

非線形化部材の配置と履歴特性のばらつきが地震応答に与える影響に関する基礎的検討

藤岡 健祐¹・廣江 亜紀子²・大住 道生³

¹正会員 国立研究開発法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 国立研究開発法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 主任研究員 (同上)

³正会員 国立研究開発法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員 (同上)

1. はじめに

レベル2地震動を考慮する設計状況においては、構造系の一部に非線形化及びエネルギー吸収を考慮する部材（以下、「非線形化部材」という）が使用されることが一般に想定される。非線形化部材として選択される部材は、平成29年道路橋示方書・同解説V¹⁾（以下、「H29道示V」という）に標準的な例として示される橋脚基部や免震支承が多いが、一方で、既設橋の耐震補強等においては、制震ダンパー等の道示に具体的な照査方法が規定されていない非線形化部材が設置されるケースも増えている。

非線形化部材の組合せにあたって、H29道示Vでは、非線形化部材を一種類の部材に限定することが標準とされている。一方で、免震橋のように、実験や解析による各種検証結果^{2,3等)}を踏まえ、「適用範囲が明確」かつ「適切に地震応答特性が評価できる」場合には、非線形化部材を一種類に限定しなくてもよいことが解説されている。ただし、現状、それらを満足する具体的な条件や検証事項については示されておらず、実務上、免震橋以外の複数種類の部材に非線形化が生じる構造の適否の判断が困難であり、統一的な運用がなされていない状況である。

そこで、本研究では、複数部材に非線形化を考慮する場合の要求事項やその検証方法の明確化に向けて、部材配置による地震応答特性の違いや各種ばらつきの影響を明らかにするための基礎的検討を行う。本稿では、非線形化を考慮する部材同士が直列もしくは並列に配置された構造系に対して、部材の履歴特性のばらつきが橋の応答に与える影響を検討した結果を報告する。

2. 静的な関係式に基づいた応答のばらつきに関する予備検討および基礎的考察

非線形化部材がどのように配置されるかによって、非線形化及びエネルギー吸収の効果が橋の応答に与える影響は異なる。したがって、部材特性のばらつきと応答のばらつきとの関係（不確実性に対する応答の感度）も、部材配置によって異なるはずである。部材配置のパターンは、部材が直列もしくは並列に配置される場合に分けられ、前者は同一橋脚上の支承部と橋脚基部等、後者は異なる橋脚の支承部同士等の関係である。H29道示Vにおける非線形化部材を一種類に限定した設計は、基礎-橋脚-支承部-上部構造をそれぞれ1つに集約したモデルで考えれば、直列した系内で非線形化する個所を一箇所に限定した設計ともいえる。ここで、部材（ばね）が直列もしくは並列に配置される構造系の基本特性を図-1に示す。図中に示す通り、1質点系の静的なつり合いで考えれば、直列に配置される部材同士は荷重が等しく、並列に配置される部材同士は変位が等しい。

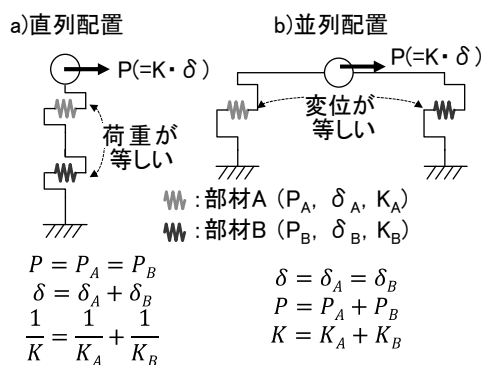


図-1 直列・並列ばねの基本特性 (1質点系)

系に蓄えられるひずみエネルギーが一定と仮定 (部材Aエネルギー+部材Bエネルギー= $E_{1A}+E_{1B}=E_{2A}+E_{2B}$ =一定)

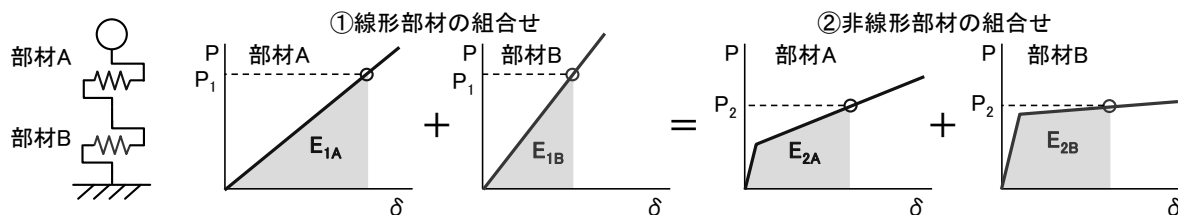


図-2 複数部材の系に拡張したエネルギー一定則の概念図 (直列配置の場合)

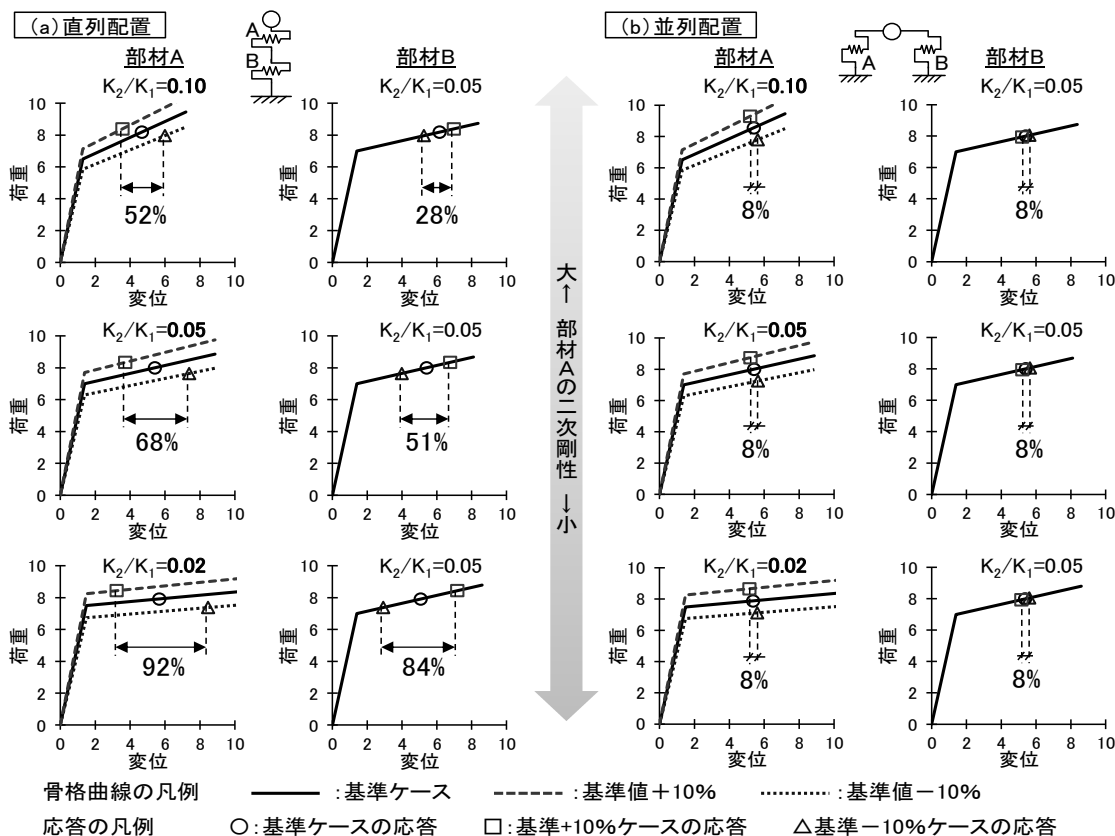


図-3 拡張したエネルギー一定則に基づく骨格曲線のばらつきによる応答のばらつき試算結果

ここでは上記の前提に加えて、Newmarkら⁴⁾が提案したエネルギー一定則の考え方を拡張して、複数部材で構成される構造系のひずみエネルギーの和が一定であると仮定した簡易的な応答試算による基礎的な考察を行う。なお、Newmarkらが提案したエネルギー一定則は、1自由度系構造物において、弾性応答エネルギー量と塑性応答エネルギー量が同一であるという仮定に基づくものである。ここで、複数部材の系に拡張したエネルギー一定則の概念図を図-2に示す。部材の骨格曲線によらず、部材のひずみエネルギーの総和が一定と仮定することで、入力エネルギー (ひずみエネルギーの和) を与えれば、各部材の応答を簡易に算出できる (並列配置も同様)。

以上の仮定に基づき、2つの非線形化部材を直列もしくは並列に配置した場合の、部材の骨格曲線のばらつきによる応答のばらつきの傾向を確認した結

果を図-3に示す。骨格曲線のばらつきは部材Aに与えるものとし、二次剛性比 (二次剛性 K_2 /一次剛性 K_1) 及び降伏変位を一定としたまま、剛性及び降伏荷重を基準値に対して $\pm 10\%$ 変化させた。なお、非線形化の種類としては、免震支承のハードニング特性等、剛性変化点から剛性が増加する場合もあるが、本稿では、剛性が低下する場合を検討対象とする。

検討ケースとしては、二次剛性比をパラメータとした3ケース ($K_2/K_1=0.10, 0.05, 0.02$ ※ K_1 は共通) を設定した。図内に応答のばらつきを表す指標として、基準ケースの応答変位に対するばらつき量の比率 ($|[\text{基準}+10\% \text{ケースの変位}] - [\text{基準}-10\% \text{ケースの変位}]| / \text{基準ケースの変位}$) を示す。なお、入力エネルギーは全ケース共通としている。

まず、 $K_2/K_1=0.10$ のケース (図内上段) で直列配置と並列配置の応答変位のばらつきを比較する。並

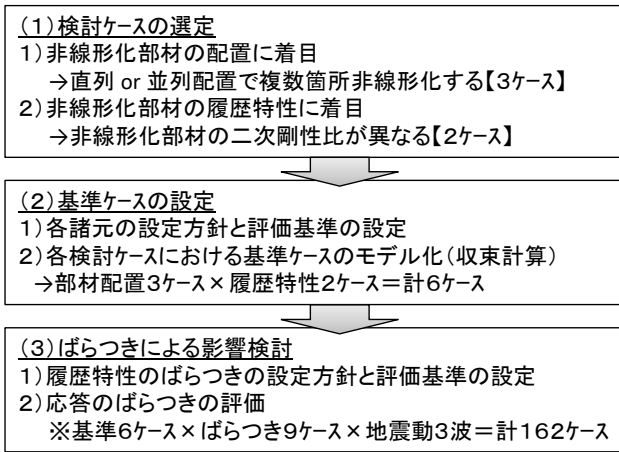


図-4 動的解析による検討手順

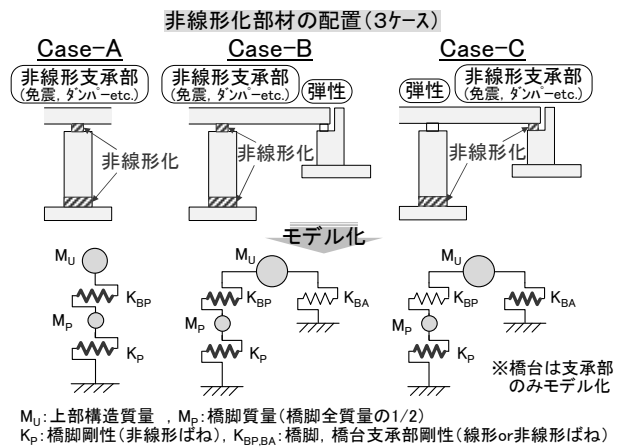


図-5 部材配置ケース及びモデル化の概要

列配置では部材A・Bともに8%程度のばらつきであるのに対して、直列配置では部材Aで52%、部材Bで28%の大きなばらつきが生じている。また、部材Aの骨格曲線が正側にばらつくと、直列配置の場合、部材Bの応答が増加するのに対して、並列配置の場合、若干であるが部材Bの応答が減少する。これは、エネルギー吸収の観点から言えば、部材Aの剛性が大きいほど、直列配置では、部材Aのエネルギー吸収比率(部材Aのひずみエネルギー量/総エネルギー量)が小さくなり、並列配置では、逆に部材Aのエネルギー吸収比率が大きくなることを示している。

次に、二次剛性比の違いによる応答のばらつきを比較する。並列配置の場合には、二次剛性比によるばらつきの違いはほとんどみられない。一方で、直列配置の場合には、二次剛性比が小さいほど、部材A・Bともにばらつきが大きくなる傾向で、 $K_2/K_1=0.02$ のケース(図内下段)では、部材Aで92%、部材Bで84%のばらつきが生じている。

以上の静的な関係式に基づく基礎的な考察結果より、応答のばらつきに大きく影響すると考えられる非線形化部材の配置及び履歴特性(主に二次剛性)に着目して、以降の動的解析における検討ケースの選定を行うものとする。

3. 2質点系モデルの動的解析による検討

橋脚-支承部を想定した2質点系の簡易な動的解析により、動的な地震応答特性の観点から、部材の履歴特性のばらつきが橋の応答に与える影響を確認する。本検討の流れを図-4に示す。(1)で2.の考察内容を踏まえた検討ケースを選定し、(2)で各検討ケースに対する基準ケースのパラメータを設定、(3)で各ケースに対して履歴特性のばらつきの設定及び応答のばらつきの評価を行う。

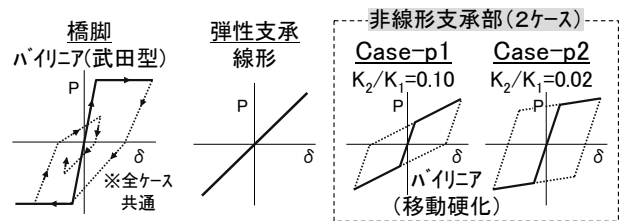


図-6 各部材の履歴特性

(1) 検討ケースの選定

2.の考察を踏まえ、非線形化部材の配置及び履歴特性の影響に着目した検討ケースを選定する。図-5に部材配置ケース及びモデル化の概要、図-6に各部材の履歴特性を示す。解析モデルはばね質点系モデルとし、上部構造、RC橋脚をそれぞれ1質点に置き換えてモデル化した。また、RC橋脚は武田型バイリニア、非線形支承部は移動硬化型バイリニアの履歴特性としてそれぞれ1方向のばね要素でモデル化した。なお、基礎はモデル化しないものとし、橋脚下端は固定条件とした。

非線形化部材の配置の影響に着目した検討ケースとして、1橋脚のモデルで橋脚基部と支承部が非線形化するケース(Case-A)、1橋脚+橋台支承部のモデルで橋脚基部と橋脚支承部が非線形化するケース(Case-B)、1橋脚+橋台支承部のモデルで橋脚基部と橋台支承部が非線形化するケース(Case-C)の3ケースを選定した。ここで、Case-A, Bは非線形化部材同士が直列に配置される構造、Case-Cは非線形化部材同士が並列に配置される構造となる。

部材の履歴特性の影響に着目した検討ケースとしては、非線形支承部の履歴特性を対象に、二次剛性比が比較的大きいケース(Case-p1: $K_2/K_1=0.10$)、二次剛性比が比較的小さいケース(Case-p2: $K_2/K_1=0.02$)の2ケースを選定した。なお、Case-Bの場合は橋脚支承部、Case-Cの場合は橋台支承部の履

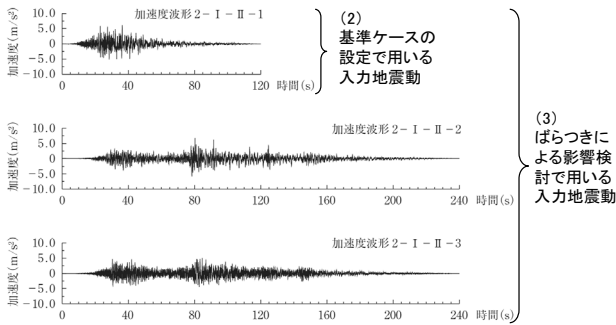


図-7 入力地震動¹⁾

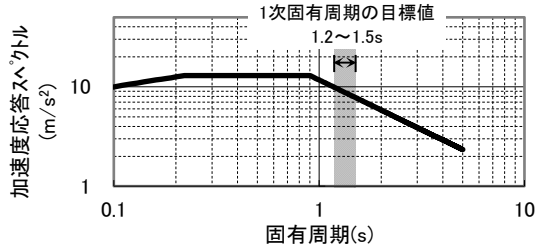


図-8 レベル2タイプI地震動(II種地盤)の標準加速度応答スペクトル

歴特性を変化させるものとした。

以上の部材配置及び履歴特性に関する検討ケースの組合せ(部材配置3ケース×履歴特性2ケース)より、計6ケースを検討対象とした。

入力地震動は、H29道示Vに規定されるレベル2タイプI地震動のII種地盤における標準加速度波形2-I-IIを用いるものとした。なお、後述する(2)基準ケースの設定においては代表1波(2-I-II-1)。

(3)ばらつきによる影響検討においては3波による評価を行うものとした(図-7参照)。

(2) 基準ケースの設定

ここでは、(1)で選定した6ケースに対して、それぞれ基準ケースとなるパラメータを設定する。

基準ケースの設定にあたって、目標とする指標、固定又は変更するパラメータを以下に示す。

<目標とする指標>

- ・1次固有周期：1.2～1.5s
(全ケース共通、図-8参照)

- ・橋脚の最大応答変位：0.072m

<固定パラメータ>

- ・上部構造重量：8,000kN (Case-A)
12,000kN (Case-B,C)
- ・橋脚重量：1,700kN (全ケース共通)
- ・橋脚P- δ ：図-9(a)参照(既往研究⁵⁾を参考)

<変更パラメータ>

- ・支承部P- δ ：収束計算より図-9(b)(c)(d)に決定
ここで、1次固有周期の目標値としては、免震デバイス等を用いて長周期化されるケース等を想定し、

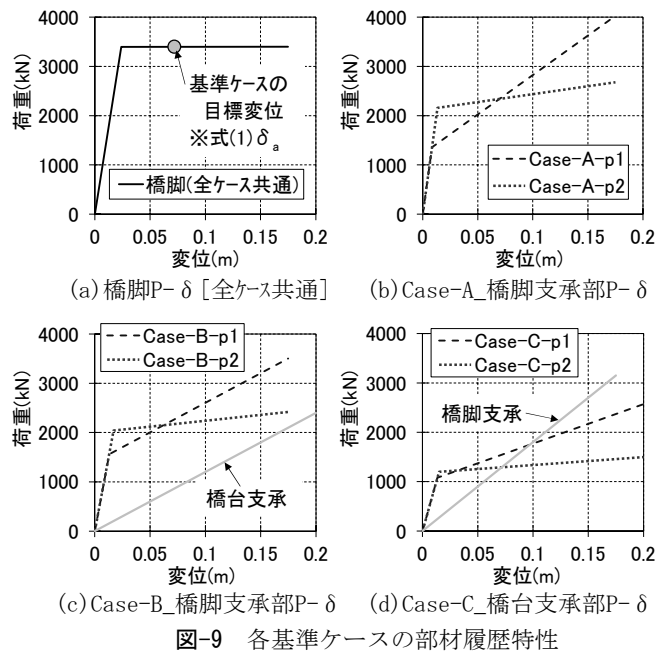


図-9 各基準ケースの部材履歴特性

入力地震動の加速度応答スペクトルが低下する周期帯に設定した(図-8参照)。

また、橋脚の最大応答変位は、支承部に非線形化を考慮することから、免震橋のRC橋脚における許容変位相当を目標値とした。なお、既設橋の耐震補強における性能評価を想定し、国総研資料第700号⁶⁾及びH14道示V⁷⁾の規定に基づく許容変位に準じて、次式(1)により目標変位を算出した。

$$\delta a = \{(\delta u - \delta y) / 2\alpha\} + \delta y \quad (1)$$

δa ：許容変位(橋脚の目標変位)

δu ：終局変位， δy ：降伏変位

α ：安全係数(1.5とする)

上部構造重量、橋脚重量、橋脚の履歴特性は固定パラメータとし、支承部の履歴特性の二次剛性比を一定としながら、剛性と降伏点を変更することで、各目標値に近づくように収束計算を行った。なお、支承部の履歴特性は、支承部を構成する部材(支承、ダンパー等)の組合せにより様々であるが、ここでは具体的なデバイス等は想定しないものとした。

粘性減衰は、道示に示されるRayleigh型減衰モデルを用いて、固有値解析により得られた1次と2次のモード減衰定数より設定した。なお、比較的早い段階で非線形化する非線形支承部においては、初期剛性の大きさから過大な減衰効果を見込まないように、部材別Rayleigh型減衰を用いて、剛性に比例する減衰を考慮しない($\beta_{ic}=0$)ものとした。また、固有値解析における非線形化部材の剛性の設定にあたっては、橋脚は降伏剛性、非線形支承部は等価剛性を用いた。各部材の減衰定数は、H29道示Vの標準値に基づき、橋脚は2%、非線形支承部は0%とした。線形支承部は、道路橋支承便覧⁸⁾より、実験による

表-1 各基準ケースの固有周期と応答変位

ケース名	固有周期(s)	最大応答変位(m)		
		橋脚	橋脚支承	橋台支承
Case-A-p1	1.25	0.075 (1.05)	0.142	---
Case-A-p2	1.40	0.074 (1.03)	0.134	---
Case-B-p1	1.28	0.072 (1.00)	0.159	0.221
Case-B-p2	1.40	0.071 (0.99)	0.174	0.205
Case-C-p1	1.31	0.072 (1.00)	0.185	0.230
Case-C-p2	1.47	0.072 (1.00)	0.182	0.249

※橋脚の応答変位()内は目標値に対する比率

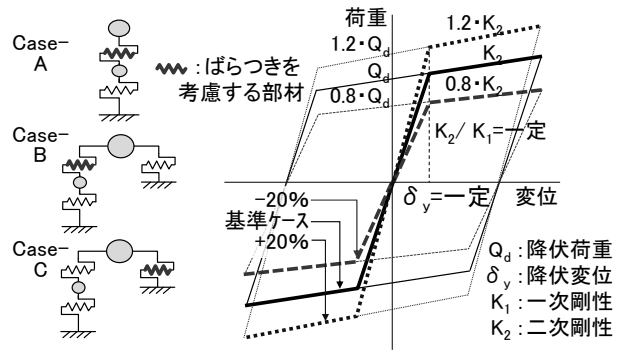
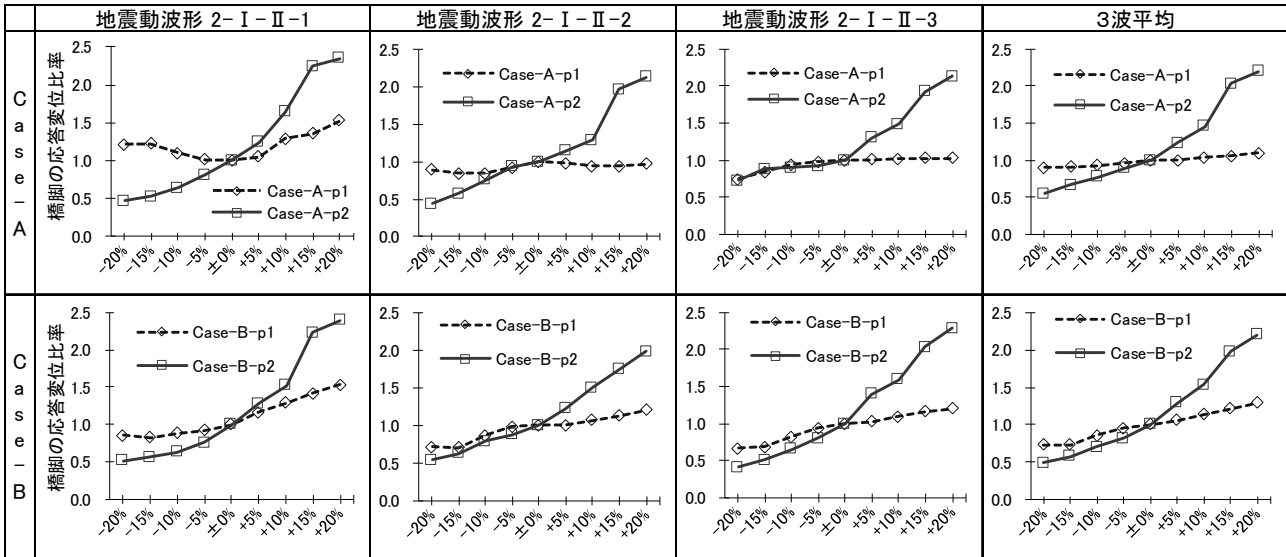


図-10 履歴特性のばらつきの設定 (±20%の場合)

表-2 橋脚の最大応答変位のばらつき (Case-A, B)



※縦軸：橋脚の最大応答変位比率 (ばらつきケースの応答値/基準ケースの応答値)，横軸：ばらつきケース

平均値から推定される積層ゴム支承の等価減衰定数5%に設定した。設定した各基準ケースの固有周期及び応答変位を表-1に示す。固有周期は目標値の1.2～1.5s, 応答変位は目標値の±5%程度の範囲内に収まっていることを確認した。

(3) ばらつきによる影響検討

各基準ケース (6ケース) において, 部材の履歴特性のばらつきによる応答への影響を確認する。なお, 実設計においては, 橋の構成部材それぞれにばらつきを考慮して, 信頼性を評価する必要があるが, ここでは, 対象部材にのみばらつきを考慮し, 対象部材及び他部材の応答への影響を評価する。

図-10に, 履歴特性のばらつきの設定方法を示す。Case-A,Bでは橋脚支承部, Case-Cでは橋台支承部にばらつきを与えるものとし, 二次剛性比及び降伏変位を一定としたまま, 剛性及び降伏荷重が変動するものとした。また, ばらつき量は, 基準ケースに対して±20%, ±15%, ±10%, ±5%とし, 基準ケース含めて計9ケースを対象とした。参考として, 免

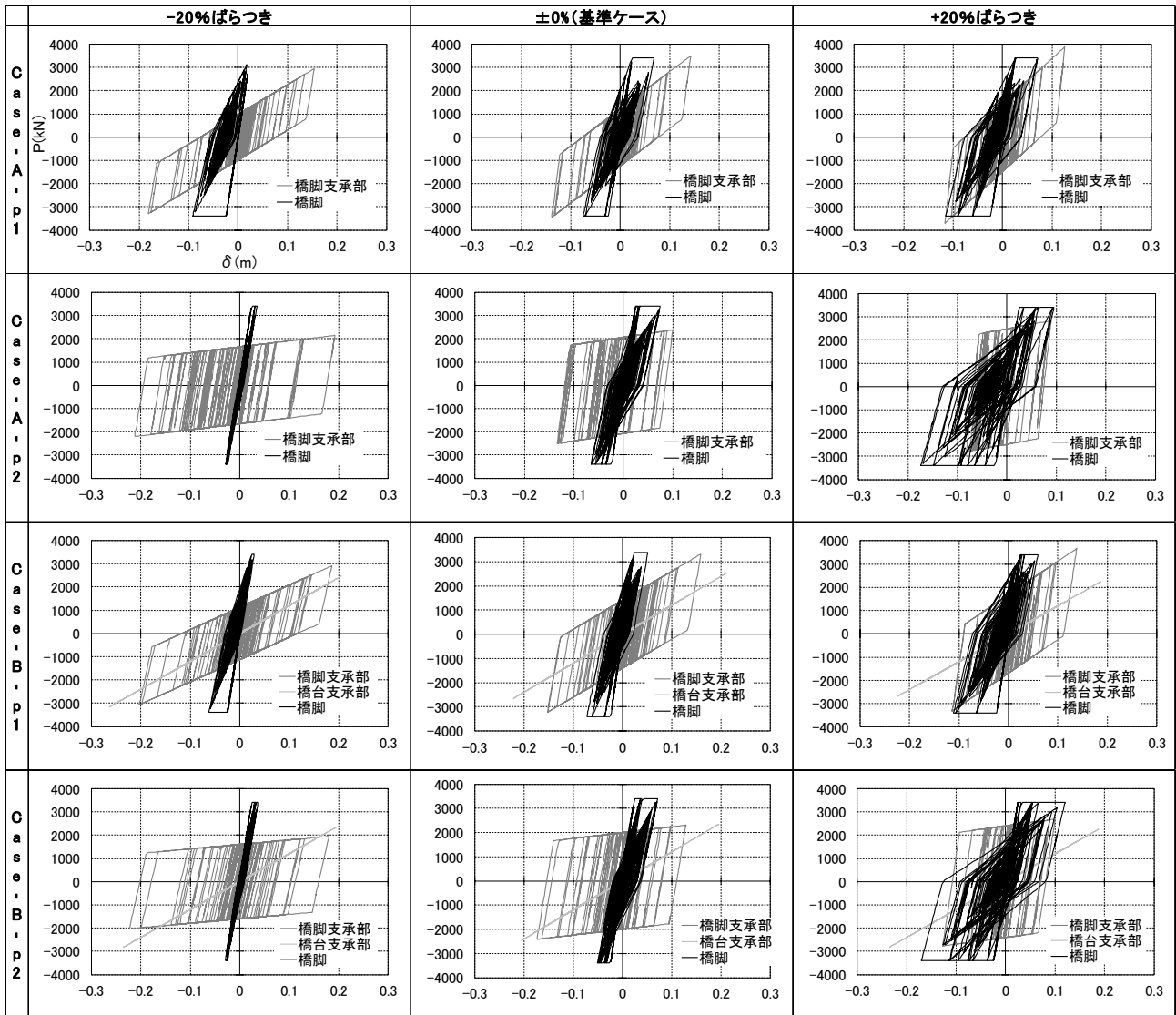
震支承では等価剛性のばらつきが±10%, 制震ダンパーでは製品毎に異なるものの, 抵抗力のばらつきが概ね-10%～+20%の範囲で設定されている。

以上より, 基準6ケース×ばらつき9ケース×入力地震動3波=全162ケースを対象に解析を行った。

表-2に, Case-A,Bにおける各基準ケースに対する橋脚の最大応答変位のばらつきを示す。まず, Case-A,Bの全体傾向として, 橋脚支承部の剛性が大きくなる (ばらつきが+側に大きくなる) ほど, 橋脚の最大応答変位が増加しており, 2.の試算結果に基づく考察と一致する。ただし, Case-A-p1の地震動波形2-I-II-1については, 基準ケースより橋脚支承部の剛性を小さくすると, 橋脚の最大応答変位が増加している (詳細は後述)。

次に, 非線形支承部の二次剛性比の違いによる影響について, Case-A,Bともに, 全ての地震動に対して, Case-p1に比べてCase-p2の応答のばらつきが大きい。3波平均の応答で比較すると, Case-A-p1では, 基準ケースに対して約0.9 (-20%のケース)～1.1 (+20%のケース)倍, Case-B-p1では約0.7～1.3倍

表-3 荷重-変位曲線 (Case-A, B, 地震動2-I-II-1の場合)



※縦軸：ばね荷重 (kN)，横軸：ばね変位 (m)

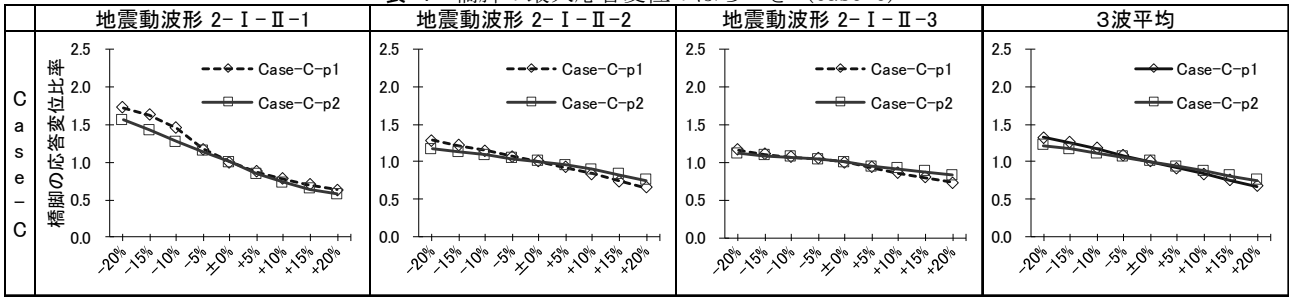
の応答であるのに対して、Case-A-p2、Case-B-p2では、約0.5~2.2倍の応答が生じており、ばらつきが著しく大きい。以上より、2.で述べた考察のとおり、非線形化部材同士が直列配置される構造では、非線形化部材の二次剛性が小さいほど、部材の履歴特性のばらつきに対する応答のばらつきが大きいことが確認された。

表-3に、地震動2-I-II-1におけるCase-A,Bの基準ケース及びばらつき±20%のケースの荷重-変位履歴曲線を示す。ここで、Case-A-p1の基準ケースでは、橋脚の応答変位が正負で同程度生じているのに対して、-20%のばらつきケースでは、大きく負側に偏っている。これにより、-20%のばらつきケースでは、基準ケースに対して変位の振幅は小さいものの、最大応答変位は増加する結果となる。このように、非線形応答は地震動の位相特性に影響を受けること

から、必ずしも静的な関係とは一致しないものと考えられる。ただし、各ケースともに橋脚支承部の剛性が大きくなるほど、橋脚の履歴ループの面積が増加し、また、橋脚支承部の応答変位が減少する傾向であることから、全体の傾向としては、2.の考察と一致している。

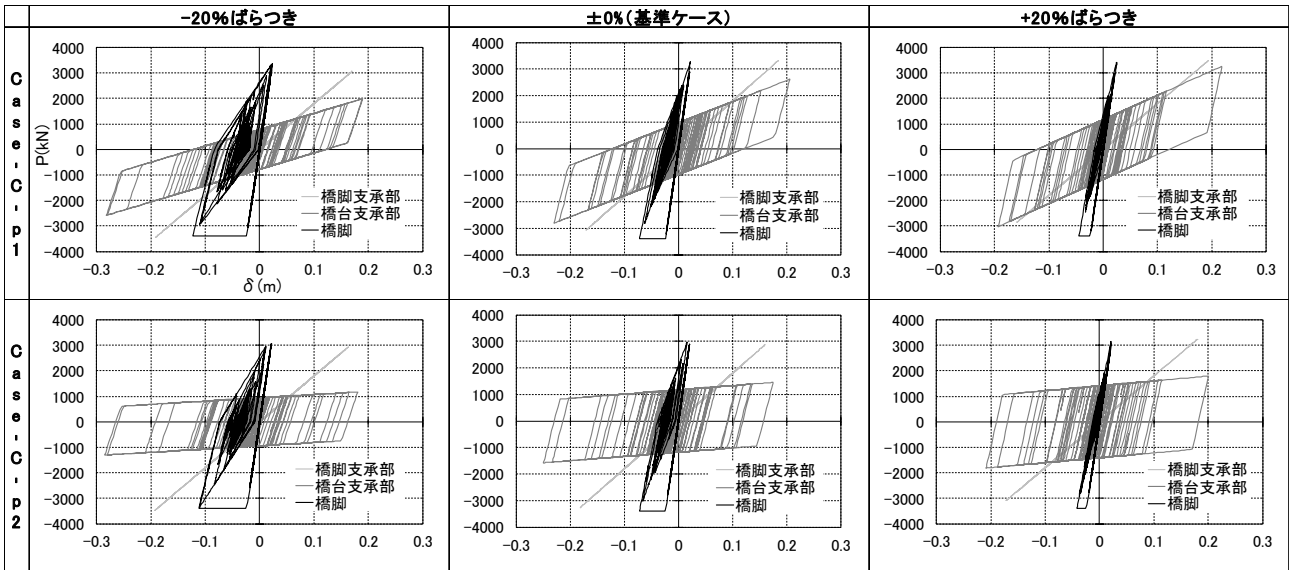
ここで、橋脚と支承部に作用する荷重の関係について、静的な力のつり合いのもと、一様な加速度分布を仮定した場合には、橋脚に作用する荷重=支承に作用する荷重+橋脚自重分にかかる慣性力となる。しかし、Case-B-p1_+20%のように支承部の最大荷重が橋脚の最大荷重(=降伏荷重)より大きくなるケースもあり、実際の動的応答においては、非線形応答に起因する位相差や減衰力、二次振動モード等の影響により、静的な関係式とは必ずしも一致しない。また、この傾向は支承部の二次剛性が大きいケース

表-4 橋脚の最大応答変位のばらつき (Case-C)



※縦軸：橋脚の最大応答変位のばらつき（ばらつきケースの応答値／基準ケースの応答値），横軸：ばらつきケース

表-5 荷重-変位曲線 (Case-C, 地震動2-I-II-1の場合)



※縦軸：ばね荷重 (kN)，横軸：ばね変位 (m)

ほど顕著となる。

表-4に、Case-Cにおける各基準ケースに対する橋脚の最大応答変位のばらつきを示す。まず、Case-Cの全体傾向として、橋台支承部の剛性が大きくなる（ばらつきが+側に大きくなる）ほど、橋脚の最大応答変位が減少しており、2.の試算結果に基づく考察と一致する。

次に、非線形支承部の二次剛性比の違いによる影響について、Case-C-p1はCase-C-p2に比べて若干応答のばらつきが大きく、Case-A,Bとは反対の傾向を示す。ただし、3波平均の応答と比較すると、Case-C-p1では、基準ケースに対して0.7（+20%のケース）～1.3（-20%のケース）倍、Case-C-p2では、0.8～1.2倍程度のばらつきであり、両者の差は小さい。また、Case-Bと比較して、全体的に応答のばらつきが小さい。以上より、2.で述べた考察のとおり、非線形化部材同士が並列配置される構造では、直列配置される構造より、部材の履歴特性のばらつきに対する応答のばらつきが小さいことが確認された。

表-5に、地震動2-I-II-1におけるCase-Cの基準ケ

※橋脚の履歴減衰エネルギー割合：

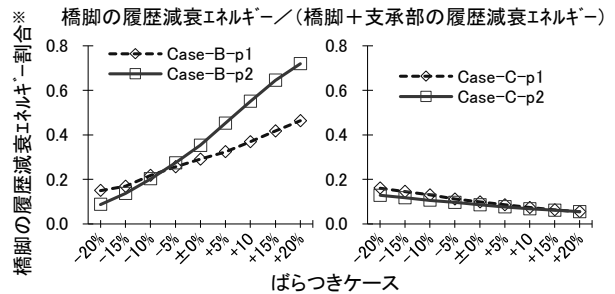


図-10 橋脚の履歴減衰エネルギー割合 (3波平均)

ース及びばらつき±20%のケースの荷重-変位曲線を示す。Case-C-p1,p2ともに橋台支承部の剛性が大きくなるほど橋脚の履歴ループは小さくなるが、橋台支承部の応答変位はケース毎の差が比較的小さい。これは、橋脚と橋台支承部が並列の関係であり、橋台支承部の剛性が大きくなるほど、橋台支承部の荷重分担が大きくなり応答が増加する一方で、部材単体としては剛性が大きくなることで応答変位が減少する効果があるためと考えられる。

図-10に、Case-B,Cにおける橋脚の履歴減衰エネルギー割合（3波平均）を示す。Case-Bにおいては、

橋脚支承部の剛性が大きくなるほど、橋脚の履歴減衰エネルギーの割合が大きくなる。また、Case-Cにおいては、橋台支承部の剛性が大きくなるほど、橋脚の履歴減衰エネルギーの割合が小さくなる。支承部のばらつきによる橋脚の履歴減衰エネルギー割合の変動は、Case-B-p2が0.09～0.72で最も大きく、Case-Cでは変動が小さい。以上より、2.で述べた考察のとおり、非線形化部材同士が直列配置される構造では、一方の部材の剛性が大きくなるほど、当該部材のエネルギー吸収割合が小さくなり、並列配置される構造では、その反対の傾向であることが確認された。

4. 結論

本稿では、非線形化部材（剛性低下を対象）同士を直列もしくは並列に配置する構造系に対して、部材の履歴特性のばらつきが応答に与える影響を検討した。本稿で対象とした条件下において、静的な関係式に基づく基礎的考察および2質点系モデルの動的解析結果から得られた知見と、それを踏まえた設計における留意事項に関する一考察を以下に述べる。

- 1) 非線形化部材同士が直列配置される構造は、並列配置される構造に比べて、部材の履歴特性のばらつきに対する応答（変位及び履歴減衰エネルギー）のばらつきが大きい。したがって、このような構造で所要の信頼性を確保するためには、応答のばらつきに応じて、一箇所のみ非線形化が生じる構造において道示で考慮されている安全余裕（限界状態の特性値と制限値の差）よりも大きな安全余裕を確保する必要がある。もしくは、橋を構成する各部材の応答のばらつきが、一箇所のみ非線形化が生じる構造で考慮されるばらつきと同程度以下となるように、非線形化部材の履歴特性のばらつきを小さく抑える必要がある。
- 2) 非線形化部材同士が直列配置される構造では、非線形化部材の二次剛性が小さいほど、部材の履歴特性のばらつきに対する応答のばらつきが大きい。このことから、橋脚と橋脚支承部で非線形化を考慮する構造において、橋脚支承部を二次剛性の小さい部材で構成すると（例えば、可動支承と摩擦型ダンパーの組合せ等）、応答のばらつきが著しく大きくなる可能性がある。
 - 1) で述べたように、安全余裕を大きくすること

で信頼性を確保することも考えられるが、設計の合理性の確保や損傷制御の観点からは、過大な応答のばらつきが生じないような構造とすることが望ましい。したがって、橋脚支承部は一定の二次剛性を確保する等、直列系内で極端に二次剛性が小さい部材が複数箇所非線形化しないように適用方法に留意する必要がある。

なお、本検討の試算では、概略的な検討により、実務上適当な範囲で各種パラメータを設定しているが、その妥当性については引き続き検討を要する。

今後は、現行の技術基準が求める性能水準を定量的に把握し、基礎や上部構造等も含めた複数部材に非線形化を考慮する場合の具体的な要求事項やその検証方法の提案に向けた検討を進めていきたい。

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，2017.11
- 2) 足立幸朗：激震動下における免震橋梁構造の信頼性評価と限界状態設計法に関する研究，京都大学博士論文，2002.1
- 3) 庄司学，川島一彦，斎藤敦：免震支承とRC橋脚がともに塑性化する場合の免震橋の耐震設計に関する実験的検討，土木学会論文集，No.682/I-56，pp.81-100，2001.7
- 4) Veletsos, A.S. and Newmark, N.M.: Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions, Proc. of the 2nd WCEE, 1960
- 5) 有馬俊，江口康平，大住道生：ダンパーの履歴特性のばらつきに基づく応答のばらつきの評価に関する一考察，第23回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2020.7
- 6) 既設橋の耐震補強設計に関する技術資料，国総研資料第700号，土研資料第4244号，2012.11
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002.3
- 8) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，2018.12