

# 東北地方太平洋沖地震で被災した文教施設の被害調査に基づいた建物の機能維持に着目した安全性評価手法の提案

東北工業大学 准教授 船木尚己 (研究代表者), 東北工業大学 教授 薛松濤  
仙台高等専門学校 助教 藤田智己, 仙台高等専門学校 教授 飯藤将之

## 概要:

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により被害を受けた文教施設の被害調査を行った。調査対象建物は、耐震診断・改修の評定を受けた宮城県と岩手県に所在する82棟の建物である。本研究は、被害調査結果に基づき、従来の評定で定める指標の妥当性を検証するとともに、建物の機能維持を可能にする新たな評定手法を構築することを目標としている。調査の結果、現行の耐震指標を満足している建物が概ね軽微な被害に留まっていたことから、構造躯体への被害を防ぐ指標として有効であると確認できた。しかし、耐震指標を満足した建物であっても、地盤変状の影響により建物被害が増大する事例も見られ、特に直接基礎の建物は注意が必要であることがわかった。さらに、校舎が使用できなくなった要因を挙げ、それらの結果から、評定によって出された耐震性能に関わらず、学校機能を維持するための解決策について詳細な検討が必要であることが明らかになった。

キーワード: 耐震診断、耐震改修、文教施設、東北地方太平洋沖地震、被害調査、ダメージレベル、機能維持

## 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震の経験から、現行の耐震基準に適合しない建築物の耐震診断および耐震改修を推進することを目的として、建築物の耐震改修の促進に関する法律(耐震改修促進法)が同年12月に施行された。この法律では、不特定多数の人々が使用する一定規模以上の建物を対象に耐震化の努力義務を課してきたが、さらなる耐震化の促進のため、対象建物の範囲拡大や明確な数値目標を掲げるなど、2006年にその内容が改正された。これにより公共建物を中心に耐震診断および耐震改修が各地で進められるようになってきている。(社)建築研究振興協会東北分室(室長:田中礼治 東北工業大学名誉教授)では、東北地方の建築物の耐震診断および耐震改修の促進をはかり、地域の安全性向上に貢献すべく、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)を設置し、これまで主に東北地方の約1,900棟の建物を対象に耐震診断・耐震改修についての評定を行ってきた。

2011年3月11日14時46分、三陸沖を震源とするM9.0の地震(東北地方太平洋沖地震)が発生し、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。この地震による被害の多くは津波によるものであり、特に岩手県、宮城県、福島県の沿岸部の多くの地域で壊滅的な被害を被った。しかしながら、地震動による構造物の被害も多数見られ、その多くは1981年の新耐震設計法が適用される以前のものであった。反面、旧耐震設計法による建物でも適切な耐震改修が施された場合、被害を免れている例が数多く見られている<sup>1)</sup>。

耐震診断・改修された建物がこれまで大きな地震に遭遇した例がほとんどなかったことから、筆者らは耐震診断・改修が行われた学校建物を中心に被害調査を実施してきた。本報告は、被害調査による結果に基づき、建物の被害状況と耐震診断による結果を対比し、現行の耐震診断指標の妥当性および耐震改修の効果を調べた結果を示すものである。具体的には、東北耐震診断改修委員会で扱った岩手県陸前高田市、宮城県仙台市と名取市および石巻市に所在する学校建物について、耐震診断の評定資料が入手できる学校を対象に被害調査を行い、実際の被害状況が本委員会による評定結果とどの程度対応するかを調べ、耐震診断指標の妥当性について検証する。また、地震発生当時、すでに耐震改修が施されていた建物については調査結果に基づいて補強効果を確認する。

調査を行った際、一部の学校では被害により建物が使用できない状態となり、仮設校舎で授業が行われていた

り、校舎の一部で立ち入りが制限されている事例が見られた。学校建物は、多くの児童・生徒が地震後も継続して授業が行われなければならない場所であり、耐震安全性以外の要素も勘案した設計クライテリアが必要であると思われることから、建物の継続的使用を視野に入れた新たな耐震性能の評価手法の構築が急務であると考えられる。本報告は、その構築のための基礎的な資料として、建物が使用不可能になった代表的な事例について、その主な原因についてもまとめる。

## 2. 調査対象地域の地震動特性

建物の地震被害を検討する場合、各々の建物に入力された地震動レベルの大きさが重要となる。立地する地盤条件により地盤増幅の影響が異なるが、本論では、調査対象地域における地震記録を用いて各建物に入力された地震の目安とする。仙台市は東北工業大学が所有する Small-Titan の観測記録、名取市は仙台高等専門学校名取キャンパスでの観測記録、陸前高田市は Kik-net 表面の観測記録、石巻市は K-net の観測記録を用いた。表-1 に最大加速度一覧を示す。また、各観測記録の速度応答スペクトル ( $h=0.05$ ) を図-1 に示す。なお、同図には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を併記している。

図-1 より、陸前高田市は短周期域で安全限界スペクトルを超える応答となるが 0.2 秒以上の応答は小さい。石巻市、名取市においては、全体的に安全限界スペクトル以下の応答である。仙台市では、3 か所における応答の性質が異なり、山沿いに位置する七北田中学校での観測記録は、短周期域で卓越しており 0.03~0.5sec 付近にかけて安全限界スペクトルを大きく上回る。その一方で海沿いに位置する七郷中学校では、1 秒付近で安全限界スペクトルを大きく上回る応答である。

表-1 各観測記録の最大加速度[gal]

市町村	観測場所	方向	
		NS	EW
仙台市 Small-titan	七郷中学校	1,074	680
	南光台東小学校	699	461
	七北田中学校	1,179	1,853
名取市	仙台高専名取キャンパス	415	451
石巻市	K-net 石巻	458	377
陸前高田市	Kik-net 陸前高田	738	630

## 3. 被害調査方法の概要

調査対象建物は、東北耐震診断改修委員会が耐震診断の認定を受けた、岩手県陸前高田市と宮城県仙台市、名取市および石巻市内に所在する 50 校の学校建物 (RC 造校舎) 82 棟とした。各市町村別の調査内訳および調査期間を表-2 に記す。

調査は、事前に耐震診断の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、すべての建物について学校関係者にヒアリングによる情報収集を行った後、建物内に立ち入り、柱、梁、壁などのひび割れ、建物周辺の地盤変状の様子、エキスパンションジョイントの被害等、目視により被害状況を確認した。調査後、82 棟の建物を岡田・高井の Damage Level<sup>2)</sup> (以降、DL とする) をもとにランク付けし、被害程度の確認を行った。

本調査内では、DL は D0 (無被害)、D1 (非構造部材のひび割れ)、D2 (非構造部材の剥落)、D3 (構造躯体の被害) に分類された。各 DL の代表的な被害例を写真-1 に示す。

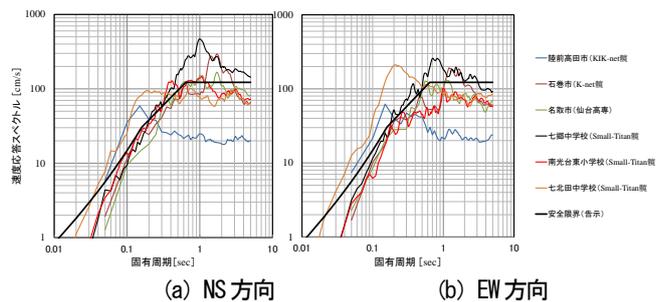


図-1 観測記録の速度応答スペクトル

表-2 調査対象建物の内訳

市町村	学校数	棟数	調査期間
仙台市	23	37	2011年12月13日 ~2012年12月23日
名取市	8	14	2012年5月21日 ~2012年6月18日
石巻市	13	25	2012年8月27日 ~2012年8月30日
陸前高田市	5	6	2011年9月20日 ~2011年9月21日
合計	49	82	



(a) D0 レベル

(b) D1 レベル



(c) D2 レベル

(d) D3 レベル

写真-1 本調査内における DL の代表的な被害例

#### 4. 調査結果と評定結果との対応

##### 4.1 調査対象建物

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、全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。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-2 に示す。建物分類は、耐震診断による評定結果および現地でのヒアリング調査に基づき、耐震性能が確保されていると判断されているか否かで分類を行った。耐震診断は、(財) 建築防災協会の耐震診断基準<sup>3)</sup>の第 2 次診断法に準じており、構造耐震指標 (以降、 $I_s$  値とする) が耐震判定指標 (以降、 $I_{50}$  とする) として定めた 0.7 を上回るとともに、 $C_{T_U} \cdot S_D = 0.3$  以上を確保することで耐震性能を有していると判断される。

分類結果より、耐震診断およびヒアリング調査により  $I_s$  値が 0.7、 $C_{T_U} \cdot S_D$  が 0.3 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 (以降、未改修建物とする) が 7 棟、耐震改修が施された建物 (以降、改修済建物とする) が 61 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 (以降、改修不要建物とする) が 14 棟であった。耐震改修の実施については、仙台市と名取市で 90% を超え、改修率が高い。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。評定結果より  $I_s$  値および  $C_{T_U} \cdot S_D$  が判明する建物について、桁行、張間、各方向の評定結果と建物棟数の関係を図-3 に示す。

張間方向では  $I_s$  値が 0.7~1.7 で偏差が大きい分布となっているのに対して、桁行方向では約 80% が 0.7~0.8 の

範囲となっている。張間方向の  $C_{T_U} \cdot S_D$  は、 $I_s$  値と同様に値が高い反面、ばらつきが大きい分布となっており、張間方向の F 値が建物ごとに大きな違いがないことを反映している。一方、桁行方向では  $C_{T_U} \cdot S_D$  の値が双峰的に分布しており、 $I_s$  値が 0.7~0.8 に集中している傾向と全く異なる。耐震改修済建物の  $I_s$  値に限ると 90% 以上が 0.7~0.8 の範囲になることが評定結果から確認されている。 $I_s$  値が 0.7 未満の建物と、0.7 以上の建物に大別し、以下に被害状況をまとめる。

##### 4.2 $I_s$ 値<0.7 の建物 (未改修建物)

ここに分類される建物は、耐震診断において  $I_s$  値の最小値が 0.7 を下回り、改修の必要性があると判断されたが、地震が発生した時点で未改修であったものである。建物棟数は 7 棟で、全体の 8% と調査建物の棟数に対する割合は少ない。調査時のヒアリングによると、改修時期が決まっていたが、地震発生に間に合わなかった事例も数棟みられた。本調査により確認された未改修建物の DL の分布を図-4 に示す。

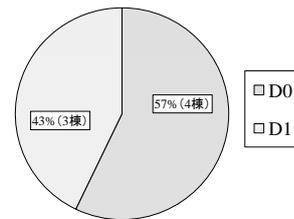


図-4 未改修建物の DL の分布

ここに分類される建物は、既往の調査<sup>4)</sup>においては構造被害が生じている事例が報告されており、本調査にお

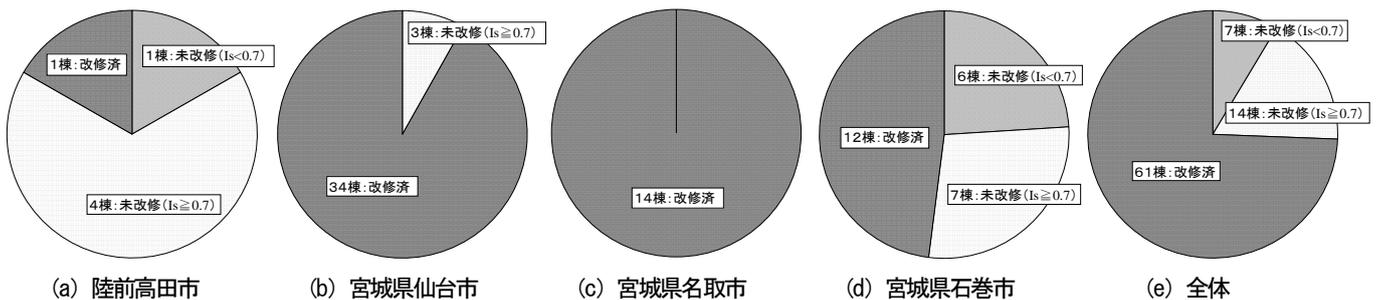


図-2 調査対象建物の分類

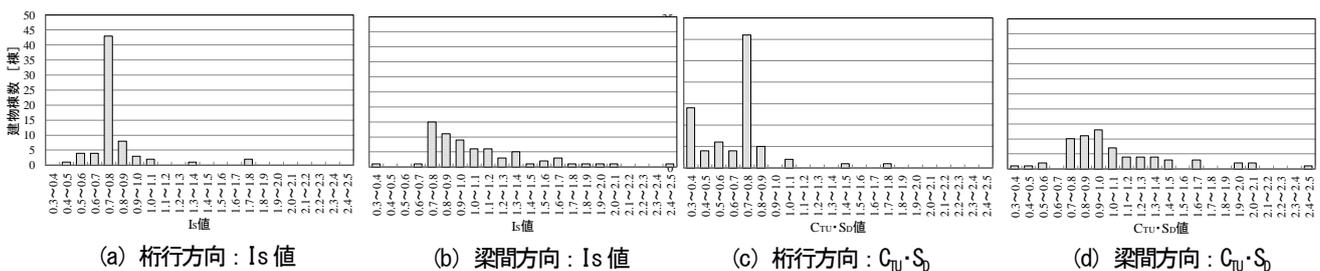


図-3 調査建物の評定結果

いても構造躯体に比較的大きな被害が見られると予想していたが、被害程度はD0或いはD1レベル相当であった。7棟中6棟が石巻市、残り1棟が陸前高田市の建物で、すべて3~4階建の建物である。図-1の速度応答スペクトルを見ると、各地域とも0.2~1秒付近の応答が他の地域の応答より低く、安全限界スペクトルも下回っている。地震動レベルが小さかったことが幸いし、被害がD1程度に留まったものと推察される。

しかしながら、1階床スラブが局所的に4cm程度沈む被害が生じた例や、地震動によって窓ガラスが500枚ほど割れるなどの被害が生じた建物があった。また、構造躯体にはほとんど被害が生じていない場合でも、地中の配管の損傷によって建物が使用不可になる事例もみられ、建物の建つ地盤条件が地震後の建物の使用継続性に大きく影響を及ぼすことが確認された。

#### 4.3 $I_s$ 値 $\geq 0.7$ の建物(改修済建物および改修不要建物)

耐震診断により  $I_s$  値が 0.7 以上の建物は、主に耐震改修が施された建物であるが、新耐震設計基準が適用される以前の建物で、耐震診断において  $I_s$  値が 0.7 以上となり耐震改修の必要性がないと判断された建物も一部ではあるが存在する。建物棟数は 75 棟で、全体の 92% となる。本調査により確認された改修済建物および改修不要建物の DL の分布を図-5 に示す。

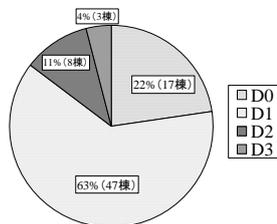


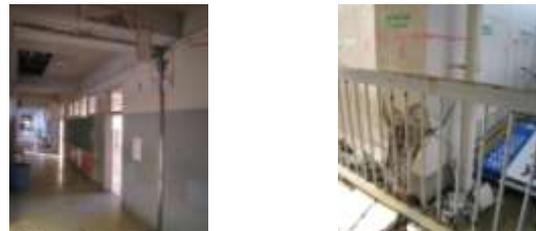
図-5 改修済建物および改修不要建物の DL の分布

調査結果より、ここに分類される建物の DL は、ほとんどが D0 或いは D1 レベルに留まっており、全体の 85% におよぶ。構造躯体への被害がない D2 レベルまで合わせると全体の 91% となる。耐震指標 ( $I_s=0.7$ ,  $C_{TU} \cdot S_D=0.3$ ) を満足することは、安全限界スペクトルと同程度の地震動に対し、構造躯体への被害が生じない、もしくは軽微程度の被害に抑え、十分な耐震性能を保障するものであると確認できた。  $I_s$  値が低い場合であっても、現行の耐震改修により、  $I_s=0.7$  を満足する補強を施された建物に大きな構造被害が見られなかったことから、耐震改修の有効性についても確認できたと思われる。しかし、75 棟中の 3 棟であるが、D3 レベルに相当する構造躯体への被害が確認されたケースが見られた。大掛りな補修が必要となる D2 レベルを加えると 75 棟中 11 棟となる。代表的な被害例を写真-2 に示す。D2、D3 レベルの被害を受けた学校建物の大部分では、基礎形式が直接基礎である

ことが評定結果との対応で明らかとなっており、建物周辺での地盤変状も確認している。基礎形式の違いに着目し、直接基礎と杭基礎に大別して DL の分布を再整理したものを図-6 に示す。なお、基礎形式のデータがないものについては除外したため、全体の建物棟数は 74 棟となっている。



(a) 仕上げ材の剥落 : D2 (b) 柱のせん断破壊 : D3



(c) E, J 部仕上げ材剥落 : D2 (d) 柱脚の破壊 : D3

写真-2 代表的な建物被害 : 続き

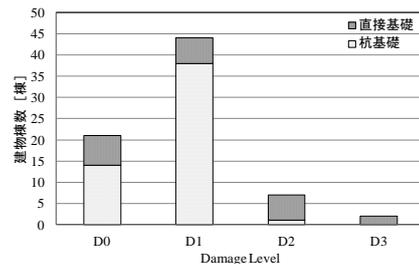


図-6 基礎形式による DL の分類

図-6 より、杭基礎の建物の DL は、D0、D1 レベルの被害に留まっているのに対し、直接基礎の建物は DL のばらつきが大きいことが分かる。直接基礎においては、地盤変状が小さい敷地の建物被害はD0或いはD1レベルに留まっていた一方、地盤変状が大きい敷地では建物被害が大きい傾向にあることが調査の中で確認された。

直接基礎の建物については、もともと地盤が良い場所に建てられたということが前提になると考えられるが、東北地方太平洋沖地震のように、地盤変位が何 m にもおよぶ大地震に対しては、地盤変状し、建物被害へと繋がってしまうことが明らかとなった。また、杭基礎を有する建物の場合においても、仙台市若林区にある中学校では、構造躯体の被害はほとんど確認されなかったが、杭の損傷により建物が傾き、使用不可となるケースが 1 校確認された(写真-3)。基礎形式、地盤変状の影響については、現行の耐震診断には考慮されていない項目である。大掛りな補修を必要としない最小限の被害に抑えることや、地盤変状による建物被害を防ぐことを考慮する場合、これらの項目を耐震診断、改修にどのように組み込んでいくかについて議論が必要と思われる。



写真-3 杭の損傷により使用不可となった建物

#### 4.4 耐震指標とDLの対応

資料より評定結果が判明するものについて、 $I_s$  値および  $C_{TU} \cdot S_D$  と DL の関係を図-7 に示す。前述した地盤変状の影響による建物被害は見られたものの、現行の耐震指標 ( $I_{so}=0.7$ ,  $C_{TU} \cdot S_D=0.3$ ) を満足することは、構造躯体への被害 (D3 レベル以上の被害) を防ぐ指標として有効であると考えられる。しかし、図-7 より、耐震指標と D2 レベル以下の被害の程度に負の相関は顕著でないことが確認できる。この結果については、各建物に入力された地震動レベルの大きさが密接に関係していると考えられ、個々の建物が建つ地盤の増幅特性を地震動レベルに考慮し、建物被害と耐震指標の関係性を検討するとともに、耐震指標を決定するパラメータに遡り、各項目と DL との関係を検討する必要がある。

#### 5. 津波被害を受けた建物

前述のとおり、今回の地震では津波による被害が甚大で、調査した建物にも津波により浸水したものが 19 棟あった。本節では、地震動被害とは区別して、その被害状況について概説する。

津波により被災した全ての建物が  $I_{so}$  を満足しており、未改修の建物はなかった。1 階床から建物の屋上まで浸水したもので幅広く存在し、屋上階まで浸水した建物は 2 棟あった。これらの建物の代表的な被害状況を示したものが写真-4 である。津波の浸水によって基礎地盤が洗掘されたり、腰壁や手すりが面外に破壊するなどの被害見られたが、柱や壁等の耐震部材に大きなひび割れ等が生じた例は確認されず、DL で分類すると D0 或いは D1 レベル相当となる。津波による被害程度は、建物の立地条件や浸水深だけでなく、漂流物の有無などに大きく影響する。したがって、DL の判定と耐震指標の評価結

果のみでその適正を判断することは難しい。しかしながら、今回の調査結果では、耐震判定指標 ( $I_{so}=0.7$ ,  $C_{TU} \cdot S_D=0.3$ ) を満足する建物は、大きな津波の水平力に対しても十分耐えられる可能性を有しているものと思われる。

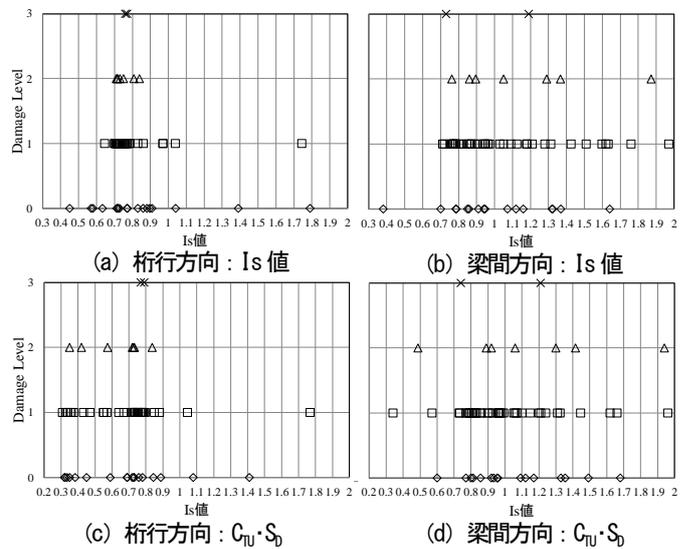


図-7 評定結果とDLの関係



写真-4 津波により建物屋上まで浸水した建物の被害例



写真-4 津波により建物屋上まで浸水した建物の被害例 (続き)

#### 6. 地震後の学校建物の使用継続性

宮城県によると、この地震により被災し、仮設もしくは他校を間借りしている学校は、最も多い時で仙台市が 16 校、名取市で 2 校、石巻市で 14 校あった<sup>5)</sup>。本調査の範囲では、14 校、23 棟確認された。

使用不可能となった要因は建物によって様々であったが、主に D3 レベルの建物被害、基礎の損傷、地盤変状に伴う建物傾斜等の構造被害によるもの、非構造部材の剥落や設備器機の落下等の被害によるもの、連続した他の棟の被害によって使用不可になったもの、そして津波の浸水によるものなどに大別される (図-8 参照)。これ

らの結果、津波の浸水によるものが最も多く、6 校、10 棟で全体の 4 割程度であった。次いで、構造被害によるものが 6 棟、非構造部材の被害に伴うものが 4 棟、連続した他の棟の被害によるものが 3 棟であった。また、使用不可となった建物被害の代表的な例を写真-5 に示す。

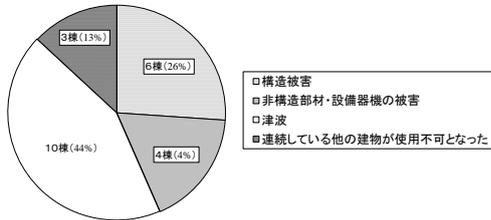


図-8 建物が使用不可となった要因の内訳



写真-5 使用不可となった建物の被害例

被害調査の際に行ったヒアリングでは、構造躯体に大きな被害が生じなかったものの、その後の余震で仕上げ材や照明等の落下、ガラスの損傷などによる生徒・児童の怪我を心配し、建物を継続して使用することに抵抗があったとの声が多く聞かれた。実際に、一部の建物では、耐震性に関して大きな問題がなくても建物への立ち入りを制限し、結果的に仮設校舎が建設された例も見られた。これは、児童・生徒の安全を最優先に考えなければならない学校ならではの事情が背景にあると考えられ、応急危険度判定に基づく判断も重要であることを意味している。また、調査対象外ではあるが、調査建物に隣接する新耐震設計基準で建てられた建物にも、前述した理由により使用不可となった事例も見られた。

学校建物としての機能維持を考慮した使用継続性に関しては、余震に対する建物の構造安全性に加えて、設備機器の落下や非構造部材の剥落等の応急危険度判定に基づく判断、また、前述した周辺地盤の変状の影響による建物損傷といった観点を、耐震診断、改修に考慮する必要性が明らかとなった。これは、学校以外の建物においても、公共機関や病院といった不特定多数の人が使用する

る建物で必要となる事項と考えられる。建物の上部構造に限定すると、建物の使用用途に応じて、使用者の心理的抵抗を考えた場合、D0 或いは D1 レベル程度の建物被害に留める必要性が示唆される。

## 7. まとめ

本研究は、東北耐震診断改修委員会で評定した約 1,900 棟の建物のうち、岩手県陸前高田市、宮城県仙台市、名取市、石巻市に所在する 82 棟の学校建物について被害調査を実施して得られた代表的な結果を示し、実際の被害状況が本委員会による評定結果とどの程度対応するかを調べ、耐震診断法の妥当性について検証した。その結果、現行の耐震指標 ( $I_{so}=0.7$ ,  $C_{TU} \cdot S_D=0.3$ ) を満足している建物が D2 レベル以下の被害に留まっていることから、構造躯体への被害 (D3 レベルの被害) を防ぐ指標として有効であると確認できた。しかし、耐震指標を満足した建物であっても、地盤変状の影響により建物被害が増大する事例があり、特に直接基礎の建物は注意が必要であることがわかった。今回の調査では、地震による被害により建物の継続的な使用に支障をきたしている例も見られた。学校建物は多くの児童・生徒が地震後も継続して授業が行われなければならない場所であるから、建物の耐震性のみならず、安全確保に配慮する必要があると思われる、使用継続性を言及する新たな耐震性能の評価手法の構築が急務である。本論では、校舎が使用できなくなった要因を挙げ、それらの結果から、評定によって出された耐震性能の大小に関連せずとも、学校機能を維持するための解決策について詳細な検討が必要であることを結論付けた。今後は、調査建物の棟数の増大、耐震診断の評定資料の入手に加え、立地の地盤状況や入力地震動の観点から被害状況との対応を詳細に検討し、最終目的である機能維持を可能にする新たな評価手法の構築を実現したい。

## 謝辞

本研究は、(財) 国土技術研究センターの研究開発助成に基づいて実施したものであり、ご関係の方々に厚く御礼申し上げます。また、調査に御協力頂いた岩手県陸前高田市・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学校関係者各位に感謝の意を表します。

## 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) 高井伸雄、岡田成幸：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
- 3) 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築物の耐震診断基準・改修設計指針・同解説、2001.10
- 4) 日本建築学会：文教施設の耐震性能等に関する調査研究報告書、2012.3
- 5) 宮城県教育委員会ホームページ：http://www.pref.miyagi.jp/kyouiku/