

偏心を有する非対称 Z 型 NC ブレース架構の静的載荷実験

小松 真吾*・山西 央朗**・高松 隆夫***

(平成29年11月1日受付)

Static Loading Test on Anti-symmetric Z-type NC Braced Frame with Eccentricity

Shingo KOMATSU, Teruaki YAMANISHI and Takao TAKAMATSU

(Received Nov. 1, 2017)

Abstract

The authors proposed the anti-symmetric Z-type non-compression braced frame having seismic response reduction performance due to incremental torsional deformation. In previous papers, we clarify the anti-symmetric Z-type shows incremental torsional deformation characteristics during static and dynamic loading. However, since these results were from experiment with a non-eccentric specimen, actual situation of structural building is not reflect. In this report, static loading test on one-story one-span specimen with eccentric as well as non-eccentric specimen are carried out to clarify torsional deformation behavior of anti-symmetric Z-type NC braced frame. We discuss effect of eccentric through the comparison with these specimens.

Key Words: Non-compression brace, anti-symmetric Z-type, eccentricity, elastic strain energy accumulation, static loading test

1. 序 論

著者等は、非対称 Z 型 NC (Non-compression) ブレース架構¹⁾の以下の特徴を活用した中低層建築物の耐震設計法確立を目指している。

- (1) 漸増振り変形 (図 1) の弾性ひずみエネルギー蓄積に基づいてブレース弾性時の地震応答を低減できる。
- (2) NC ブレースの塑性ひずみエネルギー消費に基づいてブレース弾塑性時の地震応答を低減できる。
- (3) 地震後 NC ブレース残留張力を解放すれば残留変形は容易に除去でき、繰返し使用が可能である。

これまでに静的載荷実験²⁾、振動台を用いた動的載荷実験¹⁾を行い、静的および動的荷重下において本構造システムは漸増振り変形することを明らかにした。しかしながら、これらの実験は整形な架構に NC ブレースを非対称 Z 型配置した試験体を用いており、建築構造物の実情が十分に反

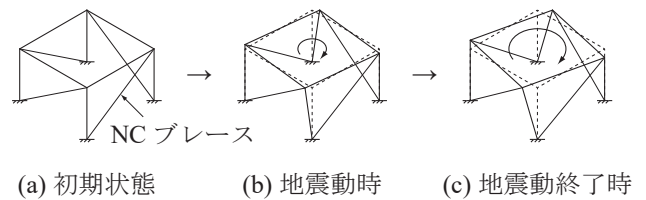


図 1 非対称 Z 型 NC ブレース架構の漸増振り変形

映されているとは言い難い。

ところで、建築構造物は計画上の制約等により重心と剛心が一致しない場合、地震時に振り振動が生じることがよく知られている³⁾。地震時における漸増振り変形特性を有する非対称 Z 型が振り振動を受けると、その挙動が大きく変化することが考えられるため、実験により詳細に検討しておく必要がある。

そこで、本報告では偏心を有する非対称 Z 型 NC ブレース架構の挙動を詳細に検討する目的で、1 層 1 スパン立体

* 株式会社ちから箱
** 広島工業大学工学部建築工学科
*** 広島工業大学名誉教授

架構試験体を用いて静的荷重実験を実施した。実験変数は偏心量およびブレース初期張力の有無とし、偏心の種類は質量偏心を想定する。また、偏心がない場合の実験も併せて行い、偏心の有無による影響について考察する。

2. 偏心を有する非対称 Z 型架構の力学特性

2.1 NC ブレースの概要

NC ブレース⁴⁾は、一端部に図 2 (a) の楔デバイスを設置しており、その動作機構により次の特徴を有する。

- 1) ブレース圧縮方向に変位しても、図 2 (b) のように楔受けが離間することで圧縮力が作用しない。
- 2) 楔受けが離間して生じた間隙に、図 2 (c) のように楔がバネの復元力で貫入し、ブレース引張方向変位と同時に抵抗できる。

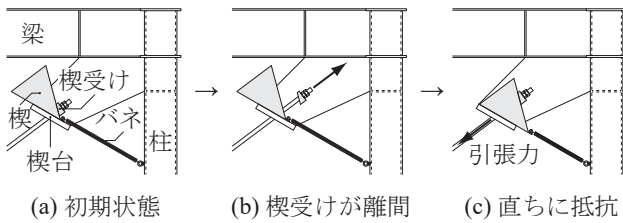


図 2 楔デバイスの動作機構

2.2 偏心を有する非対称 Z 型架構の漸増振り変形機構

まず、偏心を有する架構に生じる振り角を定式化する。いま、図 3 のように重心 G 点が図心 O 点より y 軸方向へ e_0 だけ移動した非対称 Z 型 NC ブレース架構を考える。構面骨組の番号を i 、柱の番号を j とする。 O 点における鉛直 z 軸回りモーメントのつりあいから、振り角 θ は、ブレース負担水平力の振りモーメント M_T と偏心モーメント Pe_0 の和を振り剛性 K_θ で除した、次式で表される。

$$\theta = \frac{M_T - Pe_0}{K_\theta} = \frac{\sum_i (Q_b^{Yi} y_i + Q_b^{Xi} x_i) - Pe_0}{\sum_i (k_f^{Yi} y_i^2 + k_f^{Xi} x_i^2) + \sum_j k_c^{\theta j}} \quad (1)$$

ここに、 Q_b^{Yi} 、 Q_b^{Xi} : Yi , Xi 構面ブレースの負担水平力、 k_f^{Yi} 、 k_f^{Xi} : Yi , Xi 構面骨組の剛性、 $k_c^{\theta j}$: 柱 j の個材振り剛性、 y_i 、 x_i : 符合を考慮した O 点から Yi , Xi 構面までの距離である。

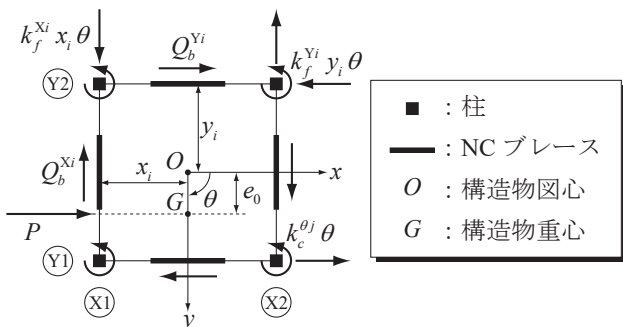


図 3 偏心架構の z 軸回りモーメントのつりあい

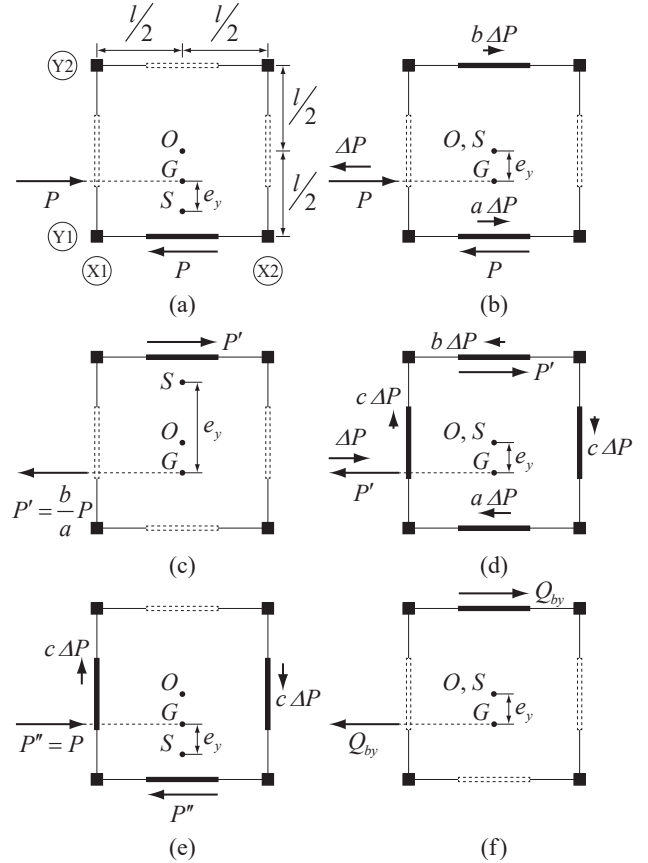


図 4 偏心架構の漸増振り変形機構

偏心を有する架構に繰り返し水平力 P が作用した場合の漸増振り変形機構は、図 4 により説明できる。図 4 では、簡単のためブレース系が負担する水平力のみを考えており、また剛心 S 点と G 点との差を e_y と表記している。

まず、図 4 (a) に示すように P が作用すると、 $Y1$ 構面ブレースのみが抵抗し、 O 点回りに M_T が生じる。続いて、(b) に示すように水平力が増分 ΔP の作用で減少すると、 $Y1$ 構面ブレースには除荷により、 $Y2$ 構面ブレースには引張変位に対する抵抗により各々右向き増分 $a\Delta P$ 、 $b\Delta P$ が生じる。 $Y1$ 構面の方が G 点に近いことから、 $a > b$ かつ $a + b = 1$ である。(b) で ΔP が増加し、 $Y1$ 構面ブレースの負担水平力が失われたときの水平力を P' とすれば、この状態は (c) のように表される。(b) において M_T のうち $Y1$ 構面ブレースの寄与分が減少するものの、 $Y2$ 構面ブレースがこれをおある程度補うことにより、水平力の方向が反転しても M_T は同一回転方向を保持したままである。

(c) において P' が増分 ΔP の作用で減少した場合も同様に、 M_T は同一回転方向を保持するが、 S 点回りに生じる反時計回りの偏心モーメント増分 ΔPe_y の存在で直交する $X1$, $X2$ 構面ブレースに抵抗力 $c\Delta P$ が生じる。振りによる水平力増分は各構面とも等しいことから、 $c = (a - b)/2$ である。(d) において ΔP が増加して $Y2$ 構面ブレースの負担水平力が失われたときの水平力を P'' とすれば、この状態は (e) の

ように表される。

例えば、(c) の状態から P' が更に増加して (f) に示すように Y2 構面ブレースが降伏水平力 Q_{by} に達したとすれば、 M_T は頭打ちとなる。このことから、ブレース降伏時の M_T を降伏振りモーメント M_{Ty} と定義し次式で表す。

$$M_{Ty} = \frac{1}{2} Q_{by} l \quad (2)$$

ここに、 l : スパン長である。

偏心を有する場合の漸増振り変形機構は、偏心がない場

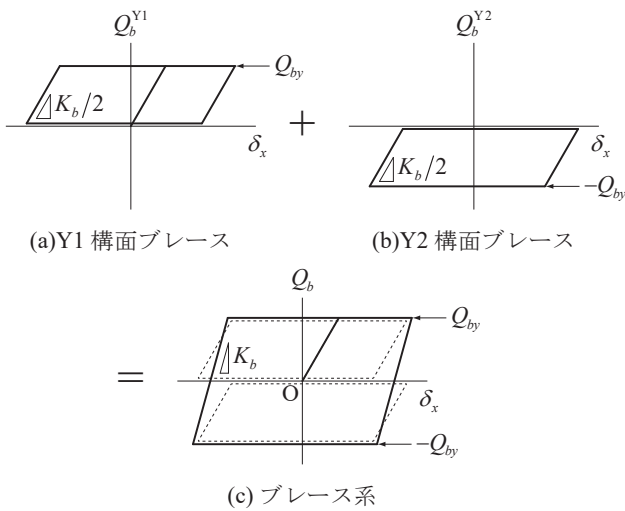


図5 弾塑性復元力特性

合¹⁾と比べてやや複雑となる。しかしながら、偏心による機構の複雑化は4.2節で後述するように、漸増振り変形特性の本質に影響を及ぼすものではない。

2.3 復元力特性

ブレース弾塑性における Q_b^{Y1} , Q_b^{Y2} と x 方向層間変位 δ_x の関係を図5に模式的に示す。各構面の NC ブレース引張領域には、図5 (a), (b) の履歴が生じる。従って、これらを合計した (c) のブレース系の復元力特性は完全弾塑性型となる。 Q_{by} は1構面のブレース降伏水平力、 K_b は両構面のブレース初期剛性の和となる。

3. 実験概要

3.1 試験体

試験体を図6に、試験体の素材特性を表1にそれぞれ示す。試験体は図6 (a) に示す1層1スパン立体架構であり、各構面に (b) の転造ねじ付きブレース (M10) および (c) の楔と楔受けを設置することで、NC ブレースの動作機構を付与している。なお、NC ブレースは1構面当たり2本ずつ設置することで、構面軸芯に対するブレース合力作用線の偏心を無視できるよう工夫している。また、試験体の第1層部分には、剛床と見なせるだけの面内剛性を与えるために、水平ブレース (M16) を設置している。

実験変数は図7および表2に示すように Yi 構面ブレース

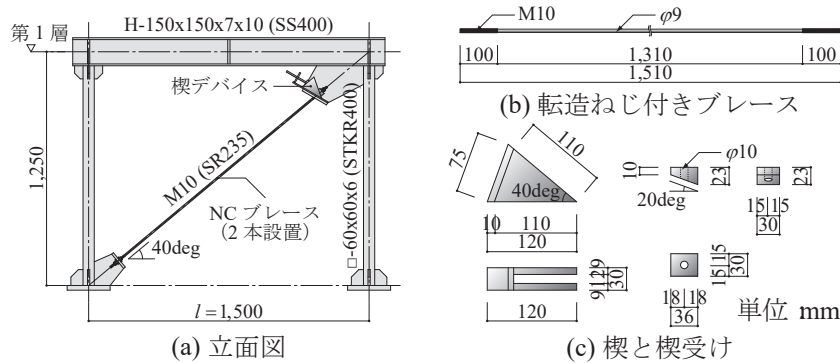


図6 試験体

表1 試験体の素材特性

部材	材質	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_y/σ_u	e (%)
柱	STKR400	469	535	0.877	19.1
梁フランジ	SS400	304	440	0.692	29.4
梁ウェブ	SS400	307	427	0.717	28.1
ガセットプレート	SS400	303	441	0.686	30.9
ブレース	SR235	353	476	0.742	25.3

σ_y : 降伏応力度, σ_u : 引張強さ, σ_y/σ_u : 降伏比, e : 破断伸び

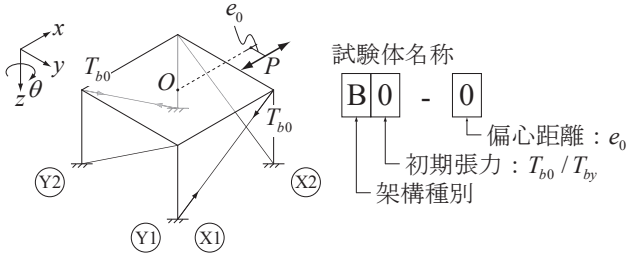


図7 実験変数

表2 試験体および実験変数一覧

試験体	架構種別	T_{b0}/T_{by}	e_0 (mm)
F-0	ラーメン	—	0
F-82	ラーメン	—	82
F-164	ラーメン	—	164
B0-0	ブレース架構	0%	0
B50-0	ブレース架構	50%	0
B0-82	ブレース架構	0%	82
B50-82	ブレース架構	50%	82
B0-164	ブレース架構	0%	164
B50-164	ブレース架構	50%	164

初期張力 T_{b0} (表1の σ_y から求めた降伏軸力 T_{by} の50%) の有無および図心 O 点から荷重点までの距離 e_0 とする。 e_0 は 0 mm, 82 mm, 164 mm の三種類である。試験体にブレースを設置していない状態での偏心率は、 $e_0=82$ mm, 164 mm でそれぞれ 0.077, 0.155となる。これらの変数の組み合わせにより、ブレース架構の場合で計6体の試験体で実験を行う (B0-0, B50-0, B0-82, B50-82, B0-164, B50-164)。また、架構および試験装置の性能検証のため、ブレースを設置しない架構の場合も e_0 を変数とした実験を行う (F-0, F-82, F-164)。

3.2 実験方法および計測計画

実験の荷重プログラムを図8に示す。実験方法は荷重点の x 方向変位 δ_x を制御値とした正負交番漸増繰返し荷重とする。各試験体とも $\pm 1/1000$, $\pm 1/700$, $\pm 1/500$, $\pm 1/300$, $\pm 1/150$ rad の荷重を2サイクルずつ行う。

図9に試験装置および計測計画を示す。ジャッキは x 軸方向に平行となるように設置し、 e_0 の値に応じて y 軸方向へ移動させる。反力フレームおよび試験体との接合部分のピンは、その回転軸が試験体の θ 方向と一致するように設置し、ジャッキが試験体の振り変形を拘束しないよう工夫している。

実験中、ジャッキ先端に取り付けたロードセルにより荷重 P を、試験体梁中央部に設置した変位計により Yi, Xi 構

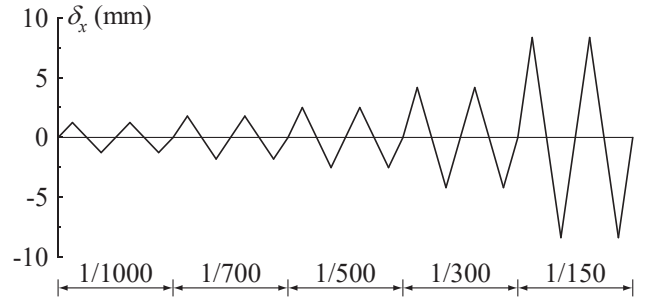
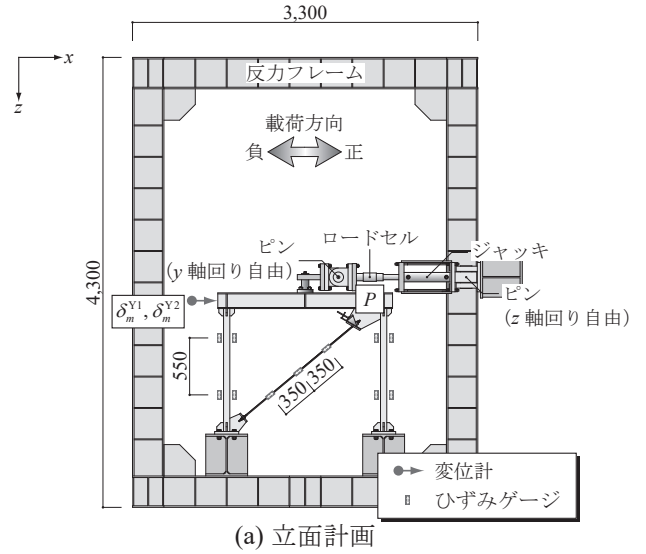
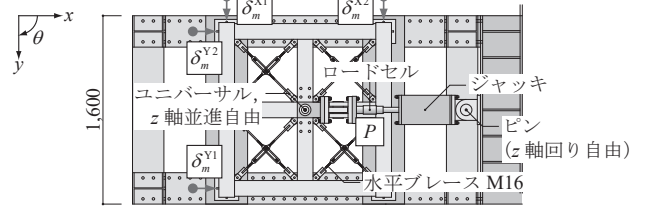


図8 荷重プログラム



(a) 立面計画



(b) 平面計画 単位: mm

図9 試験装置と計測計画

面の計測変位 $\delta_m^{Yi}, \delta_m^{Xi}$ を、柱とブレースに貼り付けたひずみゲージの値から x, y 両方向の柱せん断力および Q_b^{Yi}, Q_b^{Xi} をそれぞれ計測する。また、 Yi 構面、 Xi 構面の変位により求めた振り角をそれぞれ θ_y, θ_x と定義し、これらの平均を θ とする。

$$\theta_y = \frac{\delta_m^{Y2} - \delta_m^{Y1}}{l}, \theta_x = \frac{\delta_m^{X2} - \delta_m^{X1}}{l}, \theta = \frac{\theta_y + \theta_x}{2} \quad (3)$$

計測変位 $\delta_m^{Yi}, \delta_m^{Xi}$ と実際の節点変位 δ^{Yi}, δ^{Xi} は、図10に示すように一致しないので、微小変形を仮定して次式で補正を行う。

$$\begin{cases} \delta^{Yi} = \delta_m^{Yi} - \delta_m^{X1}\theta \\ \delta^{Xi} = \delta_m^{Xi} - \delta_m^{Y2}\theta \end{cases} \quad (4)$$

荷重点の層間変位 δ_x は図心の変位に振りによる増分を加え

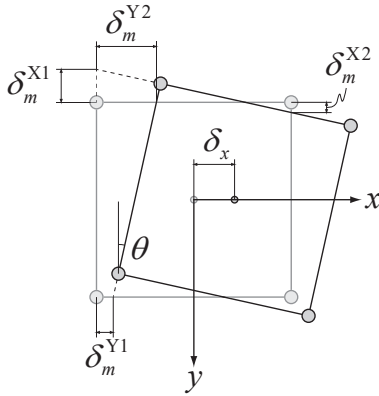


図10 計測変位から実変位への変換

て求める。

$$\delta_x = \frac{\delta^{Y1} + \delta^{Y2}}{2} - e_0\theta \quad (5)$$

4. 実験結果および考察

4.1 架構および試験装置の性能検証

ブレースを設置しない試験体 F-0, F-82, F-164 の実験結果を用いて架構および試験装置の性能を検証する。図11に F-0 のジャッキ荷重 P と柱の x 方向せん断力を総和した層せん断力 Q_x を比較したものを、図12に F-82, F-164 のジャッキ荷重によって試験体の平面図心回りに作用する偏心モーメント Pe_0 と、柱の x, y 方向せん断力および個材振り抵抗を合計した架構の抵抗モーメント M_f を比較したものを、図13には F-164 の $\theta_y, \theta_x, \theta$ を比較したものを、それぞれ示す。

図11より、ジャッキ荷重 P と層せん断力 Q_x とはほぼ一致している。また、図12より、偏心モーメント Pe_0 と架構の抵抗モーメント M_f はほぼ一致しており、ジャッキの両端に θ 方向の回転が自由となるようにピンを設置したことにより、ジャッキが振りを拘束することなく、 Pe_0 を架構が負担していることが分かる。図13で θ_y, θ_x がほぼ一致していることから、試験体の第1層部分は十分に剛床として見なせるものであることが分かる。よって、以下では θ を用いて試験体の振り挙動を議論する。

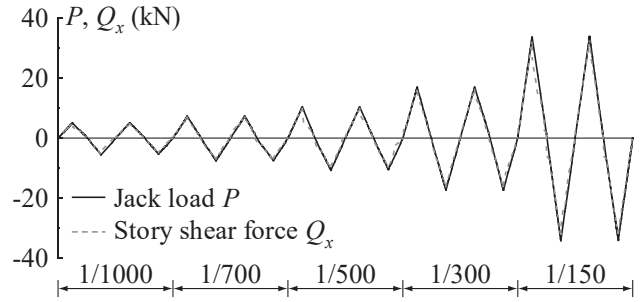


図11 ジャッキ荷重と層せん断力の比較 (F-0)

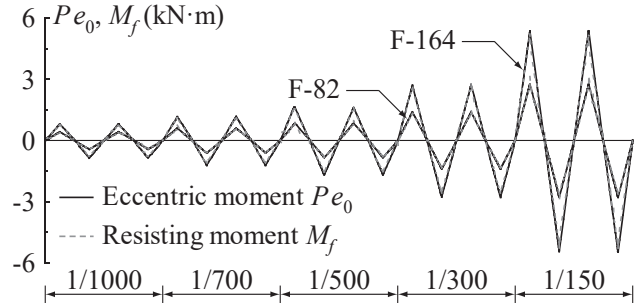


図12 偏心モーメントと抵抗モーメントの比較

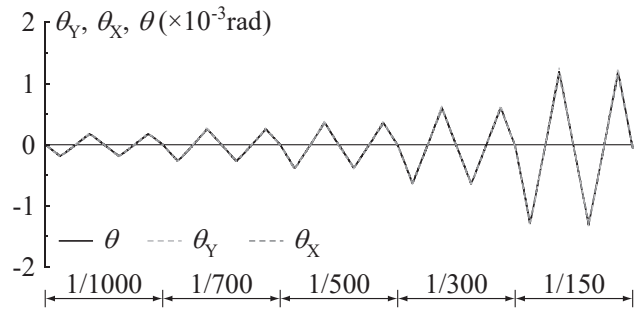
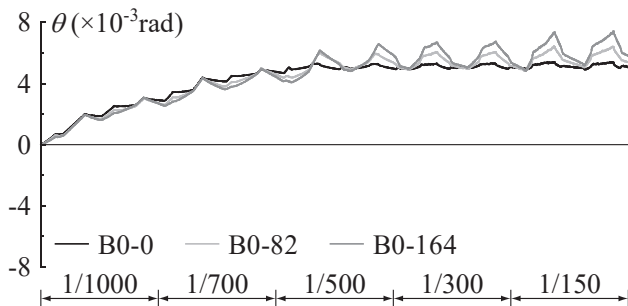


図13 振り角 (F-164)

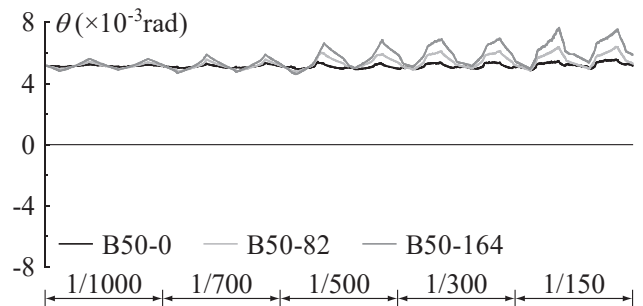
4.2 ブレース架構の振り挙動と漸増振り変形機構

図14にブレース架構試験体の θ を示す。(a) がブレース初期張力がない B0-0, B0-82, B0-164 の場合、(b) がブレース初期張力がある B50-0, B50-82, B50-164 の場合である。

(a) の初期張力がない場合、偏心を有する試験体では θ



(a) 初期張力がない場合



(b) 初期張力がある場合

図14 振り角 (ブレース架構)

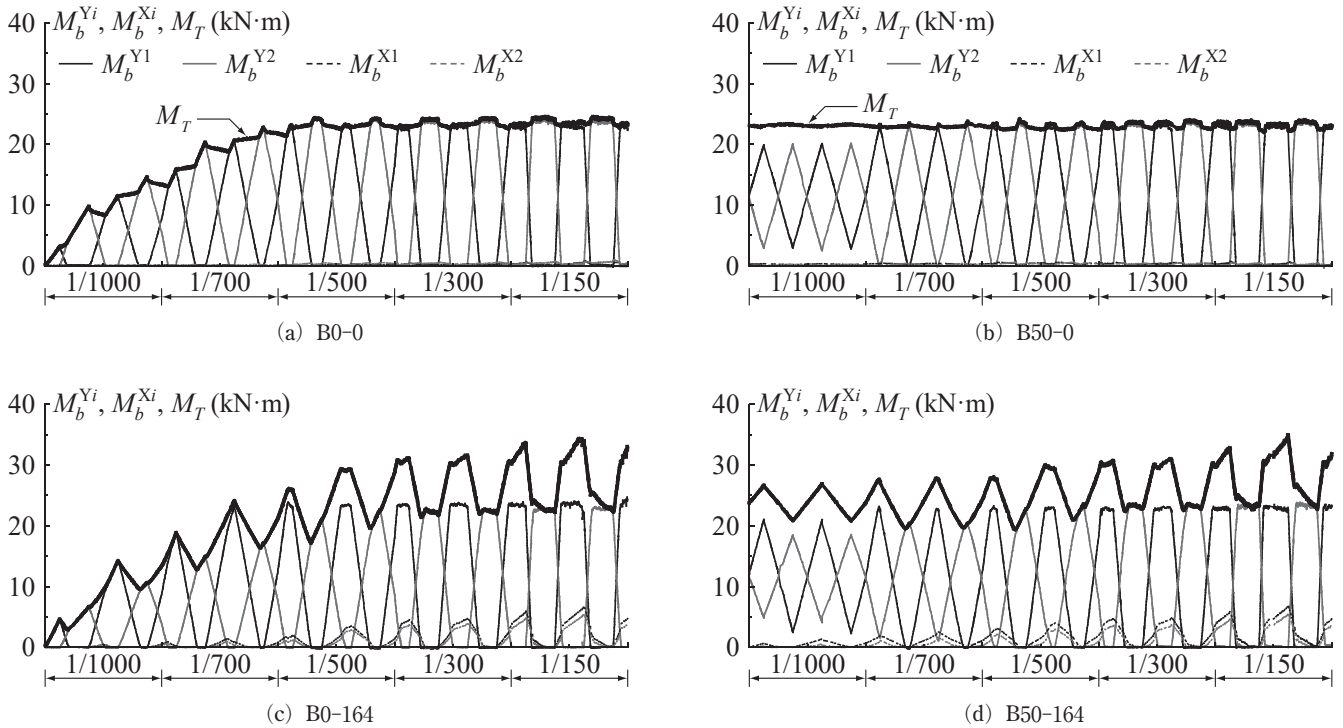


図15 プレース負担水平力の振りモーメント

の変動を伴うものの、いずれも载荷とともに θ が一方方向に進行しており、一方方向漸増振り変形していることが分かる。一方、(b)の初期張力を導入した場合には初期振り角が生じており、いずれの試験体も(a)のような θ の進行は見られない。また、(a)、(b)両者の挙動は $1/500$ radの载荷サイクルからほぼ等しくなる。

以上のように、各試験体の振り挙動はブレース初期張力、偏心の程度によって異なっている。この違いについて考察するために、図15にB0-0、B0-164、B50-0、B50-164試験体の図心回りにおける Yi, Xi 構面ブレース負担水平力の振りモーメント M_b^{Yi}, M_b^{Xi} 、および M_T を示す^{注1)}。

まず、初期張力のない(a)のB0-0を見ると、初期のブレース負担水平力が零の状態からブレース抵抗することで M_T を生じており、これは2.2節と同様の機構により減少することはなく、ブレース負担水平力が大きくなるに従い増大している。 $1/500$ radの载荷サイクルでブレースが降伏し、 M_T が M_{Ty} に達した後はほぼ頭打ちとなる。(c)のB0-164では偏心の影響により、ブレース弾性時には载荷点に近いY1構面ブレースの負担がY2構面と比べて大きい。また、図4(d)に示した抵抗機構によりX1、X2構面ブレースも抵抗するため、 M_T は変動を伴いB0-0よりも大きくなる。しかしながら、偏心が非対称Z型の振り挙動に及ぼす影響の本質は式(1)から明らかのように偏心モーメント Pe_0 であり、これは図12のように零を平均とした振りの変動を与えるのみである。従って、载荷後に残留する振り角は偏心の程度に依存しないことが明らかである。

一方で、(b)のB50-0、および(d)のB50-164の場合にはブレース初期張力の導入により载荷前から降伏振りモーメント M_{Ty} を与えているため、それぞれB0-0、B0-164のブレース降伏後における挙動とほぼ同等となる。

4.3 復元力特性

図16にB0-0、B0-164、B50-0、B50-164の P と δ_x の関係を示す。(a)が初期張力がない場合の比較、(b)が初期張力がある場合の比較、(c)が偏心を有するB0-164、B50-164における $1/1000$ rad(弾性範囲)の比較である。

(a)のB0-164の場合、正の荷重領域ではY1構面ブレース降伏時にY2構面ブレースが水平力を保持し、負の荷重領域ではY2構面ブレース降伏以前にY1構面ブレースの負担水平力が失われるため剛性低下が起こる(A)とともに、横軸の δ_x に平面上の異なる点の値を取ったことで P に見かけ上のずれが生じている(B)。前述のように、偏心によって架構の挙動には差異が生じていたが、ブレース降伏後の弾塑性復元力特性はいずれもほぼ同様なbi-linear型となり、偏心による大きな相違は認められない。

(b)の初期張力がない場合にも(a)のB0-0、B0-164と同様なbi-linear型の履歴を描いている。(a)と(b)の最も大きな違いは初期張力のない場合にはブレース弾性時に履歴を描いていることである。これを詳しく見るために、(c)にB0-164、B50-164の $1/1000$ radの弾性範囲の载荷サイクルの結果を示す。

B50-164では、図15(d)に示したように $1/1000$ radでは

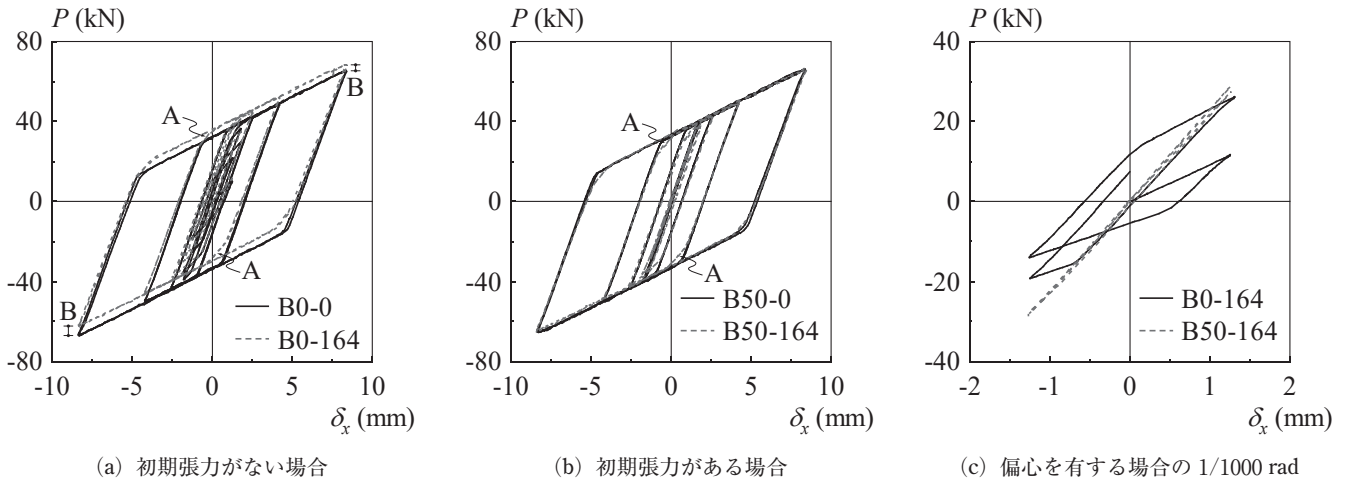


図16 復元力特性

Y1, Y2 構面ブレースともに水平力を保持しており、その挙動は線形となる。一方で、B0-164 では図15 (c) のように各構面ブレースが交互に抵抗と水平力の消失を繰返すため、片側構面ブレースのみ剛性発揮する機構と両構面ブレースが剛性発揮する機構が交互に発生することで非線形挙動を示す。既往の研究より、弾性時に生じた履歴面積は蓄積した弾性ひずみエネルギーに等しいことが分かっている¹⁾。

5. 結論

静的載荷実験の結論は次のようにまとめられる。

- 1) 非対称 Z 型 NC ブレース架構は、ブレース負担水平力の振りモーメント M_T により偏心の有無に関わらず一方向漸増振り変形を生じる。
- 2) 偏心を有する場合には偏心モーメントにより振り角 θ が変動するが、載荷終了後の残留振り角は偏心の程度に依存しない。
- 3) 非対称 Z 型 NC ブレース架構の弾塑性復元力特性は、偏心の有無に関わらずほぼ同様な bi-linear 型となる。
- 4) 一方向漸増振り変形を生じて弾性ひずみエネルギー蓄積する場合、ブレース弾性範囲の復元力特性は非線形となる。

謝 辞

本実験を実施するに当たり、長崎大学教授 故 玉井宏章先生には有益なご助言を頂きました。ここに記して、これまでのご指導に心より感謝するとともに、謹んで哀悼の意を表します。

文 献

- 1) 小松真吾, 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗: 1層非対称 Z 型 NC ブレース架構の地震応答低減に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第705号, pp. 1677-1685, 2014.11
- 2) 高松隆夫, 玉井宏章, 小松真吾, 栗原将平: 非対称 Z 型 NC ブレース架構の静的載荷実験, 広島工業大学紀要, 研究編, 第51巻, pp. 77-84, 2017.2
- 3) 柴田明德: 最新 耐震構造解析, 第2版, 森北出版, 2003
- 4) 玉井宏章, 高松隆夫, 松尾彰: ノンコンプレッションブレースの耐震性能向上について, 日本建築学会構造系論文集, 第595号, pp. 131-138, 2005.9

注

- 注1) B0-82, B50-82 は、 $e_0=0$ mm と 164 mm のほぼ中間の挙動となった。