

2006年5月27日インドネシアジャワ島中部地震による建物被害

Damages of Buildings and Housings due to the May 27, 2006 Mid-Java Earthquake, Indonesia

倉本 洋¹, 前田匡樹², 河野 進³, 楠 浩一⁴
真田靖士⁵, 高橋典之⁶, ファウザン⁷, 山野辺宏治⁸

Hiroshi KURAMOTO¹, Masaki MAEDA², Susumu KONO³, Koichi KUSU⁴
Yasushi SANADA⁵, Noriyuki TAKAHASHI⁶, FAUZAN⁷ and Koji YAMANOBE⁸

¹豊橋技術科学大学建設工学系, Dept. of Civil & Architectural Engineering, Toyohashi University of Technology

²東北大学建築学科, Dept. of Architecture, Tohoku University

³京都大学建築学科, Dept. of Architecture, Kyoto University

⁴横浜国立大学建設学科, Dept. of Architecture, Yokohama National University

⁵東京大学地震研究所, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

⁶東京大学生産技術研究所, Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

⁷豊橋技術科学大学大学院, Graduate School of Engineering, Toyohashi University of Technology

⁸清水建設技術研究所, Technical Research Institute, Shimiz Corporation

SUMMARY: A reconnaissance team was organized by the authors to investigate the damages of RC buildings and housings due to a strong earthquake occurred in mid Java Island, Indonesia, at 5:53 local time, May 27, 2006. The main objective was to analyze major factors of the earthquake damages through the field survey on the structural planning, construction condition and site condition for damaged buildings. The field survey was conducted by focusing (1) RC buildings in Yogyakarta city and (2) school buildings and the surrounding brick masonry housings in Bantul area. The earthquake damage of RC buildings in Yogyakarta city is different by a region and categorized into (1) the site damage, (2) the damage of a roof due to the lack of tie beams and (3) the story collapse due to the worse structural planning and relatively large earthquake input. The damage ratio of the brick masonry housings is severer than that of school buildings in Bantul area. This paper outlines the field survey and results of the examination.

1 はじめに

2006年5月27日午前5時53分(現地時間)にインドネシアのジャワ島で発生したM6.3の地震による建物被害を調査するために、文部科学省科学研究費補助金(特別研究促進費)による「2006年5月27日インドネシアジャワ島中部地震による被害に関する調査研究(代表:川瀬博・九州大学教授)」の一環として建物被害調査チームが組織された。

調査チームは筆者8名で構成され、建物被害が顕著であった地域において現地調査を実施し、構造計画、施工実態および地盤状況などから地震被害の要因を分析することを主たる目的とした。現地調査は7/3~7/6(出張期間:7/1~7/8)の4日間実施し、先遣隊(JSCE/AIJ合同調査隊)による事前調査情報[1]並びにガジャマダ大学(UGM)の調査グループからの情報に基づいて、①顕著な被害が報告されているジョグジャカルタ市内のRC造建物(担当:倉本,楠,山野辺,Fauzan),および②この調査に先立って九州大学チームにより実施された現地調査(6/20~6/26)において微動計測が行われたパントゥール地域の学校建物並びにその周辺の煉瓦造建物(担当:前田,河野,真田,高橋),を主な調査対象とした。

本稿では、これらの現地調査から明らかとなった建物被害状況とその要因について概説する。

2 ジョグジャカルタ市内のRC造建物の被害

ジョグジャカルタ市内のRC造建物の被害調査では、ガジャマダ大学(UGM)での事前ミーティングにおける情報に基づいて以下の6大学((1)~(5)と(7))および会計検査院((6))の計7カ所を調査対象として選択した。Fig. 1に調査建物と震源および断層の位置関係を示す。

- (1) Yogyakarta Muhammadiyah University (UMY)
- (2) Ahmad Dahlan University (UAD), campus I
- (3) Ahmad Dahlan University (UAD), campus II
- (4) State Islam University (UIN)
- (5) Economic Science Higher School (STIE)
- (6) Finance and Development Audit Agency (BPKP)
- (7) Indonesia Institute of the Arts (ISI)

Fig. 1に示されるように、調査地域は(1)、(2)~(4)および(5)~(7)の3地域に分類でき、地盤条件や断層からの距離によって建物被害の様相が異なる。各地域の被害状況は以下のとおりである。

2.1 地域I(建物(1))の被害状況

この地域はUMYの新キャンパスが建設中であり、地盤の被害が顕著であった。Photo 1は建設中の校舎であり、この1階の床はPhoto 2に示すように地盤の不同沈下により上下に変形している。しかしながら、上部構造にはほと

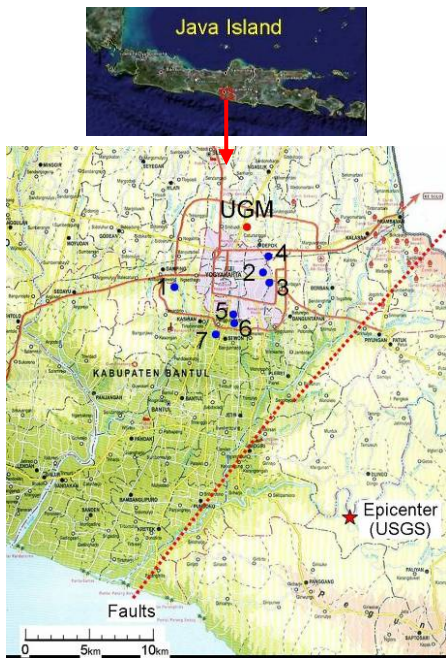


Fig.1 Location of Investigated Buildings



Photo 1 College under Construction (UMY)



Photo 2 Inequality Subsidence (UMY)



Photo 3 Damage of Roof in UAD



Photo 4 Damage of Roof in UIN



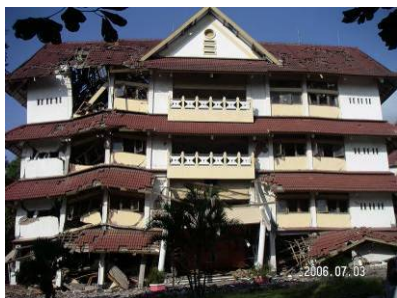
(a) Slight Damaged Building



(a) Slight Damaged Building



(a) Slight Damaged Building



(b) Story-Collapsed Building



(b) Story-Collapsed Building



(b) Story-Collapsed Building

Photo 5 Damage in STIE

Photo 6 Damage in BPKP

Photo 7 Damage in ISI

んど損傷が認められない。また、建設地周辺の地盤も調査したが、液状化を生じた痕跡は認められなかった。

以上から、この地域は比較的地盤が軟弱で、建設工事により掘削した部分は地震の影響で地盤変状を生じたが、地震入力そのものがあまり大きくなかったため、周辺地盤が液状化するまでには至らなかったものと推察される。

2.2 地域Ⅱ（建物(2)～(4)）の被害状況

この地域ではUAD（2カ所）とUINの2大学3棟の被害を調査した。何れの建物も柱、梁等の構造部材の損傷は軽微であったが、Photo 3および4に見られるように、屋根の被害が顕著である。これは、最上階に繋ぎ梁がなく、屋根トラスの下弦材を横架材として用いるディテールが

原因と考えられる。横架材の配置間隔が広いUADでは、RC柱の頂部と横架材の接合部の破壊により屋根トラスが崩落している（Photo 3）。一方、横架材が比較的密な間隔で配置されているUINでは屋根トラスの崩落していないが、屋根瓦が崩落し、弦材の局部座屈も認められる（Photo 4）。なお、UINでは2スパン毎に梁間方向に煉瓦壁が配されていたが、地震時にせん断破壊したため撤去されていた。これらの壁の存在が地震時の屋根の揺れを緩和した可能性も否定できない。

以上のように、この地域の建物被害は主に最上階架構と屋根との構造形式に依存するものであり、構造躯体自体の被害は顕著ではなく、地震動入力はそれほど大きくはなかったものと推察される。

2.3 地域Ⅲ（建物(5)～(7)）の被害状況

この地域はジョグジャカルタ市の南、シウォン (Sewon) 市北部に位置する。この一帯では RC 造建物の被害が比較的多く、倒壊した建物も数棟あった。その一方で、隣接して建設され、倒壊したものと同じような平面および立面形状であるにも関わらず、地震被害がほとんどないあるいは軽微に留まっているものも存在する。それらの数例を Photo 5～7 に示す。

Photo 5(b)は、1階で層崩壊した STIE の校舎である。1階は事務室として使用されていた。被害状況から推察すると、偏心によるねじれ崩壊の可能性がある。また、主筋および横補強筋は全て丸鋼であり、かつ柱上部で重ね継ぎ手を施していたことも層崩壊の一因と考えられる。このキャンパスでは5、6棟の RC 造校舎が建設されているが、倒壊した建物は上記のもののみで、隣接している5階建ての建物が中破程度(主に屋根の被害)であったのを除けば、他の建物は Photo 5(a)に示すように構造部材の損傷がほとんど認められない。なお、倒壊した建物は隣接する中破の建物とともにモニュメントとして保存される予定であると聞いたが、真偽は定かではない。

Photo 6は BPKP (会計検査院) の被害状況を示したものである。この建物は Fig.2 に示すように、全体の平面形状が「へ」の字で、エキスパンションジョイントで分離された2棟によって構成されている。西側の建物が1階で層崩壊を生じているが (Photo 6(b))、東側の建物の損傷は軽微である (同(a))。層崩壊を生じた建物は特に西側妻面で被害が顕著であり、北西隅柱は2階脚部でもせん断破壊している。

Photo 7は ISI における隣接する2棟の校舎の被害状況を示したものである。これらの建物は平面および立面形状がほとんど同じものである。1997年竣工の建物が軽微な被害 (Photo 7(a)) であるのに対して、2002年に竣工した建物の1階の北側半分で層崩壊を生じている (同(b))。インドネシアでは2002年に耐震基準が改定されているが、上記2棟は何れも旧耐震基準 (1989年改定基準) で設計されたものである。

2.4 倒壊建物の詳細調査

2.3節で示した BPKP の2棟および ISI の2棟については、構造設計図を入手することができた。本節では、これらの建物に対する構造設計図に基づいた被害要因の検討結果を示す。

(a) BPKP の被害要因

2.3節で述べたように、この建物はエキスパンションジョイントで分離された2棟によって構成されている。

Fig. 3には、1階で層崩壊を生じた西側の建物の内部の破壊状況を1階および2階平面図と共に示している。同図から明らかのように、1階には一点鎖線で示した控え壁があるが、柱はすべて独立柱となっている。一方、2階の平面図を見ると、赤色で示した煉瓦壁が西側妻面とその隣の構面の北側に配されている。これらの壁は1階でせん断破壊を生じた柱 (1階平面図上で赤色で表示) の上に位置している。したがって、これら2階の壁にせん断力が集中したことにより直下の柱がせん断破壊し、層崩壊に至ったものと推察される。なお、写真に示されるように2階の壁および1階の控え壁はせん断破壊し、補強筋がないために面外に崩れている。

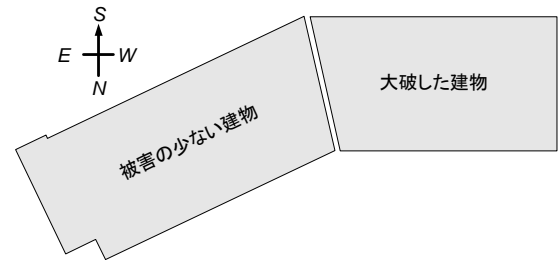


Fig. 2 Building Arrangement of BPKP

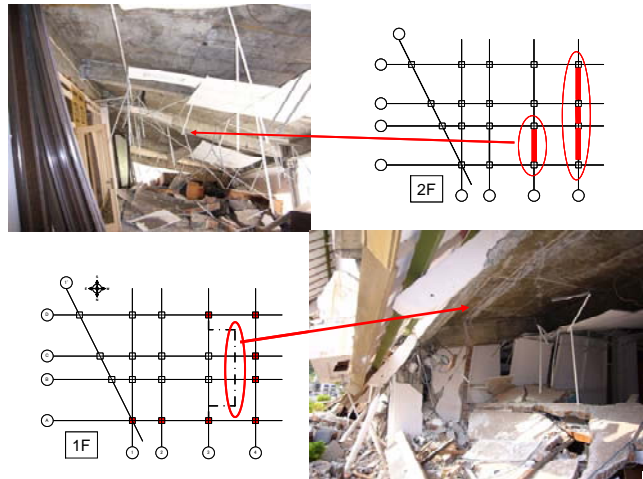


Fig. 3 Damages of Story-Collapsed Building in BPKP

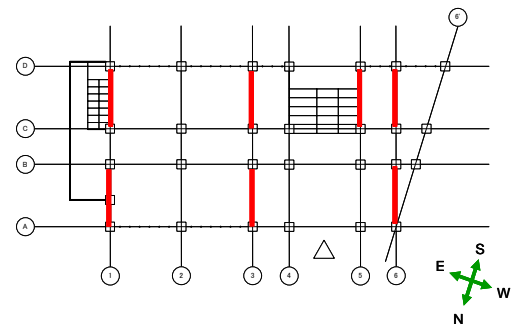


Fig. 4 Ground Plan of Slight Damaged Building in BPKP

一方、軽微な被害であった東側の建物は Fig. 4 に示す1階平面図に見られるように、煉瓦壁が梁間方向に多く配されている。この煉瓦壁にはせん断ひび割れが多く生じているが、張間および桁行き方向共に柱および梁の損傷はほとんど認められない。

なお、東側の建物の損傷状況から、地震による建物の揺れは南北方向が支配的であったと推察される。このことは、西側建物の倒壊状況とも一致する。

(b) ISI の被害要因

前述したように、ISI では平面および立面形状が類似し、隣接した2棟の建物のうち竣工年次の新しいものが1階で層崩壊し、古いものが軽微な被害に留まっている。

Fig.5に層崩壊した建物の1階平面図を被害状況と共に示す。図中の赤印はせん断破壊を生じている柱を示している。柱の被害は北側 (図の左側) 半分に集中し、北側構面はパンケーキ状に倒壊している (Photo 8)。一方、南側は Photo 9にも示されるように、階段室があるため比較的煉

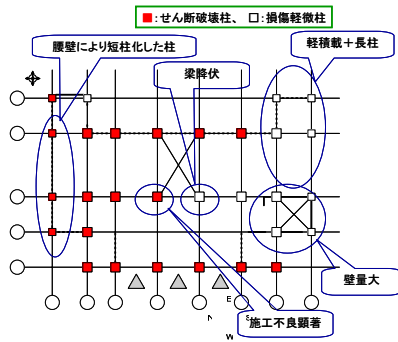


Fig. 5 Ground Plan of 1st Story of Story-Collapsed Building in ISI



Photo 8 Damage of North-side of the Building



Photo 9 Damage of South-side of the Building



Photo 10 Damage of Inside Columns of the Building



Photo 11 Damage of South Frame of Slight Damaged Building

瓦壁が多く配されていることと、南側構面が増築中で二次壁等がなく柱が長柱であったことが比較的軽い被害に留まった一因と考えられる。また、Photo 10 に示すように、1階中央ではせん断破壊した柱の隣に健全な柱がある。せん断破壊を生じた柱を見ると、破壊部分にジャンカが認められ、施工不良も破壊に少なからず影響したものと考えられる。

一方、被害が軽微であった隣接する建物の南側妻面の1階部分はPhoto 11 に示すように、二次壁がせん断破壊しているものの、構面自体はフレーム構造となっており、柱および梁の損傷はほとんど認められない。これに対して、倒壊した建物の北側構面は黄色の影で示したように、煉瓦壁が腰壁として配され、柱が短柱化していたことが入手した構造図より判明した。

Fig. 6 は両建物に対して、構造計図に基づいて二次壁を剛域として考慮したフレームモデルによる静的非線形荷重増分解析の結果を示したものである。この解析によると、被害が軽微であった建物のベースシア係数は0.7以上あり、倒壊した建物でも0.6以上となっている。しかしながら、倒壊した建物の北側構面の短柱のせん断破壊を考慮すると、当該建物の保有耐力はベースシア係数で0.2程度となっている。解析仮定やモデル化等を勘案すると、若干大雑把な解析ではあるが、本解析の範囲では、被害が軽微であった建物は十分な保有耐力を有していること、並びに層崩壊した建物では、北側構面の短柱のせん断破壊が倒壊原因に大きく影響しているものと言える。

3 学校建築とその周辺の被害

3.1 調査地域と調査の概要

調査は、ジョグジャカルタの南で震源に近いパントゥール (Bantul) 地域の学校 12ヶ所で、Fig.7 に示すように断層線を横切る南北2本の測線上の地点(図中の●)とした。

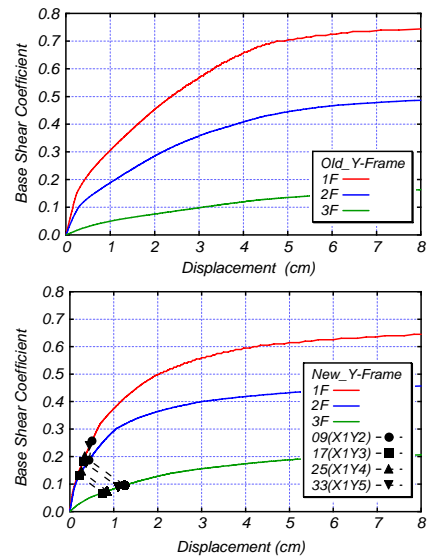


Fig. 6 Results of Pushover Analysis



Fig.7 Location of Investigated School Buildings

これらの地点では九州大学・川瀬博教授の調査グループが地盤の微動観測を行っている。

各調査地点では、全ての校舎の建設年代、構造形式および被害状況を調査し、各校1棟については、平面や柱寸法、壁厚などを実測調査した。また、学校周辺1ブロックの煉瓦造住宅の倒壊率も調査した。

3.2 学校建築の構造形式と特徴的な被害

調査地域の学校建築の構造形式は、平屋建または2階建の煉瓦造建築であった。校舎の平面は、基本的に日本の学校建築と同様に一文字型の教室の配置で、1教室が桁行き方向8~9m、張間方向7~8mの片廊下型で、廊下には屋根庇はあるが屋外となっており、外壁および教室間の間仕切り壁は煉瓦造となっている。Fig.8に示すように、煉瓦(幅120mm×長さ240mm×厚さ30~50mm程度)を積んで壁を構成し、壁上に張間方向に屋根組みの木造トラスを架け、屋根下地に瓦を葺いている。煉瓦壁の補強形式により、学校校舎の構造を大略以下の3形式に分類できる。

- (1) 無補強煉瓦造 (URM: Un-Reinforced Masonry)
- (2) 枠組み煉瓦造 (CM: Confined Masonry)
- (3) RC造フレーム+後積み煉瓦壁 (RC+URM)

概ね1970年以前がURM、1970年以降はCMで、2000年代の新しい建物はRC+URMの構造が多い。

3.3 学校建築の被害の傾向

Fig.9に建設年代別の被害率を、Fig.10に構造形式別の被害率をそれぞれ示す。図中のDamage LevelはI, II, III, IV, Vの順に軽微、小破、中破、大破、倒壊である。これらから明らかなように、無補強煉瓦造 (URM) の被害率はRC架構で補強された枠組み煉瓦造 (CM) やRCフレーム+後積み煉瓦壁などと比較して高く、煉瓦壁を拘束することで被害が軽減される、つまり、耐震性が高くなる傾向は確認できる。しかしながら、2000年代以降の新しい

建物でも大破 (IV) や倒壊 (V) が少なからず有り、日本のRC造学校建築ほど、建設年代による被害率の差は見られない。これは、RCフレームを用いた新しい建物でも煉瓦壁の拘束が不十分であること、屋根架構は古いものと同様の強度・剛性に乏しい構造形式で、これらの部分に被害が生じるからである。

典型的な枠組み煉瓦造の構造形式がFig.8である。柱断面は、壁厚と等しい150mm×150mm程度で、配筋は主筋4-10φまたは8φ、帯筋8φ@150~6φ@200程度と配筋も多くない。壁上部にはRC柱を繋ぐRC梁を配している場合もあるが、RC梁が無く柱が片持ち形式となっている構造も比較的古い建物では見られた。最近の建物では、Fig.8に示すように、RC柱およびRC梁で煉瓦壁を拘束する形式となっており、妻壁や教室間仕切り壁上部の屋根を受けるために煉瓦壁もRC梁で拘束されている。各教室中間部の屋根架構は木造トラスで、屋根面は木造の下地に屋根瓦を載せる形式で、屋根面内の強度・剛性を確保する筋交いが用いられておらず、屋根面が崩壊し屋根瓦が落下した被害事例 (Photo 12) が多数見られた。また、屋根トラスの

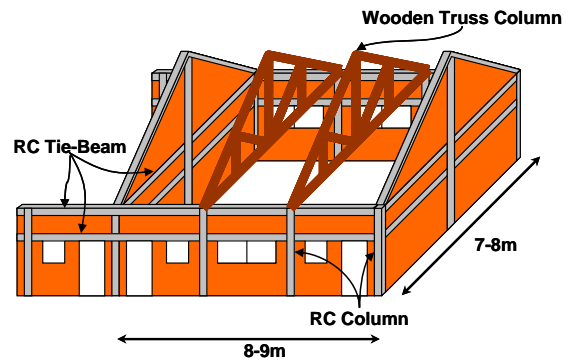


Fig.8 Typical Structural System of School Buildings



Photo 12 Partial Collapse of Roof



Photo 13 Collapse of Roof Structure



Photo 14 Damage of Unconfined Masonry Wall

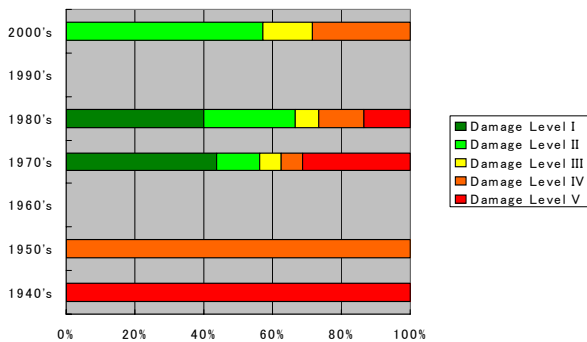


Fig.9 Construction Age vs. Damage Ratio

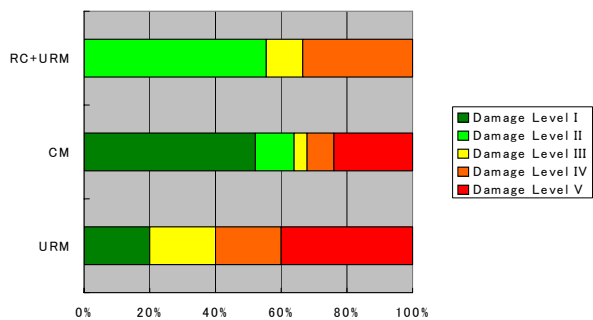


Fig.10 Structural System vs. Damage Ratio

下部架構への定着が十分でないために屋根架構の崩壊も多数見られた (Photo 13). さらに, RC 梁・柱で拘束されていない, あるいは拘束が不十分な煉瓦壁の崩壊 (Photo 14) も見られた.

3.4 学校周辺の一般家屋の被害

調査地域は農村地域で, 学校周辺の一般家屋は, 学校建築と同様に煉瓦造壁と木造屋根からなる構造がほとんどで, 古いものは URM, 比較的新しいものは CM が多く見られた. 調査地域では, 壊滅的な被害を受けた地域も多く, Photo 15 のように完全に倒壊し瓦礫となった家屋や, 煉瓦壁と屋根に大きな被害を受けたものが多数見られた.



Photo 15 Damage to Residences

UNOSAT 衛星写真による被害推定地図 (<http://unosat.web.cern.ch/unosat/asp/>) に, 調査地点ごとの被害率 (赤: 全壊, 黄: 半壊, 緑: ほぼ無被害) を加筆し, Fig.11 に示す. UNOSAT による被害推定結果と同様に断層に近づくに従い一般家屋の倒壊率は大きくなり, 断層近傍では 100% に近い倒壊率の地点もある. 北測線と南測線では, 震源から離れている北測線上の方が倒壊率が高い傾向にある. また, 断層から数 km 離れたパントゥールの中心部やパンダック (Pandak) でも倒壊率が 40~50% 程度の倒壊率であった.

Fig.12 に南測線上の各地点の一般家屋と学校建築の被害率の比較を示す. 学校建築の被害率も断層に近づくとき大きくなる傾向は同様であるが, 一般家屋の被害率を大幅に下回っている. これは, この地域では伝統的に家屋は, 専門工事業者ではなく住民自ら施工しており, 結果として施工品質が学校建築より劣るものが多いことが原因のひとつと思われる.

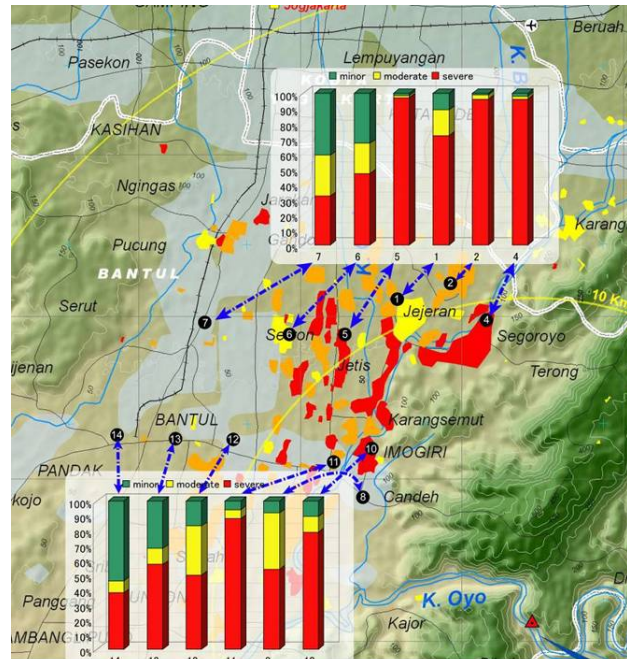


Fig.11 Damage Ratio of Residences

4 まとめ

ジョグジャカルタ市内の RC 造建物の被害調査では, 3 地域 7 カ所 (6 大学および会計検査院) を調査対象とした. 地域により被害状況が異なり, (1)地盤の被害, (2)繋ぎ梁がないことによる屋根の被害, および(3)建物の倒壊に大別できる. 前者 2 地域においては建物構造躯体の被害は顕著ではなかった. 一方, (3)の地域では倒壊している建物がある一方で, 類似した軽微な被害の建物も見受けられ, 構造計画や施工の良否が建物被害を左右した可能性がある. ちなみに, 構造図面に基づいた静的非線形荷重増分解析から, (3)の地域における入力地震動レベルは標準せん断力換算で概ね 0.2 程度であったと推定される.

学校建築および一般家屋は煉瓦壁の拘束がない/不十分な建物も多く, また, 木造屋根架構の強度・剛性が不十分であったため, 煉瓦壁の崩壊, 瓦の落下や屋根架構の崩落など甚大な被害を受けたと推察される. 学校校舎は断層近傍では大破・倒壊率が 50% を超えるが, 数 km 程度は離れると大破・倒壊が少ないこと, および一般家屋の被害率は学校建築よりはるかに大きかったが明かとなった.

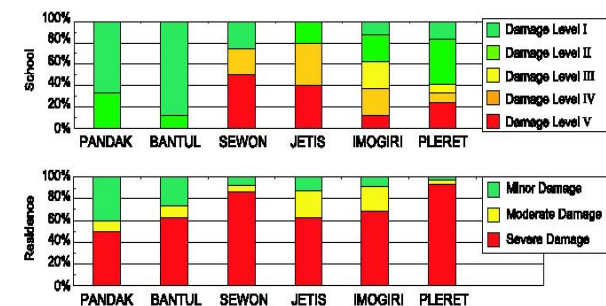


Fig.12 Comparison of Damage Ratio between School Buildings and Residences

謝辞

本研究は, 文部科学省科学研究費補助金 (特別研究促進費) 「2006 年 5 月 27 日インドネシアジャワ島中部地震による被害に関する調査研究 (代表: 川瀬博・九州大学教授, 課題番号: 18900001)」の一環として実施されたものである. 現地調査にあたっては, 日本建築学会・災害委員会, ガジャマダ大学・土木工学科, アンダラス大学・土木工学科のご協力を得た. 関係各位に記して感謝の意を表します.

参考文献

[1] JSCE/AIJ Advance Team: Provisional Report of the May 27, 2006, Mid Java Earthquake, Indonesia, 22pp., June 15, 2006