

2011年東北地方太平洋沖地震における宮城県内RC造文教施設の 被害調査活動に基づく耐震性能と復旧コストに関する研究

SEISMIC CAPACITY AND REPAIRING COST OF RC SCHOOL BUILDINGS DAMAGED BY 2011 GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE

高橋 香菜子 (リハビリテーション工学分野)
Kanako TAKAHASHI

Abstract:

Damage investigation for reinforced concrete school buildings after the 2011 Great East Japan Earthquake was carried out. Severe damage was concentrated to buildings with lower seismic capacity I_s -index, which were designed according to old seismic code. Improvement of seismic capacity by seismic evaluation and retrofit had been widely applied to existing RC school buildings in Miyagi prefecture. As a result of seismic retrofit, damage ratio was found to be much lower than those in the 1995 Kobe Earthquake. The border in damage level between demolished and repaired buildings damage by shaking corresponds to 'moderate damage' which is classified by the Japanese damage evaluation standard. Correlation between damage level in structural elements and repair cost of whole building was found. A practical estimation method for repair cost was proposed based on dimension of structural elements and damage level, and its applicability was also presented.

Keywords : 2011 Great East Japan earthquake, Seismic capacity, I_s -index, Repairing cost,

Damage Evaluation

2011年東北地方太平洋沖地震, 耐震性能, I_s 値, 復旧コスト, 損傷量評価

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波被害や原子力災害が注目されたが、東北地方を中心として広域にわたり数多くの建物が震動によって被災した。

本研究室では、文部科学省からの委託により、日本建築学会の文教施設委員会に設けられた耐震性能等小委員会（主査：壁谷澤 寿海 東京大学教授）の活動として、被災学校施設の被害調査及び復旧技術指導を行った。この調査活動に基づく資料をまとめ、検討を行うことは、今後発生しうる地震への被害想定や防災及び危機管理対策の立案あるいは、既存不適格建物の耐震診断や補強方法、及び新築建物の耐震設計法などに対して有用な資料を提供するものと考えられる。

また、近年の地震被害の中には、倒壊は免れても建物に生じた損傷により、補修して被災前と同等の耐震性能を確保することが技術的には可能であっても、経済的な観点より建て替えた方が合理的となる場合がある。2011年東北地方太平洋沖地震においても、前述した理由により建て替えを余儀なくされた建物が複数存在した。

以上の背景より、東北地方太平洋沖地震による被害状況と復旧コストの調査、分析、過去の地震との比較検討を行うとともに、被害調査で得られる情報（部材の破壊モードや損傷

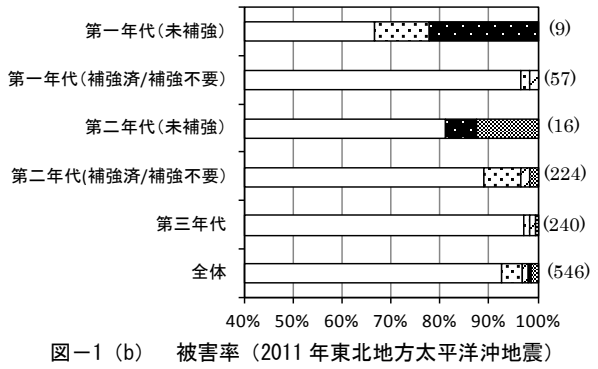
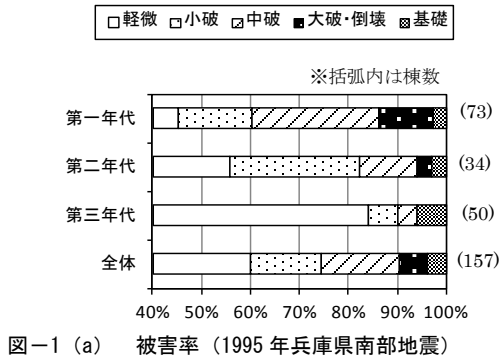
度、寸法等）から被災建物の復旧コストの推定を行う手法について提案を行っていく。

2. 被害統計

本研究では、宮城県内の地域のうち、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、栗原市内の全ての公立小中学校RC造校舎計546棟に関して、施設台帳の情報を基にデータベースを作成した。また、各市町村教育委員会の依頼に基づき、前述の小委員会で実際に被害調査を行った建物計63棟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。

図-1に1995年兵庫県南部地震(a)と2011年東北地方太平洋沖地震(b)の学校校舎の被害率を示す。ここで、1995年兵庫県南部地震は、本調査と同様の建築学会・学校建築委員会により全数調査が行われた神戸市灘区・東灘区の統計¹⁾である。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。各建物の被災度は、「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針²⁾」に従い、各階の梁間・桁行方向の最小の耐震性能残存率Rから判定した。

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



って分類される以下の三年代に区分した³⁾。

第一年代：1971年以前に建設されたもの

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(新耐震設計法施工)以降に建設されたもの

同年代での被害率を比較すると、東北地方太平洋沖地震は兵庫県南部地震よりも小さく、原因として地震動の大小や周期特性の影響が考えられる。また、兵庫県南部地震、東北地方太平洋沖地震ともに、建物の建設年代で被害率に違いが見られた。東北地方太平洋沖地震で補強済、もしくは耐震補強が不要と判定された建物の中破以上の被害率は、未補強建物と比較して非常に小さく、第三年代と同程度であった。

図-2に構造耐震指標 I_s 値とRの関係を示す。ここで、耐震補強済の建物は、プロットを丸で囲んだ。 I_s 値が低く未補強建物は、数は少ないが被害が大きい。また、耐震補強済の建物は、 $R \geq 75$ (無被害から小破、または小破に近い中破程度の被害)であった。

図-3に被災したRC造校舎の強度指標 CrS_D 値と I_s 値の関係を示す。また、 I_s 値を CrS_D 値で除した見かけの靱性指標F値についても同図に示した。兵庫県南部地震では、 CrS_D 値に着目すると、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おり、倒壊あるいは大破した建物は全て0.5以下ということが判る。この傾向は I_s 値が大きい場合であっても見られる傾向であり、東北地方太平洋沖地震においても、 $I_s = 0.80$ であり補強不要と判断されたが、 CrS_D 値の最大値は0.46、 $F=1.75$ で I_s 値が決まる靱性型建物で、中破程度の被害が生じた事例(図中A)が見られた。せん断部材が破壊したとしても耐震上の安全性は保証されていると評価することもできるが、継続使用が困難となった点や、修復性の観点から問題となった。

3. 復旧コストの分析

図-4に宮城県・岩手県・福島県・栃木県の被災したRC造学校校舎の耐震性能残存率Rと復旧状況⁴⁾の関係を示す。被災度と復旧状況の大小関係には、境界値付近で逆転する場合もあるが、相関が認められ、概ね中破($R=60 \sim 80\%$)が復旧と改築の境界に対応している。

被災した建物のうち、復旧工事資料を入手した仙台市内の5校9棟の復旧コスト・被害状況等の分析を行った。各建物の復旧コストは仙台市営繕課が保管する「災害復旧工事設計書」により調査した。建築主体工事費は、躯体補修費、仕上

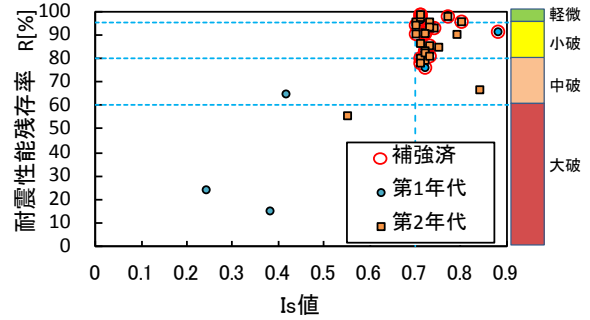


図-2 I_s 値-耐震性能残存率R

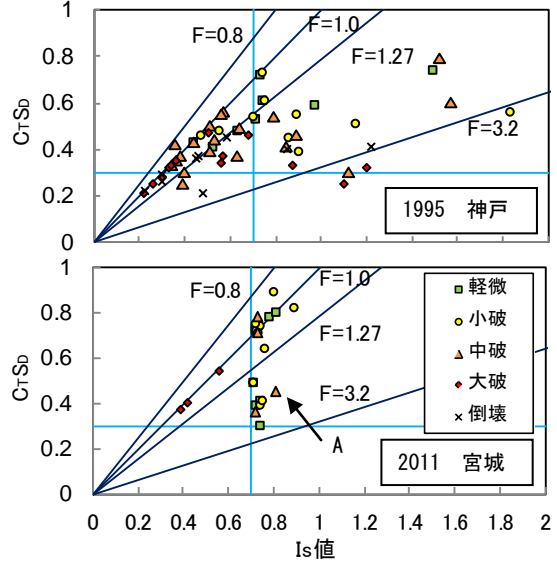


図-3 I_s 値- CrS_D 値

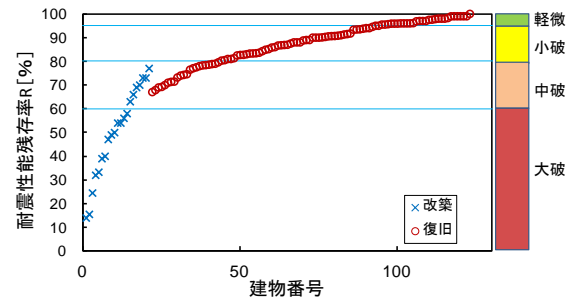


図-4 耐震性能残存率と復旧状況の関係

げ補修費、建具補修費、EXP.J補修費、共通仮設費、諸経費に分類した。災害復旧工事設計書において、ある費用が、幾つかの建物の共通の費用として算出されている場合、対象建物の復旧工事費の比率もしくは、対象建物の総ひび割れ長さの比率で分配し、各項目の復旧工事費として加算することとした。また、各建物の

総修復工事費用を、延べ床面積で基準化し、1㎡あたりにおける復旧コストを算出した。

単位面積あたりの内訳構成を図-5に示す。上から被害の大きな順に並べた。建物毎のバラつきは大きいものの、被害が大きくなると復旧コストが大きくなる傾向が見られる。現在の被災区分判定の手法は層毎に評価を行っているが、復旧コストは建物全体で決定されるためにこのようなバラつきが生じてしまうと考えられる。特に局所的に大きな被害が生じる場合にバラつきが大きくなった。内訳構成の相対値を見ると、躯体工事費は全工事費の約30%から50%を占めていた。兵庫県南部地震でも約30%であった⁵⁾ことより、躯体の復旧コストから全体の概算費用の算出が可能であるといえる。躯体工事費に限らず、その他の内訳構成についても被災度の大小に依らず概ね同程度であった。

東北地方太平洋沖地震と、兵庫県南部地震でそれぞれ被災した建物について、耐震性能残存率Rと、単位面積あたりの復旧コストを、教育委員会より提示される新築費用単価(2011年宮城県:151,600[円/㎡],1995年兵庫県:231,000[円/㎡])で基準化した関係について図-6に示す。被害が大きくなると、復旧コストも大きくなるという傾向が見られ、図-4より、改築と復旧との境界付近の復旧コストと新築費用の比は7%~10%であった。

4. 被災建物の損傷量予測に関する検討

4.1 概要

地震による被害を受けた建物に関し、補修や補強による復旧を行うのか、建替をするのかの復旧方針を検討する際には、被災建物の残存耐震性能に加え、復旧コストが大きな要因である。また、再使用までの期間が長い場合、その間の経済活動や代替施設を利用せざるを得ない等、間接的損失が生じるため、早急な判断が必要とされる。したがって、実際に補修や補強設計を行う際に実施される建物の詳細な配筋等の情報やひび割れ、剥落等の実測など詳細な調査の前段階として、損傷状態を目視で簡単に判断できる指標から全体の損傷の程度を判断する必要がある。

本研究の青木らは、被災建物への適用を意図し、部材寸法や損傷度といった簡単な情報を用いて、構造躯体及び非構造部材の損傷量及びそれらを重み付けすることで建物全体の損傷量を概算できる手法を提案した⁶⁾。図-7に手法の流れを示す。しかしながら、青木の評価法は曲げ降伏先行型の部材を想定しており、既存の建築物において多くみられるような、せん断破壊が生じる部材は対象外である。

以上の背景を受け、本章では、過去に行ったせん断破壊が先行する部材を有する架構実験の破壊性状等に基づき、せん断部材の損傷量評価モデルの提案を行い、既往の手法に修正を加えた上で、補修復旧が行われた建物へ適用し、3章でまとめた実際の費用と比較することでその妥当性を検証した。なお、本研究で分析対象とした試験体はシアスパン比が2程度、せん断補筋筋比 $pw=0.08\% \sim 0.21\%$ 程度であり、部材中央部にせん断ひび割れが進展する部材を想定している。

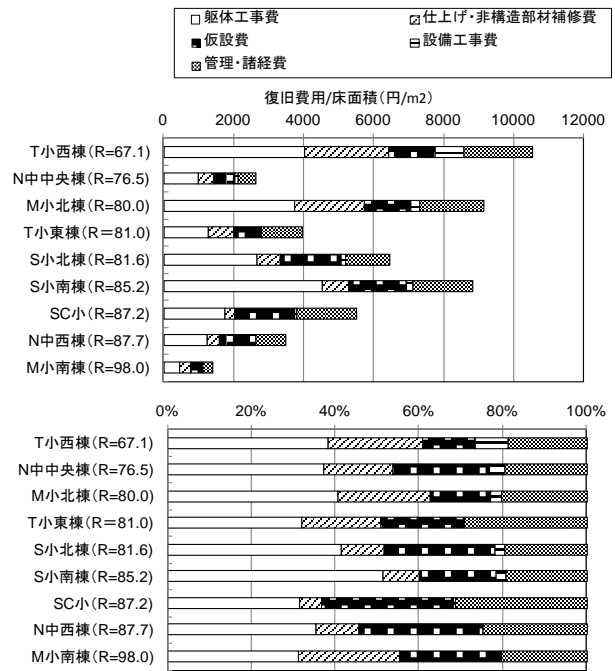


図-5 復旧コスト構成割合(上:絶対値,下:相対値)

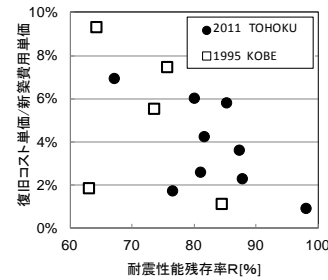


図-6 復旧コストー耐震性能残存率R

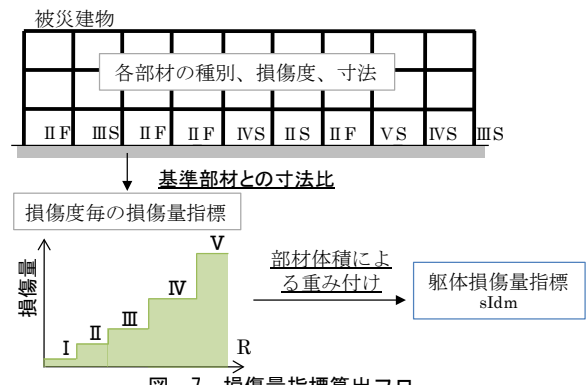


図-7 損傷量指標算出フロー

4.2 実験結果

いずれの試験体においても曲げひび割れが発生するものの降伏には至らず、せん断破壊が先行した。部材の対角線上にせん断ひび割れが発生するとほぼ同時に、急激な耐力低下を引き起こした脆性的な試験体A(写真-1)と、せん断ひび割れが発生するものの、その後もひび割れが分散・損傷が進展するとともにせん断力が上昇していき、最大耐力後も緩やかな耐力低下をする性状を示した試験体B(写真-2)が存在した。図-8にひび割れの種類ごとに分類した各加力サイクル除荷時のひび割れ長さを示す。ここで、ひび割れの種類の分類は、曲げひび割れは材軸に対しておよそ90°~70°程度のなす角で進展しているひび割れ、せん断ひび割れは材軸に対しておよそ70°~20°程度のなす角

度で進展しているひび割れ、付着剥裂ひび割れは材軸に対しておよそ 20° ~0° 程度のなす角で進展しているひび割れであると判断する。ただし曲げせん断ひび割れに関しては曲げひび割れが進展したものとして取り扱い、上記の判断基準は適応せずに分類した。試験体 A は層間変形角 0.33% でせん断破壊し、新たなひび割れの発生が見られなかったこと及びコンクリートの剥落により、部材表面のひび割れ長さは減少に転じていたことによりひび割れの計測はおこなっていない。試験体の破壊性状により部材に生じる損傷量にも大きな違いが見られた。

4.3 実験結果に基づくせん断部材の損傷量評価モデル

本研究では、この破壊モードの判別を靱性指針⁷⁾によるトラス・アーチ機構によるせん断終局強度 V_{su} とせん断ひび割れ強度 V_c の余裕度に着目して評価を行った。図-9 にその概要を示す。評価モデルにより、対角方向に発生するせん断ひび割れ長さを概ね良い精度で推定することができた。

5. 被災建物への損傷量評価モデルの適用

構造躯体の損傷程度（以下躯体損傷量指標 sI_{dm} ）は、想定する崩壊型の部材全てが新設を要するほどの損傷を負った場合の復旧コストとして定義する。 sI_{dm} は、各々の部材の損傷度から部材レベルの損傷量指標 I_k を算出し、それを各部材の体積 V_k で重みづけして式(1)で算出する。せん断部材は上記のモデルに基づき設定を行った。

$$sI_{dm} = \sum (I_k / V_k) / \sum V_k \quad (1)$$

I_k は対象とする部材の各損傷度時の損傷量指標であり、部材に発生する曲げひび割れとせん断ひび割れの評価を別々にを行い、更に部材寸法や年代といった簡単なパラメータにより重み付け平均を行うことで算出する。壁部材に関してはせん断部材と同様の手法を適用した。

算出結果を図-10 に示す。横軸は上述した評価手法により損傷度から算出した値であり、縦軸は復旧資料の躯体工事費用単価を、被災度判定及び復旧指針の判定⁸⁾に基づき経年劣化を考慮した基準額で除した値である。バラつきは見られるものの概ね良い精度で評価することができたといえる。また、耐震性能残存率と、躯体損傷量指標の関係を図-11 に示す。図-6 と同様に被害が大きくなるに伴い、 sI_{dm} が大きくなる傾向が見られた。被災度に関わらず躯体復旧コストが全体に占める割合は同程度であったため、この指標を用いることにより全体の復旧コストを概算できる可能性が示された。

6. 結論

本研究によって得られた知見を以下に示す。

(1) 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_k 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。

(2) 震動被害により、解体・改築された建物と補修により復旧された建物の被害レベルの境界は、被災度区分判定基準の中破 ($R=60\sim80\%$) に対応した。

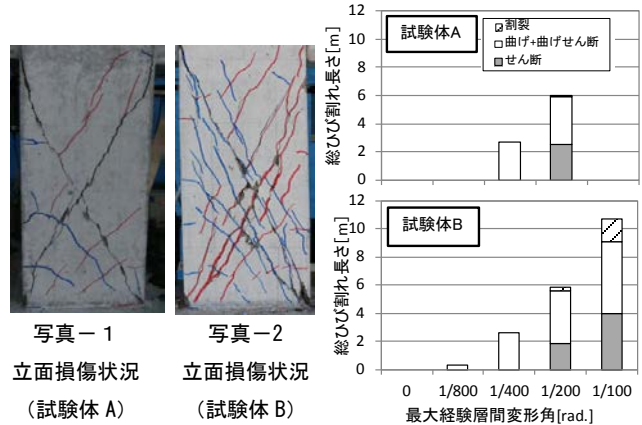


図-8 ひび割れ長さの推移

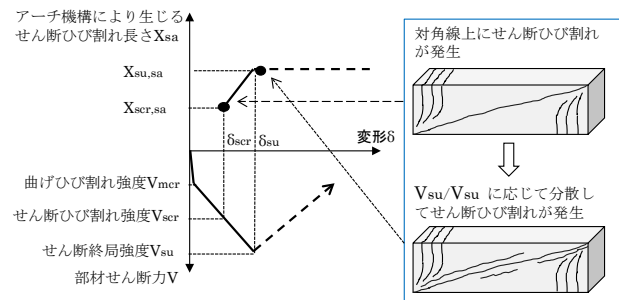


図-9 せん断ひび割れ評価法の概要

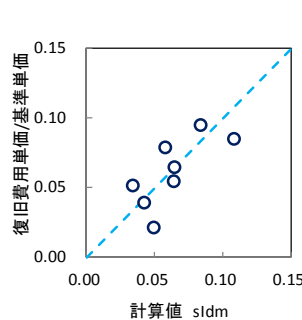


図-10 躯体損傷量指標算出結果

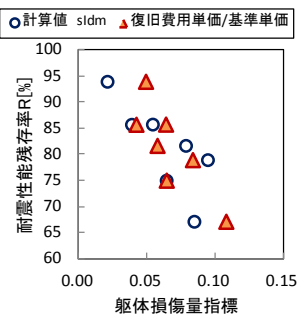


図-11 躯体損傷量指標一耐震性能残存率 R

(3) 構造躯体の被災度と復旧コストの間には相関関係が認められた。また、部材の寸法や損傷度から建物全体の損傷程度を推定する手法を実被害建物に適用し、その有用性を示した。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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(平成7年度),1995.3
- 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(平成23年度),2012.3
- 5) 前田匡樹,本多祐子,康大彦：地震被害を受けた鉄筋コンクリート造学校建物の被災度と復旧コスト,第11回日本地震工学シンポジウム,2002
- 6) 青木貴,前田匡樹：RC造建物の耐震修復性及び修復限界状態の評価を目的とした損傷量評価法の提案,日本建築学会構造系論文集,2012.9
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説,2001