

論文 2011 年東北地方太平洋沖地震における宮城県内の RC 造校舎の耐震性能と被害傾向の検討と被害事例

高橋 香菜子*1・Hamood AL-WASHALI*1・前田 匡樹*2

要旨: 2011 年東北地方太平洋沖地震で被災した宮城県内の小中学校 RC 造校舎の耐震性能と上部構造の被害傾向の検討を試みた。耐震化が比較的進んでいる宮城県内は、大破被害は建設年代が古く I_s 値の低い建物のみに見られ、1995 年の兵庫県南部地震の被害と比較して大幅に少なかったことから、耐震診断・耐震改修の効果が見られたといえる。しかし、新耐震設計法移行初期に建設、もしくは I_s 値が判定基準を上回る建物であっても、第二種構造要素とならない柱や壁に損傷が集中し、中破程度の被害が生じた事例が見られた。設計範囲の破壊形式であり骨組全体の安全性は保証されているが、継続使用、修復性の点で問題となった。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 地震被害, 耐震診断・補強, 学校建築

1. はじめに

被災した建物の統計的な傾向の検討をすることは、新築建物の耐震設計法や既存建物の耐震診断・耐震改修の効果を検討する上で重要である。2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震では、東北地方を中心に多くの建物が被災した。日本建築学会の学校建築委員会・耐震性能等小委員会(主査:壁谷澤寿海・東大地震研究所)では、文部科学省の委託を受け、被災地域の文教施設の被害調査と被災度判定を実施した。筆者らはこの調査活動の一部として、宮城県内の RC 造学校建築物の被害調査を行った。本研究ではこの調査結果による被害傾向と、建築年代や耐震補強の有無、 I_s 指標などの耐震性能評価指標について、比較検討を行った。また、本地震における典型的な被害事例について報告した。なお、本地震では甚大な津波被害や杭、基礎被害も見られたが、本研究では震動による上部構造の被害のみを対象としている。

2. 宮城県内 RC 造学校校舎の耐震性能の傾向の分析

2.1 建物データベースの作成

本地震における被害調査を行った地域のうち、主として震動被害が見られた地域である仙台市、大崎市、塩釜市、七ヶ浜町、栗原市内全ての公立小中学校 RC 造校舎 546 棟(以下 B 群)に関して施設台帳の情報を基にデータベースの作成を行った。また、実際に被害調査を行った建物(以下 A 群)に関しては、被害調査結果や構造図面等を基に、より詳細なデータベースを作成した。表-1 に入力項目を示す。なお、分析は渡り廊下、給食堂等小規模なものは除いて一般的な校舎で行った。

2.2 耐震性能の傾向

(1) 建設年と耐震性能との関係

図-1 に建設年度と耐震性能別の統計を示す。また、

表-1 データベースの入力項目

名称(学校・棟・台帳番号)・所在地・調査者・依頼書委託日・調査日・判定書発行日・判定結果・構造種別・階数・延床面積・建設年・基礎種別・ <u>桁行の方位</u> ・震度(本震・最大余震)・応急危険度判定結果・基礎構造の被災度・沈下量 S [m]・傾斜 θ [rad]・上部構造の被災度・耐震性能残存率 R ・津波被害の有無・所見・耐震診断の実施状況・耐震補強の実施状況・補強前後の I_s 指標・補強前後の C_{TSD} 値・最大被災の方向及び階・コンクリート強度 σ_B ・損傷度(0~V)及び鉛直部材別(せん断柱・曲げ柱・柱なし壁・柱型付き壁・両側柱付き壁)本数
--

注) 下線部は A 群 B 群共通, その他は B 群のみの入力項目

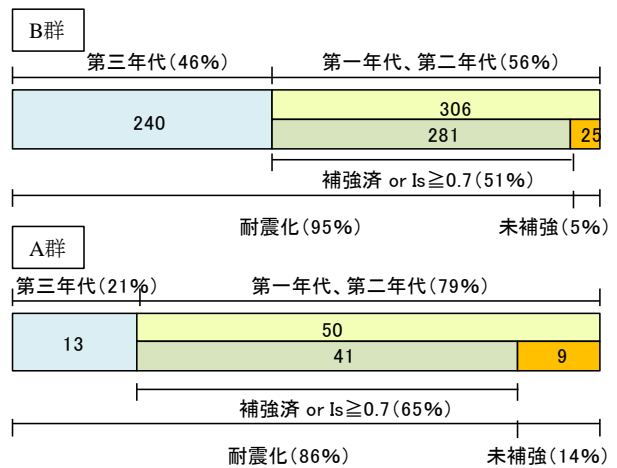


図-1 宮城県内小中学校校舎の耐震性能別統計

図-2 に耐震診断・耐震補強実施状況の推移を示す。ここで、RC 造校舎の構造性能は建築基準法施工令の改正によって以下の三年代に分類できる²⁾。

第一世代: 1971 年以前に建設されたもの

*1 東北大学 工学研究科 都市・建築学専攻 修士課程 (学生会員)

*2 東北大学 工学研究科 都市・建築学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

第二年代：1972年以降1981年以前に建設されたもの

第三年代：1982年以降に建設されたもの

被害調査地域での内訳は、第一年代が12%、第二年代が43%、第三年代が45%である。建設年度が複数年にまたがっているものは、最初に建設された部分の竣工年を採用した。B群は上述した地域内のRC造校舎546棟であり、A群は各市町村教育委員会の依頼に基づき前述の小委員会で被害調査を行った63棟について示している。したがって、上下の図を比較しても正確な被害割合を知ることができないが、大まかな被害の傾向をみることができる。即ち、各教育委員会から調査依頼を受けた学校施設は、ある程度以上の構造被害が生じた学校施設であることから、A群の棟数を被災建物の数とみなし、B群の全建物数に対する割合から、被害率の推定ができる。B群の第三年代は、全棟数の約4割を占めているが、A群の調査建物では2割程度と約半分である。調査依頼がない建物で被害が小さいと考えれば、第三年代の建物の被害率は小さかったといえる。また逆に、第一年代、第二年代のうち、 I_s 指標が0.7未満かつ未補強のもの（図の耐震性無）は、B群の全体数に占める割合5%に対し、A群の調査建物数に占める割合は14%である。このことから、1981年以前建築で I_s 指標が0.7未満かつ未補強の建物の被害率は大きかったといえる。

(2)耐震補強の有無と耐震性能との関係

文部科学省の調査では、宮城県の校舎、体育館等を含めた公立小中学校施設の耐震化率は93.5%と、全国平均である73.3%を大きく上回っている¹⁾。

補強前及び現状の I_s 値と $C_T S_D$ 値の関係性を示したグラフを図-3に示す。ここで、 I_s 値は、保有耐力を建物の重量で除した累積強度指標(C_T)、靱性指標(F)に、建物全体の形状(S_D)や経年(T)等を考慮して算出される「構造耐震指標」である²⁾。同図には、 I_s 値を $C_T S_D$ 値で除すことで算出した見かけの靱性指標 F 値も示した。補強後の I_s 値は概ね0.7の下限値付近に分布が集中しているのに対し、 $C_T S_D$ 値は補強後にも分布に広がりが見られる。また、第一年代の方が $C_T S_D$ 値の補強後の上昇がより大きい、すなわち強度型の補強設計が行われる傾向がみられた。現状で全ての建物の $C_T S_D$ 値は0.3を上回っている。また、 F 値が0.8から1.0程度と比較的小さく、せん断部材で終局状態が決まる建物では未補強のものも存在するが、 F 値が1.27から3.2の範囲内の建物は全て耐震補強が完了していることが判る。

3.被害傾向と耐震性能の比較検討

1995年兵庫県南部地震と2011年東北地方太平洋沖地震の学校校舎の被害率をそれぞれ図-4、図-5に示す。ここで、兵庫県南部地震は全数調査が行われた神戸市灘

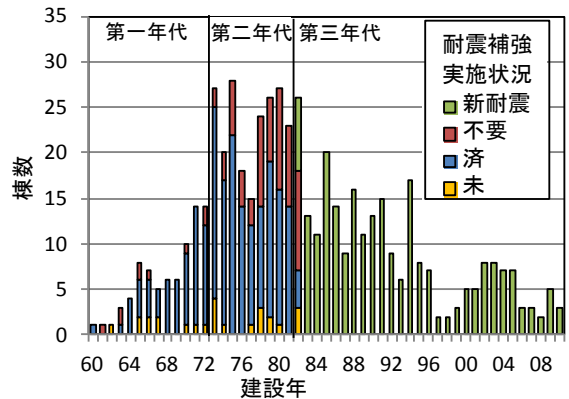


図-2 耐震補強実施状況の推移

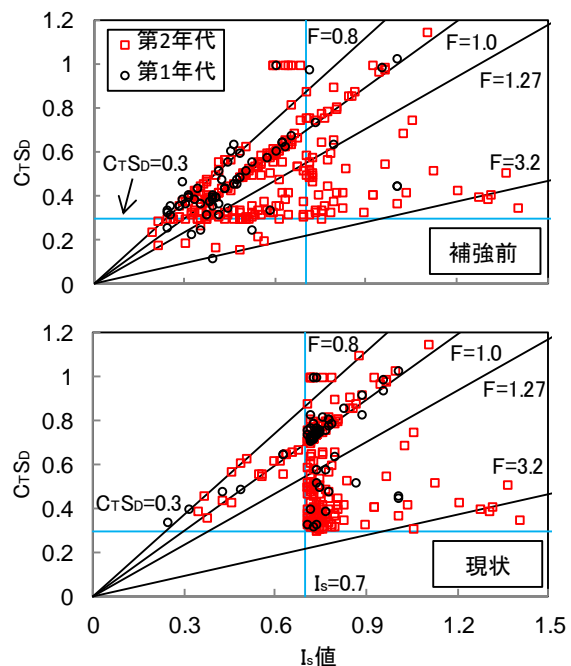


図-3 耐震補強前及び現状の I_s 値、 $C_T S_D$ 値の変化

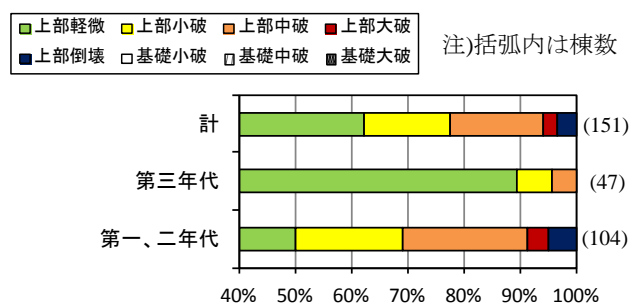


図-4 被災度割合 (1995年 兵庫県南部地震)

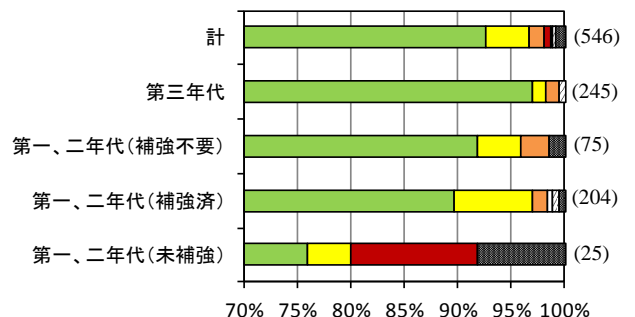


図-5 被災度割合 (2011年 東北地方太平洋沖地震)

区・東灘区 151 棟の統計で、東北地方太平洋沖地震は仙台市・大崎市・塩釜市・七ヶ浜町・栗原市内の小中学校 546 棟の統計である。竣工年は第二年代以前と、第三年代に分類した。宮城県内の小中学校に関しては、補強の有無に関しても分類し、また、判定依頼がなく、被害調査を行っていないものは「軽微」と分類した。建物の被災度は、「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針³⁾」を基に、最大被災階、方向の耐震性能残存率 R から判定した。なお、本調査では震災後早期に広域かつ多くの建物について調査・復旧判断をする必要性から、 R は次頁の式(1)の略算法を用いて算出した。

各地震の年代別被災度を比較すると、兵庫県南部地震では、第一年代、第二年代の被害率が大きい。東北地方太平洋沖地震でも同様に第一年代、第二年代の被害が比較的甚大である。第三年代で、中破・小破の被害率は、兵庫県南部地震で 10%程度であるのに対して、東北地方太平洋沖地震では 3%程度であった。第一年代、第二年代では、特に未補強の建物の被害率が最も高い。耐震補強不要と判定された建物や、耐震補強済の建物は、未補強の建物より被害率が低く、大破した建物は存在しなかった。中破・小破の被害率は 10%弱程度で、新耐震の建物より高い傾向が見られた。

図-6 に建設年度別の各被災度の棟数の推移を示す。第三年代では大破被害は見られなかった。また、新耐震設計法施行初期 (1986 年以前) では、小破や中破と判定された建物も存在したが、1987 年以降に関しては、上部構造は軽微以下の被害のみであった。以上より、建設年代が古く、耐震性能が低い建物ほど被災度が大きくなる傾向が見られた。一方で、数は少ないが、判定基準を満たす建物で中破と判定された建物が存在した。

図-7 に、 I_s 値と被災度区分判定による構造躯体の耐震性能残存率 R の関係を示す。耐震補強された建物は、プロットを丸で囲んでいる。 I_s 値が低く耐震補強されていない建物は被害程度が大きく、耐震性能残存率 R には相関関係が見られた。また、耐震補強済の建物は、 $R \geq 75$ (小破に近い中破以下の被害) であった。

図-8 に 1995 年兵庫県南部地震、図-9 に 2011 年太平洋沖地震によって被災した RC 造校舎の $C_T S_D$ 値と I_s 値の関係を示す。兵庫県南部地震の場合は、倒壊あるいは大破した建物は $C_T S_D$ 値が 0.5 以下の範囲内にあり、 $C_T S_D$ 値が 0.45 程度以下の建物の大部分で中破以上の被害が生じている、すなわち I_s 値が判定基準を満たしている建物であっても、強度指標が小さい場合に被害が大きくなる傾向が見られるという知見が得られている⁴⁾。しかし、図-9 からはそのような明確な傾向は見られなかった。この理由として、施設台帳等のデータに記載されている $C_T S_D$ は E_0 が評価された F 値に対応する強度指標であり、

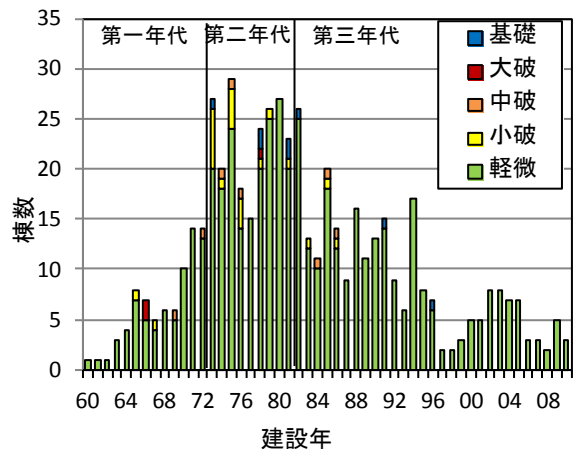


図-6 被災度の推移

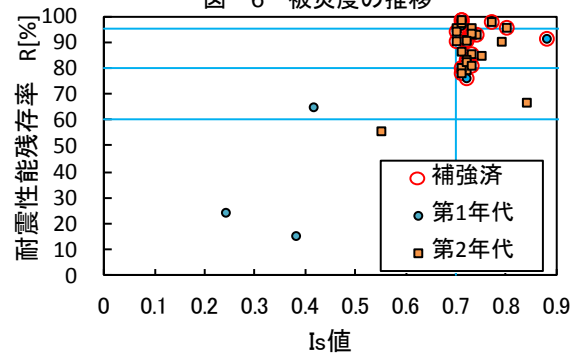


図-7 I_s 値-耐震性能残存率 R

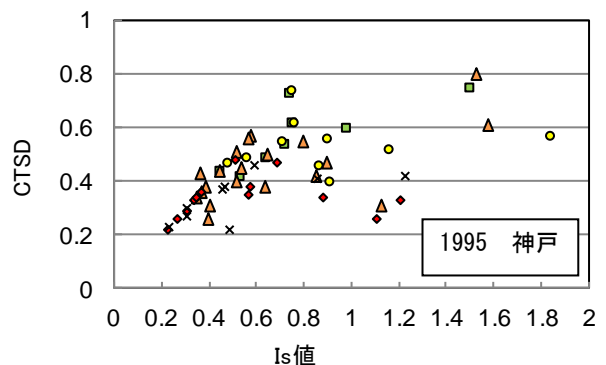


図-8 I_s 値- $C_T S_D$ 値 (1995 年 兵庫県南部地震)

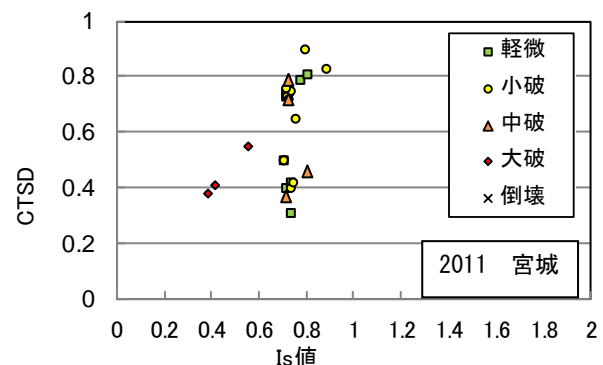


図-9 I_s 値- $C_T S_D$ 値 (2011 年 東北地方太平洋沖地震)

必ずしもそれが最大耐力を発揮した F 値に対応する強度指標に対応しているわけではないためと考えられる。そこで、詳細な構造図面等を用いることなく、建物の保有水平耐力時の強度レベルを表すものとして、被災度区分

判定略算法の耐震性能残存率 R の算定 (式(1)) に用いられる A_{org} を用いて、簡便な評価を行った。

$$R = \frac{\sum A_j}{A_{org}} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 A_{org} は、鉛直部材をせん断柱、曲げ柱、柱なし壁、柱型付壁、両側柱付壁の 5 種類に分類し、強度指標 C の比を 1 : 1 : 1 : 2 : 6、靱性指標 F を全て 1 と仮定して強度比率を求め、各層毎の和として算出した値である。したがって A_{org} は $F=1$ の変形角で算定した I_s 値として評価することができる。また、 $\sum A_j$ は、前述した強度比率を、各部材の損傷度に応じた耐震性能低減率 η によって低減した被災後の強度比率の和である。図-10 に略算法の算定フローを簡単に示す。なお、鉄骨ブレースによる補強が行われているフレームは両側柱付壁としてカウントした。ここで、典型的な学校建物の計算例 (建設年代が古く片廊下平面の Type.1、建設年代が比較的新しく中廊下平面の Type.2) を表-2 に示した。ここでは桁行方向は純ラーメン構造であると仮定して A_{org} を求めた。

図-11 に A_{org} を 1 層あたりの床面積 A_f (延べ床面積/階数) で基準化した値を横軸に、 I_s 値を縦軸にとり、被災度との関係を示した。ここで、耐震補強済の建物はプロットを丸で囲んでいる。 $A_{org}/A_f < 0.12$ 程度の範囲でかつ未補強建物の被災度が大きいという傾向がみられた。

図-12 に A_{org}/A_f と耐震性能残存率 R の関係を示す。第一年代、第二年代建設で A_{org}/A_f が低く、未補強の建物は R が小さい、即ち被害が大きい傾向が見られた。一方で第三年代建設の建物は R との相関があまり見られなかった。これは、断面寸法やせん断応力度等の材料強度等により強度の仮定が異なること、靱性能の影響を考慮に入っていないことが原因だと考えられる。今後詳細な図面や材料試験の結果などを反映するとともに、上述したブレース等による補強や強度、壁の種類、強度などを考慮することで評価精度は向上すると考えられる。

4 被害事例

耐震化が比較的進んでいる宮城県内は、上部構造の大破以上の被害は 3 棟と少なく、耐震診断・耐震改修の効果があつたと考えられる。しかしながら、耐震改修不要と判定された、あるいは新耐震設計による建物にも、第二種構造要素とはならずせん断破壊を許容されている柱及び耐震壁や雑壁等に損傷が集中し、継続使用の点で問題となった事例も見られた。ここでは上部構造の典型的被害事例について報告する。

4.1 建設年代が古く、耐震性能が低いため大破した事例 (S 中学校)

校舎 2 棟が大破と判定された S 中学校の配置図を図-13 に示す。建築年は西棟、東棟ともに 1966 年である。

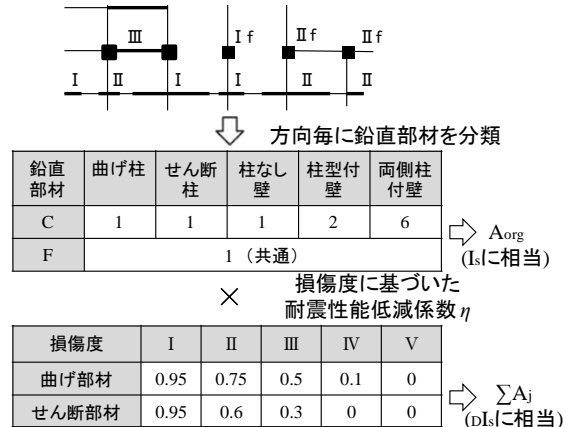


図-10 耐震性能残存率略算法のフロー

表-2 A_{org} 計算例

	Type.1	Type.2
プラン		
pA_f	90m ²	148.5m ²
pA_{org}/pA_f (梁間)	10	8
pA_{org} (桁行)	6	4
pA_{org}/pA_f (桁行)	0.067	0.027

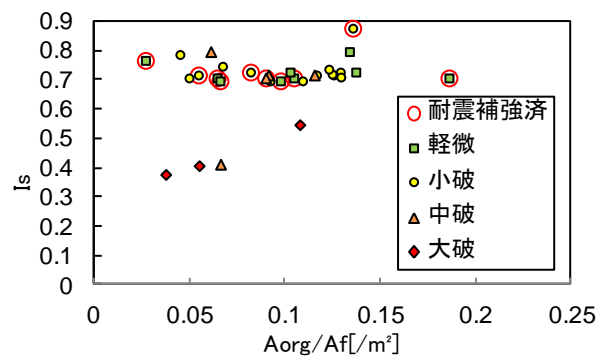


図-11 $A_{org}/A_f - I_s$ 値

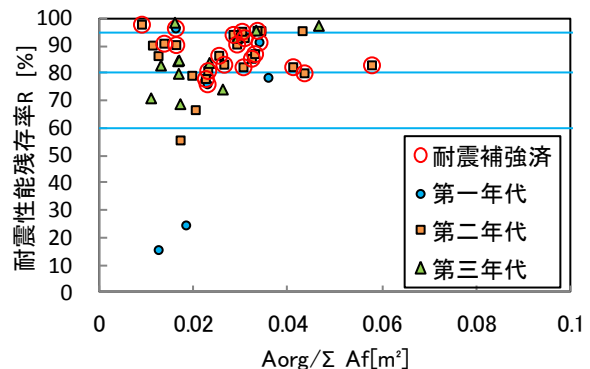


図-12 A_{org}/A_f - 耐震性能残存率 R

表一三に各棟1階の耐震診断および被害調査結果を示す。西棟は、1階梁間方向 ($I_s=0.41$) において最大被害が生じ、耐震性能残存率 $R=25\%$ で大破と判定された。また、東棟は、1階桁行方向 ($I_s=0.38$) において最大被害が生じ、耐震性能残存率 $R=16\%$ で大破と判定された。構造形式は、片廊下平面タイプで片持ち梁を跳ね出し廊下部分を支持する **Balanced Frame** 形式を採用している。1995年兵庫県南部地震の場合でも、**Balanced Frame** 形式を採用した建物8棟のうち、倒壊2棟、大破2棟、中破4棟と大きな被害が確認されている²⁾。1階柱脚部のコンクリートの圧壊及び主筋屈曲(写真一1)、耐震壁の損傷(写真二、写真三)が観察され、当該建物は改築が決定している。宮城県ではこのような建設年代が古く、既存不適格である建物は少ない(調査地域内では5%)が、このような大きな被害が生じた事例も見られた。

4.2 耐震補強不要 ($I_s > 0.7$) と判定されたにも関わらず中破と判定された事例 (T小学校西棟)

図一四にT小学校の配置図を示す。敷地は台地上に位置し、周辺地盤には20cmほどの沈下が確認された。図一五に1階桁行方向の累積強度指標 C と、靱性指標 F との関係を示す。また、同図に T 値、 S_D 値も示した。

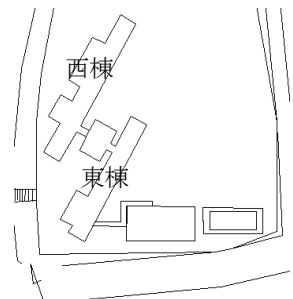
1973年建設の東棟は、部材の大部分がせん断型で構成される強度型であり、1階桁行方向において、 $I_s=0.53$ ($F=1$) と診断された。桁行方向の耐震補強により、1階、2階に各2か所の鉄骨ブレース、及び1階から3階まで各2か所の耐震壁が増設され、 I_s 値は0.73 ($F=1$) に上昇した。ブレース補強を行っていない3階桁行方向の被害が最大であり、耐震性能残存率 $R=81$ 、被災度は小破と判定された。

一方、1974年建設の西棟は耐震診断の結果、靱性型 ($F=1.75$) の建物と診断され $I_s=0.80$ となり、補強不要と判定された。なお、 C 値の最大値は0.50 ($F=1.27$) であり、東棟の補強後の $C=0.87$ ($F=1$) はもちろん補強前の $C=0.7$ ($F=1$) と比較しても小さい。この事例のように、比較的強度の低い靱性型建物に被害が生じるのは、兵庫県南部地震でも見られた傾向である。ここで、西棟の1階桁行方向の損傷度を記入した伏図を図一六に示す。

Y4、Y5 通の柱は垂壁、腰壁の存在により短柱となり、損傷の大きい柱が多い。Y4 通の柱には図面上スリットが設けられ曲げ柱として設計されていたがスリットの効果を発揮されず、写真一四に示すようにせん断破壊したのが見られた。せん断破壊した柱は第二種構造要素とはならず周辺部材に軸力の再配分が行われ、より大きな変形により地震力を負担することで、骨組全体の安全性は保たれた。1階桁行方向で被害が最大であり、耐震性能残存率 $R=67$ 、中破と判定された。このように実際の被害状況は診断結果の破壊モードと概ね一致しており、



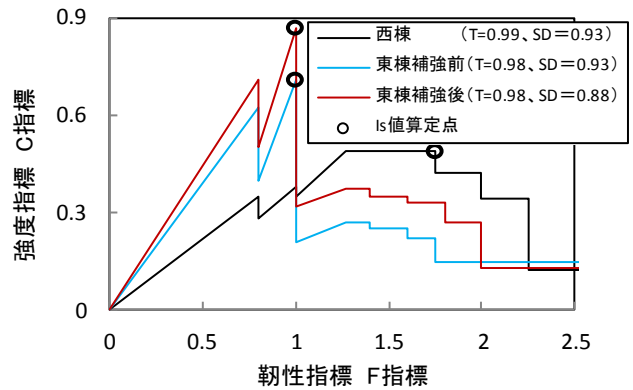
図一三 S中学校配置図



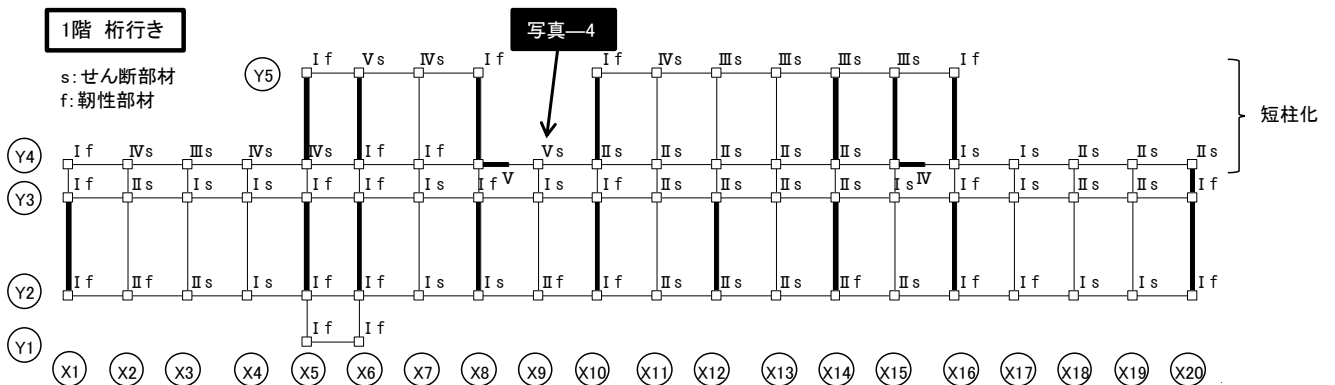
図一四 T中学校配置図

表一三 S中学校耐震診断及び耐震性能残存率 R

	方向	I_s	$C_T \cdot S_D$	F	R[%]
西棟	梁間	0.41	0.43	1.0	24
	桁行	0.24	0.32	0.8	33
東棟	梁間	0.38	0.4	1.0	31
	桁行	0.32	0.42	0.8	16



図一五 C-F 関係 (T小学校1階桁行方向)



図一六 T小学校西棟損傷度評価図

倒壊防止の観点では耐震診断や性能評価の方法として問題はないが、建物の使用者や所有者にとって地震後に継続使用が不能となった点では、学校施設は特に地震発生後の防災拠点として利用されることもあることから問題となり、今後の地震防災対策の検討課題と思われる。

4.3 新耐震設計法以降建設された建物で中破と判定された事例(N小学校特別教室棟)

1985年建築の特別教室棟は中破、エキスパンションジョイントにより接続された1972年建築の普通教室棟は軽微な被害であった。図-17に配置図を示す。

特別教室棟は4階建ての中廊下型の建物である。柱の大部分は腰壁部分に鉛直構造スリットが設けられ、損傷は軽微であった。大きな損傷は雑壁や耐震壁に見られ、これらの部材が地震力を負担したと考えられる。設計通りに応力を負担したとすることができるが、一部、開口部により短スパンとなった垂壁や袖壁(写真-5)部分のせん断破壊により、当該部材に取りつく構造部材にも大きな損傷が見られた。1階では耐震壁の数が多く、最大被害は2階の桁行方向であり耐震性能残存率 $R=69\%$ 、被災度は中破と判定された。

一方で普通教室棟は新耐震設計法以前に建設された3階建て片廊下型の平面タイプの建物であり、2階のみ耐震壁の増設による補強が行われた。最小 I_s 値は2階桁行方向で0.74 ($C_1S_D=0.48$)である。大部分の柱が無被害から損傷度Iと、甚大な被害は見られなかった。

調査範囲内で新耐震設計法による建物で中破判定は3棟あり、いずれも第三年代初期(1984年～1986年)に建設された。1987年以降建設された建物の被害は軽微以下であり、第三年代建設の建物数が第一、第二年代と比べ多いことから、被害率は小さかったといえる。

5. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震で被災した宮城県内の小中学校RC造校舎の耐震性能と上部構造被害の傾向の検討を試みた。また、本地震における典型的な被害事例について報告した。以下に得られた知見を示す。

(1) 宮城県内のRC造小中学校校舎の耐震診断は概ね終了しており、既存不適格については耐震補強が行われ、耐震化率も高い。兵庫県南部地震と比較し、被害率が小さく、大破被害は耐震補強が未補強の建物のみであったことから耐震診断、耐震補強の効果がみられたといえる。

(2) 新耐震設計法施行初期に建設された、あるいは耐震補強不要と判定された建物であっても、第二種構造要素とはならずせん断破壊を許容されている柱及び耐震壁や雑壁等に損傷が集中することで中破程度の被害が生じた事例が見られた。構造骨組の安全性は保証されているが、修復性や継続使用の点で問題が生じた。



図-17 N小学校配置図



写真-1
柱脚圧壊



写真-2
耐震壁のコンクリート剥落



写真-3
開口付耐震壁のスリット
プによる水平ひび割れ



写真-4
短柱のせん断破壊



写真-5
袖壁付柱の
損傷状態

謝辞

本調査に際しては、地震災害直後の忙しい中、構造図面や施設台帳等の資料提供、被害状況説明をして頂いた宮城県内各市町村教育委員会及び各学校の関係各位に厚く御礼申し上げるとともに、被災住民の方々の生活が一日も早く旧に復することを祈願する。

参考文献

- 1) 文部科学省, 耐震診断実施率・耐震化率(都道府県別データ)(幼・小中・高・特別支援)平成22年4月公立学校施設の耐震改修状況調査結果, 文部科学省ホームページ 参照:
http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/zyosei/taishin/index.htm
- 2) 日本建築防災協会 既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断基準同解説 2001
- 3) 日本建築学会, 1995年兵庫県南部地震 鉄筋コンクリート造建築物の被害調査報告書 第II編 学校建築, 1997.3
- 4) 財団法人 日本建築防災協会, 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