

報告 東北地方太平洋沖地震における学校建物の機能被害とその要因分析

畑中 友*1・鈴木 敦詞*2・藤田 智己*3・船木 尚己*4

要旨: 東北地方太平洋沖地震による文教施設の被害調査を実施した。対象は、東北耐震診断改修委員会により評定を受けた 82 棟の RC 造校舎である。本論は、評定および改修の妥当性を検証するため、被害調査の結果を既往の研究による Damage Level で分類した。その結果、地震動による建物被害が軽微な構造被害を示すレベルに留まっていたことから、耐震診断・耐震改修の有効性を確認できた。しかし、継続使用が求められる学校建物の一部で、その事項を満足できなかった事例が見られた。そこで、機能維持を視野に入れた評価手法を構築するための基礎資料を得る目的で、使用不可となった建物の被害事例とその要因について示した。
キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 文教施設, 被害調査, 耐震診断, 耐震改修, 機能維持

1. はじめに

東北地方では、建築物の耐震診断および耐震改修の促進を図るべく、平成 9 年に東北耐震診断改修委員会（委員長：柴田明德 東北大学名誉教授）が設置され、これまでに約 1,900 棟の建物を対象に耐震診断・改修に関する評定を行ってきた。2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、宮城県栗原市築館町で震度 7 を記録するなど、東日本の広範囲にわたって非常に大きな揺れを観測した。これまでに耐震診断・改修された建物が、大きな地震を経験した例がほとんどなかったことから、筆者らは評定を受けた学校建物を中心に被害調査を実施してきた¹⁾。それらの結果、現行の耐震判定指標（ $I_{so}=0.7, C_{TU} \times S_D=0.3$ ）を満足している建物の場合、その被害程度は、岡田・高井の Damage Level³⁾（以降、DL とする。）に基づいて整理すると、概ね仕上げ材の剥落を示すレベル 2（以降、D2 とする。）の範囲内に留まっていたことが分かった²⁾。

その一方で、一部の学校では、被害により建物が使えない状態となり、仮設校舎を建設したり、他校を間借りするなど対応して授業が行われている事例も見られた。学校建物は、多くの児童・生徒が地震後も継続して活動を行われなければならない場所であり、建物機能を地震後にも継続して確保するための新たな耐震性能評価手法の構築が急務であると考えられる。

本論文においては、被害調査の結果を DL で分類し、これまでに実施してきた耐震診断、および耐震改修の有効性を確認するとともに、継続使用を視野に入れた新たな評価手法を構築するための基礎的な資料を得ることを目的として、使用不可能になった建物の代表的な被害事例を示し、その主な要因について報告するものである。

2. 被害調査結果の概要

2.1 調査対象建物と調査方法

調査対象建物は、東北耐震診断改修委員会にて評定を受けた岩手県陸前高田市、宮城県仙台市、名取市および石巻市内に所在する 49 校の学校建物（RC 造校舎）82 棟である。各市町村の調査建物の内訳、および調査期間を表 1 に示す。被害調査を行った建物の竣工年については、耐震診断の評定を受けたものであるため、すべての建物が、新耐震設計法が適用された 1981 年以前のものである。

表 1 調査対象建物の内訳と調査期間

市町村	学校数	棟数	調査期間
仙台市	23	37	2011/12/13 ~ 2011/2/23
名取市	8	14	2012/5/21 ~ 2012/6/13
石巻市	13	25	2012/8/27 ~ 2012/8/30
陸前高田市	5	6	2011/9/20 ~ 2011/9/21
合計	49	82	

建物の耐震診断結果および耐震改修の実施状況別に分類した内訳を図 1 に示す。建物は、耐震改修の実施の有無で分類し、未改修の建物については、構造耐震指標（以降、 I_s 値とする）が耐震判定指標（以降、 I_{so} とする）として定めた 0.7 を上回る建物と、それ以下のものに分けた。その結果、耐震診断によって最小 I_s 値が 0.7 以下となり、耐震改修が必要と判断されたが、未改修の建物が 7 棟、耐震改修が施された建物が 58 棟、 I_s 値が 0.7 を上回り、耐震改修が不要と判断された建物が 17 棟であった。

耐震改修の実施状況については、仙台市と名取市で改

*1 東北工業大学大学院 工学研究科 大学院生（学生会員）

*2 仙台高等専門学校 生産システムデザイン工学専攻 専攻科生（会員外）

*3 仙台高等専門学校 建築デザイン学科 助教 博士（工学）（正会員）

*4 東北工業大学 工学部建築学科 准教授 博士（工学）（正会員）

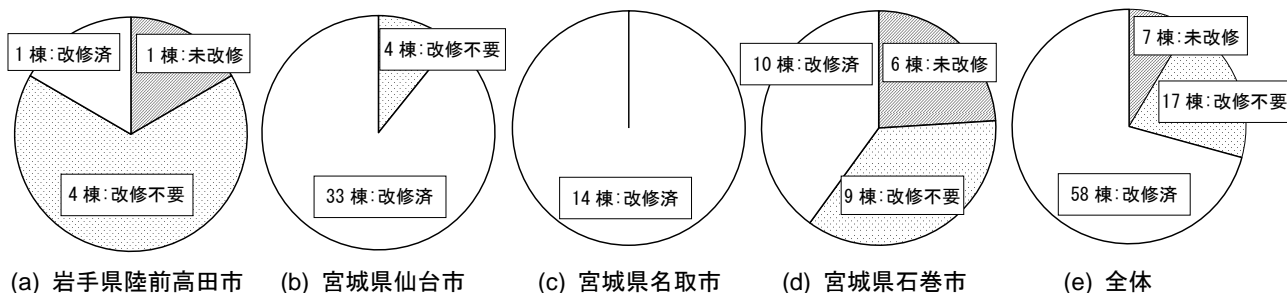


図-1 調査対象建物の分類

修化率が高い。石巻市については、耐震改修の実施計画はあったものの、地震発生時に間に合わなかった建物が数棟あったことが調査によって確認された。ここで示す建物の耐震診断の結果は、(財)建築防災協会の耐震診断基準⁴⁾に基づいて計算されたものである。

調査は、事前に評定資料から建物の竣工年、耐震診断の結果および耐震改修の実施状況等を確認し、全ての建物について、地震発生時における状況などの情報を学校関係者へのヒアリングにより収集した後、目視により建物内外の被害状況を確認した。

2.2 調査結果の概要

調査対象建物について、耐震判定指標を満足した建物と、それ以下のものに分け、それぞれの被害状況を、前述の DL で分類した結果を図-2 に示す。既往の研究³⁾より、DL は建物の被害状況により D0 から D6 の 7 段階に分類され、D0 (被害なし)、D1 (仕上げ材ひび割れ)、D2 (仕上げ材剥落)、D3 (剪断ひび割れ・構造被害)、D4 (層変形有・パンケーキ状崩壊無し)、D5 (1 階の 1/2 ~ 3/4 破壊もしくはそれ以外の層でパンケーキ状崩壊)、D6 (全層パンケーキ状崩壊) と定義される。これらの結果より、耐震判定指標を満足したすべての建物は D3 以内に収まっており、今回のような大規模地震においても、建物の倒壊による人的被害の発生を防ぐ指標として十分成立するものであると確認できた。その内訳として、D0、あるいは D1 が全体の 80% を占めている。また、非構造部材の剥落は見られるものの、構造躯体への被害がほとんどないとされる D2 まで含めると全体の 96% となった。また、評定の結果が耐震判定指標を下回った場合であっても、耐震改修が施され、その結果、耐震指標を満足した建物に大きな構造被害が見られなかったことから、その有効性についても確認できたと思われる。

しかしながら、被害により建物が使用不可となった事例も数棟であるが確認された。地震後における機能維持を考えた場合には、構造躯体だけではなく、人的・物的被害に結びつくような建物の損傷は軽減すべきであり、そのためには被害程度を D1 で抑える必要がある。それを実現するためには、上部構造の評価に重きを置いた従

来の耐震診断手法に、新たな検討事項を盛り込む必要があると思われる。そのことから、次章においては、使用不可となった建物を対象に、どのような要因で継続使用ができなくなったのかについて検証する。

図-2(a)に示すように、棟数は少ないものの、耐震指標を下回った未改修建物があったが、今回の調査においては大きな構造被害は見られず、使用不可となった事例も無かった。これについても別途検証が必要であると思われるが、今後検討することとし、本論においては対象外とする。

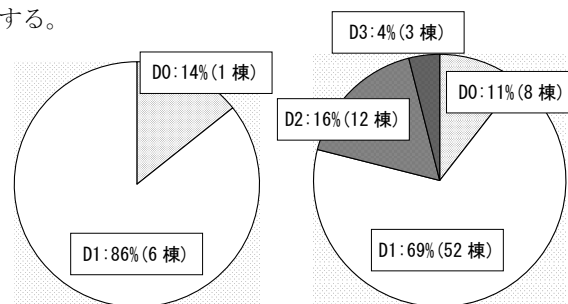


図-2 分類別被害状況

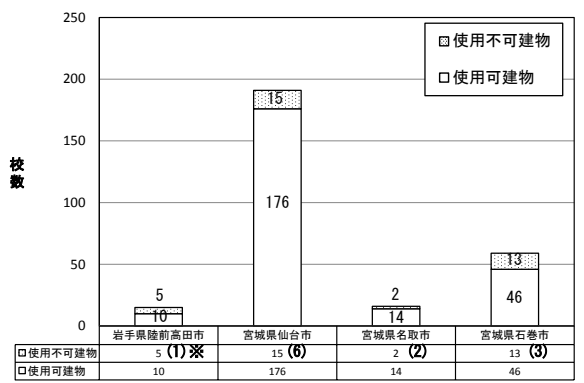
3. 使用不可となった建物の被害事例

3.1 被害建物の概要

岩手県陸前高田市教育委員会⁵⁾および宮城県教育委員会⁶⁾によると、地震により校舎が使用不可となり、仮設校舎または他校を間借りして授業を行った小中学校は、陸前高田市では 15 校中 5 校、仙台市は 191 校中 15 校、名取市は 16 校中 2 校、石巻市で 59 校中 13 校であった(図-3)。そのうち、調査を実施した建物は、陸前高田市で 1 校 (1 棟)、仙台市が 6 校 (12 棟)、名取市 2 校 (5 棟)、石巻市 3 校 (4 棟) の合計 12 校 (22 棟) である。この 22 棟に対し、使用不可となった要因について、地震動または津波の浸水によるものに大別した結果を図-4 に示す。ここで、津波によるものが 10 棟と、全体の 4 割を占めるが、地震動による被害とは異なるため、本論における検証からは除外することとした。

地震動による被害で使用不可となった 12 棟について、DL で分類した結果を図-5 に示す。この結果、D3 に分類された 3 棟の建物のうち 2 棟が使用不可となっている。

また、D2は12棟中4棟であった。DLが大きくなるほど使用不可の棟数の割合も大きくなっている一方で、D1に分類された建物でも使用不可となっている事例が見られた。DLによる分類は、主に建物上屋の損傷程度をパターン化し評価するものであり、簡便かつ精度良く被害状況を判断できる手法であるが、基礎や周辺地盤等の被害の評価は含まれていない。また、複数の要因が絡み合って使用不可となった事例も多く、必ずしもDLや評定結果と相関していない。そこで、表-2に、使用不可となった建物の概要、評定結果とDL、調査により確認した使用不可となった主な要因について示し、次節で代表的な被害事例を述べる。



※ データラベルの()の数字は、調査した学校数
 図-3 使用不可建物数(各市別)

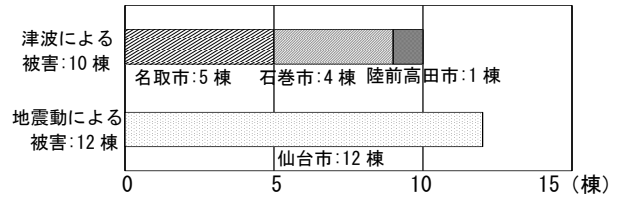


図-4 使用不可となった主な要因

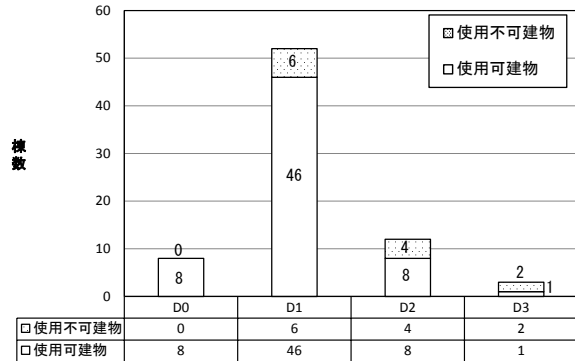


図-5 使用不可建物の割合(DL別)

3.2 個別建物の被害事例

比較的大きな構造躯体の被害により使用不可となった建物は3棟確認された。そのうち、柱や梁の被害によるものは2棟、基礎の被害によるものが1棟であった。また、非構造部材や設備機器等の被害により使用不可となった事例も多く確認された。その多くが、天井や雑壁に被害が大きく、余震に対して児童生徒の安全を確保す

表-2 地震動により使用不可となった建物の概要(所在地:仙台市)

No	名称	竣工年	階数	耐震補強の有無	最小 Is 値 (最小 C _{TU} × S _D)	DL	主な被害 ○ 備考
1	NK 中学校	1973	4	有	資料無し	D3	・ 構造被害(壁のせん断されつ) ・ 仕上げ材の剥落 ・ 周辺地盤の沈下 ○ Small-titan による計測震度: 6.1
2	TH 小学校	1974	4	無	0.800 (-)	D3	・ 構造被害(柱のせん断破壊) ・ 仕上げ材の剥落 ・ 周辺地盤の沈下
3	KM 小学校 (A 棟)	1981	4	有	0.711 (0.713)	D1	・ 構造被害(杭基礎の損傷)
	KM 小学校 (B 棟)	1982	4	有	0.713 (0.374)	D1	・ 周辺地盤の沈下
4	SH 小学校 (A 棟)	1972	3	有	0.714 (0.732)	D2	・ 非構造部材の被害 ・ 損傷度 I 程度の構造被害
	SH 小学校 (B 棟)	1972	3	有	0.711 (0.728)	D2	・ 非構造部材の被害 ・ 損傷度 I 程度の構造被害
5	ND 小学校 (B 棟)	1971	4	有	0.707 (0.728)	D1	・ 非構造部材の被害 ・ 損傷度 I 程度の構造被害 ・ 周辺地盤の被害
	ND 小学校 (D 棟)	1975	4	有	0.714 (0.737)	D1	・ 非構造部材の被害 ・ 損傷度 I 程度の構造被害
6	AG 中学校 (北校舎)	1973	4	有	資料無し	D2	・ 非構造部材の被害 ・ 損傷度 I 程度の構造被害 ・ 周辺地盤の沈下
	AG 中学校 (中校舎)	1967	4	有		D1	・ 非構造部材の被害
	AG 中学校 (南校舎)	1984	4	有		D2	・ 非構造部材の被害 ・ 損傷度 I 程度の構造被害
7	SN 小学校	1975	4	有	資料無し	D1	・ 非構造部材の被害 ・ 損傷度 I 程度の構造被害

るために使用を中止したものであった。以下に、代表的な被害事例を示す。加えて、その被害をもたらしたと考えられる要因についても言及する。

1) 地盤増幅によるものと考えられる事例 (NK 中学校)

NK 中学校校舎は、1973 年に竣工した RC 造 4 階建ての、耐震改修が施された建物である。代表的な被害の様子を写真-1 に示す。写真に示すように、耐震壁にせん断されつが生じるなど比較的大きな構造被害が生じたため、建物への立ち入りを禁止した事例である。加えて、非構造部材の大規模な剥落や、周辺地盤の沈下による建物の傾斜が確認された。



(a) 外壁のせん断されつ



(b) 柱の被害



(c) 壁のせん断されつ



(d) 仕上げ材の剥落

写真-1 代表的な被害の様子

本学校の敷地内の地盤上に、地震観測網 (Small-titan⁷⁾) が設置されており、今回の地震による波形が記録されている。それらの結果を図-6 に示す。Small-titan は、仙台市内の 20 箇所に設置されており、それらの中で最も大きな加速度を記録したのがこの観測点である。最大加速度は、NS 方向で 1,179gal, EW 方向が 1,853gal (計測震度 6.1) であった。波形記録から算出した速度応答スペクトルを図-7 に示す。図には、比較のため、告示による工学的基盤の速度応答スペクトルに地盤増幅係数 1.5 を乗じた安全限界スペクトルおよび K-NET と KiK-net で観測された石巻市と陸前高田市の記録、宮城県名取市に所在する仙台高等専門学校の敷地内での観測記録に基づき算出した結果を併記した。

これらの結果より、この地域で観測された波形記録は短周期域で卓越しており、特に EW 方向で 0.03~0.5 秒付近にかけて安全限界スペクトルを大きく上回っていることがわかる。これより、想定した地盤増幅を上回る入力地震動が与えられた場合、その継続使用が困難となる被害程度となる可能性があることから、現行の耐震診断・耐震改修では考慮されていない入力地震動の影響を

検討する必要があると思われる。

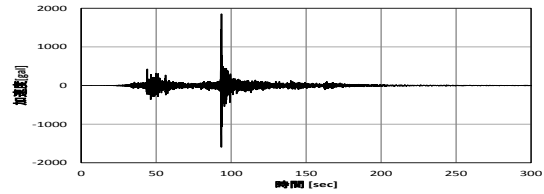


図-6 観測記録 (EW 方向時刻歴波形 : Max=1,853gal)

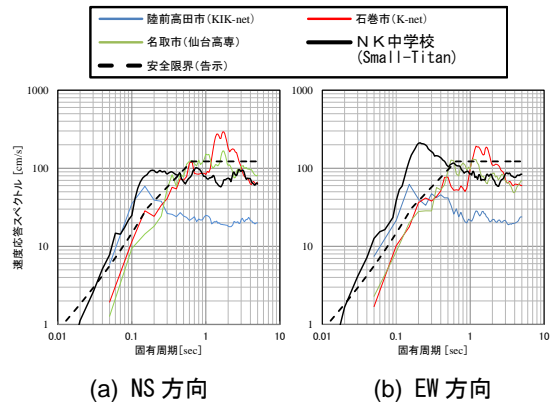


図-7 速度応答スペクトル

2) 靱性型建物であることが原因と考えられる事例 (TH 小学校)

TH 小学校校舎は、1974 年に竣工した RC 造 4 階建ての建物である。本校舎は、新耐震基準法が適用される以前の建物であるが、評定により靱性型 (F=1.75), Is 値が 0.8 と評価され⁸⁾, 耐震補強は施されていない。代表的な被害の様子を写真-2 に示す。ここに示した柱は、両端に垂壁、腰壁がついた短柱となっている。同じ北面の通りに同様の形式の柱が配置され、それらの柱に写真に示すような比較的大きな損傷が見られたため、本校舎の使用を中止した事例である。これらの柱は、設計図書ではスリットが設けられて曲げ柱として設計されていたが、スリットの効果が十分に発揮されずにこのような被害が生じたものと考えられる。

本建物は改修工事の計画があり、その効果を確認するため、改修工事前後で常時微動測定を実施する予定である。建物敷地内には、地震観測網が整備されていなかったため、実際に建物に作用した地震動は不明であるが、改修前に実施した測定の結果から、地盤の振動特性について検証した。また、建物の固有周期を調べるために、1 階に対する R 階のフーリエスペクトル比を求めた。測定に用いた微動計は速度型換振器で、サンプリング周波数を 200Hz, 計測時間を 5 分間とした。測定で得られた記録からフーリエスペクトルを求める際、測定記録を複数個のフレームに分割し、それぞれの結果を相加平均して算出した。図-8 に、水平動スペクトル 2 成分の RMS

を上下動スペクトルで除して求めたH/Vスペクトル比を、改修前の長辺方向のフーリエスペクトル比を図-9に示す。これらの結果より、地盤は1秒前後の周期成分が卓越していることがわかる。また、被災後の建物に対して微動測定を行った結果、固有周期は0.3秒付近となり、被災前はより短周期であると考えられることから、地盤の卓越周期との共振を被害の原因として帰着させることは難しい。前述のとおり、本建物の被害原因は、靱性型建物で設計されていたものの、各部材が設計どおり機能しなかったことにある。そのため、地震時の塑性変形に期待した靱性型建物の場合、損傷を防ぐための部材設計には十分な注意が必要であると思われる。

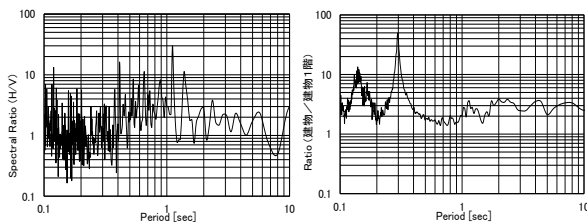


図-8 周辺地盤の H/V スペクトル比 図-9 フーリエスペクトル比 (改修前：長辺方向)

3) 非構造部材の被害が原因と考えられる事例 (ND 小学校)

ND 小学校校舎は、1971年から1975年にかけて竣工されたRC造4階建ての建物である。本校舎は、図-10に示すように、Exp.Jointで連結された3棟と、1,2階部分に掛けられた渡り廊下で連結された1棟の校舎で構成している。評価対象となった建物はそのうちの2棟 (B, D棟) で、いずれも耐震改修が施されている。残りのA, C棟は未改修である。本校舎は、西側のA, B棟に比較的大きな被害が生じ、建物が使用不可となった。代表的な被害の様子を写真-3に示す。写真はA棟の被害の様子で、

柱に比較的大きなせん断きれつが生じている。また、教室内の照明機器や天井が落下する被害もA棟で確認された。本棟においては、非構造部材の被害が顕著であり、児童・生徒の人命を優先するという責務上、使用不可とする判断は妥当なものであるとされる。校舎の使用継続性という観点からは、構造耐震指標に代表される構造安全性のみならず、非構造部材の落下や、設備被害といった項目が耐震診断・耐震改修の検討事項として考慮されるべきと考えられる。

一方で、他の校舎については、構造躯体および非構造部材の被害は軽微で、特にC, D棟は無被害に近い状態であった。しかし、A棟が大きな被害を被ったことを受け、本校では全ての棟の使用を停止した。このように、隣接した棟の被害が、全棟の継続使用に影響を与える例もあり、隣接棟の被害は使用継続性に対して影響を与える要因となるとと思われる。

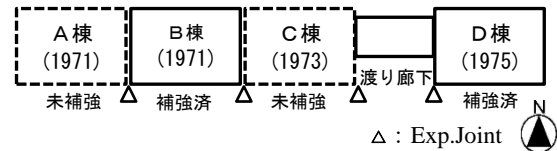


図-10 校舎の構成



写真-3 代表的な被害の様子

3.3 使用不可となった共通要因

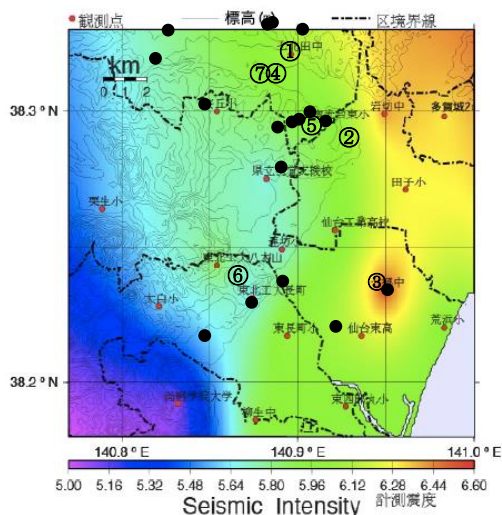
図-12は、前述のSmall-titanによる各観測点の記録から算出した仙台市内の震度分布である。図より、沿岸部および北部で計測震度が高く、使用不可となった建物が所在する地域と概ね一致する。このことから、使用不可となった共通した要因の一つとして、大きな入力が入力された建物が作用したものと考えられる。

3.4 個別建物の要因の検証

既往の研究⁹⁾より、建物被害に関しては、周期が1~2

秒の地震動の影響が大きく、被害率との相関も指摘されている。また、周期が1秒以下の振動は、非構造部材や室内被害との相関がみられる。今回の東北地方太平洋沖地震では、周期が0.5秒以下の短周期成分が卓越し、建物被害に結びつく1~2秒の周期帯で小さかったとされている。しかしながら、前述の通り、短周期側とはいえ、安全限界スペクトルを上回る入力地震動があった場合、その構造被害が顕著となる事例も見られた。また、同様の入力地震動であった場合でも、強度型か靱性型かによって被害が大きく異なる事例も見られ、特に靱性型建物の場合、学校建物としての継続使用が困難となる可能性が示唆された。さらに、非構造部材の落下や、設備被害を受けて、学校建物として継続使用を停止する事例も確認されたことから、構造安全性のみならず、非構造部材の被害について考察する必要性が生じた。加えて、建物としてはほとんど被害の無い場合であっても、隣接した棟に大きな被害が生じている事例において、建物全体としての使用を停止する例も見られ、隣接棟との関係性についても耐震診断・耐震改修の中で検討される必要となることが示唆された。さらに、周辺地盤の被害が大きい建物で、上部構造の被害も大きかったことから、入力地震動のみならず、地盤変状の大小も建物被害に影響を及ぼしていると思われる。

評定により構造判定指標は満足したものの、構造躯体や非構造部材に被害が生じて、建物の機能が失われた事例について、その要因は、入力地震動の特性や周辺地盤の変状、耐震改修の方針など多岐にわたると考えられる。



①~⑦：使用不可建物（図中の番号は表-2と対応）
●：本報告で調査した使用可能であった建物

図-12 仙台市内の計測震度分布と使用不可建物の所在地（参考文献7に加筆）

4. まとめ

評定を受けた建物を対象に実施した被害調査の結果を、既往の研究によるDLで分類した。その結果、評定

により構造耐震指標を満足した建物の多くが、深刻な構造躯体の被害を免れていることがわかり、耐震診断ならびに耐震改修の有効性について確認することができた。しかしながら、一部の建物で地震動による被害が生じ、建物の機能が失われる事例が見られた。本論においては、これらの建物の代表的な被害事例を示し、建物が使用不可となった要因をまとめた。その結果、現行の耐震診断では考慮されていない入力地震動や周辺地盤の変状などが建物被害に大きく影響を及ぼしている可能性があることが確認された。加えて、部材の損傷が建物の継続使用に影響することから、靱性型建物の場合、損傷を制御するための部材設計には注意が必要であることがわかった。

謝辞

調査を行うにあたり、岩手県陸前高田市、宮城県仙台市、名取市、石巻市の教育委員会の方々をはじめ、各学校関係者のご支援を頂きました。また、解析に用いたK-netおよびKik-net強震記録は、独立行政法人防災科学技術研究所、Small-Titanの観測記録は、東北工業大学工学部環境エネルギー学科松川忠司助手より提供頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，2011.7
- 2) 藤田智己，船木尚己，畑中友，飯藤将之，田中礼治：東北地方太平洋沖地震の学校建物被害調査に基づく耐震診断の妥当性と問題点に関する考察，東日本大震災2周年シンポジウム，Po-23，2013.3
- 3) 高井伸雄，岡田成之：地震被害調査のための鉄筋コンクリート造建物の破壊パターン分類，日本建築学会構造系論文集，No.549，pp.67-74，2001.11
- 4) 財団法人日本建築防災協会：2001年改訂版既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断基準・同解説，2001.9
- 5) 岩手県陸前高田市ホームページ：
<http://www.city.rikuzentakata.iwate.jp/>
- 6) 宮城県教育委員会ホームページ：
<http://www.pref.miyagi.jp/site/kyouiku/>
- 7) 神山眞，松川忠志，穴澤正宏：2011年東北地方太平洋沖地震における東北工業大学アレー観測システムSmall-Titanによる強震記録について（速報），2011.4
- 8) 高橋香菜子，HamoodAL-WASHALI，前田匡樹：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，2012.7
- 9) 市口恒雄，松村正三：地震動の周期に依存した建物被害と新たな課題，科学技術動向研究，2012年5・6月号，pp.21-35