

1. はじめに

2008年6月14日午前8時43分に、岩手県内陸南部を震源とする地震(M=7.2)が発生し、岩手県奥州市および宮城県栗原市で震度6強の揺れが観測された。この地震により大崎市立上野目小学校のRC造校舎は大破の被害を受けた。一方、周辺の同一の構造形式を持つ大崎市立真山・西大崎小学校の両校舎において、被害は軽微であった。

そこで本研究では、対象建物の耐震性能と破壊モードを考察し、また、限界耐力計算を用いて各小学校の本震時の地震応答を推定し、上野目小学校のみが多大な被害を受けた原因を明らかにすることを目的とする。

2. 建物概要および被害状況

2.1 建物の概要

上野目・真山・西大崎小学校と、岩出山観測点の位置関係を図-1に示す。岩出山観測点は、各小学校から最も近距離に位置する、本震時の地震波記録が観測された地震計である。上野目小学校の校舎は昭和38年に建てられ、鉄筋コンクリート造の校舎に木造下屋が付随している。骨組形式として桁行、梁間方向ともラーメン架構であり、梁間方向の一部に耐震壁が配置されている。代表的な柱断面を図-2に示す。柱断面は450×450mmと小さく、主筋・帯筋の量も少ない。真山・西大崎小学校校舎についても、平面等の構造形式、柱断面、建設年代は共にほぼ同一である。

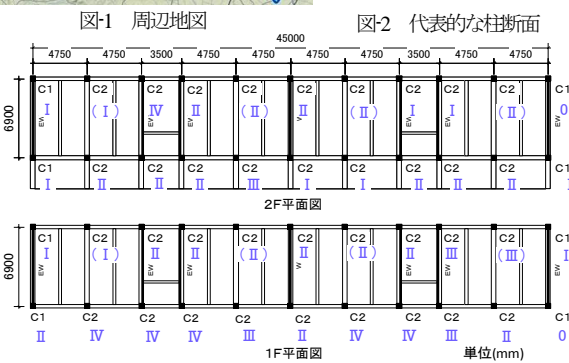
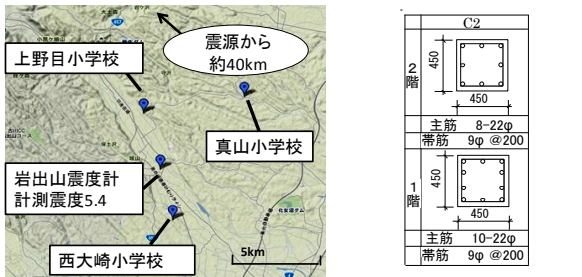


図-3 平面図及び柱直部位材の損傷度

2.2 被害状況

上野目小学校校舎の「被災度区分判定基準」¹⁾による各階の柱の損傷度を図-3の平面図中に示す。1階では、柱22本のうち、柱4本に幅10mmを超える大きなせん断ひび割れが生じ(損傷度IV)、柱3本にも大きなせん断ひび割れが生じた(損傷度III)。2階の被害は、1階と比較して損傷度は小さく、損傷度II以下の柱が半数を占めたが、局所的に損傷度の大きい柱も見受けられた。被害調査の結果、1階で大破、2階で中破の被害を受けたことが確認できた。周辺の被害状況として、道路に多数の亀裂があり、地盤が非線形化したことが推測できる。一方、真山・西大崎小学校校舎の被害については、階段踊り場部分の損傷や材端の軽微な曲げひび割れ等にとどまり、被災度は軽微で上野目小学校校舎と比較して小さかった。

3. 対象建物の耐震性能および解析モデル

3.1 耐震診断

各階桁行方向について耐震診断²⁾(第2次診断)を行った。対象建物である3小学校は、前述したとおりほぼ同一の構造形式であるため、上野目小学校の診断結果のみを示す。材料強度は「西大崎小学校外2件校舎等耐震診断及び評価業務委託上野目小学校校舎 評定報告書」に示されたものを用いた。コンクリート強度は圧縮試験の結果から1階で17.8、2階で18.0N/mm²。鉄筋強度は294N/mm²とした。

診断の結果、柱は曲げ柱と判定され、1階でC指標が0.48、F指標が2.3と、靱性型の建物であると判定された。Is値は1階で1.04、2階で1.33とIso=0.7を上回る結果となった。

3.2 破壊モードの検討

耐震診断の際に算出した部材強度に基づいて、柱の破壊モードについて検討した。図-4にせん断耐力(Qsu)と曲げ耐力(Qmu)の比較を示す。すべての柱でせん断耐力に比べ、曲げ耐力が下回り、曲げ破壊先行型と判定された。しかし、実際の被害では多くの柱でせん断破壊が確認された。そこで、耐震診断において算出した部材の強度式に関する、コンクリート強度、鉄筋強度、軸力、せん断補筋比をパラメータとして、せん断破壊した理由を検討した。図-5にはその一例としてせん断補筋比(pw)の値を変化させた際のQmuとQsuの値を示す。図によると、pwの値を0.14%(200mmピッチ)から0.05%(500mmピッチ)まで減らさないとQmuがQsuを上回らない。ピッチのばらつきを考慮しても、500mmは考えづらく、他のパラメータについても、変動軸力やコンクリートの劣化等を考慮しても、せん断破壊を予測することは難しいことがわかった。

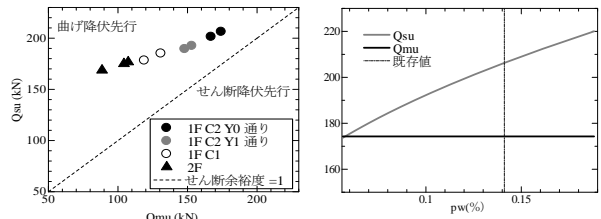


図-4 QmuとQsuの関係

図-5 パラメーターの変更(pw)

3.3 静的漸増載荷解析

解析対象は桁行方向とし、柱及び梁を、剛域を持つ線材に置換する。剛域は柱・梁のフェースまでとし、基礎はピン支持で剛梁により固定されるものとする。各線材の挙動は、材端曲げバネ、せん断バネ及び軸バネによって考慮する。各曲げバネ、せん断バネのひび割れ強度、終局強度、降伏点剛性低下率 α_y は耐震診断の材料強度を用いて、略算式³⁾により算出した。静的漸増載荷解析の結果、層間変形角が約1/250radで損傷限界(1階の梁の一端が降伏)、1/100radで層崩壊(1階のすべての柱頭・柱脚が降伏、図-7)という結果が得られた。図-6に1質点系への縮約を行い算出した耐力曲線と、岩出山観測点の本震のSa-Sdスペクトル(h=5%)を示す。

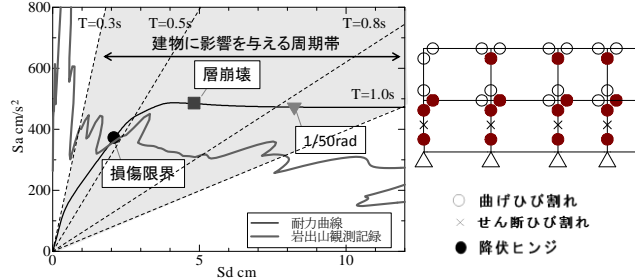


図-6 耐力曲線

図-7 ヒンジ発生状況

4. 入力地震波の推定

余震観測記録および上野目小学校の地盤増幅特性から、入力地震波の推定を行う。最大加速度・スペクトル強度、応答スペクトルの比率により、各小学校における入力地震波の比較を行い、上野目小学校について地盤応答解析により地盤増幅特性を確認し、入力地震波の倍率の推定を行う。

4.1 余震観測

2008年7月2日から8月1日の1か月間にわたって、上野目・真山・西大崎小学校において余震観測を行った。岩手・宮城内陸で9波、福島県沖で3波、岩手県沿岸沖で2波の記録が得られた。

図-8にスペクトル強度SIの比較を示す。上野目小学校の1階での入力真山小学校に対しては2倍強、西大崎小学校については2倍弱の入力があつたと推測できる。最大加速度についても概ね同様の傾向が確認できた。

各小学校における入力地震波の推定を目的として、応答スペクトルの比率を算出した。岩出山観測点に対する各小学校の自由地盤における応答スペクトルの周期ごとの比率を、岩手・宮城内陸地震6波(真山小学校では4波)の記録を対象として算出し、応答スペクトル比とした。各小学校における加速度応答スペクトル比の平均値を図-9に示す。また、地震計に長周期成分のノイズの混入が確認されているため、上野目・西大崎小学校では周期0.8秒以降、真山小学校では0.6秒以降の長周期領域では信頼性が低く、点線で示す。

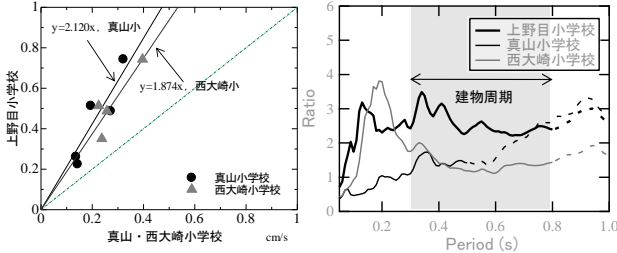


図-8 スペクトル強度の比較

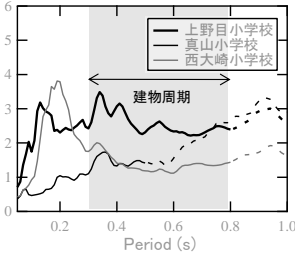


図-9 加速度応答スペクトル比

4.2 上野目小学校の地盤増幅特性

上野目小学校のボーリングデータ(図-10)から、各層におけるせん断波速度を算出し、上野目小学校の表層10mにおける地盤増幅特性を求めた。図-11に増幅スペクトルを示す。ボーリングデータを用いたため、2次元的な表層の地盤情報については考慮に入っていない。

弾性(線形)と等価線形化による地盤の非線形性を考慮した増幅スペクトルの比較を行う。線形では、0.1~0.2秒の短周期成分に増幅が確認できるが、非線形では0.2秒以降の長周期領域に増幅が確認できた。そのため、地盤の非線形化が生じた地盤では、短周期成分の入力地震波成分は減少し、長周期成分で増幅されることがわかる。

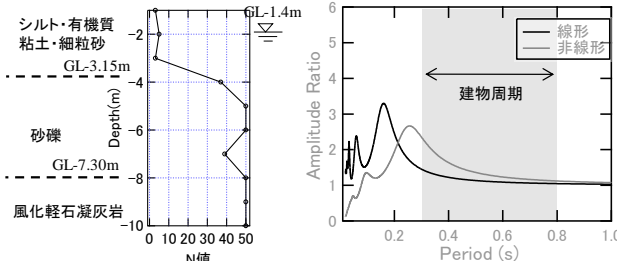


図-10 上野目小ボーリングデータ

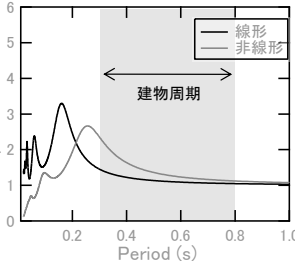


図-11 上野目小増幅スペクトル

5. 限界耐力計算による応答値の推定

各小学校における本震時の応答を推定するために、岩出山観測点に対する各小学校の応答スペクトルの周期ごとの比率を、岩出山の本震時の記録に掛けあわせることで、本震時のSa-Sdスペクトルを推定し、限界耐力計算により本震時の応答の推定をおこなった。また、上野目小学校については、周

辺の道路の亀裂等の被害状況から、地盤の非線形化が考えられ、増幅スペクトルの非線形と線形の倍率の比をとり、地盤の非線形化に対する影響も考慮に入れた。

図-12に応答スペクトルの比率の平均値を用いて建物の塑性化による減衰補正を行ったSa-Sdスペクトルを用いて、各小学校の本震時の応答値の推定を行った結果について示す。

表-1に地震波ごとに算出した応答値とその平均値を示す。層崩壊以上の応答のものには色を付けた。1/50rad以上の地震波は1/50radとして平均値を算出した。

以上の結果から、上野目小学校で層崩壊(1/100rad)以上の応答があり、真山・西大崎小学校では損傷限界(1/250rad)以上ではあるが層崩壊には至らない結果となった。よって本震時にも上野目小学校では、他の2校と比較して、大きな地震動を受けたと考えられる。しかし、余震観測記録には周期0.8秒より長周期側の成分にノイズが混入していると思われるため、応答スペクトル比にもその影響があり、そのため、1/50rad以降の応答でやや過大に評価されている可能性がある。

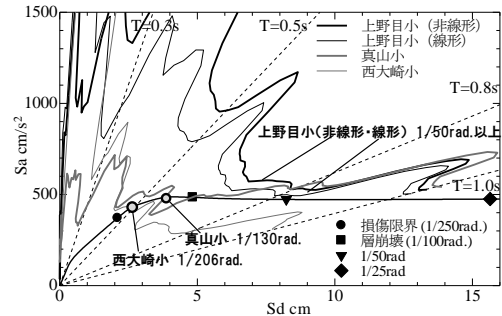


図-12 応答スペクトル比による応答値の推定

表-1 各推定地震波の応答値

余震発生日時	上野目(rad.)		真山(rad.)	西大崎(rad.)
	線形	非線形		
7/7 15:14	1/66	1/50以上	1/270	1/115
7/14 23:56	1/67	1/50以上	1/131	1/180
7/29 0:55	1/50以上	1/50以上	1/250	1/250
7/29 16:27	1/116	1/107	-	1/285
7/29 16:35	1/102	1/97	-	1/250
7/30 10:15	1/50以上	1/50以上	1/250	1/250
平均	1/68	1/60	1/207	1/202

6. まとめ

対象建物の基本的な耐震性能の確認と、余震観測・地盤増幅特性から各小学校の本震時の応答の推定を行った。結果を以下にまとめる。

耐震診断では、基準値を上回り、高い耐震性能を保持していたことが分かった。しかし、解析結果からは部材の破壊モードは曲げ破壊であったが、上野目小学校の校舎では、せん断破壊により耐力が低下したと考えられる柱が多数確認された。その結果を受けて、破壊モードに対する検討を行ったが、一つの理由では説明がつかなかった。

地盤の増幅特性と応答スペクトル比により、入力地震波の推定を行った。その結果、入力的大小により3小学校で被害レベルの差が生じ、上野目小学校において、大振幅の地震波の入力により、多大な被害をもたらしたことが推測できた。

破壊モードに違いが生じたことや、地震波の入力が増幅された要因について、切り土・盛り土の影響やねじれ振動等が今後の検討要因として考えられる。

[参考文献]

- 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2001.9
- 2001年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 2001.10
- 鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1997.7
- 前田匡樹他: 2008年岩手・宮城内陸地震により被災した学校建築物の調査と余震および常時微動観測 JAEI 梗概集 pp.324-332 2008.11