

2011年東北地方太平洋沖地震の観測データに基づく、 地盤特性の違いと建築構造物の非線形応答*

東北大学工学部建築・社会環境工学科 ○田附 遼太
東北大学災害科学国際研究所 源栄 正人
東北大学大学院工学研究科 吉田 英史

1. はじめに

2011年3月11日に三陸沖を震源とするM9.0の東北地方太平洋沖地震が発生し、多大なる被害をもたらした。震源地から近い仙台市内でも多くの建物が地震動による被害を受けたが、東北大学人間・環境系研究棟のように大きな被害を受けた建物もあれば、仙台駅前のように被害の小さい建物もあり、場所によって被害の大きさが異なっていた。このことから、地盤の違いを考慮した耐震設計や耐震診断補強が必要であると考えられる。

ここでは、仙台市内の地盤の異なる4地点の地震観測記録をベースに、地震動の差異がそれぞれの地点に建てる階数の異なる建物の非線形応答に及ぼす影響を定量的に検討した。

2. 対象地点・表層地盤

対象地震動は2011年東北地方太平洋沖地震の本震とする。

対象地点は東北大学のDCRC観測網で2011年東北地方太平洋沖地震の貴重な観測データが得られている¹⁾仙台市内の地盤の異なる以下の4地点とする。

- ・仙台駅前(住友生命ビル)：洪積台地
- ・長町(長町南コミュニティーセンター)：沖積平野
- ・鉾町(東配水管理事務所)：沖積平野
- ・青葉山(東北大学人間・環境系研究棟)：青葉山丘陵地

図1に仙台市域の表層地質分類図²⁾を示す。仙台駅前や市街地中心部が位置するところは洪積台地となっており、住友生命ビルの観測記録は工学地盤地震動として位置づけられる。洪積台地を取り巻くように青葉山などの丘陵地が存在し、北部には人工改変地が存在する。そして、長町・鉾町などの地域が位置するところは沖積平野である。

3. 解析モデル

Takedaモデル型の復元力特性とする。図2にTakedaモデル型のスケルトンカーブを示す。初期剛性Kに対して、降伏時剛性低下率を0.3とし、降伏時剛性 $K_y = 0.3K$ とする。ひび割れ耐力 F_c は降伏耐力 F_y の1/3と仮定する。粘性減衰は降伏時剛性比例型($h=0.03$)とする。

以上から、初期周期 T 、降伏時周期 T_y とすると、 $T_y = T/\sqrt{0.3} \cong 1.83T$ と与えられる。

* Difference of Ground motion Characteristics and Nonlinear Response of Building Structures Based on the Observed earthquake Data during the 2011 Tohoku Earthquake by Ryota Tazuke, Masato Motosaka, Hidefumi Yoshida

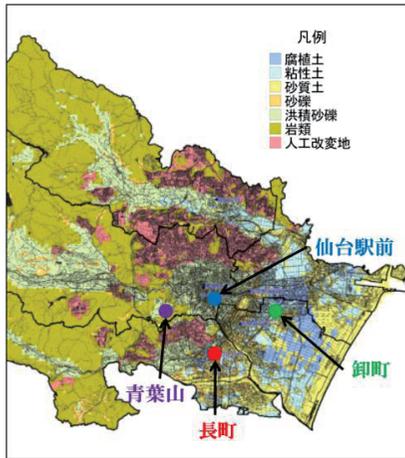


図1 表層地質分類図(250mメッシュ)²⁾

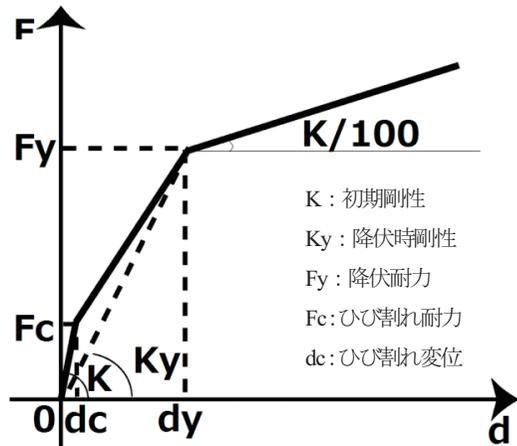


図2 Takeda モデル型スケルトンカーブ

4. 建物モデル

等価1自由度質点系による検討を行う。対象4地点に6階建・9階建・15階建・20階建の階高3.4mのRC構造物を建てると仮定する。RC造設計用1次固有周期(初期周期) $T=0.02 \times$ 建物高さ(m)で求められるので、それぞれの1次固有周期は0.41s・0.61s・1.02s・1.36sとなる。

5. 解析結果

5.1. 擬似速度応答スペクトル

図3に対象4地点のNS成分の擬似速度応答スペクトルを示す。1秒付近での周期帯で洪積台地である仙台駅前に比べ、青葉山では2倍以上、沖積平野である長町では4倍以上、同じく沖積平野である卸町では1.8倍程度増幅している。1秒付近でピークとなる長町と青葉山では、長町が青葉山に比べて2倍弱増幅している。

5.2. 必要耐力

塑性率(μ)と被災度の関係を大田³⁾と同じく以下のように想定する。

$\mu \leq 1.00$: 軽微・無被害 $1.00 < \mu < 2.50$: 小破 $2.50 \leq \mu < 5.50$: 中破 $5.50 \leq \mu$: 大破

仮定した被災度をもとに $\mu = 1.00, 1.80, 4.00, 6.00$ と設定し、それぞれの地点で得られたベースシア係数を縦軸、初期周期を横軸とした必要耐力スペクトルを図4に示す。この図から以下のことが分かる。

- 1) 6階建の建物は比較的地盤の固い仙台駅前に比べて、塑性率によるが長町では1.4~2.9倍、青葉山では、1.3~1.9倍、卸町では2.2~3.0倍耐力を持たせる必要がある。
- 2) $\mu = 1.00$ 、つまり被害を小さくするための耐力は、仙台駅前に比べて、長町では6階・9階・15階・20階建の建物を建てる時2倍以上必要であり、卸町では6階建の建物を建てる時3倍も必要である。
- 3) 15階建・20階建の建物になると、ベースシア係数が最も大きいのは長町である。
- 4) 9階建の建物で $\mu = 1.80$ になる時のベースシア係数が長町・青葉山で仙台駅前より小さくなっている。
- 5) 塑性率が大きくなれば、ベースシア係数(必要耐力)は小さくなる。

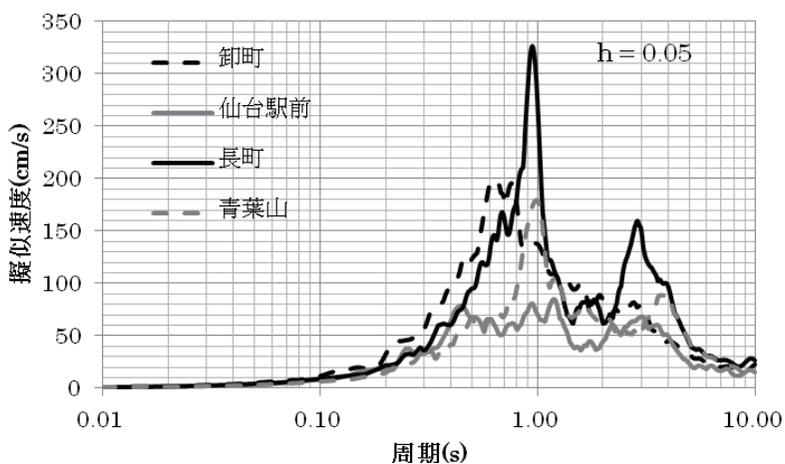


図3 擬似速度応答スペクトル

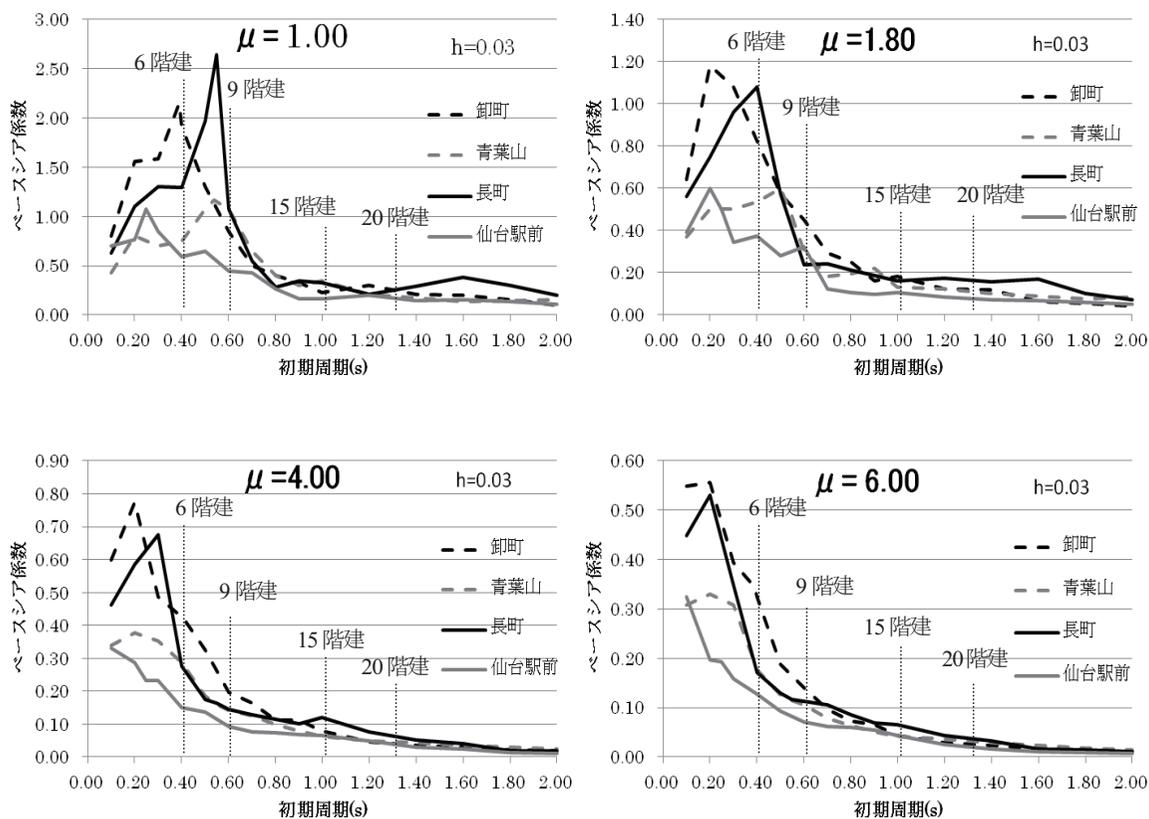


図4 仙台市域の地盤構造の異なる4地点の必要耐カスペクトル

5.3. 必要塑性率

建物に与える強度(ベースシア係数) $C_b=0.2, 0.6, 0.8, 1.0$ と設定し、その時塑性率を縦軸、初期周期を横軸とした必要塑性率スペクトルを図5に示す。この図から以下のことが分かる。

- 1) $C_b=0.2$ の時は仙台駅前と比較して、6階・9階・15階建の建物は卸町で、20階建の建物は長町で2倍以上変形している。卸町に6階建の建物を建てた時、想定の大破度では大破を示している。
- 2) $C_b=0.8$ の時の長町の15階建の建物と $C_b=1.0$ の時の長町の15階建・卸町の15階建の建物は仙台駅前よりも変形していない。
- 3) $C_b=0.8, 1.0$ の時、青葉山の6階建の建物では塑性率が1.0を下回っているが、9階建の建物になると1.0を上回っている。つまり、6階建の建物よりも9階建の建物の方が変形している。
- 4) ベースシア係数が小さいほど塑性率は大きくなっている。また、想定の大破度で大破～中破を示すものも多くなっている。

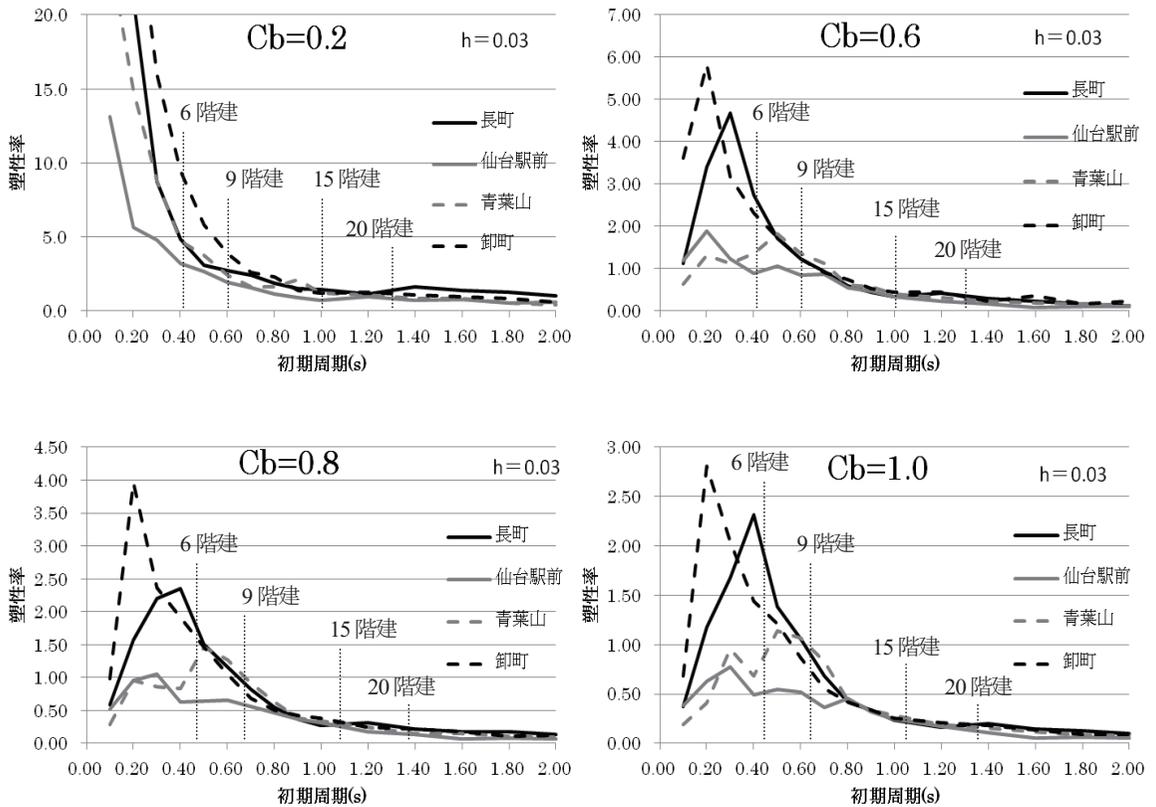


図5 仙台市域の地盤の異なる4地点の必要塑性率スペクトル

6. 考察

解析結果から、 $C_b=0.2$ で6階建($T=0.41$)の建物は鉦町で $\mu=8.79$ と4地点で変形が一番大きく、仙台駅前で $\mu=3.23$ と4地点で変形が一番小さいということになった。また、青葉山で $\mu=4.50$ 、長町で $\mu=4.73$ となった。鉦町での変形を他の3地点での変形に抑えるために、鉦町に6階建の建物を建てる時どの程度のベースシア係数(必要耐力)にすればよいか検討する。

図6に鉦町の必要耐力スペクトルを示す。図中の●印は、初期周期0.41(s)、 $\mu=3.20$ のところを示す。この点を見ると、 $C_b=0.48$ である。つまり、鉦町での変形を仙台駅前での変形に抑えるためには、6階建の建物にベースシア係数(必要耐力)を0.48にする必要があり、仙台駅前に比べ2.4倍程度耐力を持たせなければならない。

また、図中の▲印は、初期周期0.41(s)、 $\mu=4.60$ のところを示す。青葉山・長町の塑性率があまり変わらなかったで、間をとって $\mu=4.60$ をみる。この点をみると $C_b=0.4$ である。つまり、鉦町での変形を青葉山・長町での変形に抑えるためには、6階建の建物にベースシア係数(必要耐力)0.4にする必要があり、青葉山・長町に比べ2倍程度耐力を持たせなければならない。

$C_b=0.2$ で9階建($T=0.61$)の建物でも同様の検討をしてみる。この時、鉦町で $\mu=4.06$ 、仙台駅前で $\mu=1.94$ 、青葉山で $\mu=2.29$ 、長町で $\mu=2.84$ である。図中の■印は、初期周期0.61(s)、 $\mu=1.90$ のところを示す。この点をみると $C_b=0.43$ である。図中の◆印は、初期周期0.61(s)、 $\mu=2.30$ のところを示す。この点をみると、 $C_b=0.33$ である。図中の×印は、初期周期0.61(s)、 $\mu=2.80$ のところを示す。この点をみると、 $C_b=0.26$ である。

以上から、鉦町での変形を仙台駅前での変形に抑えるためにベースシア係数を0.43、青葉山での変形に抑えるためにはベースシア係数を0.33、長町での変形に抑えるためにはベースシア係数を0.26にする必要がある。つまり、鉦町での変形を他の3地点での変形に抑えるためには、仙台駅前に比べ2.1倍程度、青葉山に比べ1.6倍程度、長町に比べ1.3倍程度耐力を持たせなければならない。

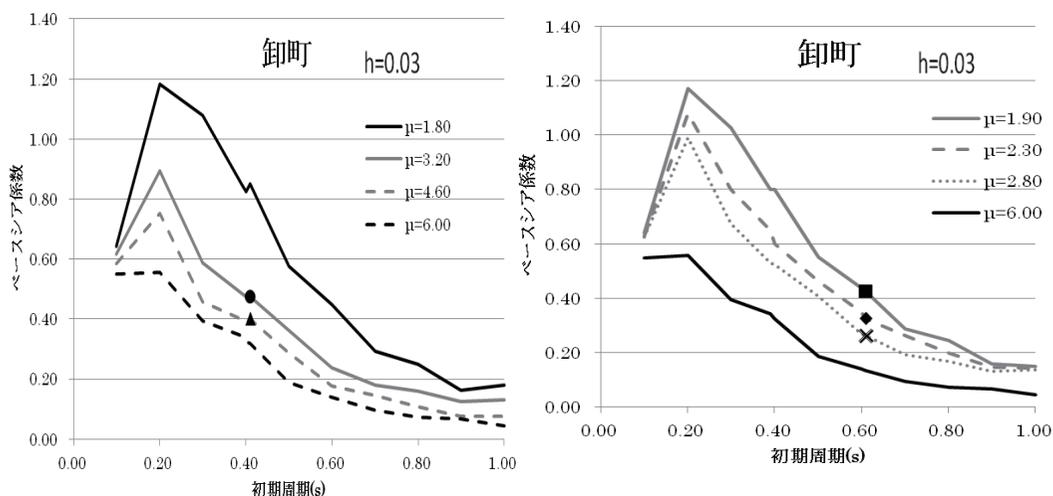


図6 鉦町の必要耐力スペクトル

7. 実被害との比較

2011年東北地方太平洋沖地震の地震動による被害として、仙台市若林区鉞町2丁目のRC造2階建の建物と仙台市若林区鉞町3丁目のRC造3階建の建物を取り上げる。写真1に2つの建物の被害状況を示す。

左の写真が鉞町2丁目のRC造2階建の建物の被害状況である。この建物は1階壁が弱軸方向に層崩壊し、2階隅柱はせん断破壊している。右の写真は鉞町3丁目のRC造3階建の建物の被害状況である。この建物はねじれてせん断破壊している。

以上の被害からこの2つの建物は大破であるので、図4の $\mu = 6.00$ の必要耐力スペクトルをみる。RC造2階建・3階建の建物より、初期周期0.10(s)~0.20(s)に注目すると、鉞町でのベースシア係数が他の3地点よりも大きい。つまり、持たせなければならぬ耐力が大きく、他の3地点比べそれだけ地震力を受けている。

また、ベースシア係数が約0.55より、図5の $C_b = 0.6$ の必要塑性率スペクトルをみる。初期周期0.10(s)~0.20(s)に注目すると、他の3地点に比べて鉞町では塑性率が大きく、想定した被災度は中破~大破を示していることから、この2つの建物の場合、概ね実被害と想定が合っている。

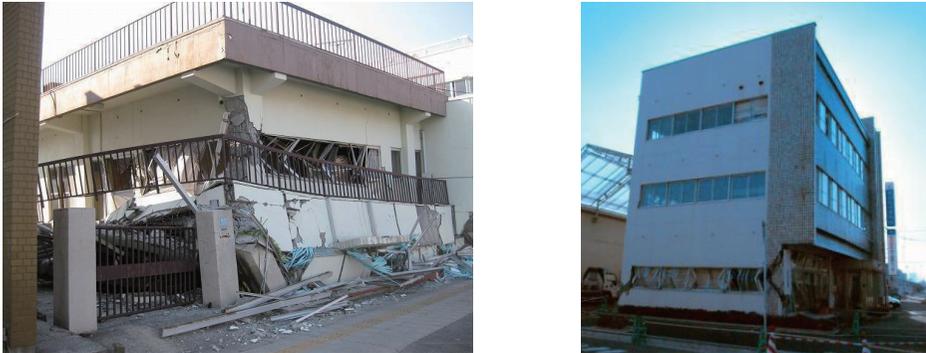


写真1 鉞町2丁目のRC造2階建の建物(左)と3丁目(右)のRC造3階建の建物の被害状況

8. まとめ

今回、仙台市域の地盤条件の異なる4地点で2011年東北地方太平洋沖地震の際に観測された地震記録を用い、階数の異なる建物の非線形応答に及ぼす影響を検討した。その結果、必要塑性率スペクトルは、与える強度(ベースシア係数)によって変形の大きさは異なるが、特に短周期で比較的地盤の固い仙台駅前と比べて、軟弱地盤である沖積平野である長町・鉞町では変形が大きくなっている。また、必要耐力スペクトルはやはり短周期で仙台駅前と比べて、長町・鉞町は耐力を持たせなければならぬ。これらの結果は、仙台市域のサイズミック・マイクロゾーニングのための貴重な基礎資料となると思われる。

[参考文献]

- 1) 大野・源栄：2011年東北地方太平洋沖地震とその余震における仙山市内の強震動特性、日本地球惑星科学連合, MIS036-P72, 2011. 5
- 2) 平成14年度仙台市地震被害想定調査報告書, 2002年, 仙台市
- 3) 大田俊一郎：周期性を考慮した地震動の破壊指標に基づく建物被害推定に関する研究、東北大学卒業論文, 2001
- 4) 岩崎智哉、源栄正人：入力特性を考慮した仙台地域への地盤増幅特性、日本建築学会東北支部研究報告集, pp. 189-192, 2000. 6
- 5) 柴田明德 著：最新 耐震構造解析 第2版 森北出版(2003) pp. 113-144
- 6) 源栄正人：東日本大震災における地震動と建物被害の実態と教訓、東日本大震災に関する技術講演会論文集 pp. 21-40, 2012. 2
- 7) 堀則男：地震時エネルギー応答性に基づく鉄筋コンクリート造建物の耐震設計手法に関する研究、東北大学博士論文, 1996
- 8) 源栄正人：2011年東北地方太平洋沖地震 —地震被害調査速報—, 2011