

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：14301
 研究種目：挑戦的萌芽研究
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23656340
 研究課題名(和文) 地震動レベルをスイープする変形指定逆問題型キャパシティースペクトル法
 研究課題名(英文) Ductility Inverse-Mapping Capacity Spectrum Method for Variable Level of Ground Motion
 研究代表者
 竹脇 出 (TAKEWAKI IZURU)
 京都大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：20155055

研究成果の概要(和文)：

本研究では、2000年改正の建築基準法(限界耐力計算)で導入された従来のキャパシティースペクトル法(以下CS法)とは全く逆の発想により、「応答を指定して」それに対する「入力地震動レベルを決定する」という、これまでの構造設計パラダイムを覆す方法(インバースCS法)を制振・非制振両構造物に対して提案した。インバースCS法の最大の特徴は、入力地震動レベルが決められたCS法では等価線形化で必要となる非弾性応答変形は応答評価後に決まる量であるため構造物の応答を評価するには必然的に繰り返し操作が必要であるのに対して、非弾性応答変形を前もって定めるため繰り返しが必要となる点にある。

研究成果の概要(英文)：

A ductility inverse-mapping method for SDOF systems including passive dampers is proposed which enables one to find the maximum acceleration of ground motion for the prescribed maximum response deformation. In the conventional capacity spectrum method, the maximum response deformation is computed through iterative procedures for the prescribed maximum acceleration of ground motion. This is because the equivalent linear model for response evaluation is described in terms of unknown maximum deformation. While successive calculations are needed in the conventional capacity spectrum method, no numerically unstable iterative procedure is required in the proposed method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：耐震設計、地震エネルギー、地震防災、最悪地震動、構造解析、極限外乱理論

1. 研究開始当初の背景

デマンドスペクトルとキャパシティースペクトルの関係から、構造物の応答を簡易的に評価するキャパシティースペクトル法(以下CS法)が最近10年あまりの間に展開され、建築構造物の簡易耐震設計法の中心的な

方法として利用されている。しかしながら、**入力地震動レベルが決められた従来のCS法**には、(1)等価線形化で必要となる非弾性応答変形は応答評価後に決まる量であるため構造物の応答を評価するには必然的に繰り返し操作が必要であること(図1)、(2)この繰

繰り返し操作の収束性は保証されていないこと、(3)複数解の存在による設計解の不確実性、などの問題点が指摘されている。これらの問題点に対する解決法としては、弾塑性応答評価のための経験式の導入などいくつかの方法が提案されているが、有効な解決法は提案されていない。また、特定の入力地震動レベルに対する設計解の状況しか把握できないという問題点も存在する。本研究では、従来の方法とは全く逆の発想により、「応答を指定して」それに対する「入力地震動レベルを決定する」という、これまでの構造設計パラダイムを覆す方法（インバースCS法）を提案している（図2）。これにより、不確実な繰り返し操作を必要とせず、幅広い入力地震動レベルに対する応答特性を把握しながら設計を行うことが可能となる。

2. 研究の目的

- (1) 繰り返しが必要ないキャパシティースペクトル法（インバースCS法）が独自の逆問題型定式化により可能となることを明らかにすること。
- (2) インバースCS法を制振ダンパー付構造物に適用し、構造種別（鉄骨造S、鉄筋コンクリートRC、木造Wood）および建物層数に応じて有効な制振ダンパー（履歴ダンパー、粘弾性ダンパー、粘性ダンパー）を見出す独自の方法を構築すること。

3. 研究の方法

図1は繰り返しを伴う通常のキャパシティースペクトル法の操作を表す。一方、図2はインバースCS法の概要図を表す。

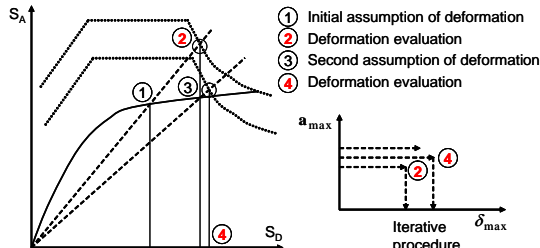


図1 キャパシティースペクトル法の概要

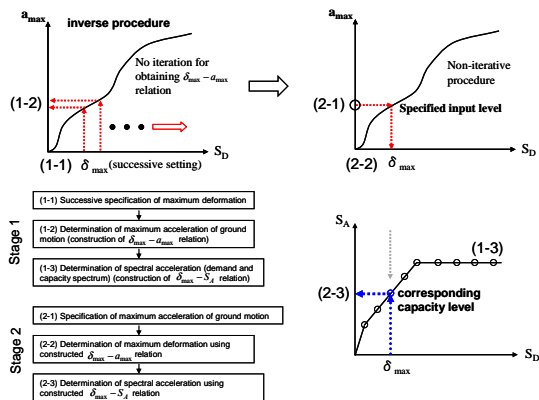


図2 提案インバースCS法の概要

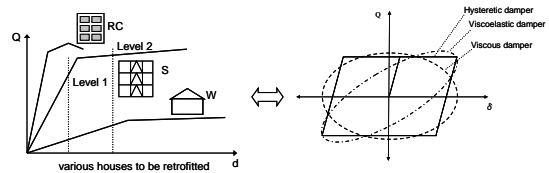


図3 制振改修建物とダンパーの復元力特性

図3は、鉄筋コンクリート造、鉄骨造および木造建物の復元力特性と制振改修のためにそれらに組み込む粘性、履歴、粘弾性ダンパーの復元力特性を表す。

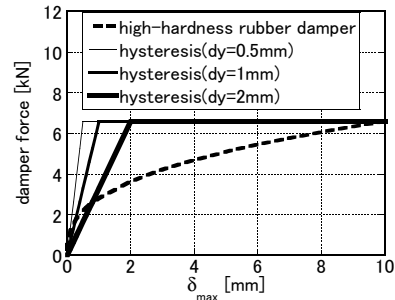


図4 高硬度ゴムダンパーと履歴ダンパーの復元力特性

図4は、高硬度ゴムダンパーと種々の降伏変位の履歴ダンパーの復元力特性を表す。

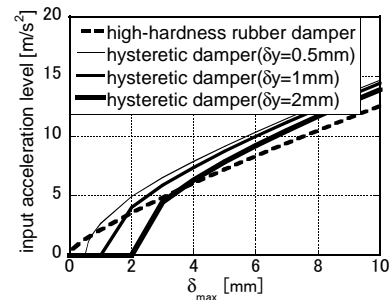


図5 高硬度ゴムダンパーと種々の降伏変位を有する履歴ダンパー付1自由度モデルの最大応答変位に対する地動最大加速度

図5は、高硬度ゴムダンパーと種々の降伏変位を有する履歴ダンパー付1自由度モデルの最大応答変位に対する地動の最大加速度を表す。横軸に対して縦軸が決まるが、インバースCS法によると、逆に縦軸の値から横軸の値が決まるとも理解できる。

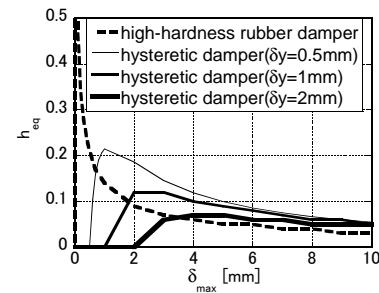


図6 最大変位に対する等価粘性減衰定数

図6は、高硬度ゴムダンパーと種々の降伏変位を有する履歴ダンパー付1自由度モデルの最大応答変位に対する等価減衰定数を表す。図5から指定された地動最大加速度から最大応答変位が求められると、図6によりそれに対応する等価減衰定数が求められる。

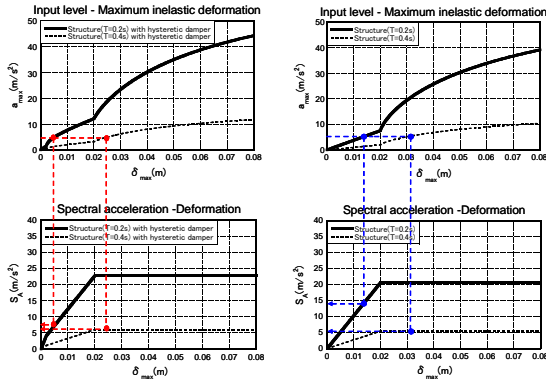


図7 履歴ダンパーがある場合と無い場合の2種類の1自由度モデル (T=0.2s, 0.4s) の最大層間変位と地動最大加速度の関係、及び最大層間変位と応答加速度スペクトルの関係

図7は、履歴ダンパーがある場合と無い場合の固有周期の異なる2つのモデル(T=0.2s, 0.4s)について、最大応答変位に対する地動の最大加速度の図と、最大応答変位に対するスペクトル加速度の図を表す。図5と同様に、最初は横軸に対して縦軸が決まるが、インバースCS法によると、逆に縦軸の値から横軸の値が決まるとも理解できる。

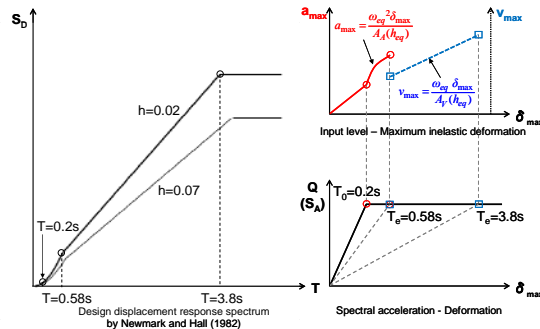


図8 インバースCS法により求めた1自由度モデルの等価固有周期でのスペクトル変位に対する地動の最大加速度あるいは地動の最大速度と(右上図) Newmark と Hall の変位応答スペクトル(左図)

図8は、インバースCS法により求めた1自由度モデルの等価固有周期でのスペクトル変位に対する地動の最大加速度あるいは地動の最大速度と(右上図) Newmark と Hall の変位応答スペクトル(左図)を表す。右下図は、応答スペクトルの領域境界点に対応する復元力特性上の点を表す。

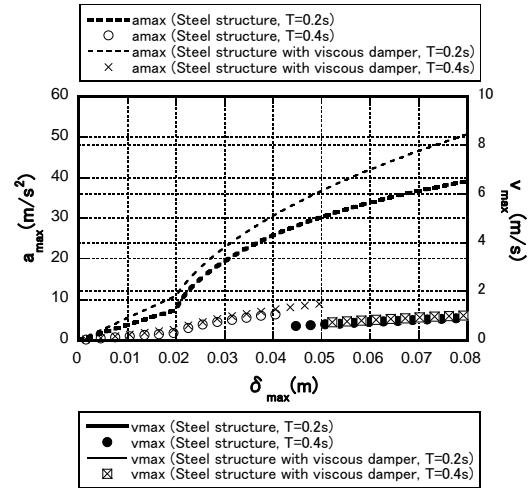


図9 インバースCS法により求めたスペクトル変位に対する地動の最大加速度(左軸)と最大速度(右軸)(粘性ダンパー有無の2つのモデル(T=0.2s, 0.4s))

図9は、粘性ダンパーが無い場合とある場合の固有周期の異なる2つのモデル(T=0.2s, 0.4s)について、インバースCS法により求めたスペクトル変位に対する地動の最大加速度(左軸)と最大速度(右軸)の図を表す。T=0.4sの場合には地動最大加速度に加えて最大速度を用いて表現する必要がある。

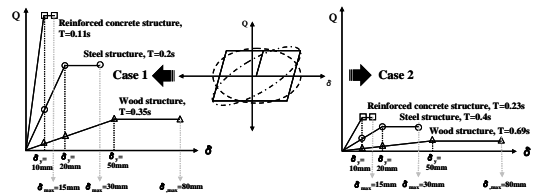


図10 剛柔2つのタイプの建物(RC造、鉄骨造、木造)の復元力特性

図10は、剛柔2つのタイプの建物(RC造、鉄骨造、木造)の復元力特性を表す。

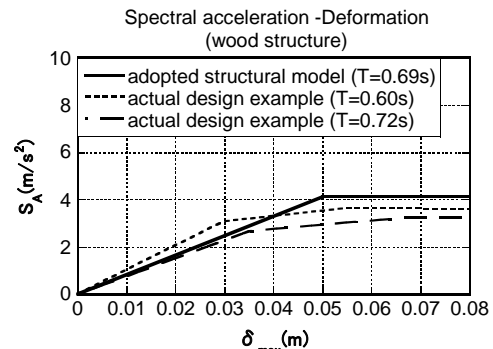


図11 木造建物に対する現実的な2つの復元力特性と採用された近似復元力特性

図11は、木造建物の現実的な2つの復元力特性と採用された近似復元力特性を表す。

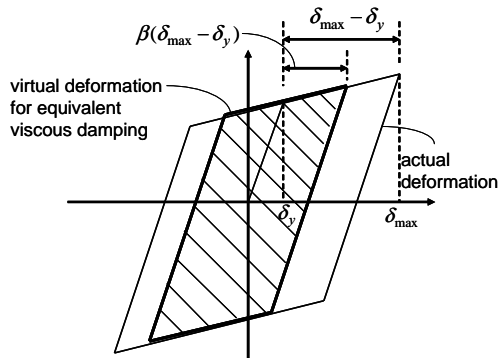


図 12 最大変位の復元力特性と有効変位比を乗じた場合の変位に対する復元力特性

図 12 は、最大変位に対する復元力特性と有効変位比を乗じた場合の変位に対する復元力特性を表す。最大値を示すのは 1 点であり、多くのループではそれよりも小さな振幅を示すため、消費エネルギーと最大振幅の関係を近似的に表現したものとなっている。

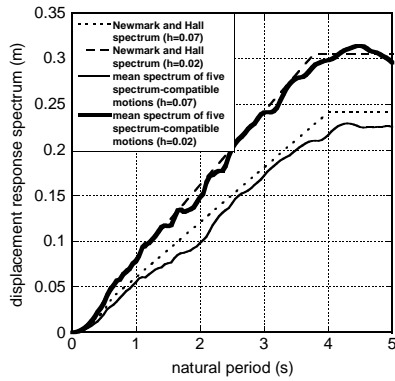


図 13 Newmark と Hall の設計用変位応答スペクトルと 5 波のスペクトル適合地震動の変位応答スペクトルの平均値

図 13 は、Newmark と Hall の設計用変位応答スペクトルと、それと適合するように作成した 5 波のスペクトル適合地震動の変位応答スペクトルの平均値を表す。

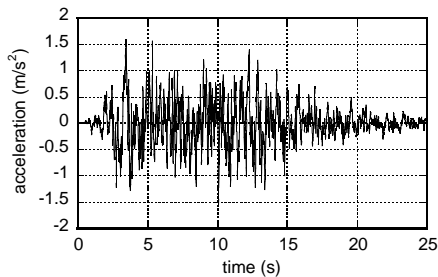
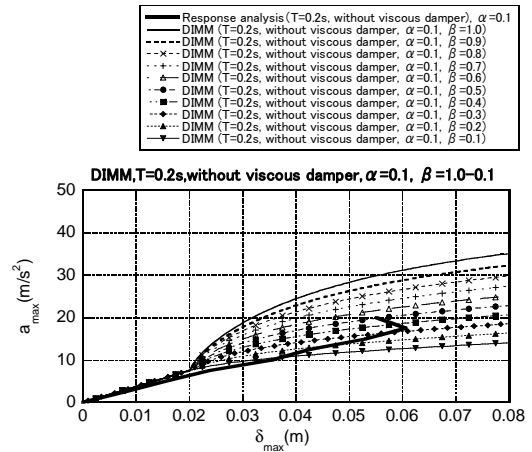
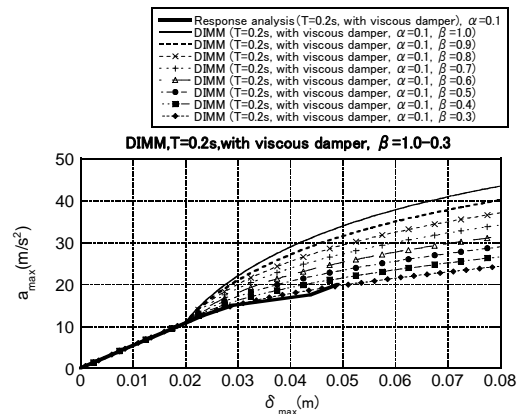


図 14 スペクトル適合地震動の 1 例

図 14 は、Newmark と Hall の設計用変位応答スペクトルに適合するように作成した模擬地震動の加速度波形の 1 例を表す。



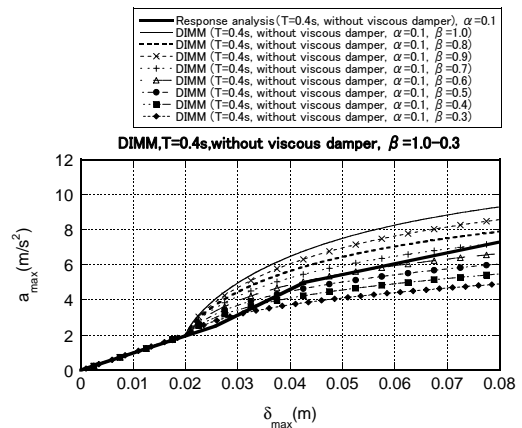
(a) 粘性ダンパーが無い場合



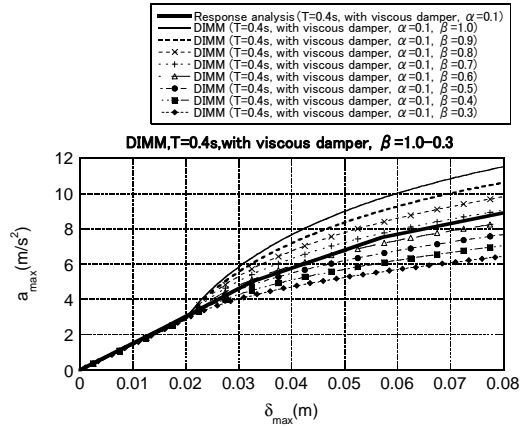
(b) 粘性ダンパーがある場合

図 15 粘性ダンパーが無い場合とある場合の ($T = 0.2s$)、種々の有効変形比に対する地動最大加速度と最大変形の関係と時刻歴解析によるその検証

図 15 は、 $T = 0.2s$ のモデルについて、粘性ダンパーが無い場合とある場合の、種々の有効変形比に対する地動最大加速度と最大変形の関係と時刻歴解析によるその検証を表す。



(a) 粘性ダンパーが無い場合



(b) 粘性ダンパーがある場合
 図 16 粘性ダンパーが無いときとあるときの ($T = 0.4s$)、種々の有効変形比に対する地動最大加速度と最大変形の関係と時刻歴解析によるその検証

図 16 は、 $T = 0.4s$ のモデルについて、粘性ダンパーが無い場合とある場合の、種々の有効変形比に対する地動最大加速度と最大変形の関係と時刻歴解析による検証を表す。

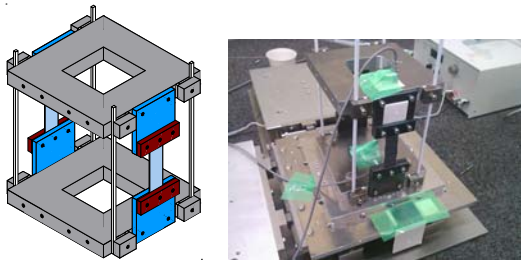


図 17 実験供試体と振動実験概要

図 17 は、鉛板を履歴ダンパーの一例として採用し、種々の入力レベルに対する鉛板付き構造モデルの復元力特性を実験的に明らかにするための振動実験供試体を表す。この特性を H23 年度に展開したインバース CS 法に適用することにより、履歴ダンパー付き構造物のインバース CS 法が有効に利用できることを明らかにした。

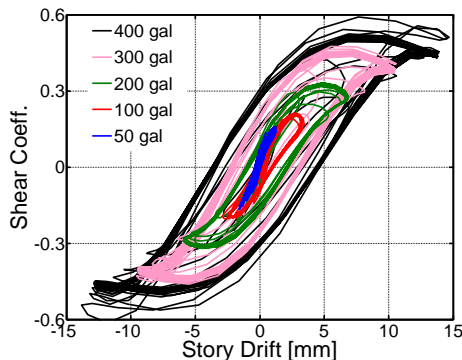


図 18 種々の入力レベルにおける鉛板付実験供試体の履歴復元力特性

図 18 は、鉛板を履歴ダンパーの一例として採用した場合の、種々の入力レベル (50-400gal) に対する鉛板付実験供試体の復元力特性を表す。

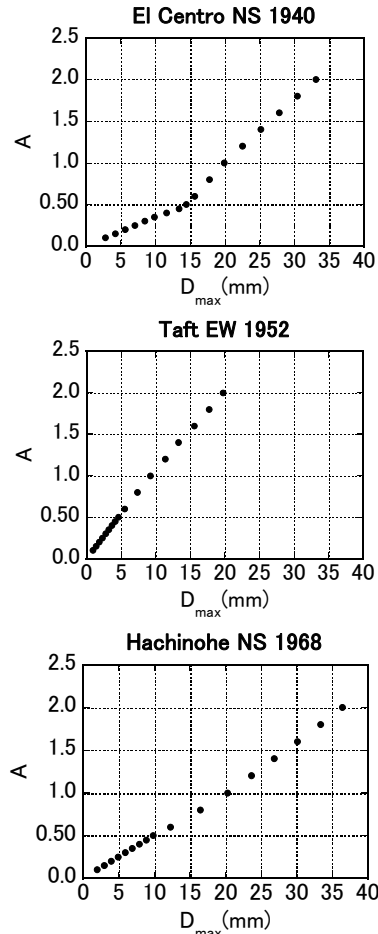


図 19 10 層 3 スパン骨組の入力地震動レベルと最大層間変位の関係

図 19 は、図 5, 7, 9, 15, 16 などに対応する、履歴ダンパーを有する 10 層 3 スパン骨組における、El Centro NS 1940, Taft EW 1952, Hachinohe NS 1968 の 3 地震動に対する入力地震動レベルと最大層間変位の関係を表す。縦軸の 1.0 は原波のレベルを表す。地震波ごとに異なる特性を有することが理解される。10 層 3 スパン骨組モデルの諸元を以下に示す。階高 $H_j = 4(m)$ 、スパン長 $L = 7(m)$ (全スパン一様)、層質量 $m_j = 120 \times 10^3(kg)$ であり、柱と梁の剛性は実在する鉄骨造建物を参考にして設定した (表 1)。非減衰 1 次固有周期は $T^{(1)} = 1.39(s)$ (非減衰 1 次固有円振動数 $\omega^{(1)} = 4.52(rad/s)$) である。

表 1 梁と柱の断面特性

層	$I_c(mm^4)$	$A_c(mm^2)$	$I_b(mm^4)$
1~5	2162651392	46464	2920000000
6~10	1898898000	40356	1720000000

(スパン方向には同一の部材を用いる)

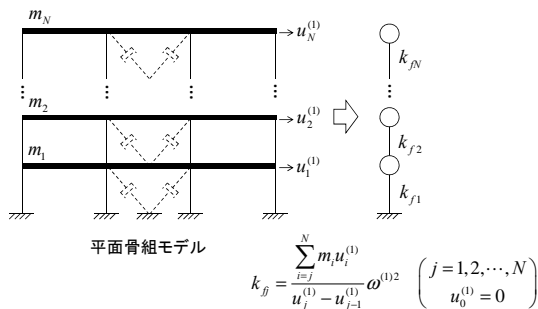


図 20 履歴ダンパー付き 10 層 3 スパン骨組
表 2 骨組の層剛性と履歴ダンパーの第 1, 2 分枝剛性

層	k_{fj} (kN/mm)	$k_{ej} (= k_{fj})$ (kN/mm)	$k_{pj} (= \Gamma_j k_{ej})$ (kN/mm)
1	182	182	9.10
2	119	119	5.95
3	113	113	5.65
4	110	110	5.50
5	106	106	5.30
6	87.7	87.7	4.39
7	75.0	75.0	3.75
8	71.0	71.0	3.55
9	66.6	66.6	3.33
10	54.0	54.0	2.70

($\Gamma_j = 0.05$, 降伏層間変位 $\delta_{yj} = H_j/200$ (=20mm))

4. 研究成果

- (1) 限界耐力スペクトルや Newmark と Hall の設計用応答スペクトルに対して「インバース CS 法」を展開した。逆問題型解法により繰り返し計算が不要である利点を最大限利用している。建物の 1 次固有周期領域により、地動最大加速度が入力地震動レベル指標となる場合と、地動最大速度が入力地震動レベル指標となる場合があるため、その点にも留意した方法を構築した。
- (2) 等価線形化において最大変形を用いた消費エネルギーの等価性条件は過大な減衰評価となることが知られているため、塑性変形部分に「実効率」を乗じた新しい形式を提案した。時刻歴解析によりその精度を検証した。
- (3) 鉄骨造や RC 造の種々の復元力特性モデルについてインバース CS 法を適用し、変形能力の違いが「変形 - 入力地震動レベル」関係や「変形 - スペクトル加速度」関係、「変形 - 等価減衰定数」関係に及ぼす影響について詳細な検討を行った。
- (4) H23 年度に展開した「インバース CS 法」を制振ダンパー付鉄骨造、RC 造、木造建物に適用した(図 5)。ダンパーとしては、

粘性ダンパー(オイル:リリース機構なし)、粘弾性ダンパー、履歴ダンパーを採用した。横軸を指定変形量として、地動最大加速度(あるいは速度)やスペクトル加速度および等価粘性減衰定数をグラフ化し、「インバース CS 法」の特徴を詳細に把握した。図 6 から理解されるように、インバース CS 法を用いると、ダンパーによる応答低減効果が幅広い入力地震動レベルに対して明らかとなる。

- (5) 鉛板を履歴ダンパーの一例として採用し、種々の入力レベルに対する鉛板付き構造モデルの復元力特性を実験的に明らかにした。この特性を H23 年度に展開したインバース CS 法に適用することにより、履歴ダンパー付き構造物のインバース CS 法が有効に利用できることを明らかにした。
- (6) 地動最大加速度と最大層間変位の関係が誘導できれば、せん断型モデルに対する理論は、平面骨組モデルに対しても適用可能であることを、10 層 3 スパン骨組を例として示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 1 件)

H.-G.Kim, S.Yoshitomi, M.Tsuji and I.Takewaki, Ductility inverse-mapping method for SDOF systems including passive dampers for varying input level of ground motion, *Earthquakes and Structures*, Vol.3, No.1, pp59-81, 2012. (査読有)
(<http://technop.kaist.ac.kr/?page=container&journal=eas&volume=3&num=1>)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹脇 出 (TAKEWAKI IZURU)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 20155055

(2) 研究分担者 (H23 のみ)

吉富 信太 (YOSHITOMI SHINTA)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 30432383