

2011 年東北地方太平洋沖地震による工学院大学新宿校舎の応答解析についての研究

1. はじめに

近年首都圏では、M7 クラスの首都直下地震による震源近傍の強振動や、長周期成分が卓越する M8 クラスの東海・東南海連動地震に対し超高層建築の対策の重要性が指摘されている。2011 年 3 月 11 日に三陸沖を震源とする日本で観測史上最大の地震、東北地方太平洋沖地震（以下、東北地震と記す）が発生し、より注目されるようになった。また、近年では構造的被害だけでなく、BCP（事業継続計画）を始めとする、建物の機能維持などの対策の重要性が求められるようになってきている。そこで、既往の研究では、工学院大学新宿校舎高層棟（以下大学棟と記す）を対象に常時微動・人力加振および工学院大学高層棟地震観測システム（以下、観測システムと記す）での地震動観測を実施し観測結果を反映した構造モデルを構築し、地震応答解析を行っている^{1,2)}。

中間報告では、入力地震波に東北地震を用い、地震応答解析を行った。本研究では、解析で得られた結果をもとに大学棟立体モデル（以下、立体モデルと記す）の改善を行う。

3 大学棟立体モデル

図 1 に工学院大学新宿校舎の立体モデルのアクソメ図、図 2 に基準階平面図を示す。と竣工図面および構造計算書をもとに作成している。その際地下部分は地下 6 階まで剛性の高い RC 構造となっているため、本研究では地下階は扱わず、地上階の構造部材のみ扱う。また今回も既往の研究同様、非構造部材を考慮していない。建物重量は構造図および構造計算書より床（積載荷重、固定荷重）、壁および小梁の重量を算出し構造部材は解析ソフト（任意形状立体フレーム弾塑性解析プログラム SNAP V.4³⁾）による自動計算により算出した。この立体モデルは既往の研究⁴⁾で中小地震を用いて解析し、それを観測波形と比較検討したところ妥当性を確認している。しかし、東北地震を入力地震波とした応答解析では、誤差が生じた。

4 仮定条件及び解析条件

仮定条件を以下のように示す。

- ・各階の床は剛床と仮定
- ・柱脚の支持条件は固定と仮定
- ・梁は床スラブの剛性、強度を考慮した合成梁として評価
- ・パネルゾーンの剛性を考慮
- ・既往の研究⁴⁾より減衰定数 1% のレーリー減衰と仮定
- ・ブレースは節点間距離を材長とし、実際のブレース長さ等を考慮した剛性

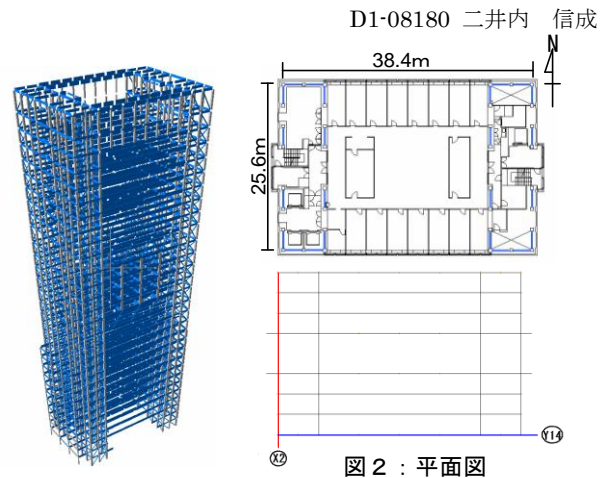


図 1：アクソメ図 上：基準階平面図 下：基準階伏図
図 2：平面図

表 1 固有周期比較

| | 固有周期 | | | | ねじれ |
|--------|------|------|------|------|-----|
| | NS | | EW | | |
| | 1次 | 2次 | 1次 | 2次 | |
| 本震後-観測 | 3.11 | 0.93 | 3.01 | 1 | |
| モデル変更前 | 2.91 | 0.93 | 2.83 | 0.99 | 2.2 |
| モデル変更後 | 3.09 | 0.99 | 2.96 | 1.04 | 2.4 |

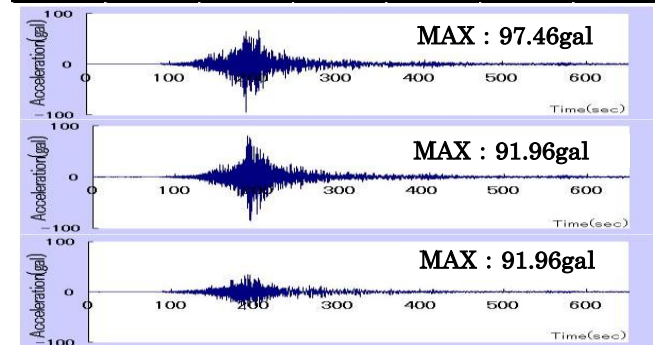


図 3：東北地震 加速度 時刻歴波形

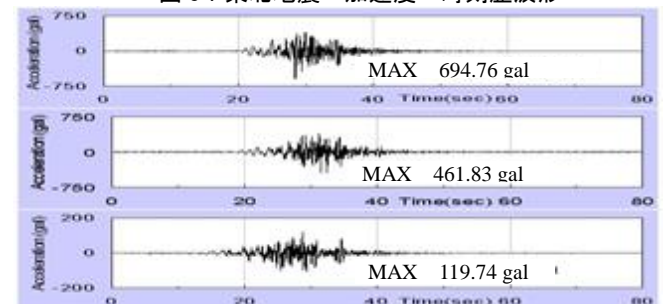


図 4：想定首都直下地震 加速度 時刻歴波形

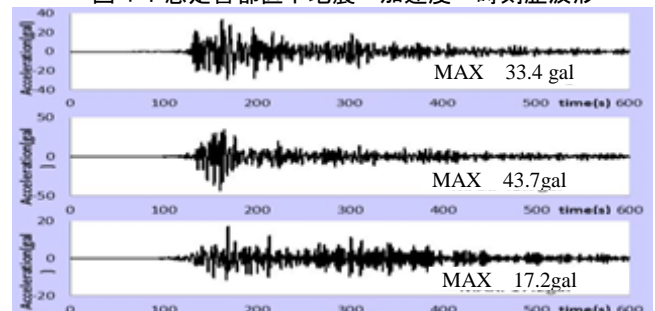


図 5：想定東海・東南海連動地震 加速度 時刻歴波形

- ・対象とする立体モデルの振幅が大きいため弾塑性解析とする
- ・柱は塑性化しないと仮定
- ・梁は材端パネモデル³⁾とし、バイリニア形の履歴特性を使用。また、全ての部材を合成梁として評価し正負で異なる全塑性モーメントを算出
- ・ブレースは両端ヒンジモデルとし、座屈を考慮した柴田・若林の履歴特性³⁾を使用

東北地震を入力地震波としてこの仮定条件及び解析条件で解析を行ったところ、誤差が生じた。

5 モデルの提案

5.1 パネルゾーン

既往の研究では、柱梁接合部は剛域になっている。今回はパネルゾーンを剛域にするのではなく、剛性率を持たせたモデルを提案する。立体モデルでのパネルゾーンの評価方法を(1-1)式に示す。SNAP Ver 4でのパネルゾーンの剛性は体積とせん断弾性係数によって決まる。しかし、剛性はX方向、Y方向共に値が同じになる。そのため、各方向に剛性増大率を与える事によって、方向ごとに剛性値を変える。

$$\left. \begin{aligned} \begin{pmatrix} m_{xp} \\ m_{yp} \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} K_{yp} & 0 \\ 0 & K_{xp} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \gamma'_x \\ \gamma'_y \end{pmatrix} \\ K_{yp} &= K_{xp} = GV \\ V &= B_x * B_y * D_z \end{aligned} \right\} (1-1)$$

V：体積 G：せん断弾性係数 K：剛性

これにより、表1に示す通り周期が伸びる事が確認できた。このモデルを使用し、地震応答解析を行う。

6.地震応答解析による構造被害予測

6.1 入力地震波

改善した立体モデルを使用し、中間報告と同様に大学棟の観測システムより観測された東北地震のNS,EW,UD成分の3成分の観測記録を使用している。また、最終報告では、特徴が異なる入力地震波として、想定首都直下地震⁷⁾および想定東海・東南海連動地震⁸⁾を用いる。ただし、東北地震においてEW,NS成分は1Fの記録、UD成分はB6F記録を使用している。図1~図3に、加速度の時刻歴波形、図2は減衰定数1%の速度応答スペクトルのNS方向を示す。

東北地震は長周期成分が卓越し継続時間も長い地震である事が確認できる。また、東北地震は短周期成分が多く混じった地震である。想定首都直下地震は振幅が大きく短周期成分が卓越し、想定連動地震では長周期成分が卓越し継続時間が長く、両者の特性が異なる事が確認出来る。

5.2 解析結果比較

5.2.1 東北地方太平洋沖地震

図7にNS方向の各階最大応答値、図8に柱梁の各階最大塑性率、図9にNS方向の29階時刻歴波形を示す。(以

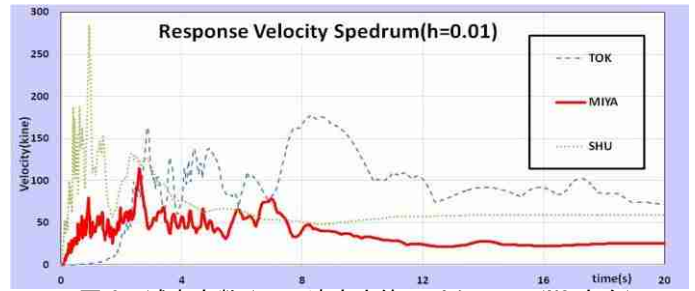


図6：減衰定数1% 速度応答スペクトル (NS方向)

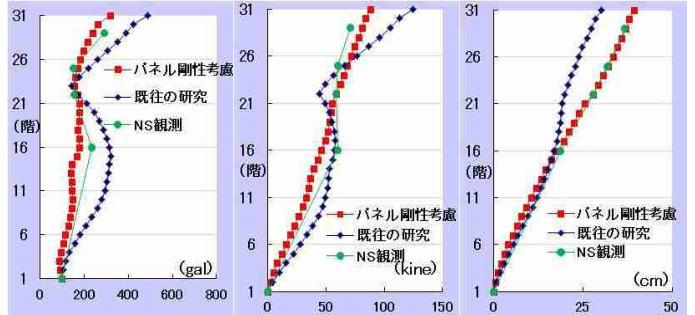


図7：各階最大応答値 NS方向
左：加速度 中：速度 右：変位

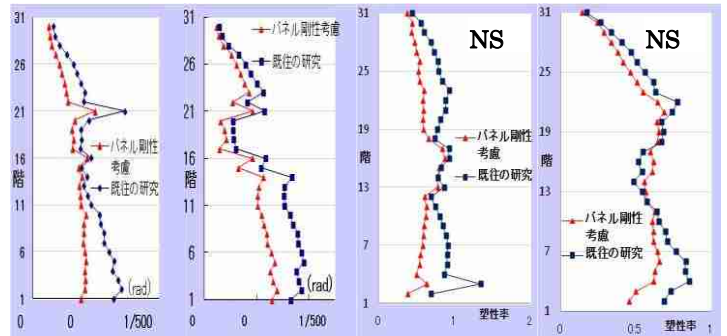


図8：左から：層間変形角：NS、EW、最大塑性率：梁 ブレース

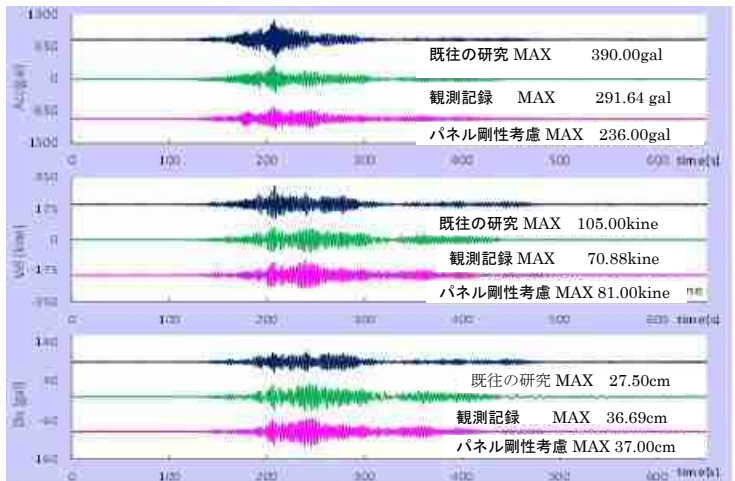


図9：NS方向 29階時刻歴波形
上：加速度 中：速度 下：変位

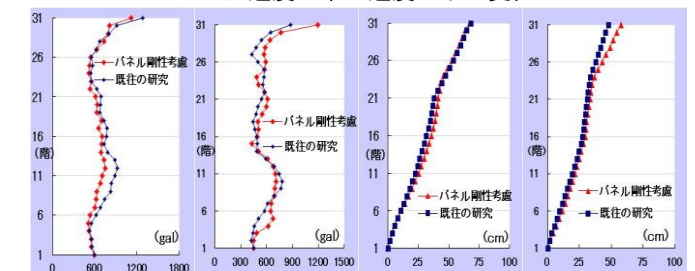


図10：各階最大応答値
左から：NS加速度、EW加速度、NS変位、EW変位

下のグラフにおいてパネルゾーンを考慮したモデルの解析結果をパネル剛性考慮、考慮していないモデルを既往の研究と表記している。)今回は紙面上の都合により、前回解析記録と観測記録の誤差が大きかった NS 方向のみ記載する。図 7 より観測記録とモデル改善前、モデル改善後の応答値を示す。これより、改善前のモデルと観測記録では、加速度、速度で約 3 割過大評価、変位では逆に約 10cm の過小評価していた。しかし、改善したモデルの解析より、誤差が非常に小さくなっている事が確認できる。これは、パネルゾーンを考慮することで立体モデル全体の剛性が落ち、それにより周期も実際の観測記録に近くなり、その結果 NS 方向の誤差が減少したのだと考えられる。

図 8 では NS 方向、EW 方向の層間変形角および NS 方向の各階最大塑性率を示す。これより、層間変形角は以前のモデルより全体的に小さくなっている事が確認できる。また、各階最大塑性率より、以前の立体モデルは NS 方向の梁で塑性率 1.0 を超える結果になっていたが、パネル剛性を考慮したモデルでは、梁の塑性率は全体的に低下し塑性率が 1.0 を超えていた階でも 1.0 を下回っている事が確認できる。EW 方向に関しても同様に梁の塑性率は全体的に低下している。また、ブレースは全体的に以前とあまり変化が無いが、梁と同様若干最大塑性率は低下している。これは、立体モデル全体の剛性が落ち、力が梁に集中しなくなった事が考えられる。

図 9 の 29 階時刻歴波形よりこれらの上記の要因により観測記録に近づいたと考えられる。しかし、今回 EW 方向は記載していないが、変位に関して過小評価という結果になった。現立体モデルは梁が合成梁となっている。この剛性梁の剛性が実際よりも強いという事が考えられる。また、改善モデルはブレースにおいて節点間距離を材長とし、実際のブレース長さ等を考慮した剛性になっている。しかし、今回パネルゾーンを評価するにあたって、2 重に剛性がかかっている事が考えられ、それにより EW 方向の周期が思うように伸びなかった事が考えられる。今回の立体モデルは NS 方向の周期に合わせてあるが、EW 方向に関しては、観測記録の周期よりも短い。SNAP の解析において周期は解析結果に支配的に影響することが考えられることから、結果になったと考えられる。

5.2.2 想定首都直下地震

図 10 に各階最大応答値、図 9 に最大層間変形角、図 10 に各階平均塑性率、図 11 に NS 方向の 29 階時刻歴波形を示す。それぞれ、以前の立体モデルとパネル剛性考慮したモデルを比較している。

図 10 より、応答値に関しては各方向の加速度、変位共に以前のモデルと大きな変化は見られなかった。また、図 11 の層間変形角においても大きな変化は見られず、1/200 以内に収まっている事が確認できる。

図 12 より、各階平均塑性率を見てみると梁の平均塑性率は以前の結果より低く評価される傾向がある。それに代わってブレースの各階の平均塑性率は、全体的に塑性率が上って

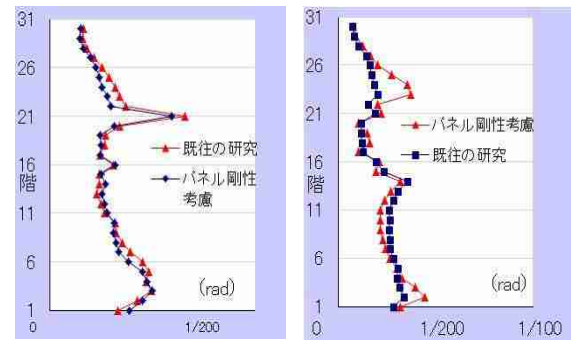


図 11：層間変形角

左：NS 右EW

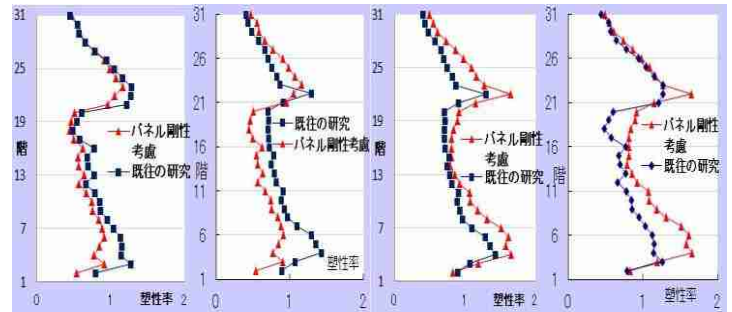


図 12：各階平均塑性率

左から：梁NS、EW ブレースNS、EW

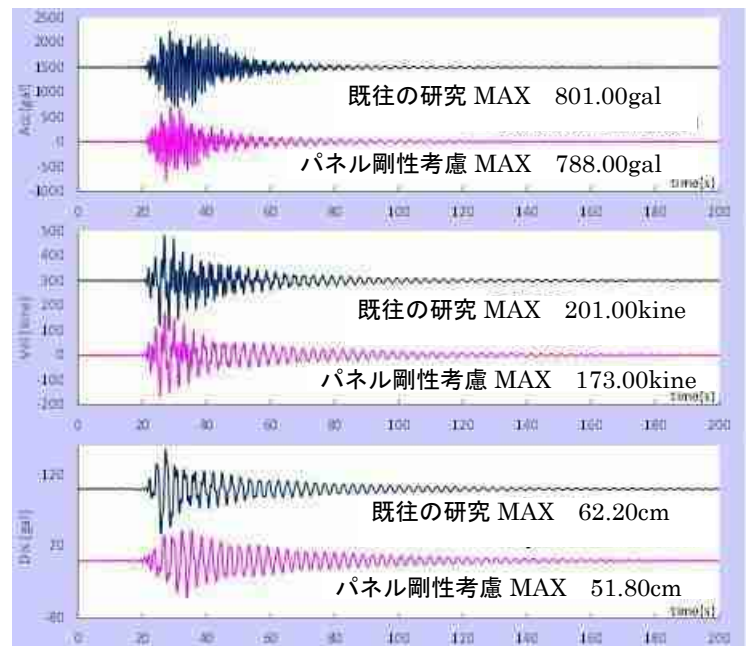


図 13：NS 方向 29 階時刻歴波形

上：加速度 中：速度 下：変位

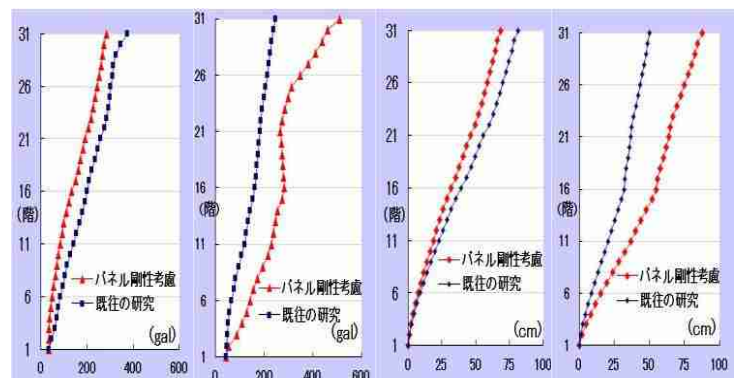


図 14：各階最大応答値

左から：NS 加速度、EW 加速度、NS 変位、EW 変位

いる事が確認できる。以前のモデルでは、パネルゾーンを剛域として仮定されている事から、直接梁に力が伝わっていたと考えられる。そのため、梁に大きな力が加わりそれに

よって多くの損傷が出るのだと考えられる。しかし、改善モデルは、パネルゾーンが変形し力が分散することで、ブレースに力を逃げた事により、梁への負担が減ったと考えられる。

最後に図 13 より、NS 方向の 29 階の加速度、速度、変位を比較すると、それぞれ以前の解析結果より小さな値になった。また、今回は紙面上の都合により塑性分布図を記載していないが、以前のモデルと改善モデルの分布地が変わっていることが確認できている。また、全体的に梁の塑性率が低下している。

5.2.3 想定東海・東南海連動地震

図 14 に各階最大応答値、図 15 に最大層間変形角、図 16 に各階平均塑性率、図 17 に NS 方向の 29 階時刻歴波形を示す。それぞれ、以前の立体モデルとパネル剛性考慮したモデルを比較している。

図 14 より NS 方向の加速度と変位に減少が見られ、EW 方向に関しては増加がみられる。NS 方向で加速度の現象が見られる原因として、剛性が下がったことにより加速度が落ちたのだと考えられる。その影響で NS 方向の変位も落ちたと考えられる。一方、EW 方向で加速度の増加が見られる原因として、全体の剛性が下がったことで EW 方向に関しても変位が増えた事が原因だと考えられる。この事から、図 15 の層間変形角を見ても、NS 方向が減少し EW 方向が増加している。

図 16 より、各階平均塑性率を見ても NS 方向の梁を見ても、加速度、変位が落ちたことで全体的に落ちている。EW 方向の梁に関しては、加速度、変位が増加している事から塑性率が増加する。ブレースにおいては、NS 方向は変化があまり見られないが EW 方向に関しては、想定首都直下地震同様に、梁に集中していた力が、ブレースに逃げたことで、塑性率が増加したと考えられる。この事により、梁の塑性率が減少しブレースの塑性率が増加する。

図 17 より、NS 方向の加速度、速度、変位を見ても、想定首都直下地震と同じ傾向が見られ、全体的に小さくなっている。

6 今後の課題

今回は大学棟立体フレームモデルにパネルゾーンを入れた際に一か所において妥当性を確認したものの、他の箇所に関して手計算による妥当性についての確認していない。その為、他の接合部パネルの妥当性の確認をする必要がある。

改善した立体フレームモデルを使用して解析を行った結果、以前の解析とは大幅に結果が変化した。そのため、新しい制振補強案を検討する必要がある。また同時に、施工性、運搬性、応答低減効果、費用対効果等を考慮した、現実的な制振補強案を考える必要がある。

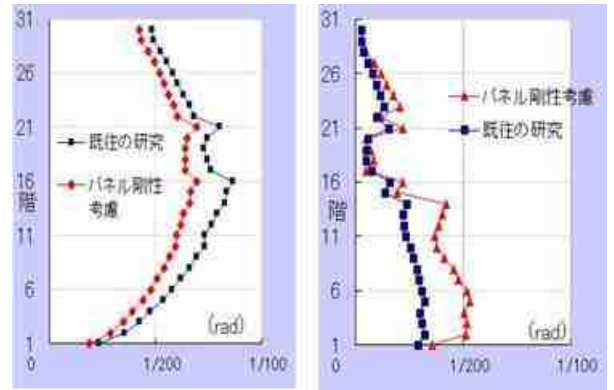


図 15：層間変形角
左：NS 右 EW

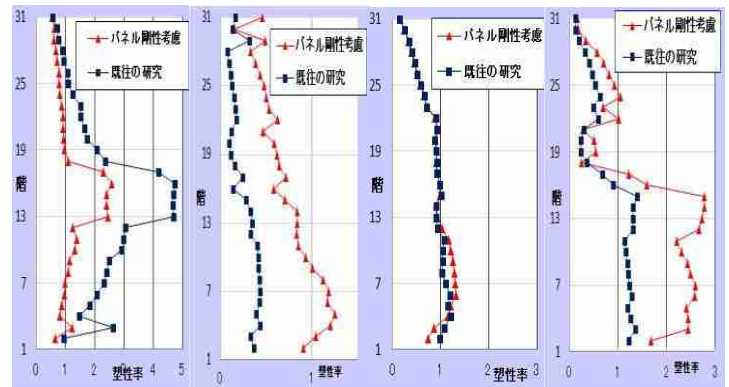


図 16：各階平均塑性率
左から：梁 NS、EW ブレース NS、EW



図 17：NS 方向 29 階時刻歴波形
上：加速度 中：速度 下：変位

《参考文献》

- 1) 小菅英沙子他：日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、構造 II、pp.617-618、2007.8
- 2) 島村賢太他：日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）、構造 II、pp.817-818、2008.9
- 3) 株式会社構造システム：SNAPVer.4 テクニカルマニュアル
- 4) 星幸男他：日本建築学会大会学術講演梗概（東北）、構造 II、pp.475-476、2009.8
- 5) 中野泰宏：2010 年度卒業論文、久田研究室
- 6) 建築鋼構造-その理論と設計-：井上一郎 吹田啓一郎