

平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震における 仙台市役所本庁舎のトグル制震補強効果の確認

Verification on the Effect of the Toggle Damping System in the Sendai City Hall
during the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

池田 隆 明 ^{*1}	高瀬 裕 也 ^{*1}	妹尾 嘉 章 ^{*2}
Takaaki Ikeda	Yuya Takase	Yoshiaki Senoo
阿部 良 洋 ^{*3}	船木 尚 己 ^{*3}	守 研 二 ^{*3}
Yoshihiro Abe	Naoki Funaki	Kenji Mori
佐々木 清 ^{*4}	鈴木 幸 一 ^{*5}	
Kiyoshi Sasaki	Koichi Suzuki	

【要旨】

仙台市役所本庁舎は昭和 40 年に竣工した鉄骨鉄筋コンクリート造の建物である。耐震診断により耐震補強が必要との判定を受けたため、平成 20 年に増幅機構付き制震ブレース（トグル制震構法）による耐震補強を実施している。平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震において、仙台市では震度 6 強が観測されるなど強い揺れをうけたが、仙台市役所本庁舎は耐震補強により被害を最低限に抑制できた。当該建築物では地震観測が行われており、本震時の地震動記録が得られている。そこで、観測記録とそれを用いた地震応答解析結果から、トグル制震装置による耐震補強の効果について定量的な検討を行った。その結果、補強設計目標（層間変形角）をクリアできたこと、耐震補強をしなかった場合に比べ、建物の変形を大幅に抑制していたことが明らかになった。

【キーワード】 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震 トグル制震構法 仙台市役所本庁舎 耐震補強
層間変形角

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（以後、東北地方太平洋沖地震）では、震源に近い東北地方の太平洋岸域を中心に未曾有の津波被害が発生した。強い揺れも広範囲で発生し、宮城県栗原市の震度 7 を最大として、震度 5 弱以上を観測した地域は 17 都県に及んだ¹⁾。

震源に近い仙台市では強い揺れが発生し、耐震性能が低い建築物には被害が発生した²⁾。仙台市役所本庁舎は、昭和 40 年に竣工したいわゆる旧耐震建築物であったが、平成 20 年に増幅機構付き油圧制震ブレース（以後、トグル制震構法）による耐震補強が完了していたため、一部の非構造部材に補修可能な軽微な被害が発生した程度であった。

当該建築物では、平成 21 年 10 月より地震観測を実施しており³⁾、本震時の建物の地震時挙動が観測されている。そこで、観測記録および観測記録を用いた建物の地震応答解析から、東北地方太平洋沖地震におけるトグル制震構法による耐震補強の効果について定量的な検討を行う。

2. 仙台市役所本庁舎の概要

仙台市役所本庁舎は、昭和 40 年に竣工した鉄骨鉄筋コンクリート造（SRC 造）地上 8 階、棟屋 3 階、地下 2 階の建築物である。凝灰岩の支持基盤に直接支持されている。高層部（北側）と低層部（南側）に分かれているが、スラブによるせん断力の伝達が可能であることから、構造的には一体と考えて問題ないと考えられる。

新耐震設計法以前の耐震基準を用いて設計されていることから、耐震診断を行った結果、構造耐震指標（Is 値）が 0.6 以下であり耐震補強が必要と判断された。そのため、耐震性能を新耐震設計法と同等とされる Is=0.6 以上に引き上げることを目標として、平成 20 年にトグル制震構法を用いた耐震補強を実施している。

耐震補強では、新耐震設計法の理念である「耐用年数中に一度あるかないかの大規模な地震動（レベル 2 地震）に対しても、最低限人命に危害を及ぼす倒壊をしないこと」を目標に、層間変形を 1/150 以下とするような設計クライテリアを設定し、それに基づき長手方向（X 方向）に 94 基、短手方向（Y 方向）に 88 基のトグル制震ブレースを設置している。

1. 技術研究所 2. トグル事業部 3. 東北工業大学 4. 山下設計東北支社 5. 元山下設計東北支社

表-1に仙台市役所本庁舎の建物概要を、写真-1に仙台市役所本庁舎の全景を示す。また、表-2に耐震補強の概要を示す。

表-1 仙台市役所本庁舎の建物概要

項目	内容
建物名称	仙台市役所本庁舎
延床面積	27,809m ²
規模	地上8階，地下2階，塔屋3階
構造種別	鉄骨鉄筋コンクリート造
構造形式	耐震壁付きラーメン構造
基礎形式	独立基礎（直接基礎）
使用材料	コンクリート：普通（ $F_c=180\text{kg/cm}^2$ ） 異形鉄筋：SD30，丸鋼：SR24，鉄骨：SS41級



写真-1 仙台市役所本庁舎の全景
(平成21年10月撮影)

表-2 仙台市役所本庁舎の耐震補強の概要

項目	内容
トグル制震ブレース	長手方向（X方向）：94基 短手方向（Y方向）：88基
増設補強壁	2箇所
構造スリット補強	長手方向（X方向）：12構面 短手方向（Y方向）：8構面
柱補強	炭素繊維巻：12箇所

3. 地震観測記録

耐震補強終了後の平成21年10月より、地上1階と屋上階（PH1階）の2箇所に地震計を設置し、地震観測を実施している³⁾。

図-1に仙台市役所本庁舎と東北地方太平洋沖地震の震央と想定震源域の位置関係を示す。震央は宮城県沖であるが、想定震源域は茨城県沖にまで広がる約400km×200kmの範囲と考えられている⁴⁾。

図-2に仙台市役所本庁舎で観測された加速度波形を示す。地上1階の加速度波形には、二つの振幅が大きい領域が明瞭に見られる。今回の地震では、震源域内で複

数の破壊が連動して発生していることが考えられる。釜江・川辺⁵⁾は宮城県沖から茨城県沖にかけての5箇所で大いなる断層の破壊があったとしており、この二つの振幅の大きい領域は宮城県沖の2か所の断層破壊によるものと考えられる。

そのため、地震動の継続時間が長く、最大加速度が50cm/s²を超える振幅は地上1階では130秒程度、屋上階では150秒程度継続する。最大加速度は、地上階が約413cm/s²、屋上階が853cm/s²であり、いずれも約100秒付近からはじまる二番目の振幅が大きい領域で観測されている。

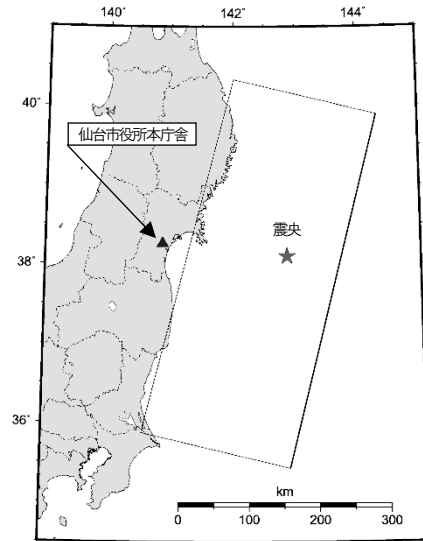
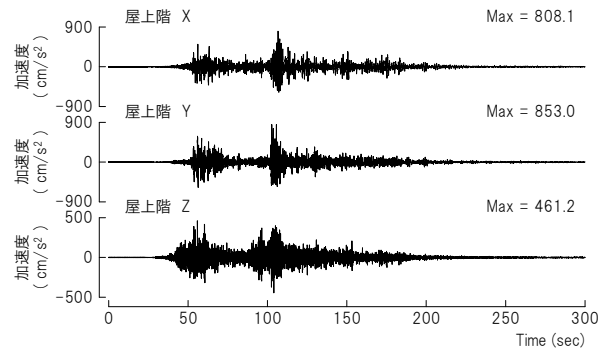
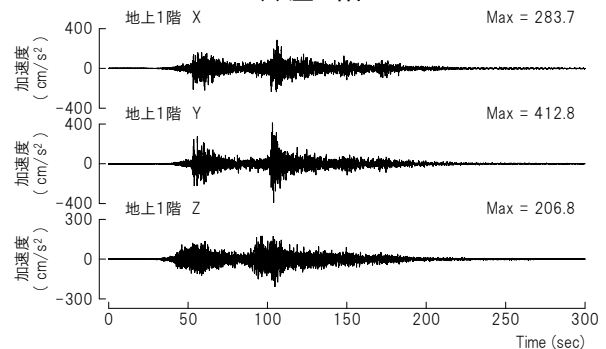


図-1 仙台市役所本庁舎と震央との位置関係

(四角で囲まれた範囲は防災科学技術研究所による推定断層面⁴⁾)



(a) 屋上階

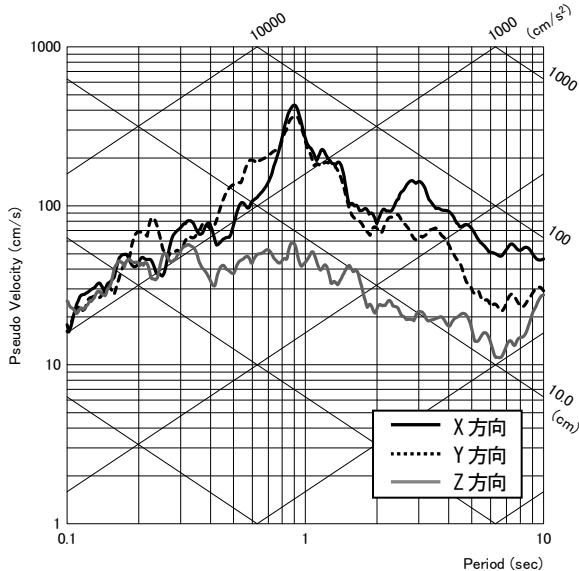


(b) 地上1階

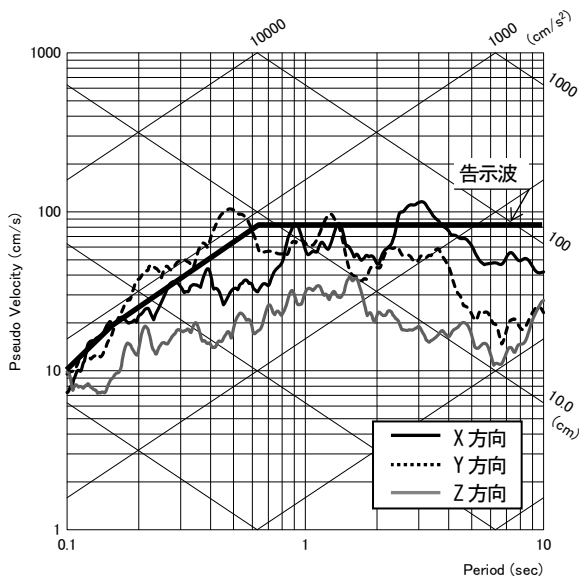
図-2 仙台市役所本庁舎で観測された地震動の加速度の時刻歴波形

図-3に地上1階と屋上階の擬似速度応答スペクトル ($h=0.05$) を示す。地上1階の応答スペクトルには、設計用地震動として用いた告示波のスペクトル⁶⁾をあわせて示す。地上1階で観測された地震動は、ほぼ設計で考慮したレベル2地震動相当であったことがわかる。

屋上階の擬似速度応答スペクトルには、約0.9秒付近に明瞭な卓越が見られる。そのため、当該建物は一次モードが卓越して挙動したと考えられる。



(a) 屋上階



(b) 地上1階

図-3 仙台市役所本庁舎で観測された地震動の擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$)

4. 補強効果の検証

耐震補強の性能目標に使用されている層間変形角を指標として、本震時の挙動と、耐震補強を実施しなかった場合（以後、未補強とも表記する）とを比較し、その差異をもって耐震補強効果として取り扱う。

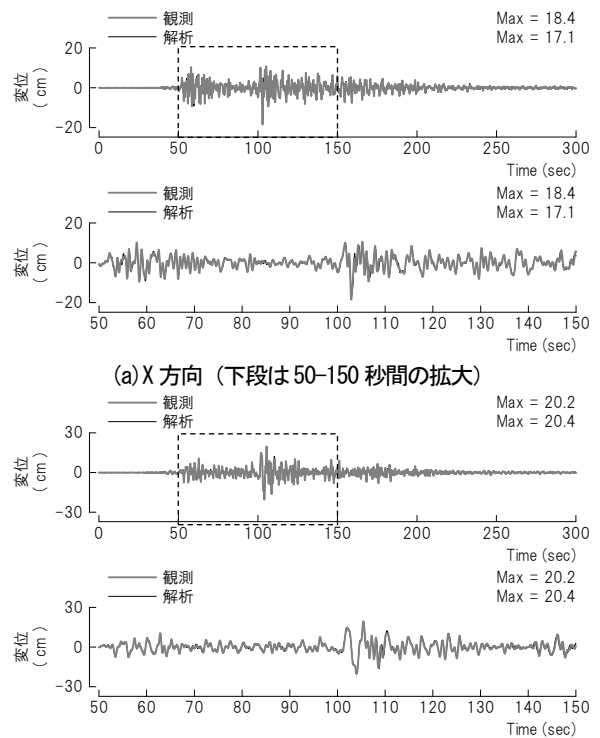
4.1 本震時の層間変形角

層間変形角を算出するためには、各階の変位波形が必要となるが、地震計は地上1階と屋上階にしか設置していないため、地震観測記録から層間変形角を求めることは不可能である。そこで、建物を質点系の基礎固定モデルに置換し、地上1階で観測された地震動を入力し、地震応答解析から各階の変位波形を算出する。

解析モデルはX方向とY方向で独立させ、強震時の卓越周期が、地震観測記録から得られた建物の強震時の卓越周期と一致するように設定している。

地震応答解析の精度については、屋上階の観測変位波形の再現性から確認する。図-4に観測変位波形と解析変位波形を重ねて示す。観測変位波形は、観測された加速度波形に対して0.1Hz~10Hzのバンドパスフィルターを作用させた後、フーリエ積分により算出した。

観測変位波形と解析変位波形は、振幅、位相とも高い精度で一致しており、地震応答解析は観測変位波形を正確に再現できている。このことから、屋上階以外の各階の変位波形も地震応答解析から同様に評価できると考えられる。



(a) X方向 (下段は50-150秒間の拡大)

(b) Y方向 (下段は50-150秒間の拡大)

図-4 屋上階における観測変位波形と解析変位波形の比較

図-5に地震応答解析から算出した本震時の層間変形角を示す。両方向ともに層間変形角は設計クライテリアの1/150以下であり、補強設計の性能目標をクリアしている。

4.2 未補強の場合の層間変形角

未補強の場合の層間変形角についても本震と同様に地震応答解析から推測する。検討に用いる解析モデルは、本震時の解析モデルから、トグル制震部材を取り除いたものである。

図-5に未補強の場合の層間変形角の分布を示す。層間変形角は複数の階で設計クライテリアの1/150を超え、X方向で1/61、Y方向で1/58まで拡大している。このことから、未補強の場合、建物に大きな被害が発生していた可能性が高い。

4.3 耐震補強の効果

本震時の層間変形角との差を耐震補強効果と考え、耐震補強により、建物の層間変形角を最大で1/4に低減し、大きな被害を回避したと考えられる。

図-6に地上1階に対する相対変位の分布を示す。耐震補強により相対変位は最大で1/3に低減されており、建物全体の変位についても大幅に抑制されたことがわかる。

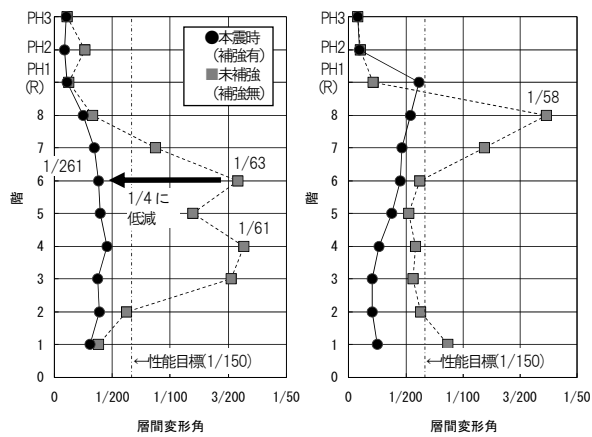


図-5 耐震補強の有無による層間変形角の比較

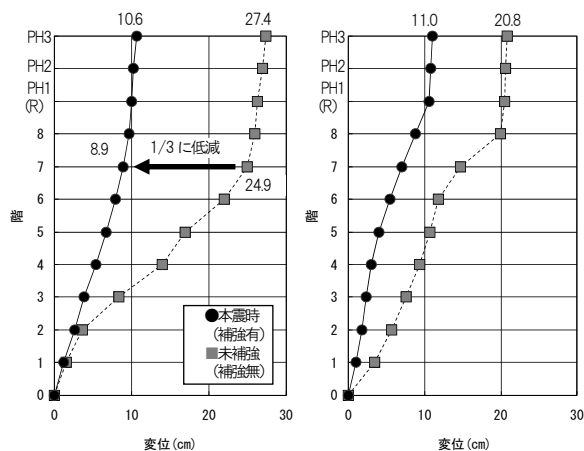


図-6 耐震補強の有無による相対変位の比較

写真-2に地震後（平成23年3月13日）の地上1階の状況を示す。天井や照明には被害は見られない。また、

仙台市役所本庁舎から東に約400m程度離れた宮城県警察本部の記者クラブ（SRC造7階建の3階）では机や椅子の散乱が見られたが⁷⁾、仙台市役所本庁舎ではこのような被害は少なかったことから、トグル制震構法による耐震補強の効果があったことが推測される。



写真-2 地震後の仙台市役所本庁舎の様子
(地上1階, 平成23年3月13日撮影)

5. まとめ

平成23年東北地方太平洋沖地震における仙台市役所本庁舎の耐震補強の効果に関し、地震観測記録と地震応答解析結果から以下の事項を確認した。

- ①本震時の建物の層間変形角は1/150以下であり、補強設計の性能目標をクリアした。
- ②耐震補強により、建物の層間変形角を最大で1/4、相対変位を最大で1/3に低減した。
- ③耐震補強を実施しなかった場合には、建物には大きな被害が発生した可能性が高い。

耐震補強が有効に機能したことにより、仙台市役所本庁舎の被害は軽微であり、室内についても棚・ロッカーの転倒は少なかった。そのため、地震後に約1,200の方に避難場所として利用していただくことができた。また、地震直後から市役所としての機能も継続的に維持され、様々な震後対応を円滑に行うことに大きく寄与したと考えられる。

【参考文献】

- 1) 気象庁：震度データベース検索,
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/shindo_index.html (平成23年7月22日参照)
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所 独立行政法人建築研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)調査研究(速報),
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/20110311/0311quickreport.html> (平成23年7月22日参照)
- 3) 池田隆明, 阿部良洋, 守研二, 高瀬裕也：増幅機構付

き制震装置で耐震補強された仙台市役所本庁舎の地震観測, 学術講演梗概集, B-2, pp.13-14, 構造 II, 2010.9.

- 4) 防災科学技術研究所: 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による強震動,
http://www.bosai.go.jp/news/oshirase/20110315_01.pdf (平成 23 年 7 月 22 日参照)
- 5) 釜江克宏, 川辺秀憲: 2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の震源のモデル化 (強震動生成域) (第 1 報),

<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/eq/tohoku1/Tohoku-ver1-rev20110601.pdf> (平成 23 年 7 月 22 日参照)

- 6) 建設省: 平成 12 年建設省告示第 1461 号
- 7) 産経ニュース,
<http://sankei.jp.msn.com/affairs/photos/110311/dst11031115420022-p1.htm> (平成 23 年 7 月 22 日参照)

Summary The main office of the Sendai municipal government, a steel reinforced concrete building, was constructed in 1965. It was judged as a result of seismic diagnosis that the seismic performance of the building was lower than an existing seismic standard. The building was therefore retrofitted by the Toggle damping system in 2008. At the time of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, the city of Sendai was subjected to strong ground motions and a seismic intensity 6+ was recorded. The damage to the main office of the Sendai municipal government was, however, minimized and limited owing to the Toggle damping system. Seismic observation was conducted at the building and the records of ground motions during the earthquake were available. We made a quantitative evaluation of the Toggle damping system by the dynamic response analysis of the building. As a result, we obtained the following valuable results.

- (1) The story deformation during the earthquake satisfied the seismic design criteria.
- (2) The deformation of the building was controlled more than in cases with no seismic retrofit.

Key Words: *the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Toggle Damping System, Sendai City Hall, Seismic Retrofitting, Story Deformation*