神戸海洋気象台では周期約1.0 s以下、築館では約0.6 s以下の全ての周期域で、2次剛性比による損傷度指標の値の低減効果がみられる。

図8(a)において、完全弾塑性系損傷度指標に対する割合が100%以下のときは、 n が小さくなるに従って値が大きくなり、100%以上のときは、 n が大きくなるに従って値が大きくなる傾向がみられる。これは、図8(b)の築館の場合でも同様のことがいえる。

5. まとめ

本論文では、5種類の1自由度系の解析モデルを用いた弾塑性地震応答解析を行い、応答塑性率や損傷度指標が、降伏強度、2次剛性比及び解析モデルの差異によって、どのような影響を受けるのかを検討し、その過程で算出された損傷度指標の値が、耐震性能の目標値として設定された損傷度指標を満足するかについても検討した。結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 損傷度指標や応答塑性率の値は、解析モデルによって異なり、回転近似モデル(P-Δ効果あり)と、回転厳密モデル(P-Δ効果あり)では大きくなる傾向が得られた。さらに、回転厳密モデル(P-Δ効果あり)が要求される耐震性能を最も満足しにくいモデルであるという結果が得られた。
- 2) 2次剛性比が大きくなるほど損傷度指標の値は低減され、その影響で周期によっては修復不可能であったものが修復可能となる場合もある。
- 3) 築館の最大加速度は非常に大きい、構造物の損傷に影響の大きい周期帯域では加速度は小さく、それに対応して応答塑性率、損傷度指標の値が小さくなっていることが確認できた。

謝辞

本論文には、防災科学技術研究所の強震ネットワークから提供された強震記録を使用させて頂いた。関係者に厚く敬意と謝意を表す次第である。

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, 丸善, 2012.
- (2) 家村浩和, 三上卓:土木学会論文集, No.689/I-57, pp.333-342, 2001.
- (3) Ghobarah, A. and Aly, N.M.: Seismic reliability assessment of existing reinforced concrete buildings, Journal of Earthquake Engineering, Vol.2, No.4, pp.569-592, 1998.
- (4) 山下典彦, 原田隆典:P-Δ効果が1自由度系の非線形応答に与える影響, 土木学会地震工学論文集, CD-ROM, pp.1-8, 2003.