

# 平面異種混合構造の必要保有水平耐力

Required seismic strength of a structural system consisting of different elements in hysteresis rule

伊藤 拓海\*・大井 謙一\*・片野 史大\*

Takumi ITO, Kenichi OHI and Fumihiko KATANO

## 1. はじめに

老朽化した既存RC構造物の耐震リニューアルを目的として、既存構造物内部を補強するとともに、鉄骨骨組を新しく増築する補強計画の検討が行われている<sup>1)</sup>。この種の耐震リニューアル計画の形態として、1) 水平方向に構造体として一体となった平面的混合構造、2) 構造体として一体型とならない隣接型構造、3) 高さ方向に構造種別の異なる立体的混合構造、などが挙げられる(図1)。

このうち、2) に対しては、それぞれの構造物を単独に耐震診断・耐震補強を実行すればよいので、現在刊行されている各種構造物の耐震診断法・耐震補強設計手法<sup>2,3)</sup>を適用すればよい。

また、3) に対しては、学校の体育館等がこの種の構造物に該当し、近年の地震による被災経験から、耐震診断・耐震補強設計手法が確立されつつある<sup>4)</sup>。

しかし、1) に関する評価指針としては、既存RC造の外周壁面に鉄骨架構を外側から取り付けて耐震補強する場

合の耐震診断・耐震補強のマニュアルが整備されているのみである<sup>5)</sup>(図1)。

そこで本研究では、上記1) に該当する平面異種混合構造物に対する耐震性能評価において、まず構造特性係数もしくは靱性指標の異なる構造物が混合された場合の基礎的検討を行う。

損傷に係わる指標の許容値を満足するために必要な混合構造物の必要保有水平耐力の提案式を検討し、種々の強度配分を持つ混合構造物の時刻歴応答解析を行い、提案式との比較・検討を行う。

## 2. 混合構造物の損傷に係わる指標の等高線

### 2.1 混合構造物の弾性限

異なる構造物からなる混合構造物に対し、構造物の耐力が弾性応答せん断力  $Q_e$  を上回れば、地震応答は弾性範囲に留まる。ここで、各構造物の降伏変形  $\delta_y$  が共通の混合構造物において(図2)、両者の降伏耐力の単純和  $(Q_{y1} + Q_{y2})$  が  $Q_e$  を上回れば、混合構造物の地震応答は弾性範囲に留まる(図3二重線)。

### 2.2 損傷に係わる指標の等高線の作成方法

混合構造物の場合、 $Q_y (Q_y = Q_{y1} + Q_{y2}) < Q_e$  の時、損

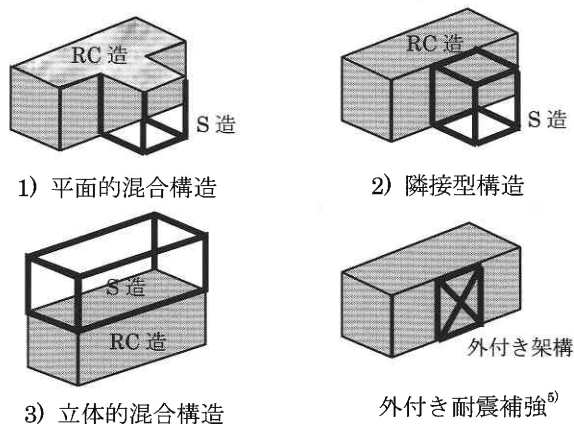


図1 耐震リニューアル計画の形態

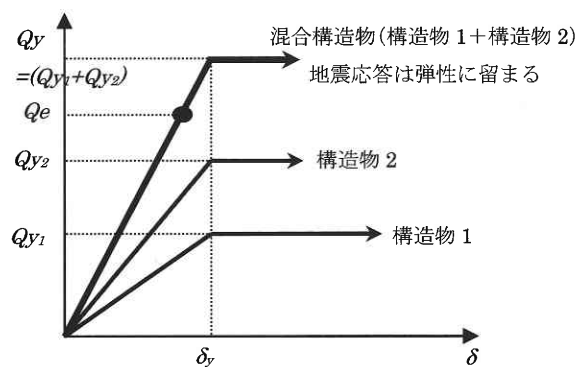


図2 混合構造物における弾性応答せん断力

\*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

傷に係わる指標は様々な耐力比の混合構造物の時刻歴応答解析を実際に行い、その応答履歴から具体的に損傷に係わる指標を評価することができる。応答結果より、損傷に係わる指標の等高線は図3の破線のように得られる。また耐震設計で、損傷に係わる指標の許容値をある値に設定した時、その値に対応する等高線は受容の境界線と考えることができる。

このような受容の境界線に対して、RC耐震診断基準<sup>3)</sup>では、RCラーメン骨組とRC壁からなる並列系構造物の靱性指標の評価方法が、自乗和平方根による評価式で提案されており(同基準(4)式)、図4の楕円に対応する<sup>6)</sup>。この評価式は一般に安全側の結果を与えると考えられる。ここでは、損傷に係わる指標の受容の境界線(図4破線)における両端(単独の構造物の応答)を直線で結び、混合構造物の損傷に係わる指標が許容値に達する境界線を直線近似する方法を検討する。

混合構造物を構成する各骨組の耐力比を $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ とし、直

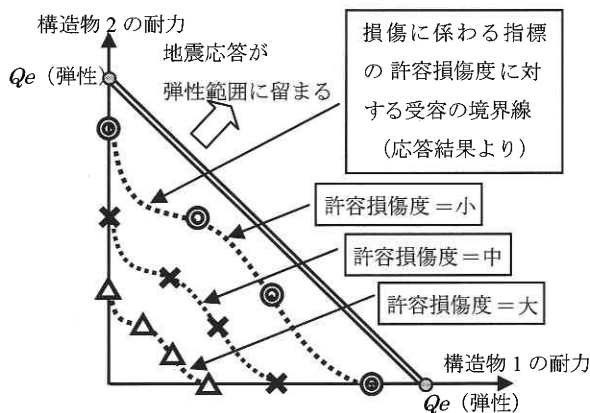


図3 損傷に係わる指標の等高線 (その1)

線近似された損傷に係わる指標の許容値を満足するための必要耐力を求めると(図4◎), 混合構造物の構造特性係数は次式のようなになる。ここで $\alpha_1$ は両者の降伏耐力の単純和に対するそれぞれの降伏耐力の比( $\alpha_1 = \frac{Q_{y1}}{Q_{y1} + Q_{y2}}$ )とする。

$$comb Ds = \frac{1}{\alpha_1/Ds_1 + \alpha_2/Ds_2} \quad (\alpha_1 + \alpha_2 = 1.0) \dots\dots\dots (1)$$

また鉄鋼系建築構造物の耐震性能評価に関わる文献4,7,8)では、異なる構造特性係数(あるいは靱性指標)を持つ要素が混在する場合の構造特性係数(靱性指標)の評価方法が示されており、弾性応答せん断力 $Q_e$ と要素の耐力 $Q_{u_i}$ に対して次式のような評価式が採用されている。(n=2の場合、構造特性係数は式(1)と一致する)

$$Q_e \leq \sum_{i=1}^n \frac{Q_{u_i}}{Ds_i} \dots\dots\dots (2)$$

混合構造物では各構造物の降伏変形、損傷に係わる指標ならびにその許容値が異なるため、混合構造物の応答結果の受容判定において、以下の3つの状況が考えられる。

- ① 両者とも許容値を満足する場合
- ② 両者とも許容値を満足しない場合
- ③ 一方の構造物は許容値を満足するが、もう一方が許容値を満足しない場合

①, ②に対する受容判定については明白である。しかし、③の状況に対して、混合構造物の応答結果の受容判定を行う方針については議論の分かれるところである。そこで本稿の以下の解析では、③の状況を回避するため、降伏変形、損傷に係わる指標ならびにその許容値が共通となる場合を想定し、以下の検討を行う。

### 3. 平面異種混合構造物の構造特性係数と地震応答解析

#### 3.1 解析方法

平面異種混合構造物を構成する骨組の降伏変形 $\delta_y$ が共通で、履歴則のみ異なる混合構造物の構造特性係数に関する検討を行う。

RC骨組の代表的な履歴則としてDegrading Tri-linear型(Takeda Model<sup>9)</sup>、鉄骨骨組に対してNormal Bi-linear型と進行スリップ型の履歴則、計3ケースを想定し、異なる2つの履歴則を組合せた混合構造物を想定する(組合せ数は3通り)。

- ① Degrading Tri-linear型 + Normal Bi-linear型
- ② Degrading Tri-linear型 + 進行スリップ型
- ③ Normal Bi-linear型 + 進行スリップ型

Degrading Tri-linear型, Normal Bi-linear型, 進行スリップ

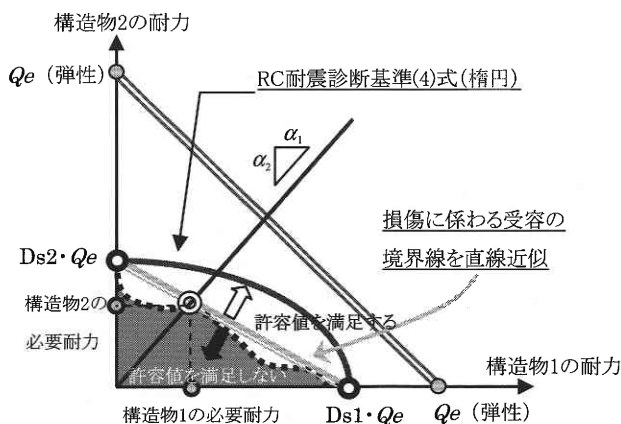


図4 損傷に係わる指標の等高線 (その2)

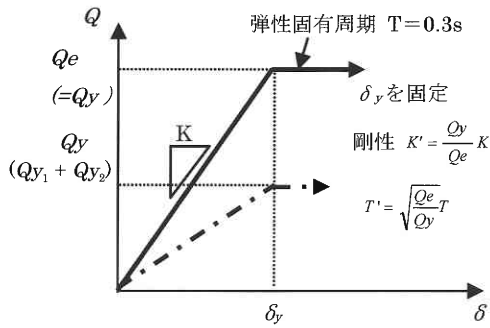


図5 混合構造物の設定

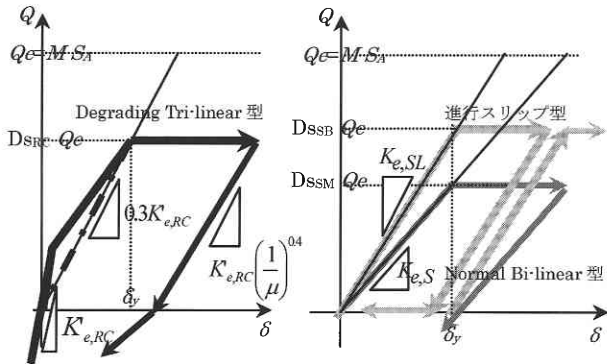


図6 代表的な骨組の復元力特性

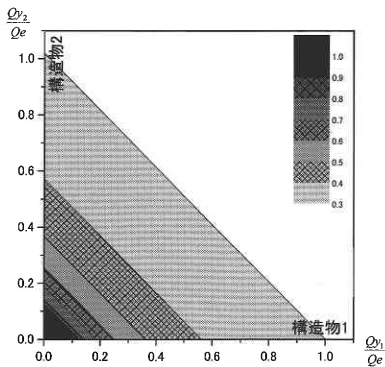


図7 混合構造物の弾性固有周期

型において、それぞれ単独の場合の構造特性係数を  $DS_{RC}$ ,  $DS_{SM}$ ,  $DS_{SB}$  とする。全質量  $M$ ,  $Q_e = Q_y$  の場合の弾性固有周期  $T = 0.3$  秒となる構造物 (図5) を設定し、強度と剛性は完全に相関があるものとし、強度が小さい場合は剛性も小さいと考え、弾性固有周期は大きくしている。RC骨組、鉄骨骨組の復元力特性を図6に示す。なお、Degrading Tri-linear型では、降伏せん断力を第2折れ点の復元力とし、この割線剛性に対して固有周期0.3秒となる骨組を設定する<sup>10)</sup>。また要素耐力の組合せからなる混合構造物の弾性固有周期を算定し、図7に示している。

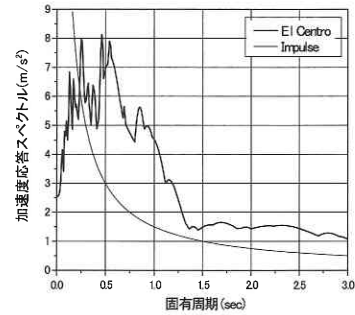
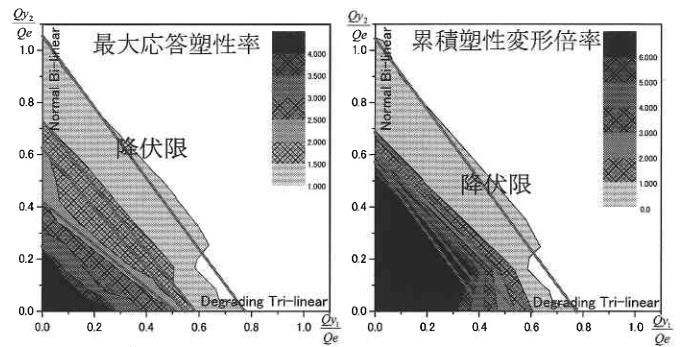
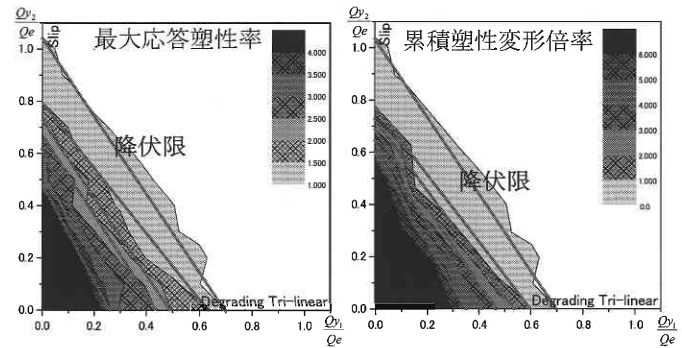


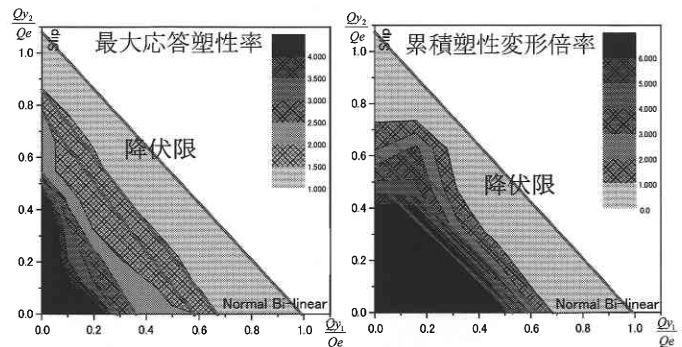
図8 加速度応答スペクトル (h = 3%)



(a) Degrading Tri-linear 型 + Normal Bi-linear 型

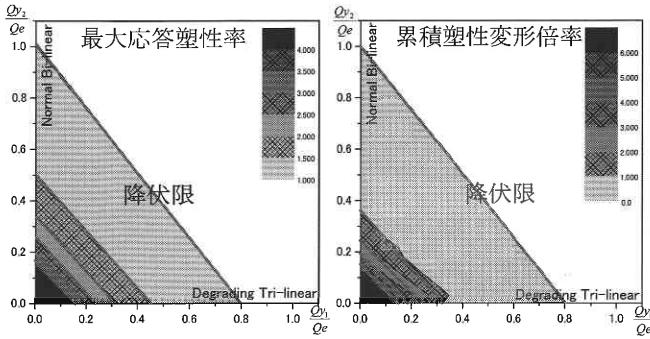


(b) Degrading Tri-linear 型 + Slip 型

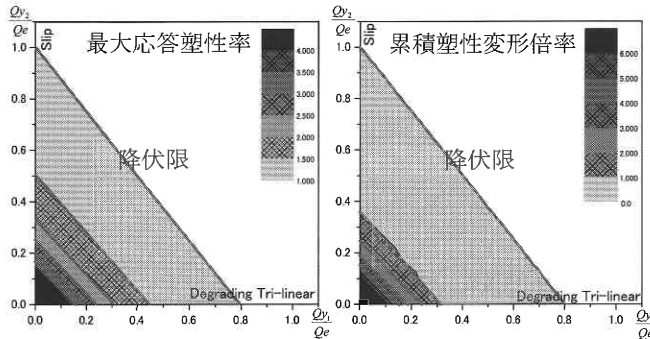


(c) Normal Bi-linear 型 + Slip 型

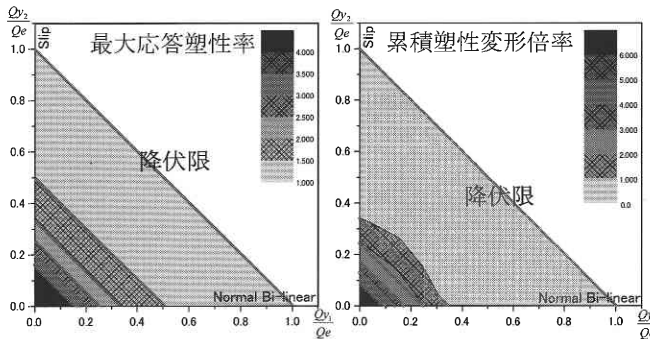
図9 損傷に係わる指標の等高線図 (El Centro h=3%)



(a) Degrading Tri-linear 型 + Normal Bi-linear 型



(b) Degrading Tri-linear 型 + Slip 型



(c) Normal Bi-linear 型 + Slip 型

図 10 損傷に係わる指標の等高線図 (Impulse h=3%)

応答解析で使用する入力地震動は最大地動速度を 0.25 m/sec に基準化した El Centro 1940 NS 成分, Impulse 波を用いる. 減衰定数  $h = 3\%$ , 応答解析の継続時間は 20 秒 (El Centro 1940 NS), 10 秒 (Impulse 波) で, 応答計算の時間刻み  $\Delta t = 0.005$  秒とする. また, 入力地震動の加速度応答スペクトルを図 8 に示す.

3.2 解析結果と考察

図 6 の復元力特性を組合せた混合構造物の地震応答解析を行い, 損傷に係わる指標の例として最大応答塑性率  $\mu = \delta_{\max} / \delta_y$  ( $\delta_{\max}$ : 最大応答変形) ならびに累積塑性変形倍

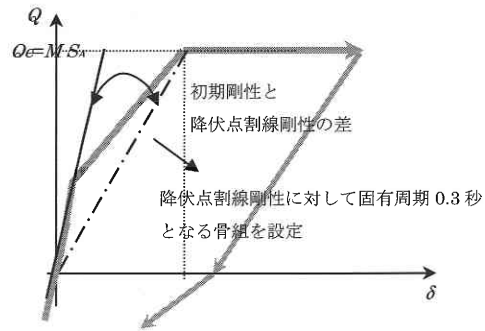


図 11 Degrading Tri-linear 型についての考察

率  $\eta = \sum |\delta p| / \delta_y$  ( $\sum |\delta p|$ : 正負の全累積塑性変形) を選択し, これらの損傷に係わる指標の等高線図とその直線近似を図 9, 10 に示す.

Degrading Tri-linear 型では降伏点割線剛性に対して弾性固有周期及び弾性応答せん断力を設定しているため, 弾性限界が理論値と異なると考えられる (図 11).

図 9, 10 より, 応答結果の等高線は, 塑性化領域において凹凸となるが, 地震波の違いや履歴則の組合せに関係なく, 概ね直線近似によって混合構造物の損傷に係わる指標を表現することが可能である. 特に, 最大応答塑性率の場合 (今回のケースでは降伏変形  $\delta_y$  が共通なので最大応答変形に共通の許容値を設ける場合と等価) には, 応答値の等高線が直線近似されたクライテリアの内側に凹になる傾向があり, 構造特性係数の評価式 (式 (1)) は安全側の評価であることも確認できる. 以上の結果より, 靱性指標 (ないし構造特性係数の逆数) の耐力重み付き平均の考え方によって, 共通の損傷に係わる指標の許容値を満足するために必要な構造特性係数の評価式 (式 (1)) は概ね妥当であると考えられる.

4. 結 論

老朽化した RC 建物の耐震リニューアルを目的として, 鉄骨骨組を新しく増築する補強計画の検討が行われている. このような構造種別の異なる混合系構造物では, 履歴則, 降伏変形, ならびに損傷に係わる指標とそのクライテリアが異なるため耐震性能評価は困難であり, その評価手法の確立は急務である. そこで本稿では, 構造種別の異なる骨組で代表的な履歴則を持つ構造物が, 水平方向に構造体として一体となった平面的混合構造物に対して基礎的な検討を行った. 混合構造物は, 各骨組の履歴則, 降伏変形, 損傷に係わる指標, あるいはその許容値が異なる場合が多いが, 本稿では損傷に係わる指標に共通の許容値 ( $\delta_y$  が共通) を設け, 履歴則のみ異なる混合構造物に対して地震

## 研究速報

応答解析を行い、応答結果による損傷の指標に係わる等高線と直線近似による等高線との比較を行った。提案する必要耐力の評価法は、塑性率の場合には応答結果に対して安全側の評価になることを確認した。

## 謝 辞

本研究は、(社)日本鉄鋼連盟2002年建築鋼構造研究助成金を受けて活動した平面異種混合構造研究会(大井謙一主宰)の研究の一環として行われた。同研究会の井上哲郎教授(筑波大)、河村昌俊氏(構造企画研究所)、樋口喜光氏(建設企画コンサルタント)の貴重な助言を得た。

(2003年9月17日受理)

## 参 考 文 献

- 1) (社)日本鉄鋼連盟, 鋼構造による学校校舎のリモデルプラン全国研究会テキスト, 2002.9
- 2) 例えば, (財)日本建築防災協会, 既存鉄骨造建築物の耐震改修施工マニュアル, 2000.11
- 3) 例えば, (財)日本建築防災協会, 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針, 2001.10
- 4) 例えば, 屋内運動場等の耐震性能診断基準, 文部省(当時), 1996
- 5) (財)日本建築防災協会, 既存鉄筋コンクリート造建築物の外側耐震改修マニュアル, 2002.9
- 6) 久野雅祥, 岡田恒男: “耐震壁をもつ低層鉄筋コンクリート建物の地震応答(1質点 壁・フレーム並列系の応答)” 日本建築学会大会論文集, 1975
- 7) (社)日本鉄鋼連盟. 高力ボルト接合による靱性型鉄骨架構の構造設計マニュアル, 2003.3
- 8) (社)日本鉄鋼連盟. 薄板軽量形鋼造建築物設計の手引き, 2002.6
- 9) Takeda, T., M.A. Sozen, and N.N. Nielsen, “Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes”, 第3回日本地震工学シンポジウム, 1970
- 10) 日本建築学会, 地震荷重と建築構造の耐震性, 1977