

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：15201

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14291

研究課題名（和文）地震後残留変形低減機構を有する構造物の地震時挙動と設計法構築

研究課題名（英文）Seismic Behavior and Design Method Development for Self-Centering Structures

研究代表者

小松 真吾（Komatsu, Shingo）

島根大学・学術研究院環境システム科学系・助教

研究者番号：60845618

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、地震後残留変形低減が可能なセルフセンタリング構造の包括的な地震応答予測法の構築が目的である。まず、1質点系モデルで多数の構造物特性と入力地震波を変数とした時刻歴応答解析を実施し、その基本的な地震時挙動を明らかにするとともに、非線形サイクル数および塑性変形の分布を定式化した。次に、これら地震性状を反映した等価線形化理論を作成し、その良好な応答予測精度を示した。そして、応答予測理論を多質点系構造に拡張し、5質点系モデルと滑らかなスペクトル特性の模擬地震波を用いてその妥当性を検証した。提案手法によりセルフセンタリング構造の合理的な設計が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

等価線形化法に詳細な地震応答を反映しながら理論展開を行う手法は、研究代表者の知る限り今までに行われていない。その結果、提案手法は従来の最大変形だけでなく累積塑性変形（ダメージの総量）も同時に予測することが可能となった。累積塑性変形を予測することは設計時におけるセルフセンタリングデバイス容量の検討の簡略化や性能設計の発展に繋がる。以上から、研究成果は新規性を有しており、その学術的価値は大きい。セルフセンタリング構造は、大地震後にも継続使用を可能とする高い耐震性能を有しており、普及が促進されれば持続可能な社会の実現に大きく貢献できる。この点から、研究成果の社会的意義は大きいと言える。

研究成果の概要（英文）：This research aims to develop a comprehensive seismic response prediction method for self-centering structures that can reduce residual deformation after seismic events. Firstly, a time history analysis of the SDOF system with many structural characteristics and input ground motions as variables is performed. Further, formulating the number of non-linear cycles and plastic deformation distributions from their basic seismic response behaviors. Next, an equivalent linearization method reflecting the seismic responses is developed and indicated a good correspondence with the time history analysis results. Further, a response prediction of the 5DOF system using simulated earthquake waves that have smooth spectral characteristics was carried out by expanded prediction theory for MDOF systems. Concluded that the self-centering structures can be designed reasonably using the proposed prediction method.

研究分野：建築構造

キーワード：セルフセンタリング 時刻歴応答解析 等価線形化法 非線形サイクル数 塑性変形分布 等価粘性減衰定数 最大塑性変形予測 累積塑性変形予測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1995年の兵庫県南部地震、また1994年の米国 Northridge 地震では、鋼構造建物の柱梁溶接接合部における脆性破壊などの重大な構造被害により、多くの建物が地震後継続使用不可となったことが両国で大きな社会問題となった。これらの地震を契機として、高い耐震性能を付与するための新しい構造が様々に提案され、耐震構造研究が飛躍的に進歩した。中でもセルフセンタリング構造は、特殊な機構を組み込むことにより構造物の地震後残留変形を従来構造と比較して大幅に低減であるという利点を有している。本構造の普及により構造物の地震後継続使用が可能となり、持続可能な社会の形成に大きく貢献できる。セルフセンタリング構造の合理的な性能設計には、力学的に明快かつ高精度な地震応答予測法が必要不可欠であるが、これまでにいくつか提案されている手法は経験式のみを頼った力学的根拠に乏しいものが殆どである。セルフセンタリング構造の地震応答挙動を動力学理論に反映した包括的な手法の開発は、喫緊の課題であると言える。

2. 研究の目的

本研究課題は動力学理論と経験的な地震応答性状の両方に基づく、セルフセンタリング構造の包括的な地震応答予測手法を開発することを最終目的とする。詳細を以下に述べる。まず、セルフセンタリング構造の基本的な地震応答性状を、多数の設計変数を設定した1質点系モデルの時刻歴応答解析により明らかにする。次に、これらの結果を詳細に検証することで、非線形サイクル数や塑性変形分布といった地震時の重要な物理量を数式化する。そして、これらを反映して1質点における等価線形化法の基本的枠組みを作成し、本手法は最大変形だけでなく従来手法では予測できない累積塑性変形を良好な精度で予測できることを証明する。最後に、多質点系の応答予測理論を1質点系のそれに基づいて作成し、その応答予測精度を示す。以上より、セルフセンタリング構造物が合理的に設計できることを結論付ける。

3. 研究の方法

本研究では、図1に示す復元力特性モデルを対象とした。エネルギー消費性能の様々なセルフセンタリング構造4種に加え、一般的な鋼構造物の構造特性を表すバイリニア構造も対象に加えた。これらはエネルギー消費率 β_e を変数として用いることで、共通の力学モデルで表現可能である。

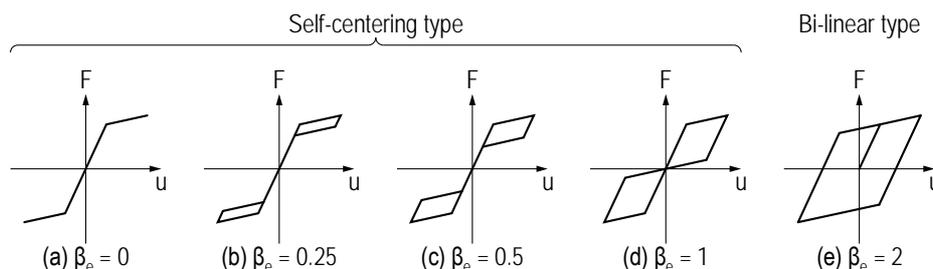


図1 本研究で対象とする復元力特性モデル

(1) 1質点系の時刻歴応答解析および等価線形化法

図2aに1質点系モデルを、図2bにその復元力特性モデルを示す。1質点系モデルの動的特性は初期固有周期 $T_0 = 2\pi / \omega_0$ および初期減衰定数 ζ_0 であり、履歴形状を特徴付ける変数は降伏後2次剛性比 α 、エネルギー消費率 β_e 、最大塑性率 μ である。

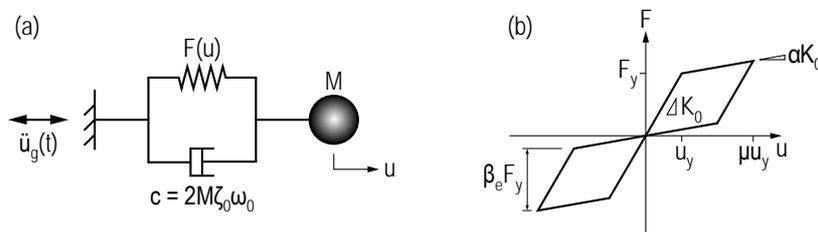


図2 1質点系モデルとその復元力特性モデル

解析変数は、以下に示す通りである。初期固有周期 $T_0 = 0.1\text{sec}$ から 3.0sec (0.1sec刻み); 初期減衰定数 $\zeta_0 = 0.02$, 降伏後2次剛性比 $\alpha = 0, 0.2, 0.5$; エネルギー消費率 $\beta_e = 0, 0.25, 0.5, 1, 2$; 最大塑性率 $\mu = 2, 4, 8, 16$; 入力地動加速度 $\ddot{u}_g(t) = 26$ 地震波。30種周期×1種減衰×3種剛性比×5種エネルギー消費率×4種塑性率×26種地震波の総計46,800組合せの解析を行った。なお、最大塑性

率 μ が目標値に対し誤差 $\pm 0.1\%$ 以内となるように、降伏耐力 F_y を調整して収斂計算を行った。

解析条件は次の通りとした。時刻歴応答解析はNewmarkの β 法($\beta = 0.25$ の平均加速度法)により解き、解析時間刻みは T_0 の $1/200$ 以下となるように決定した。解析の各ステップで生じた不釣り合い力は、Newton-Raphson法による収斂計算で解消した。

これら多数の時刻歴応答解析結果から、非線形挙動を呈した半サイクルの総数および半サイクル毎の塑性変形分布をパラメータ $T_0, \alpha, \beta_e, \mu$ および地震波特性を用いて数式化する。これらを等価線形理論に反映して等価粘性減衰定数の閉形式解を作成し、1質点系の等価線形化法による地震応答予測法を確立した。

(2) 多質点系の時刻歴応答解析および等価線形化法

多質点系モデルの解析では、1質点系のパラメトリックな解析とは対照的に、多質点系の応答予測法の妥当性を検証するための解析を行った。図3aに5質点系モデルを、図3bに主架構の質量および剛性分布を示す。これらの構造特性から、主架構の1次固有周期 T_1 は0.8secと決定される。

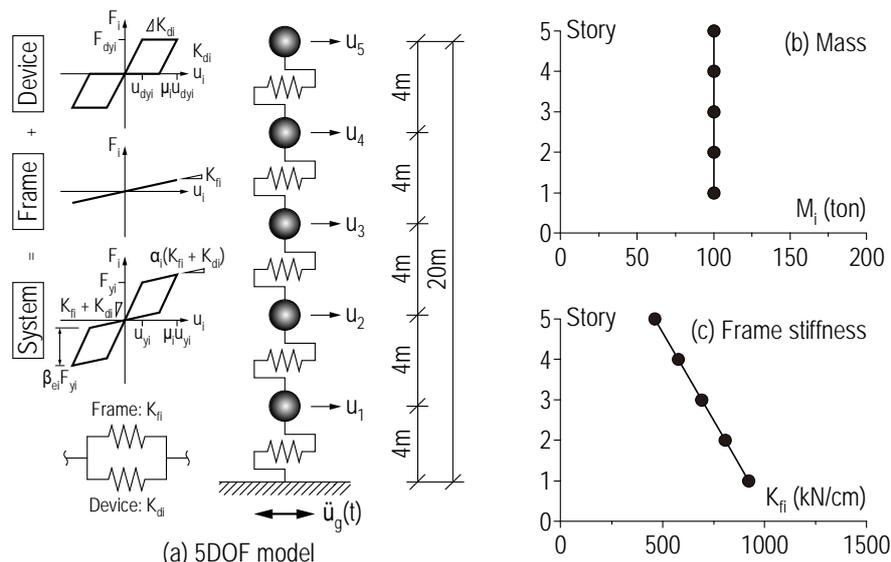


図3 5質点系モデルとその主架構構造特性

各層に目標値以下の一様な層間変形角と塑性率を生じさせるために、各層に付与すべきデバイス剛性を決定する設計法を、前述の1質点系の等価線形化法に基づき展開した。この設計を、滑らかなスペクトル特性を持つ模擬地震波BCJ-L1, BCJ-L2を対象に実施した。例として目標層間変形角 $\theta = 1/300\text{rad}$ (BCJ-L1), $1/150\text{rad}$ (BCJ-L2); 目標塑性率 $\mu = 2$ (BCJ-L1), 4 (BCJ-L2)を検討する。各層の β_{ei} は一定とし、減衰定数は1次と2次が0.02で等しいRayleigh型とした。

以上で設計した多質点構造の時刻歴応答解析を、Newmarkの β 法($\beta = 0.25$ の平均加速度法)で解いた。解析時間刻みは1次固有周期 T_1 の $1/200$ 以下となるように決定し、解析の各ステップで生じた不釣り合い力は、Newton-Raphson法による収斂計算で解消した。

4. 研究成果

1質点系の時刻歴応答解析結果を図4にまとめる。それぞれ、図4aはセルフセンタリング型($\beta_e = 1$)とバイリニア型($\beta_e = 2$)で累積塑性変形倍率 η を比較したもので、図4bは $\beta_e = 1, \alpha = 0.2$ の系で26波平均した非線形サイクル数 n_{NL} を解析と予測で比較したもので、図4cは26波平均した基準化塑性変形倍率 $\Delta\mu(n) / \Delta\mu_{\max}$ と基準化サイクル数 $(n-1) / n_{NL}$ の関係を解析と予測で比較したものである。ここで、 $\Delta\mu(n) / \Delta\mu_{\max}$ は大きい順に並べた半サイクル毎の塑性変形倍率をそれらの最大値 $\Delta\mu_{\max}$ で基準化したもので、 $(n-1) / n_{NL}$ はサイクル数を $n=1$ で0, $n=n_{NL}+1$ で1となるよう基準化したものである。

図4aより、 $\beta_e = 1$ の系の η は、最大塑性率 μ が等しい $\beta_e = 2$ の系の η に対して統計的に0.744倍となる。一方で、潜在的なエネルギー消費性能は、両者等しい振幅下を仮定すれば $\beta_e = 1$ は $\beta_e = 2$ の0.5倍となり、解析結果と乖離する。既往の等価線形化法では潜在的なエネルギー消費性能から等価減衰定数を決定するため、セルフセンタリング構造の等価減衰を低めに見積もり、過大な予測を与えることとなる。以上から、詳細な地震応答性状を等価線形化法に反映するため、図4b, cのような地震応答を求め、定式化することとした。

非線形サイクル数 n_{NL} は $T_0 \rightarrow 0$ で剛な系の非線形サイクル数 n_{NL}^R となり、 $T_0 = 0.3\text{sec}$ の周辺で極値を持ち、これ以降は T_0 の増加に伴い柔な系の非線形サイクル数 n_{NL}^F に向かって漸減し、 α, β_e, μ などにも大きく左右される(図4bの丸プロット)。 n_{NL} の予測式は、これらの変数に加えて地震波の継続時間 t_d や n_{NL}^R, n_{NL}^F を用いて定式化したことに特徴があり、変数毎に異なる傾向を良好に再現できている(図4bの実線)。

図 4c の丸プロットは、基準化サイクル数 0.05 毎に計算した、30 種周期、3 種剛性比、26 地震波による解析結果の平均である。大きい順に $\Delta\mu$ を並べ替えることで、 $\Delta\mu(1) = \Delta\mu_{\max}$, $\Delta\mu(n_{NL} + 1) = 1$ の 2 点が確定値となる。そこで、 $\Delta\mu_{\text{mid}} = \Delta\mu(n_{NL}/2 + 1)$ と定義して、この値を解析結果から決定することで、これら 3 点を通る指数曲線で塑性変形倍率の分布を定式化した。指数曲線による分布は、解析結果の平均的な傾向を良く捉えている。

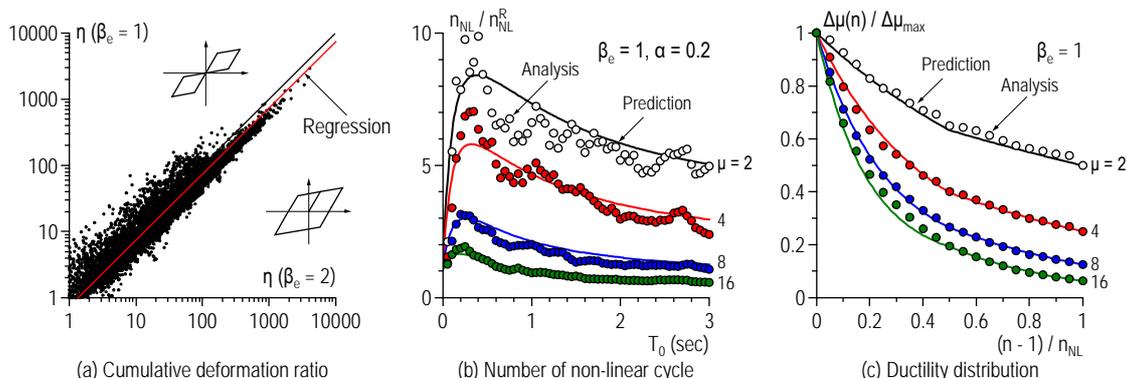


図 4 1 質点系の地震応答

新しく提案した等価粘性減衰定数 ζ_{eq} の算定法は、Newmark-Rosenblueth の平均減衰法に基づき、具体的な非線形半サイクルの総数 n_{NL} と各々に対応する塑性変形倍率 $\Delta\mu(n)$ の値を用いる。すなわち、特定サイクルの等価粘性減衰定数 $\zeta_{eq}(n)$ を $\Delta\mu(n)$ から求め、これを $n = 1$ から $n = n_{NL} + 1$ まで平均することにより ζ_{eq} を決定するものである。 $\alpha = 0.2$, $\zeta_0 = 0.02$ の条件の下、提案手法により算定した $\beta_e = 0.5, 1, 2$ の系の ζ_{eq} を図 5 に示す。提案手法は $n_{NL} = 2, 16, 32$ (赤、青、緑実線) を仮定しており、また比較として Newmark-Rosenblueth 式に基づく笠井の ζ_{eq} を示す。ただし、笠井の手法は $\beta_e = 2$ に対応するパイリニア型のみ提案されているため、 $\beta_e = 0.5, 1$ に対しては定常振幅時のエネルギー消費性能に応じて修正した。提案手法と笠井法の ζ_{eq} は同様の傾向を持つが、個別の地震応答の影響を考慮できない笠井法とは対照的に、 ζ_{eq} は n_{NL} に依存して様々に変化する。

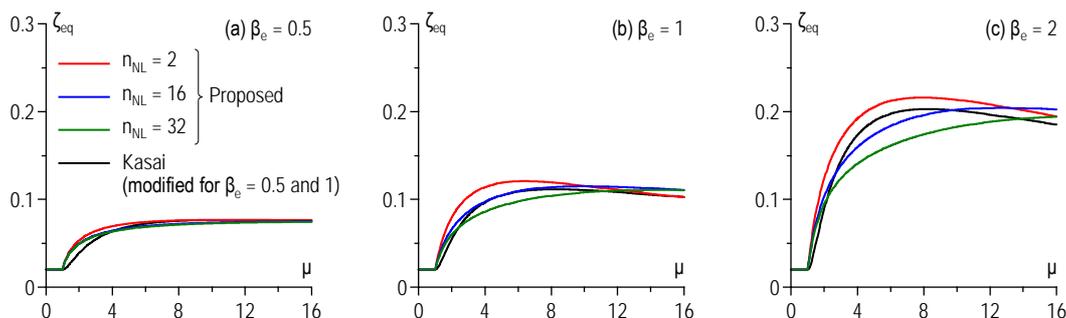


図 5 等価粘性減衰定数

これらの ζ_{eq} を用いた場合の最大応答の予測精度について検討した。検討対象は、前述の 46,800 ケースの解析結果である。最大応答の予測法としては、最も精度が良いと思われる笠井の等価速度スペクトルと応答スペクトルの低減に基づく方法を用いた。表 1 には各 β_e の最大加速度(Acc.)、最大変位(Disp.)、累積塑性変形(Cum. Def.)の予測値を解析値で除した比の平均値と標準偏差を示す。

表 1 最大加速度(Acc.)、最大変位(Disp.)、累積塑性変形(Cum. Def.)の予測精度

上段：平均値，下段：標準偏差

μ	$\beta_e = 0$			$\beta_e = 0.25$			$\beta_e = 0.5$			$\beta_e = 1$			$\beta_e = 2$		
	Acc.	Disp.	Cum. Def.												
2	1.154 (0.197)	1.179 (0.208)	1.829 (2.151)	1.129 (0.174)	1.153 (0.183)	1.770 (1.807)	1.107 (0.169)	1.130 (0.177)	1.711 (1.618)	1.072 (0.187)	1.094 (0.192)	1.627 (1.421)	1.081 (0.252)	1.103 (0.255)	1.136 (0.913)
4	1.213 (0.219)	1.260 (0.252)	1.404 (1.418)	1.180 (0.191)	1.225 (0.218)	1.499 (1.349)	1.153 (0.186)	1.197 (0.207)	1.496 (1.223)	1.101 (0.199)	1.141 (0.213)	1.497 (1.155)	1.064 (0.250)	1.100 (0.259)	1.070 (0.798)
8	1.222 (0.243)	1.301 (0.302)	1.155 (1.020)	1.160 (0.215)	1.233 (0.264)	1.287 (1.009)	1.114 (0.201)	1.183 (0.238)	1.319 (0.943)	1.053 (0.200)	1.118 (0.229)	1.341 (0.896)	0.975 (0.225)	1.027 (0.237)	1.028 (0.686)
16	1.208 (0.271)	1.339 (0.380)	1.047 (0.636)	1.119 (0.237)	1.237 (0.315)	1.173 (0.671)	1.061 (0.221)	1.171 (0.281)	1.222 (0.678)	0.990 (0.211)	1.094 (0.264)	1.256 (0.665)	0.890 (0.220)	0.966 (0.247)	1.067 (0.562)
ALL	1.199 (0.236)	1.270 (0.299)	1.359 (1.453)	1.147 (0.207)	1.212 (0.252)	1.432 (1.300)	1.109 (0.198)	1.170 (0.231)	1.437 (1.183)	1.054 (0.204)	1.112 (0.227)	1.430 (1.082)	1.003 (0.249)	1.049 (0.256)	1.075 (0.752)

す．最大加速度および最大変位は， β_e が小さいほど平均，標準偏差ともに大きくなる．累積塑性変形倍率は， $\Delta\mu(n)$ および n_{NL} を用いて誘導した閉形式解で予測したものであり，研究代表者の知る限りセルフセンタリング構造について本研究以外で検討したものはない．その性質上ばらつきは最大変位に比べて大きい， η が重要となる μ が大きい場合には平均が 1 に近づくとともに標準偏差が小さく高精度の予測となる．なお，笠井の ζ_{eq} による予測精度は紙幅の都合上割愛するが，平均が提案手法より 3.5%~7.4% 程大きく，標準偏差はほぼ同程度であった．以上から，提案手法の 1 質点系における地震応答予測精度は良好であり，僅かではあったものの既往手法から精度を改善できた．そこで，次に 1 質点系の予測理論を多質点系に拡張し，その応答予測法を議論する．

既往の制振設計法に倣い，BCJ-L1, BCJ-L2 入力時の層間変形角を 1/300rad, 1/150rad で一樣とするために必要な各層のデバイス剛性 K_{di} を各層の $\beta_{ei}=1$ として図 6a のように定めた．主架構剛性 K_f は直線分布だが，必要デバイス剛性 K_{di} は上層ほど小さくなり，よって各層の 2 次剛性比 α_i は上層ほど大きくなる．図 6b, c, d はそれぞれ，各層の層間変形角 θ_i ，最大層せん断力 V_i ，累積塑性変形倍率 η_i の解析値と予測値の比較を示す．提案手法は， n_{NL} の算定に等価 1 質点系でのデバイス剛性比 K_d / K_f の仮定が必要なため，設計した多質点構造の層間変形角が目標値以下となることが従来の制振設計法と本質的に異なる．図 6b より，BCJ-L1, BCJ-L2 共に層間変形角 θ_i は目標値以下であり，概ね一樣な分布を満足した．図 6c より，最大層せん断力 V_i は上述の理由から安全側の予測となるが，建物高さ方向の分布傾向を良く捉えている．図 6d より，累積塑性変形倍率 η_i は 1 質点系での考察から明らかなように多少精度は落ちるものの，妥当な予測値を与えたと言える． α_i が 0.3 程度で概ね一定の 1 層から 4 層と比べ，最上層では α_i が 0.5 前後と高く η_i が大きくなるが，このような傾向も再現できている．以上から，任意の主架構にセルフセンタリングデバイスを設置した際の各層応答が妥当な精度で予測できるため，多層セルフセンタリング構造が合理的に設計できる．

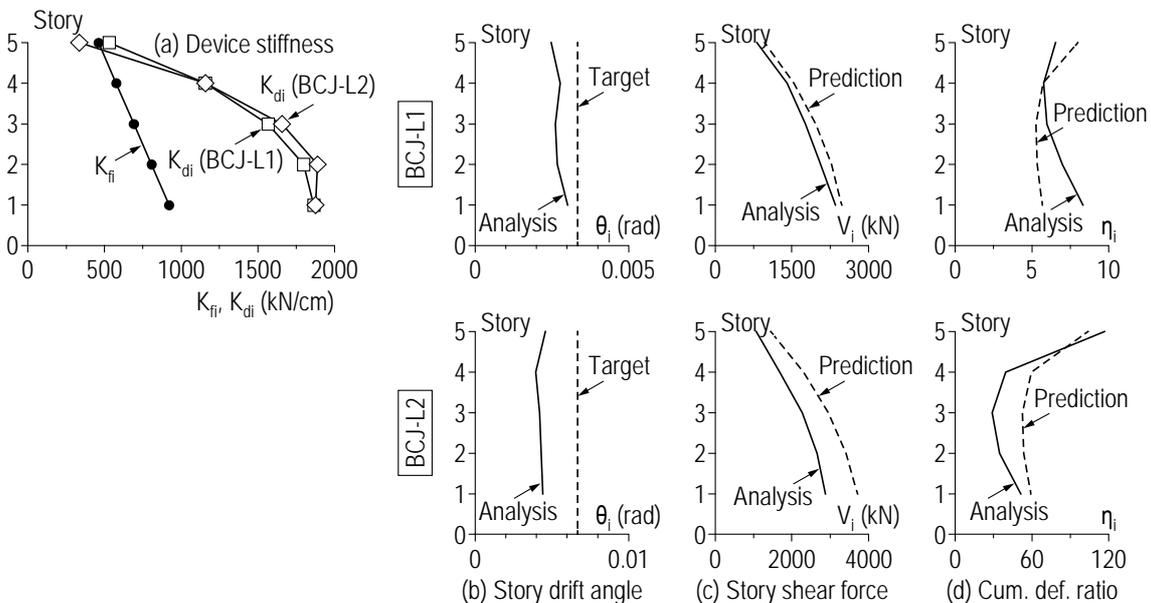


図 6 5 質点系モデルの必要デバイス剛性と地震応答

最後に，本研究課題の位置づけと今後の展望を述べる．本研究課題は，数多く提案されているが，その地震応答性状の詳細な検討やこれを反映した包括的な地震応答予測手法が未だないため普及していないセルフセンタリング構造の，性能設計のための地震応答予測手法の開発を目的としたものである．1 質点系の地震応答性状と等価線形化理論を組み合わせることで，従来手法と比べてセルフセンタリング構造の地震応答予測精度を改善でき，さらに既往の手法では予測することが不可能であった累積塑性変形も妥当な精度で予測することができた．これにより，与えられた地震入力レベルにおけるデバイス容量の検討の簡略が図れ，よって性能設計の発展に貢献できた．

今後の展望だが，さらなる応答予測精度の改善が考えられる．提案手法を含む等価線形化手法では，表 1 にも示したように β_e が小さいほど， μ が大きいほど予測精度が低下する傾向にある．特に， $\beta_e=0$ のエネルギー消費がない非線形弾性系ではこれが顕著となる．このような実際と予測の乖離について今後詳細に検討を行う予定である．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------