

# 地震時の繰り返し挙動を考慮した 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価手法の開発

(独) 建築研究所 構造研究グループ 研究員 向井智久

## 1. はじめに

本研究では、より適切な構造設計法として、地震時の繰り返し挙動を考慮した耐震性能評価手法を構築することを目的とした。建物の保有する荷重と変形の積で算定される履歴吸収エネルギーに着目し、地震時における鉄筋コンクリート造(RC造)建物の最大応答値の推定(応答評価)とRC部材の繰り返し挙動によって生じる損傷程度の把握(損傷評価)に関する検討を行い、実験により本手法の有効性を確認した。本手法は、地震時における建物の繰り返しの揺れの影響を「繰り返し回数」で陽に評価することから、海洋型地震や直下型地震等の地震発生条件を考慮でき、結果として長時間地震動の揺れが継続する大規模平野での建物の耐震性能評価も可能となる。

## 2. 耐震性能評価手法の枠組みに関する現状と課題

阪神大震災の被害を契機として、1998年に建築基準法が改正された。この改正で取り入れられた上部構造物に関する新たな耐震性能評価の枠組みは、建物の応答評価(地震時の建物の挙動の評価)、部材の損傷評価(地震時の部材の損傷度合いの評価)の大きく2つからなる。現在、RC造建物の応答評価手法は、建物が最大応答に至った時点で、部材の破壊が発生するという仮定に立脚した手法であるため、地震時における建物の繰り返し挙動を考慮していない。一方、近年の実験研究において、RC部材が多数回繰り返し変形を受けた場合に、これまでに想定していない破壊の存在が示唆されている。このことは、繰り返し挙動を受けるRC部材が最大応答以外の要因で破壊する可能性を意味しており、応答評価や損傷評価において当該破壊を考慮する必要が生じるが、現時点ではいずれも適切な評価手法がない。従って、地震時の繰り返し挙動を考慮できるRC造建物の応答及び部材の損傷を評価手法を開発することが課題となる。

## 3. 各課題に対して実施した研究開発

### 3.1 RC造建物の最大応答変形予測(応答評価)手法とその妥当性の検証

RC造建物の応答評価について、部材のエネルギー吸収効果を評価できる手法を開発し、6層RC造の立体架構試験体の実験によって、本手法の妥当性を確認した。

#### 3.1.1 6層立体架構に対する最大応答予測手法の精度

試験体形状は6層の1×2スパン(図1参照)で、中央に連層耐震壁を有している。なお試験体の縮尺は1/3である。また、両固定条件(基礎回転、固定)の実験は同一試験体で行い、単点加力より得られた固有周期は、基礎回転: 0.157sec, 基礎固定: 0.269secとなった。加力装置の都合上、無限均等スパンと仮定した支配面積に対して

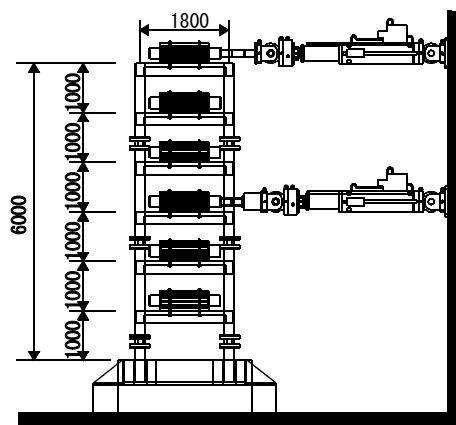


図1 試験体形状及び加力装置

梁の長期設計を行い、梁ヒンジ機構を確保できる柱として設計を行った。また、直交梁及びスラブ効果を考慮し、逆三角形の外力分布を想定した場合の試験体の保有水平耐力は基礎回転:415kN( $C_B=0.74$ )、基礎固定:739kN( $C_B=1.32$ )となった。

次にエネルギー吸収のモデル化を行い、応答変形推定式を導く。RC造建物のエネルギー吸収量  $ES$  を弾性歪みエネルギー  $E_y$  と1サイクル目の塑性歪みエネルギー  $E_{ds}$ 、2サイクル目以降の累積歪みエネルギー  $E_c$ 、粘性減衰吸収エネルギー  $E_h$  の4種類に分類しモデル化を行う。なお、 $E_h$  は初期剛性比例型の式とした。エネルギー吸収量  $ES$  と入力エネルギー量  $ED$  が等しいと仮定し、最大応答変位  $\delta_D$  の算定式(1)が得られる。

$$\delta_D = \frac{ED \cdot K_{ey} - \{0.5(\beta - \alpha\beta - 3) - 4\xi(ND - 1)\}Q_y^2}{2Q_y[\{1 + 2\xi(ND - 1)\}Q_y + \pi\theta\gamma ND \cdot Q_{0D}]} \cdot \delta_y \quad (1)$$

その結果得られる推定値と実験値の比較した結果を表1に示す。表より、概ね最大応答を予測できていることが分かる。従って、RC造建物を対象とした本推定法の妥当性が確認された。

表1 推定結果

| 基礎回転   |      |      | 基礎固定     |      |      |
|--------|------|------|----------|------|------|
| 地震動    | 実験値  | 推定値  | 地震動      | 実験値  | 推定値  |
| TOH25  | 0.08 | 0.14 | FKOBE50  | 0.56 | 0.82 |
| ELCE37 | 0.33 | 0.59 | FKOBE75  | 0.80 | 1.21 |
| KOBE50 | 1.08 | 1.48 | FTAKA250 | 2.04 | 2.59 |
| KOBE75 | 1.73 | 2.02 |          |      |      |

### 3.2 RC造梁部材の損傷評価の提案

地震時に繰り返し挙動するRC部材の損傷評価手法の提案を目的とし、その挙動を陽に考慮できる物理量として履歴吸収エネルギーに着目して検討を行った。具体的に、部材の損傷評価について、主なエネルギー吸収要素である梁部材を対象に構造実験を実施し、地震時の応答過程によって生じる破壊の存在や損傷状態を明らかにし、それらの知見を取り入れ、エネルギー吸収性能に基づく損傷評価の手法を提案した。

#### 3.2.1 RC造梁部材の破壊(安全限界状態)の定義

地震時の繰り返し挙動によって生じる破壊を、構造実験により再現し定義する。ここで実施した構造実験用の7体の試験体(図2参照)は同形状・同配筋の曲げ降伏する梁部材で、せん断余裕度が約1.1から1.2程度(せん断余裕度のばらつきはコンクリート強度の違いによる)であり、曲げ降伏後にせん断圧縮破壊するよう設計した。部材断面  $200\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、シアスパン  $700\text{mm}$  の梁部材で、主筋の歪みゲージは梁端部とせん断補強筋に貼付した。パラメータは载荷履歴であり、(1)地震時の応答履歴(以下、本震・余震载荷)、(2)左右均等な定変位繰返し载荷(以下、両側定変位载荷)、(3)一方向に片寄った定変位繰返し载荷(以下、片側定変位载荷)、(4)  $\pm 5, \pm 10, \pm 20, \pm 30, \pm 40, \pm 50 \times 10^3 \text{rad}$  の漸増繰返し载荷(以下、漸増载荷)とする。上記(1)の载荷履

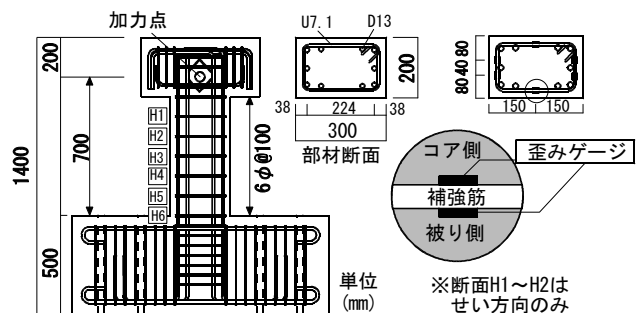


図2 試験体概要及び補強筋のゲージ貼付位置

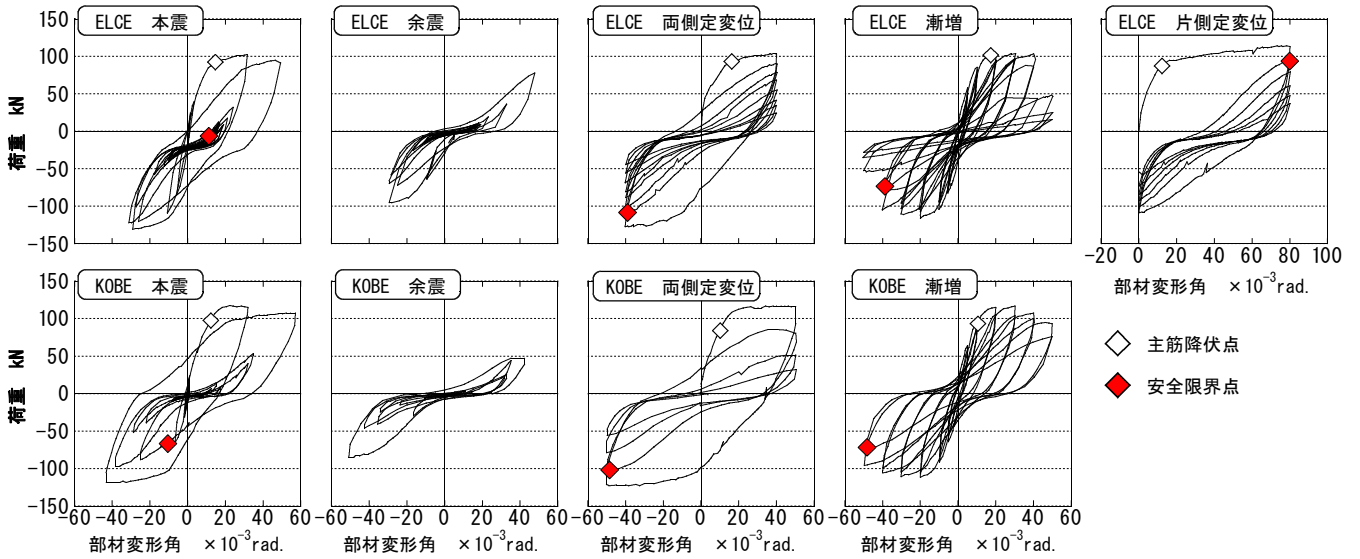


図3 荷重変形関係

歴は、4層の純ラーメンRC造建物を対象に地震応答解析を行った結果に基づき決定し、その際の入力地震波は50kineに基準化したEiCentroNS(1940年ImperialValley地震、以後ELCE)、JMA-KOBENS(1995年兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録、以後KOBE)の2波であり、(1)に対応する試験体も2体である。ちなみに余震の履歴は、本震の応答終了後に、本震で使用した入力地震動を再度用いて得られる応答履歴から決定している。

図3に実験で得られた荷重変形関係を示す。まず漸増载荷試験体の破壊について検討する。既往の研究では、部材角の増加に伴い、軸方向変形が増加から減少に変化する点、またはヒンジ領域におけるせん断変形角割合の急増している点を「安全限界点(部材の耐力低下点)」と定義している。そこで実験結果を用いて、漸増载荷試験体のせん断変形角割合および軸方向変形の推移を検討したところ、ELCE、KOBE両漸増試験体において耐力低下時(それぞれ $40 \times 10^{-3} \text{rad.}$ 、 $50 \times 10^{-3} \text{rad.}$ の2サイクル目(図3参照))にせん断変形角割合の増加、軸方向変形の減少が見られた。よって本試験体においても、前述した安全限界点の定義は妥当であるといえる。

### 3.2.2 履歴吸収エネルギーによる損傷評価法の提案

3.2.1において特定した曲げ降伏する梁部材の安全限界点までの履歴吸収エネルギーを算定した。その結果に基づき図4に梁部材における各種限界状態の吸収エネルギーモデルと吸収量の推定式を提案する。使用限界点は弾性範囲内にあると仮定したため、繰返し数によらず吸収エネルギー量は一定である。1サイクル目の塑性歪み吸収エネルギーは、地震時応答変位の片寄りが大きい場合と、左右ほぼ均等であ

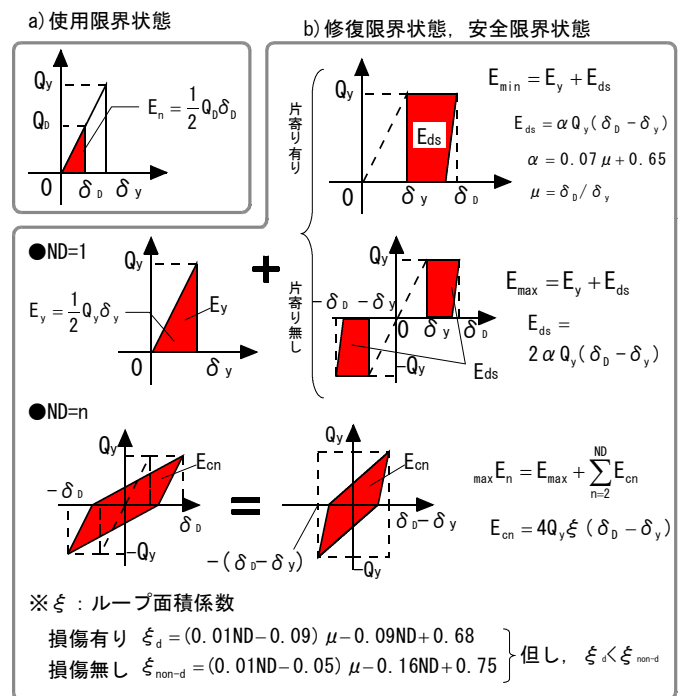


図4 各種限界状態におけるエネルギー吸収モデル

る場合とに分けて算出する。図中の  $\alpha$  は 1 サイクル目の塑性歪みエネルギー吸収の効率係数で、規則的載荷試験体 5 体の 1 サイクル目のエネルギー量の実験値より逆算した。次に 2 サイクル目以降のエネルギー量  $E_n$  を算出する場合、繰り返し吸収エネルギー性能を表すループ面積係数  $\xi$  は 2 種類提案した。

$$\xi_d = (0.01ND - 0.09) \mu - 0.09ND + 0.68 \quad (2)$$

$$\xi_{non-d} = (0.01ND - 0.05) \mu - 0.16ND + 0.75 \quad (3)$$

ただし、 $\xi_{md}$  の値が  $\xi_d$  を下回る場合は  $\xi_d$  の値を用いる。

ここで提案した式(2)及び(3)より、ある塑性率におけるエネルギー吸収性能が分かるため、地震時の繰返し載荷を考慮した安全限界変形(塑性率)を定め、上式を用いて本震載荷試験体の安全限界吸収エネルギーの算定を行う。その際、3.2.1で定めた安全限界点に至るまでに経験した正負の最大変形の平均値を用い、 $\xi$  は本実験結果より損傷有りの  $\xi_d$  を用いた。その結果、ND を大きく想定した安全限界吸収エネルギーの計算値は、本震載荷時のそれと相関性があり、本計算式は概ね精度良く部材の安全限界吸収エネルギーを評価できた。

#### 4. 得られた成果の活用

本手法の特徴の一つに、地震時の繰返し挙動を考慮している点があり、種々の地震動(例えば海洋型地震や直下型地震等の地震発生条件や長時間地震動の揺れが継続する大規模平野への立地条件等)に応じた建物の耐震性能を評価できる利点があり、その利点を活かして地震時の RC 造建物の最大応答の予測を精度良く行える。同時に地震動の位相特性を表す繰返し回数が、RC 部材のエネルギー吸収性能及び破壊を決定する際に必要な情報となり、部材の損傷評価をさらに精緻化し、より性能指向型の構造設計を可能とする。結果として、地震時応答並びに部材の損傷を正確に評価できることで、建物の地震時のリスクを正確に評価できることにつながる。

#### 5. 今後の課題と展望

今後の課題は、実建物における地震観測結果との比較により、本手法の妥当性を検証するとともに、応答評価法の精度向上に努める必要がある。また他の構造部材(柱や壁部材)を含めた総合的な部材の損傷評価手法を構築する必要がある。

現在、地震動を静的な地震力に置換して簡易に評価している既存建物の耐震診断手法を、性能指向型の手法へ改善した動的な耐震診断手法を提案することで、例えば近年活発に開発されている鋼材ダンパーなどを用いた既存 RC 造建物の制震補強に適用できる。また、主要動継続時間の長い長周期地震動に対する高層建物の梁部材などのように、大きい変形で多数回繰返される部材の損傷評価に適用するための枠組みは完成しており、材料・配筋の違いを考慮した実験などを通してその違いを考慮することで、適用範囲を拡大することも可能である。さらに研究・開発を進め、評価法の精度向上及び簡易化が図られれば、建築基準法に示されているエネルギー法を用いた RC 造建物の性能評価に基づく設計が可能となり、構造設計における選択の幅を広げることにも可能である。また、本研究開発によって得られた知見を基に、繰返し作用に対して抵抗があり、エネルギー吸収性能に優れた RC 造部材の研究開発が促進されることも期待できる。