

2層Z型NCブレース架構の振動台実験と数値解析

高松 隆夫*・玉井 宏章**・山西 央朗***・小松 真吾****・中山 雅隆*****

(平成27年10月29日受付)

Shaking table tests and numerical analysis on two-story Z-type NC braced frame

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Teruaki YAMANISHI,
Shingo KOMATSU and Masataka NAKAYAMA

(Received Oct. 29, 2015)

Abstract

The authors propose a Z-type NC braced frame with reduction capability of earthquake response in elastic region by elastic strain energy accumulation. The following conclusions were obtained from shaking table tests and numerical analyses of one-story NC braced frames. 1) Z-type NC braced frames characterize one-directional incremental deformation performance. 2) Earthquake responses of the elastic frames can be reduced by function of the energy accumulation. 3) The frames in plastic region show bi-linear-type restoring force characteristics and therefore they absorb equal level of plastic strain energy to BRB braced ones. In this paper shaking table tests of two-stories Z-type NC braced frames are carried out to examine these functions of multi-stories frames. The experimental results clarify the performance of one-story frames applying to multi-stories ones.

Key Words: two-story, Z-type NC braced frame, shaking table tests, numerical analyses

1. 序 論

昨今大地震後における建物の継続使用がさげばれており、主架構の損傷は微々たるものに抑えなければならない。そのためブレース等の部材に地震のエネルギーを吸収させる耐震要素が兵庫県南部地震以降急速に広まっている¹⁾。従来より用いられている引張ブレースは耐震ブレースとしての要求に応えることができない。一方、著者等が開発したNC(ノンコンプレッション)ブレースは楔デバイスにより座屈とスリップ現象を解消したブレースである。NCブレースは完全弾塑性型の復元力特性を描くことにより、大地震時に効率よくエネルギーを吸収することができる履歴

ダンパーとして機能する²⁾。近年、著者等はこのNCブレースを鉄骨ラーメン架構にZ型配置したZ型NCブレース架構を提案している。この構造システムの最大の特徴はZ型NCブレースの性能により架構の層間変形を一方向に漸増させる一方向漸増変形性能を付与し、弾性ひずみエネルギーを蓄積できる点である。これまでに1層架構の研究を行い、次のことを明らかにした。振動台実験により³⁾、1) Z型NCブレース架構は振動時に漸増変形性能を示す。また、漸増変形性能による振動後残留変形はブレース降伏耐力の増加に伴い大きくなる。2) 数値解析により振動台実験を良好な精度で追跡できる。また、実大架構の数値解析により⁴⁾、3) Z型NCブレース架構は弾性ひずみエネルギー

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 長崎大学工学部工学科

*** 広島大学大学院建築学専攻

**** 広島工業大学大学院工学系研究科知的機能科学専攻

***** 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

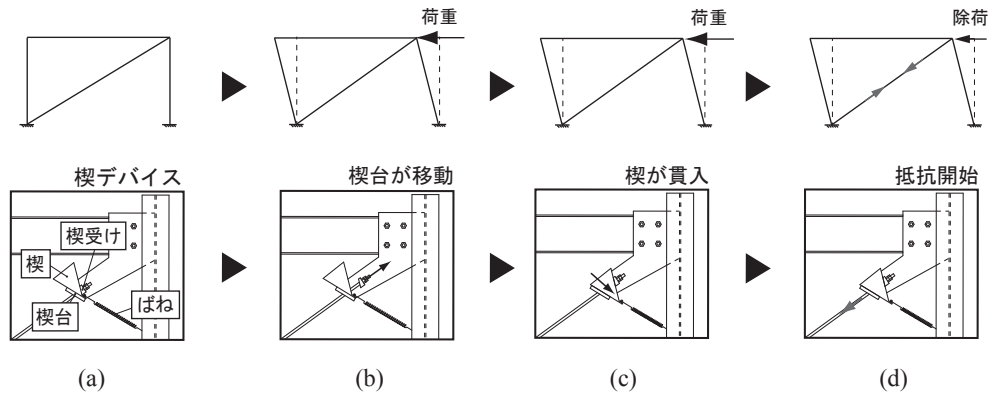


図1 NCブレースの抵抗機構

ギヤ蓄積により、履歴ダンパー架構と比較して、弾性地震時の絶対加速度応答を低減できる。4) Z型 NC ブレース架構はブレース弾塑性時に Bi-linear 型復元力特性を示すため弾塑性振動時には履歴ダンパー架構と同様の地震応答低減効果が期待できる。5) 漸増変形性能による弾塑性振動後の残留変形をブレース剛性比、入力地震動によらず良好な精度で評価できた。

本論では Z 型 NC ブレース架構を多層へと拡張するために 2 層模型試験体の振動台実験および数値解析を行う。実験変数を NC ブレースの配置として多層 Z 型の基本的な振動性状、漸増変形性状を明らかにする。

2. 1層 Z型 NC ブレース架構の特徴

図 1 に NC ブレースの抵抗機構を示す。NC ブレースは図 1 (a) のようにブレース上端に楔デバイスによる接合方法を用いたブレースである。楔デバイスは楔、楔台、楔受け、ばねによって構成されている。楔は、主架構と一体となった楔台と楔受けとの間に設置されており、主架構やブレースと一体になっていない。ばねは常に復元力が働くように設置している。NC ブレースは圧縮力に対しては抵抗せず、楔と楔受けの間に離間が生じる (図 1 (b))。同時にバネの復元力により離間により生じた隙間に楔が瞬時に貫入する (図 1 (c))。従って NC ブレースは楔と楔受けの間に緩みが生じず引張力に対して常に抵抗できる (図 1 (d))。以上から NC ブレースは以下の性能を有する。1) 圧縮力が働かないため座屈しない。2) スリップを生じず常に引張抵抗できる。

この NC ブレースを 1 層鉄骨ラーメン架構に Z 型に配置すると 1 層 Z 型 NC ブレース架構となる。地震時に 1 層 Z 型 NC ブレース架構は図 2 のように NC ブレースが抵抗しない方向に架構が漸増変形する一方向漸増変形性能を有する。

復元力特性について説明する。Z 型の一方向漸増変形性能により主架構、NC ブレースの復元力特性は図 3 (a)、

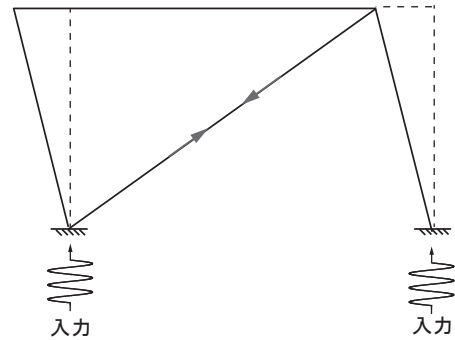
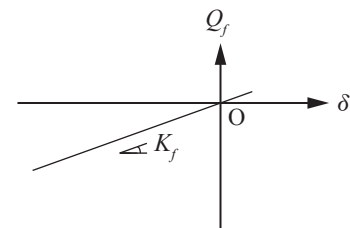
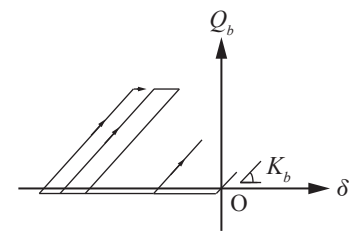


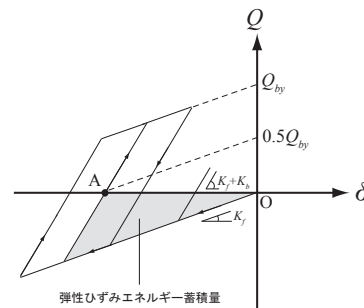
図2 Z型 NC ブレース架構の変形状態



(a) 主架構



(b) NC ブレース



(c) 1層 Z 型 NC ブレース架構

図3 各復元力特性

(b) となる。 Q_f, Q_b : 主架構, NC プレースの負担水平力, Q_{by} : NC プレース降伏水平力, K_f, K_b : 主架構, NC プレースの水平剛性, δ : 層間変形とする。層せん断力 Q は Q_f と Q_b を合計したものとなり, Z 型 NC プレース架構の復元力特性としては図 3 (c) となる。プレース弾性状態である時は地震時に漸増変形によって生じた弾性ひずみエネルギーを架構に蓄積することができ, 同図の復元力特性上では着色部分の領域に該当する。この性能が弾性の地震応答低減をもたらす重要な要素となる。また, NC プレース降伏後は Bi-linear 型の復元力特性を示し地震時の入力エネルギー

を効率よく吸収する。地震後層間変形は A 点に収束する。
 多層 Z 型 NC プレース架構の場合は i 番目の層について 1 層の場合と同様の一方向漸増変形性能や復元力特性を適用できると考えられる。

3. 振動台実験と数値解析

3.1 試験体

図 4 に試験体を, 図 5 にプレースを, 表 1 に素材特性を示す。試験体は 2 層 1 スパンの立体架構であり, 各部材は全周隅肉溶接接合されている。各層には錘を積載しており,

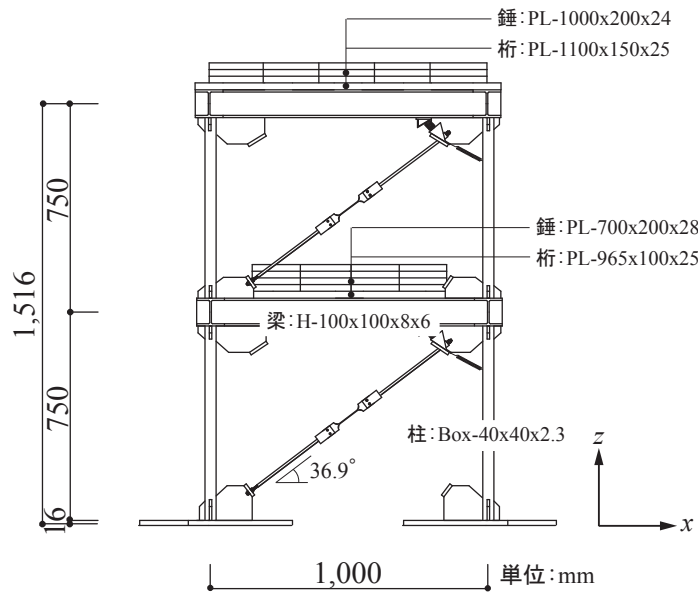


図 4 2 層試験体

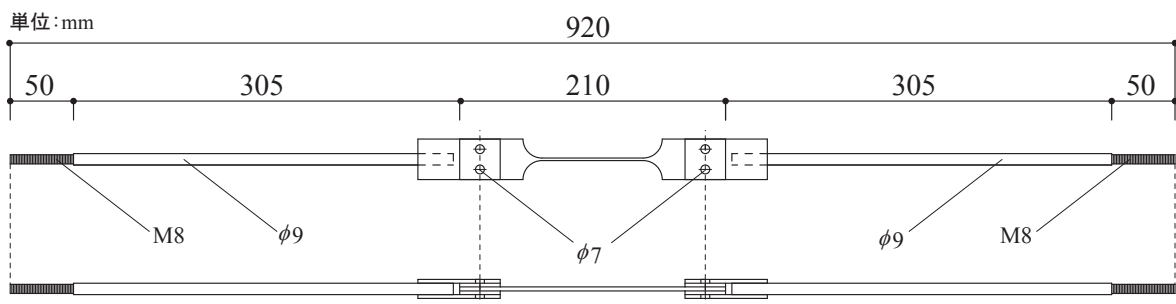


図 5 プレース

表 1 素材特性

部材	鋼種	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	YR	e (%)
柱	STKR400	372	474	0.78	19
梁フランジ	SS400	310	442	0.70	28
梁ウェブ	SS400	340	456	0.75	26
ガセットプレート	SS400	342	433	0.79	29

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

1層の質量を 655 kg, 2層の質量を 810 kg としている。ブレースは耐力調整用の Fuse を軸部に装着する形式である。なお、一構面に NC ブレースを 2 本配置して接合部の偏心曲げを回避している。Fuse は図 6 に示すもので、予め引張試験を行い、素材特性の確認を行った。引張試験結果を図 7 に示す。ブレース上端部の楔デバイスについてはばねと図 8 の楔と楔受けを設置する。ばねは楔をスムーズに貫入

させるだけのばね定数を有し、楔と楔受けの摩擦面については発錆処理を施して楔デバイスの機能に必要な摩擦係数を確保している。故に本ブレースは NC ブレースの動作機構を有している。

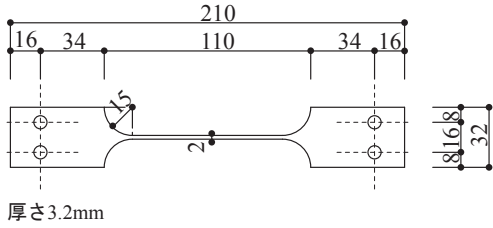


図 6 Fuse (塑性化部位)

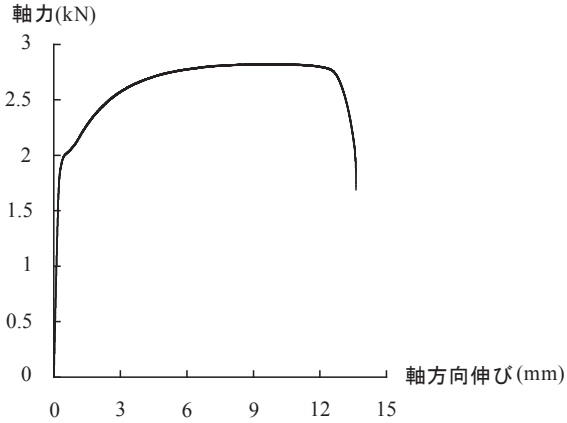


図 7 引張試験結果

3.2 計測計画

計測計画図を図 9 に示す。地動加速度 α_g , i 層絶対加速度 $i\alpha_x$ を加速度計により計測する。計測用架構に取付けた変位計で i 層の振動台からの絶対変位 $i\Delta_x$ を計測し, i 層の層間変位 $i\delta_x$ を次式により算出する。

$$(i=1) \quad {}_1\delta_x = {}_1\Delta_x \quad \dots (1)$$

$$(i=2) \quad {}_2\delta_x = {}_2\Delta_x - {}_1\Delta_x \quad \dots (2)$$

またひずみゲージにより i 層柱のせん断力 iQ_c , i 層 NC

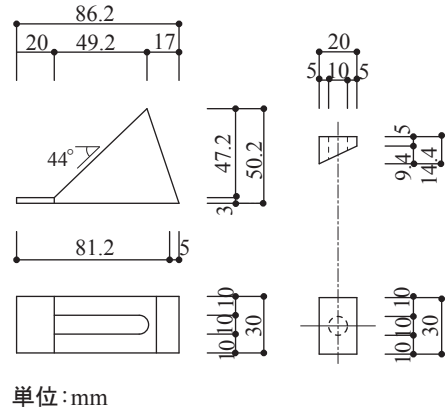


図 8 楔と楔受け

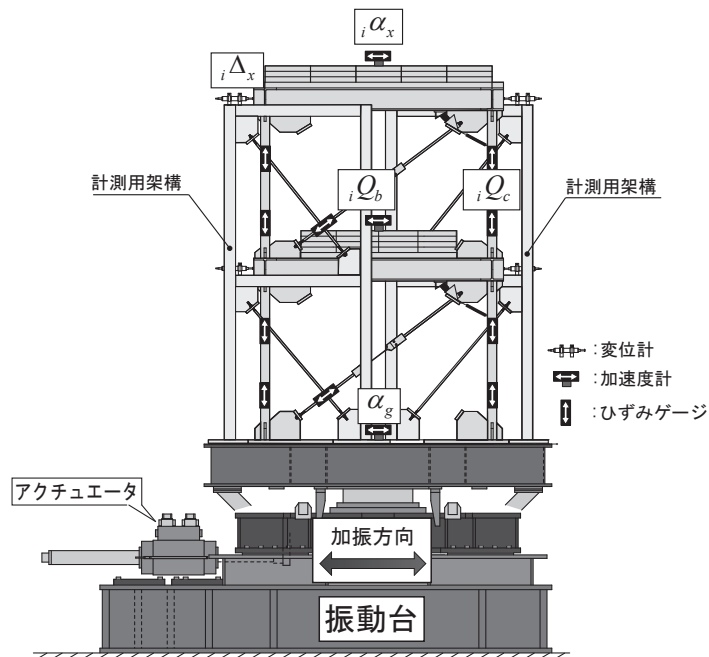


図 9 計測計画図

ブレースの負担水平力 iQ_b を計測する。また i 層層せん断力 iQ_x は iQ_c と iQ_b を合計したものとする。なお、ブレース付の計測用架構は固有周期が0.02sであり本実験の入力波に用いる正弦波の周期0.333sと比較して非常に短く、計測が正確に行えるものである。

3.3 実験変数と加振プログラム

実験変数をNCブレースの配置とする。図10のように各層同方向に配置したものをA-type、2層部分を逆方向に配置したものをB-typeとする。加振は一方向の加振とし、図11のプログラムで行った。図11は振動数3Hz(周期0.333s)の正弦波で加振Ⅰでは1層部分のNCブレースにFuseの引張試験結果より得られた降伏耐力の50%の軸力が作用するように、加振Ⅱでは100%の軸力が、それぞれ定常応答時に作用するよう入力加速度を調整している。加振ⅢはFuseが破断伸びの90%の塑性伸びを生じる入力である。なお、予備加振としてWhitenoise加振を行い、2層の絶対加速度のフーリエスペクトルと地動加速度のフーリエスペクトルの比から i 次の固有周期を求めた。またこのフーリエスペクトル比に $1/\sqrt{2}$ 法を適用して i 次の減衰定数を算出した。

3.4 数値解析モデル

解析プログラム「SNAP.ver 6」を用いて解析モデルの作成、数値積分を行う。図12はモデルの一構面を示す。柱梁は試験体と同断面のものを設定している。主架構の剛性を

試験体と一致させるため、解析モデルにおいて柱頭および柱脚部の剛域長さを調整した。NCブレースは軸ばねで表現し、 i 層NCブレース降伏水平力および水平剛性 iQ_b 、 iK_b は本実験結果から得られたものとし完全弾塑性モデルとした。圧縮降伏耐力は0.001kNとして圧縮力が作用しない特性を再現した。図13に軸ばねモデルの復元力特性を示す。本実験では振動台のロッキングが無視できないため、振動台の回転角と転倒モーメントの関係から回転剛性 $K_{table} = 28,000 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ を算出し、モデル下部の回転ばねに入

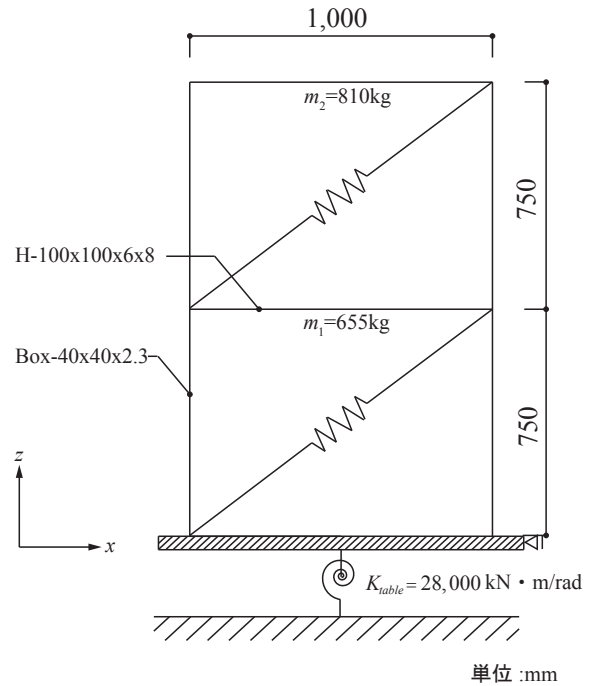


図12 2層解析モデル

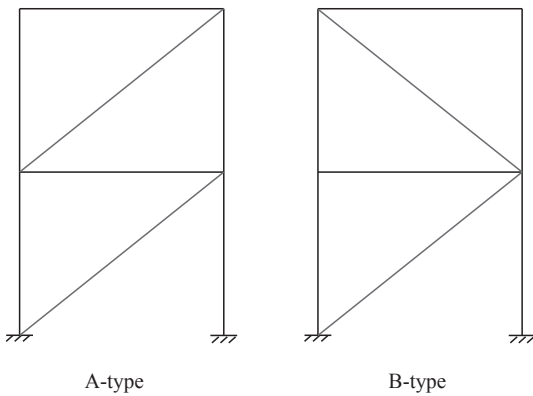


図10 ブレース配置

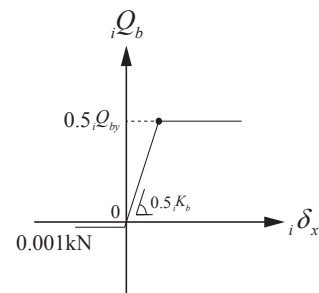


図13 軸ばねモデル復元力特性 ※1 構面当たり

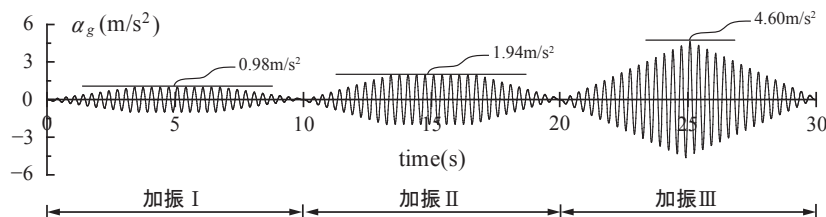


図11 加振プログラム

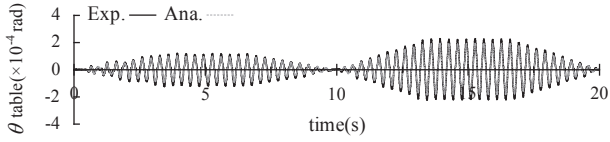


図14 振動台回転角時刻歴

力した。図14に回転角 θ_{table} 時刻歴を実験結果 (Exp.) および解析結果 (Ana.) を併せて示す。これより実験結果と解析結果は概ね良好に一致している。

3.5 数値解析概要

数値積分は Newmark- β 法 ($\beta=0.25$) とする。時間刻み

を 0.002 s とし解析モデルの 1 次減衰定数および入力波を実験で得られたものを入力した。表 2 に Whitenoise 加振と固有値解析結果から得た解析モデルの固有周期を示す。各次固有周期は実験結果とほぼ同じであると判断し本解析モデルにて解析を実施する。

4. 実験・解析結果

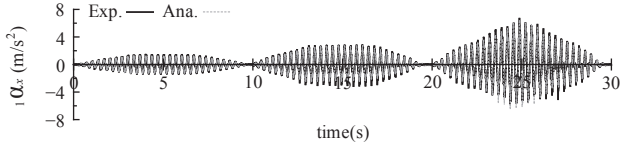
4.1 時刻歴応答結果 (加速度・変位)

図15に各層の絶対加速度応答時刻歴を示す。両 type ととも解析結果は各層とも実験結果と概ね良好に対応しているが加振Ⅱにおいて実験結果が解析結果より若干応答が大きく表れている。これは本実験の楔デバイスが不安定な状態になり、NC プレースが抵抗時にスリップを生じたためであ

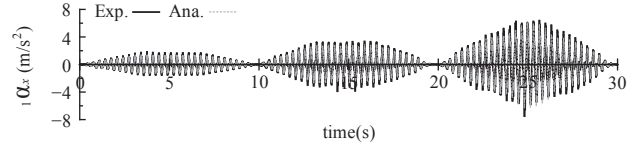
表 2 Whitenoise 加振・固有値解析結果

試験体	$iT_{Exp.}$ (s)		$iT_{Ana.}$ (s)		$iT_{Exp.}/iT_{Ana.}$		ih	
	$i=1$	$i=2$	$i=1$	$i=2$	$i=1$	$i=2$	$i=1$	$i=2$
主架構	0.178	0.058	0.175	0.057	1.02	1.02	0.023	0.007
A-type	0.097	0.026	0.098	0.028	0.99	0.93	0.028	0.008
B-type	0.098	0.025	0.096	0.026	1.02	0.96	0.030	0.011

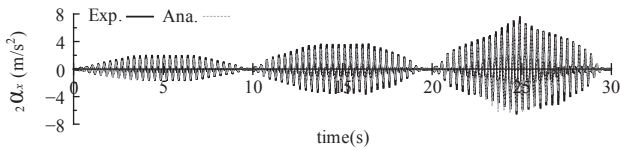
$iT_{Exp.}$, $iT_{Ana.}$: i 次モードの固有周期, ih : i 次モードの減衰定数



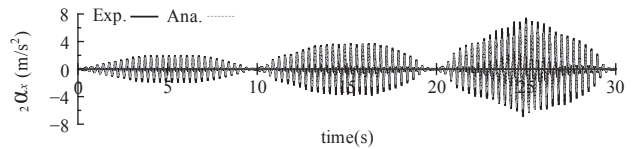
(a) A-type (1層)



(b) B-type (1層)

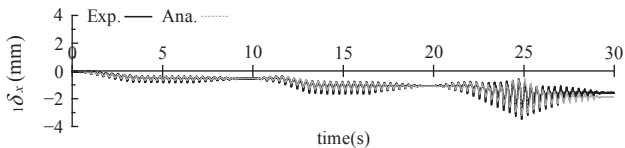


(a) A-type (2層)

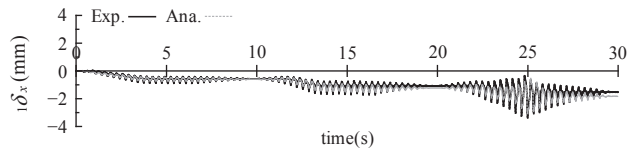


(b) B-type (2層)

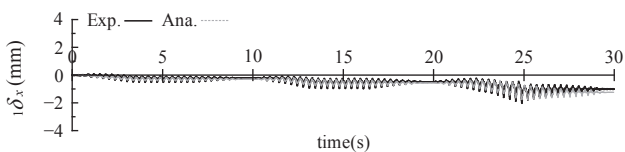
図15 各層絶対加速度応答時刻歴



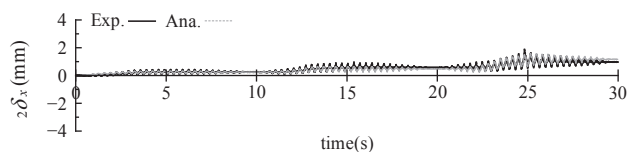
(a) A-type (1層)



(b) B-type (1層)



(a) A-type (2層)



(b) B-type (2層)

図16 各層層間変位応答時刻歴

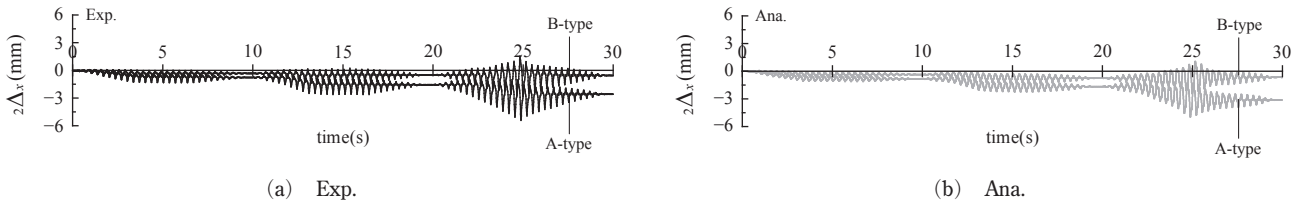


図17 頂部絶対変位応答時刻歴

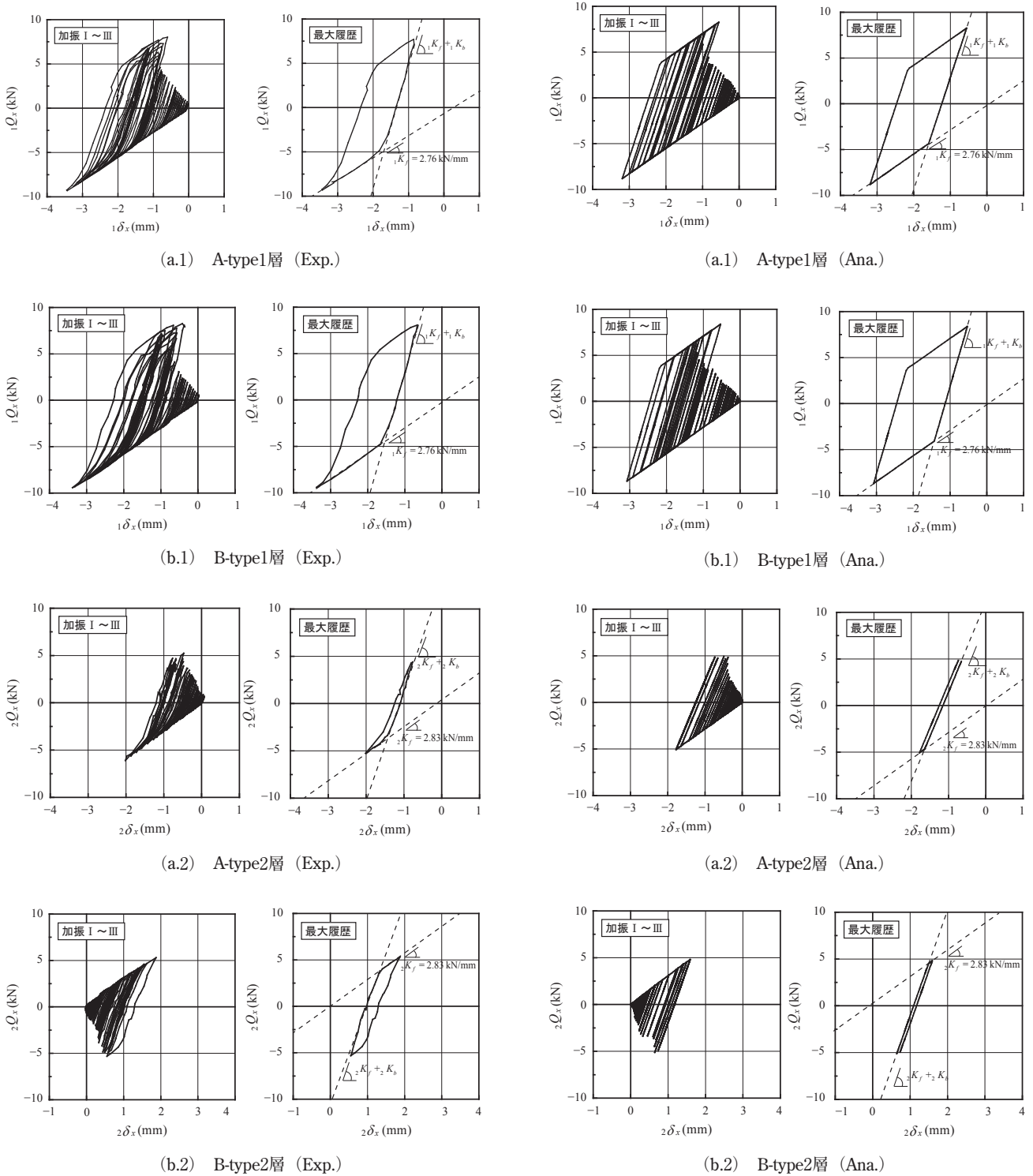


図18 $Q_i-\delta_i$ 関係

る。実験結果および解析結果において各加振の正負応答の絶対値はほぼ同じである。これは Fuse 弾性時において本実験のような徐々に加振力が漸増する入力では、漸増変形も徐々に進展するためである。すなわち漸増変形時 NC プレースの剛性が消失する区間が小さくなる。よって 1 サイクルのうち漸増変形が生じる負側と引張抵抗する正側の履歴に大差が生じないため正負の応答が同等となる。また本実験では A-type と B-type で各層の絶対加速度応答は同等である。

図16に各層の層間変位応答時刻歴を示す。両 type の各層とも解析結果は実験結果と概ね良好に対応している。Fuse が弾性である加振Ⅱまでは両 type の各層において漸増変形性状が確認できる。違いとして NC プレースを逆向きに Z 型配置した B-type の 2 層部分では他と比べ逆向きに漸増変形が起こっている。また 1 層部分の Fuse が弾塑性となる加振Ⅲにおいて両 type の 2 層部分では加振Ⅱまでと同様漸増変形を生じている。1 層部分でも生じているが、これにはひずみ硬化による Fuse の耐力上昇の影響が含まれている。加振Ⅲ終了後の残留変形はいずれの場合においても実験結果が解析結果よりもわずかに小さい。これは上述にある楔デバイスのスリップに起因するものである。

4.2 架構の頂部絶対変位

図17に架構頂部の絶対変位 Δ_x の応答時刻歴を示す。まず実験結果と解析結果は良好に対応している。次に試験体の type ごとに比較してみる。実験も解析も A-type の方が B-type よりも負方向に大きく変位している。その差は加振が進むにつれ大きくなっており、振幅が最も大きくなる加振Ⅲの時には最大で B-type の 2 倍以上変位が大きく生じた。すなわち B-type の方が絶対変位が大幅に低減されたといえるが、これは 2 層部分の漸増変形を 1 層部分と逆向きになるように NC プレースを Z 型に配置し、層ごとに変位を相殺することでもたらされる。すなわち多層 Z 型層 NC プレース架構では NC プレースの配置方向を変更することで架構頂部の絶対変位を制御できる。

4.3 $iQ_x-i\delta_x$ 関係

図18に各 type 各層の $iQ_x-i\delta_x$ 関係を示す。それぞれ加振Ⅰ～Ⅲまでのものと全加振中最大となる加振Ⅲの 25 s 付近の履歴を示す。まず、全てに共通する事項として一方向漸増変形性能により iK_f のみで抵抗する区間と iK_f+iK_b で抵抗する区間が現れている。さらに iK_f において実験結果と解析結果は一致している。

1 層部分について両 type とも Fuse が塑性伸びを生じ最大時に Bi-linear 型の復元力特性を示している。A-type と

B-type で応答に大きな違いは見られなかった。実験結果と解析結果は良好に対応している。

2 層部分では最大応答時にも Fuse は弾性であり漸増変形により履歴が生じる。NC プレース配置方向が異なることにより B-type は各 type の 1 層部分および A-type の 2 層部分とは復元力特性が点対称となっている。実験結果と解析結果の比較では B-type の最大履歴は実験の方がやや大きめに現れたが概ね対応している。

5. 結 論

2 層 Z 型 NC プレース架構の振動台実験および数値解析を行い以下の知見を得た。

1) 本実験では多層 Z 型 NC プレース架構は正負で絶対加速度応答の大小は生じない。また A-type と B-type の絶対加速度応答はほぼ等しい。

2) 多層 Z 型 NC プレース架構は NC プレースを Z 型配置した層ごとに一方向漸増変形する。

3) NC プレース降伏後は Bi-linear 型に近似できる復元力特性を示す。

4) 多層 Z 型 NC プレース架構では NC プレースの配置方向を変更することで試験体頂部の絶対変位を制御できる。

5) 数値解析結果は実験結果と良好に対応する。

謝 辞

実験を実施するに当たり本大学大学院生栗原将平さん、本大学学部生上石裕也さんおよび倉本朝水さんには大変なお力添えをいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- 1) 佐伯英一郎, 前田泰史, 中村秀司, 緑川光正, 和田章: 実大アンボンドプレースに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集第476号, pp. 149-158, 1995.10.
- 2) 玉井宏章, 高松隆夫, 松尾章: ノンコンプレッションプ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.
- 3) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 小松真吾, 中山雅隆: Z型 NC プレース架構の一方向漸増変形性能に関する研究, 広島工業大学紀要第49巻, 研究編, 2015.2.
- 4) 中山雅隆, 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 小松真吾: 1 層 Z 型 NC プレース鉄骨架構の地震応答解析, 日本建築学会中国支部研究報告集, CD-ROM, 論文番号-228, 2015.3.