

耐震補強要素が偏心配置された鉄筋コンクリート造骨組のねじれ応答性状

Torsional Response of Seismically Retrofitted R/C Structures

上田 芳郎*・山内 成人*・真田 靖士*・中埜 良昭*

Yoshiro UEDA, Naruhito YAMAUCHI, Yasushi SANADA and Yoshiaki NAKANO

1. はじめに

現行の耐震規定において、耐震補強要素の平面的な偏在程度は弾性剛性に基づく「剛性偏心」により評価される¹⁾。そのため、RC造壁と比較して弾性剛性の小さい鉄骨系架構を用いた補強建物では補強要素の偏在程度は軽視される傾向にある。しかしながら、鉄骨系架構においてもRC造壁と同程度の付加耐力が期待でき、部材が降伏し剛性低下が生じる建物の終局強度時には、「剛性偏心」よりもむしろ耐力的な偏心（以下、耐力偏心）が建物の応答に対して大きな影響を及ぼすものと考えられる。そこで「剛性偏心」及び「耐力偏心」が建物のねじれ応答へ与える影響を検討するため、振動台実験を計画した。本報では、振動台実験に先立ち実施した試験体の基本性能の把握を目的とする静的載荷実験の結果及びその実験結果を反映した弾塑性応答解析の結果について考察する。

2. 実験概要

2.1 振動台実験の計画

本実験（未実施）では、実験パラメータを偏心率とし、剛性

偏心率が等しく耐力偏心率が異なる架構のねじれ応答性状の把握を目的とする。「剛性偏心率 R_{ck} 」は耐震診断基準¹⁾における(A)式を、また「耐力偏心率 R_{eq} 」は文献²⁾における(B)式をそれぞれ用いて算出する。①無補強構面②RC造壁補強構面③鉄骨ブレース補強構面の3種類の平面フレームを計画し(図1)、①と②、①と③を組み合わせる事により、 R_{ck} が等しく R_{eq} が異なる試験体を製作した。また、本実験では①と①による無偏心試験体も製作した。表1、2に材料試験の結果を示す。また、表3に計画時における各試験体の諸元を示す。ただし、同表での弾性剛性は、RC造部分の実験時における剛性低下を考慮し³⁾、柱及びRC造壁部材の剛性を理論値の1/2であると仮定して算出した。

2.2 静的載荷実験

振動台実験に先立ち実施した静的載荷実験では、同種構面を組み合わせた試験体（①と①、②と②及び③と③）の

表1 コンクリートの材料試験結果

	最大圧縮応力度 σ_y (MPa)	ヤング係数 E (N/mm ²)	最大圧縮応力時歪 ϵ_{max} (%)	比重 t /mm ³
コンクリート	15.52	1.35×10^4	0.30	2.04×10^{-3}

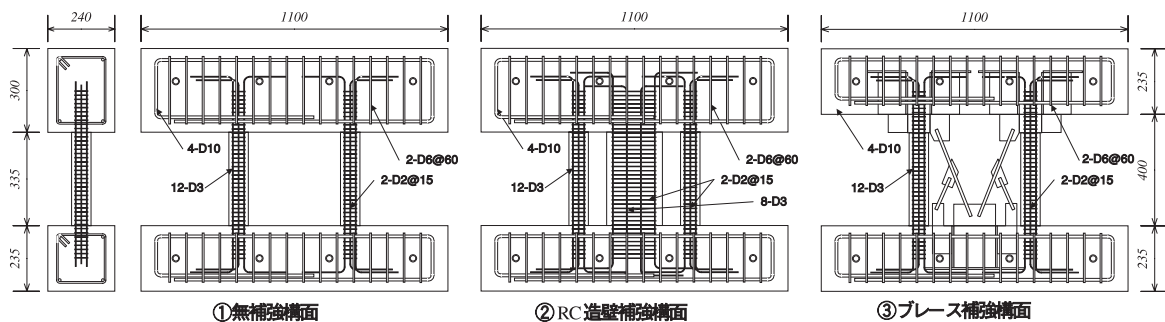


図1 各構面の寸法及び配筋図

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

表2 鉄筋及びブレース材の材料試験結果

	断面積	引張降伏応力度	ヤング係数	降伏歪
	A (mm ²)	σ_y (N/mm ²)	E (N/mm ²)	ϵ (%)
D2	3.59	433.8	1.69×10^5	0.46
D3	8.76	430.2	1.44×10^5	0.52
ブレース材	32.0×2	408.3	2.25×10^5	0.50

$$R_{ek} = \frac{e_k}{\sqrt{B^2 + L^2}} \quad \text{--- (A)} \quad R_{eq} = \frac{e_q}{\sqrt{B^2 + L^2}} \cdot C_B \quad \text{--- (B)}$$

$$e_k = \frac{\sum_i K_x \cdot i_y}{\sum_i K_x} \quad e_q = \frac{\sum_i Q_{yx} \cdot i_y}{\sum_i Q_{yx}}$$

- e_k : 剛性偏心距離
- K_x : 各構面での弾性剛性
- $\sum_i K_x$: 建物全体の剛性
- J_y : 構面-重心間距離
- B, L : 建物長さ
- e_q : 耐力偏心距離
- C_B : ベースシア係数
- Q_{yx} : 各構面での降伏耐力
- $\sum_i Q_{yx}$: 建物全体の耐力

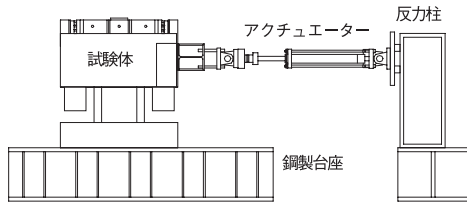


図2 加力装置立面図

表3 剛性偏心率及び耐力偏心率

	無補強	RC造壁補強	ブレース補強
弾性剛性×10 ⁴ (N/m)	1.51	4.33	3.30
加力方向終局時耐力 (kN)	16.9	28.6	36.2
ベースシア係数	0.77	1.30	1.58
剛性偏心率 ¹⁾ : Re _k	0.00	0.10	0.10
耐力偏心率 ²⁾ : Re _q	0.00	0.11	0.13

基本性能を把握することにより、表3に示した各偏心率が実現可能かどうかを確認した。

図2に加力装置図を示す。荷重は2本のアクチュエーターを水平に設置し、回転を制御しつつ加力を行った。正負交番繰り返し荷重を採用し、層間変形角にして、±1/223 rad, ±1/167 rad, ±1/111 rad, ±1/84 rad, ±1/67 rad, ±1/56 rad, ±1/47 rad, ±1/34 rad, ±1/27 rad, ±1/20 radまで各1回ずつ加力した。

3. 実験結果 (静的荷重実験)

3.1 破壊状況

図3に各試験体の荷重-層間変形角関係を、図4に最終破壊状況をそれぞれ示す。

無補強試験体では、層間変形角 0.002 rad 付近で柱上部危険断面に曲げひび割れが発生し、荷重 11.8 kN (0.015 rad) 時に柱主筋が降伏し、柱主筋降伏後に最大耐力 13.1 kN (0.027 rad) に達した。

RC造壁補強試験体では、層間変形角 0.002 rad 付近で柱部材に曲げひび割れ、壁部材にせん断ひび割れが生じた。荷重 29.0 kN (0.010 rad) 時に壁主筋が降伏し、その後、最大耐力 33.1 kN (0.012 rad) に達した。

ブレース補強試験体では、層間変形角 0.005 rad 付近でブレース材上部に座屈が生じ、荷重 39.9 kN (0.012 rad) 時に

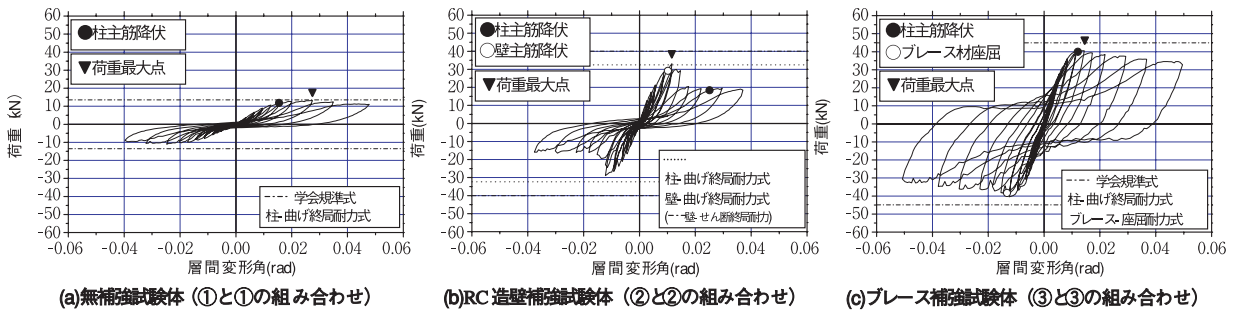


図3 荷重・層間変形角関係

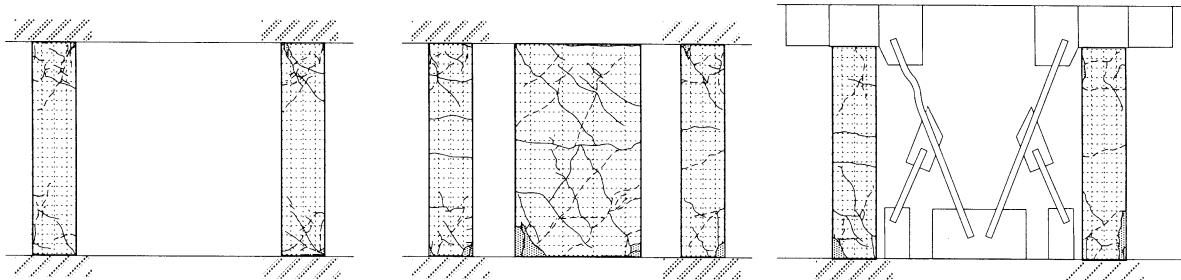


図4 最終破壊状況

表4 実験結果に基づく偏心率

	無補強	RC造壁補強	ブレース補強
弾性剛性×10 ⁴ (N/mm)	0.31	1.00	0.99
加力方向終局時耐力 (kN)	13.1	23.1	26.8
ベースシア係数	0.60	1.05	1.17
剛性偏心率 ¹⁾ : Rek	0.00	0.11	0.11
耐力偏心率 ²⁾ : Req	0.00	0.07	0.09

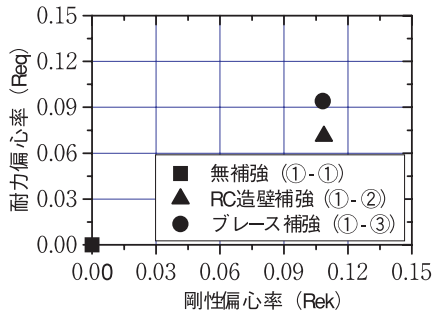


図5 実験結果に基づく偏心率

柱主筋が降伏し、40.5 kN (0.014 rad) で最大耐力に達した。尚、RC造壁補強試験体及びブレース補強試験体に関して、図3に示した計算値は、補強部材の耐力の最大点と柱部材の耐力の最大点のずれを考慮に入れ、実験結果を元に(補強部材の耐力+α×柱部材の耐力)(α:低減率)に従い算出したものである。αの値は、RC造壁補強試験体で0.74、ブレース補強試験体で0.85とした。また、軸力の変動及びP-δ効果の影響も考慮した。

3.2 実験結果に基づく偏心率

表4及び図5に実験結果に基づく偏心率を示す。(A)式、(B)式に基づく偏心率の算出に際し、剛性及び耐力はそれぞれ初期剛性及び最大耐力とした。初期剛性はひび割れ発生状況及び履歴性状に基づき第1折れ点と判断した点までのデータを最小自乗法により直線近似したものを使用した。耐力偏心率はRC造壁補強試験体が0.07、ブレース補強試験体が0.09、剛性偏心率は両試験体共に0.11となり、計画した偏心率の関係が実現できた事を確認した。

4. 解析概要

4.1 解析モデルの概要

本解析では、静的載荷実験の結果を反映し、耐力偏心率が建物のねじれ応答に及ぼす影響について、重心位置における最大回転角の大きさに着目して検討を行う。そこで、図6(a)～(c)に示す1層1×1スパン、スパン長400mmの試験体を以下に述べる方法によりモデル化した。柱部材及び補強部材を加振方向ではそれぞれ弾塑性バネに置換し、並列に結合させた。また、試験体における柱部材の直交方向の強度を加振方向に対し1.54倍としたこ

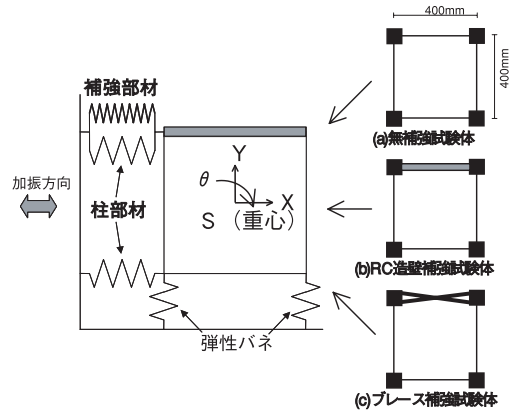


図6 解析モデル

とから、直交方向は常に弾性であると仮定し、各構面に弾性バネを配した。加振方向の剛性低下に伴う直交方向の剛性低下は無視した。地震動の入力はX方向への1方向入力とした。

ねじれ振動の運動方程式は、剛床仮定を用いて建物を1質点3自由度系に置換すると、重心位置の力の釣り合いと重心周りのモーメントの釣り合いから(1)式のように表される4)。尚、簡単のために減衰力による項は無視した。

$$\begin{bmatrix} m & 0 & m \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_x & 0 & K_y \cdot e_y \\ 0 & K_y & -K_x \cdot e_x \\ K_x \cdot e_y & -K_y \cdot e_x & K_\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\ddot{x}_0 \\ -\ddot{y}_0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

$$\begin{cases} K_x : x, y \text{ 各方向の全剛性 } (= \sum_i k_x, \sum_i k_y) \\ e_x : x \text{ 方向の偏心距離 } (= \sum_i k_y \cdot l_x / K_y) \\ e_y : y \text{ 方向の偏心距離 } (= \sum_i k_x \cdot l_y / K_x) \\ K_\theta : \text{重心周りのねじれ剛性 } (= \sum_i k_x \cdot l_y^2 + \sum_i k_y \cdot l_x^2) \end{cases}$$

- m : 建物の質量
- I : 回転慣性質量
- k_x : x 方向 i 構面の剛性
- l_x : x 方向 i 構面の重心からの距離
- k_y : y 方向 i 構面の剛性
- l_y : y 方向 i 構面の重心からの距離

4.2 試験体の復元力特性のモデル化

図7に試験体各構面の復元力特性のモデル化方法を示す。静的載荷実験の結果に基づき、柱及び壁部材の履歴はTakedaモデル⁵⁾、ブレース部材はBilinear slipモデルを修正したものにそれぞれ置換した。振動台実験の実験パラメータは偏心率であるので、初期剛性及び降伏耐力は静的載荷実験の結果と一致させ、特に骨格曲線に着目してモデル化を行った。図7に示すRC造壁及びブレース部材の復元力は、各補強フレームの復元力の実験値から柱部材の復元力

研究 速 報

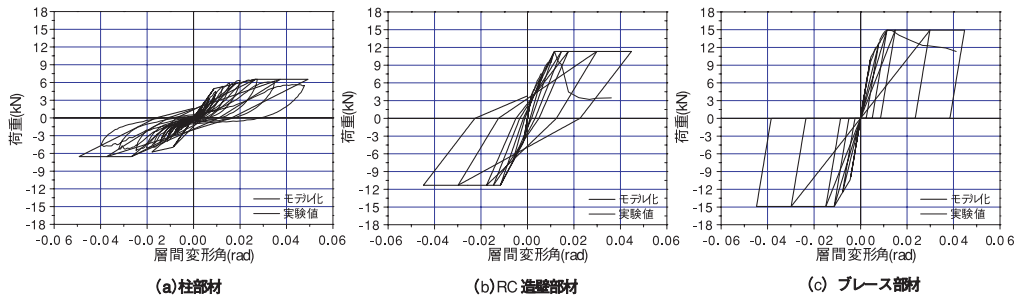


図7 試験体の復元力特性のモデル化

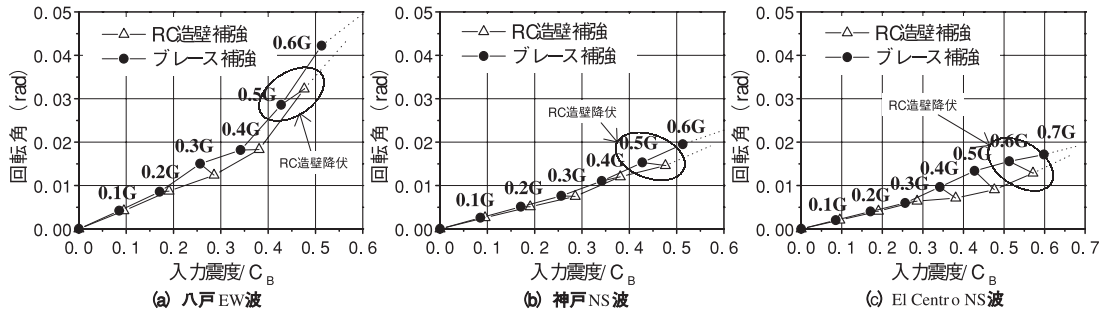


図8 入力震度/C_Bに対する最大回転角

を差し引いて算出した。降伏後の復元力特性に関して、実験では RC 造壁部材がせん断破壊しており、急激な耐力低下が回転角に影響を及ぼすものと考えられるが、今回は特に降伏点付近までの挙動に着目し、降伏後は降伏耐力を維持し続けるものと仮定した。

4.3 入力地震波

入力地震波には、八戸 EW 波、神戸 NS 波、El Centro NS 波の 3 波を使用した。地震波は、振動台実験の加振波とするので周波数成分 0.1 Hz 以下及び 30 Hz 以上をカットし振動台で制御可能な地震波へ変換を行った。また、相似則により、実地震動を再現するためには試験体の縮尺率 (1/10) に対して、地震波の時間軸を圧縮する必要がある。さらに、長期軸力が目標の 1/2 しか確保できなかったため、地震波の時間軸を $1/\sqrt{20}$ に圧縮した。解析では、最大加速度を重力加速度 G に対して 0.1 G ~ 1.0 G まで段階的に変化させて入力を行った。

5. 解析結果

図 8 に地震波の入力震度と重心位置における最大回転角の関係を示す。X 軸の入力震度はベースシア係数 C_B で除して基準化を行った。尚、ここで示すベースシア係数は各試験体において、補強及び無補強両構面の耐力を各々算出し、構面の耐力の単純和を試験体重量で除したものとした。八戸 EW 波及び神戸 NS 波では 0.5 G で、El Centro NS 波では 0.6 G でそれぞれ壁部材が降伏した。いずれの地震波に

おいても初期段階では耐力偏心率の大小による違いはほとんど見られないが、降伏耐力付近では耐力偏心率の大きいブレース補強試験体の回転角が RC 造壁補強試験体を上回る。その傾向は El Centro NS 波において顕著であった。

6. ま と め

静的載荷実験の結果をもとに試験体をモデル化し、弾塑性応答解析を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ①補強構面の降伏耐力付近で耐力偏心率の大きいブレース補強試験体の回転角が RC 造壁補強試験体を上回る。
- ②今回検討した 3 波のうちでは、El Centro NS 波が最大回転角において最も大きな差が現れる波である事が分かった。

(2001 年 9 月 10 日受理)

参 考 文 献

- 1) 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 日本建築防災協会, 1977 年.
- 2) 鉄骨系架構が偏心配置された鉄筋コンクリート造骨組のねじれ応答性状に関する研究, 日野泰道, 中埜良昭, 日本建築学会関東支部研究報告集, 1998 年.
- 3) 鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, 日本建築学会.
- 4) 最新耐震構造解析, 柴田明徳.
- 5) Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, T. Takeda, Journal of ASCE, pp. 2557-2573, Dec. 1970.