

衛星画像による2007年ペルー・ピスコ地震の
建物被害把握の精度検証
VISUAL DAMAGE DETECTION OF BUILDINGS
USING QUICKBIRD IMAGES
FOLLOWING THE 2007 PISCO, PERU EARTHQUAKE

松崎 志津子¹⁾、山崎 文雄²⁾、Miguel Estrada³⁾、Carlos Zavala⁴⁾
Shizuko MATSUZAKI¹, Fumio YAMAZAKI², Miguel ESTRADA³,
Carlos ZAVALA⁴

1) 千葉大学大学院工学研究科、博士後期課程 修(工)

¹ Graduate Student, Graduate School of Engineering, Chiba University, M. Eng.
e-mail : 10td0309@graduate.chiba-u.jp

2) 千葉大学大学院工学研究科、教授 工博

² Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.
e-mail : yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

3) ペルー国立工科大学日本 - ペルー地震防災研究センター(CISMID)、准教授 Ph.D.

³ Associate Professor, Japan Peru Center for Earthquake Engineering and Disaster Mitigation,
National University of Engineering, Peru, Ph.D. e-mail : estrada@uni.edu.pe

4) ペルー国立工科大学日本 - ペルー地震防災研究センター(CISMID)、所長 Ph.D.

⁴ Director, Japan Peru Center for Earthquake Engineering and Disaster Mitigation,
National University of Engineering, Peru, Ph.D. e-mail : czavala@cismid.uni.edu.pe

ABSTRACT: A strong earthquake struck the city of Pisco in Peru on 15 August 2007. The authors performed visual damage detection of buildings using images by QuickBird satellite. The interpretation was carried out building by building, then the damage grades of about 10,800 buildings were determined. The results were compared with field survey data and also with aerial photographs, and the accuracy of damage inspection was studied. The results show that about 70% of collapsed buildings of the whole city were detected. Some amount of omission error was observed due to the limitation of vertical images.

キーワード: QuickBird、建物被害、目視判読、2007年ペルー・ピスコ地震

1. はじめに

災害発生時において、リモートセンシングによる広域観測は被害把握の有効な手段のひとつである¹⁾。人工衛星リモートセンシングは、航空写真に比べると解像度では劣るものの、一度にはるかに広い地域を観測できる特徴がある。また同じ地域を繰り返し観測して時系列変化を把握できる利点を生かし、災害発生から早期に緊急観測し広域的な被害を推定することは、防災利用の中で最も期待されている^{2), 3)}。

とくに2001年に打ち上げられたQuickBird衛星は、地上解像度がパンクロマチック・バンドで0.61mと

極めて高解像度であり⁴⁾、その画像を用いた地震時の建物被害把握が試みられてきた。その手法には、画像を目で見比べて被害を判断する目視判読と、デジタル画像処理による自動被害抽出⁵⁾がある。目視判読による建物被害把握の例としては、2003年5月に発生したアルジェリア地震の地震前後の画像を用いた約1,400棟の建物被害の目視判読があり、判読者により結果にばらつきがあること、建物密集地域の判読が困難であること、崩壊や部分崩壊に比べて一部損傷は判読困難であることなどが指摘された⁶⁾。また2003年12月のイラン・バム地震に関しては、地震前後画像により約12,000棟の建物被害目視判読が行われ、そのうちの421棟について地上調査結果と比較がなされ、被害の大きな建物は十分に被害を判読でき、とくに崩壊クラスの被害は地上調査の60%以上が正しく判読できると報告された。しかし、全体的に被害クラスを小さめに判読する傾向が指摘された⁷⁾。

QuickBird衛星以外の高分解能光学センサ衛星もあり、2001年インド・ブジ地震におけるIkonos衛星の利用⁸⁾や、2008年中国四川地震におけるFORMOSAT衛星画像からの目視による建物被害判読が行われている⁹⁾。しかし、このような衛星画像を利用した個別建物の被害把握の研究は始まってから日が浅く、地上確認データの不足などから、精度の検証はまだ充分には行われていない。また被害把握の精度は画像解像度に依存するのみならず、対象地域の自然環境や社会環境にも影響されるので、当面はさまざまな状況での検証を続ける必要があると考えられる。

本研究では、災害直後の被害把握における高分解能光学センサ衛星画像の有効性を検討し、衛星画像から判読できる建物被害レベルを明らかにすることを目的に、2007年8月にペルー太平洋岸を襲ったピスコ地震のQuickBird衛星画像を用いて建物被害把握を行った。地震前後の2時期画像を目視で比較し、約12,000棟の建物の被害レベルを1棟ずつ判定した後、その結果を地上からの被害調査結果と比較した。また、より分解能の高い航空写真からの目視判読結果とも比較した。

本研究では、比較する地上調査としてCISMID(ペルー国立工科大学ペルー日本地震防災センター)¹⁰⁾が実施した10,000区画以上の建物調査結果があるため、既往の研究と比較して圧倒的に多くのサンプル数での地上調査との比較検討が可能であり、実用を視野に入れた適用性の検討を目的とする。目視判読は単純ではあるが画像を用いた被害把握の基本であり、自動抽出手法の開発においても精度を検討するうえで検証データとして必要である。目視判読の有効性と限界を明らかにすることは、リモートセンシングによる被害把握の実用化を進めるうえで重要な意味を持っている¹¹⁾。

2. ピスコ地震と研究対象地域

2007年8月15日、ペルー国太平洋岸のイカ州沿岸部においてマグニチュード7.9の地震が発生した(「2007年ペルー・ピスコ地震」とする)^{12), 13)}。ペルー国家統計情報局(INEI)によると、イカ州とりマ州南部を中心に約600人の死者と1,000人以上の負傷者、9万棟以上の倒壊家屋が出る大災害となり¹⁴⁾、震源から北に約200km離れた首都のリマでも大きな揺れが観測された¹⁵⁾。

本研究の対象地域は、イカ州のうち震源に近く被害の大きかったピスコ郡の中心ピスコ市とする。ピスコ市は人口約5万4千人で、太平洋に面しており、主要な国道のパンアメリカン・ハイウェイが近くを通過している。筆者らは、地震直後から数回にわたって、ピスコ市の被害状況を調査している。

CISMIDの調査によると、この地区の建物で構造の把握されている建物10,494区画のうち約18%はアドベ(日干しレンガ)造、約79%が焼成レンガ造で、両者を合わせて組積造建物が全体の97%を占める。組積造は一般に靱性に乏しく架構の変形から一気に崩壊する¹⁶⁾。しかし、ペルーの焼成レンガ造の場合は、鉄筋コンクリート(RC)による柱梁で壁を補強した枠組み組積造(コンファインド・メーソンリー)であり¹⁷⁾、また床もRCスラブが多く、建物全体の水平剛性は比較的大きい。今回の地震でも、アドベ造の建物に被害が多くみられた¹⁸⁾。

図1に地震12日後のQuickBird衛星画像を、図2に市街中心部の地震前後の衛星画像の部分拡大を示す。図1、2ともにパンシャープン画像をトゥルーカラー表示している。地震前画像は地震約70日前の6月3日に、地震後画像は8月27日に取得された。平均オフナディア角は地震前画像が26°、地震後画像が30°である。図2では中央の建物で、地震前に判別できた屋根が地震後には瓦礫状となり、建物の影もなくなっ

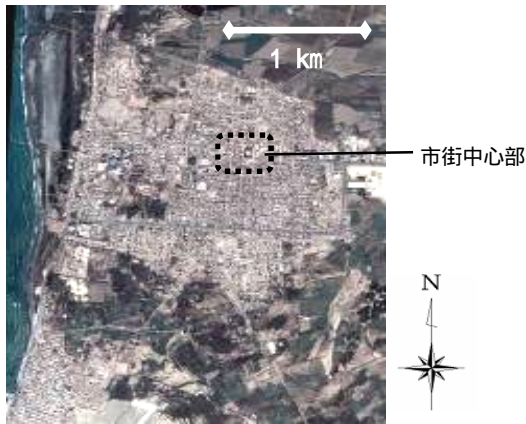


図1 地震後12日後のビスコのQB衛星画像



図2 地震前(左),地震後(右)のQB衛星画像の一部

て、完全に崩壊したことが観察できる。瓦礫はおもに、壁材である日干しレンガか焼成レンガ、RCガラ、アドベ造屋根材の竹や泥で、雨が降らないこの地方では¹⁰⁾屋根瓦はほとんど使用されていない。

3. 判読・検証の流れと建物被害区分

まず判定する区画の大きさと形状を確認するために敷地 GIS データを衛星画像に重ね、地震約 2 ヶ月前と地震 12 日後の衛星画像を比較して 1 棟ずつ被害レベルを判読する。使用する被害レベルの分類はその地域の建物構造種別によるが、今回は既往の研究にならい EMS 1998¹⁹⁾を使用した(図 3)。これは組積造建物の被害レベルを定義したものである。衛星画像判読では Grade1(G1)と Grade2(G2)の判別は困難として、無被害もこれに含めた。判読した結果を GIS で集計し、地上からの被害調査と比較して、その精度の検証をエラーマトリクスを用いて行った。さらに一部地域について、地震前衛星画像と地震翌日の航空写真から目視被害判読を行い、衛星画像のみによる判読と比較をした。

比較検証用の地上被害調査は、CISMID が地震直後から 3 ヶ月をかけて実施したもので、調査団は研究者や復旧関係者など 40 人以上から構成されている。調査項目は、建物用途、階数、構造種別、被害レベルで、敷地コード番号は敷地の GIS データに対応している。被害は敷地ごとに判定され、複数の建物がある場合には、その敷地の最も大きな被害をもってランクを判定する。壁がある程度残っていても、屋根が崩落している場合は崩壊と判定される。この地上調査は、被害レベル分類を EMS1998 でなく CISMID 独自の 4 段階(Sin dano, Leve, Severo, Grave)によっている。表 1 に CISMID の被害分類と EMS1998 分類の関係を示す。地上調査での被害の評価に当たり CISMID ではワークショップを開催し、調査に参加した全員が 4 つの被害分類の基準について知識を共有するようにしている。実際には 75%の区画では敷地の奥まで立ち入り調査ができたが、25%ほどの区画では不可能であった。たとえば被災した土地が第三者に不法に占拠されないよう、囲いを新たに増設した区画などである。

目視判読作業を行ううえで地震前後の変化で着目した点は、屋根と影の形状の変化とテクスチャの変

G1 	Grade1	ほとんど被害なし わずかな仕上げの落下
G2 	Grade2	構造体のわずかな被害 かなり大きな仕上げの崩落
G3 	Grade3	幾分の構造体被害, 大きく広範囲な壁のクラック, 非構造部材の損傷
G4 	Grade4	構造体への深刻な被害, 壁の 深刻な損傷, 屋根床の一部崩落
G5 	Grade5	建物全体の崩壊

図3 European Macroseismic Scale 1998
組積造被害分類

表1 2つの被害分類における被害レベルの関係

CISMID 4 段階被害レベル	EMS1998
SIN DAÑO (no damage : 被害なし)	G1,G2
LEVE (slight : 軽度の被害)	
SEVERO (severe : 著しい被害)	G3
GRAVE (serious : 深刻な被害、崩壊)	G4,G5

化である．とくに影は重要で、この地方の屋根は土かコンクリートで道路や裸地と似た色合いのため、影により個別の建物形状が認識されるだけでなく、影の形の変化により被害状況がわかることが多い．

4. QuickBird 衛星画像を使用した目視被害判読

今回は一人で全ての判読を行い、極力、地上調査結果を見ないように作業した．1 時間の作業で 130 ~ 250 区画を判読し、総作業時間として約 65 時間を費やした．図 4 に判読作業結果の GIS 表示を示す．甚大な被害である G5 ランクの建物は西側の海沿いと中央よりやや東側の旧市街に多い．

表 2 に衛星画像判読結果と地上調査の比較を示す．図 5 は各々の被害ランクの割合を示している．対応するそれぞれの被害ランクは、画像判読と地上調査でほぼ同じ割合となっている．被害なし・軽度と崩壊被害が全体の 9 割近くを占め、中程度の被害割合は少ない．靱性が小さく、一気に崩壊してしまう組積造建物の性質が顕著に表れている．なお全 12,079 区画のうち、地上調査で No Data (調査結果なし) となっている建物 1,149 区画、及び地震前画像で空地であるのに崩壊と判断されていた 104 区画は除外して 10,826 区画を精度評価の対象としている．

判読精度の評価にはエラー・マトリクスを用いる(表 3)．行列の縦方向で算出した精度がプロデューサ精度で、地上調査から見て実際の被害の何%が正しく判読されたかを示す．また横方向で算出したものがユーザ精度で、行った判読の何%が正しい判読であったかの信頼度を表す．対角方向の成分の合計を総数で除したものは総合精度と呼ばれる．

表 4 に衛星画像を用いた目視判読結果の精度を示す．プロデューサ精度、ユーザ精度ともに 70% 以下

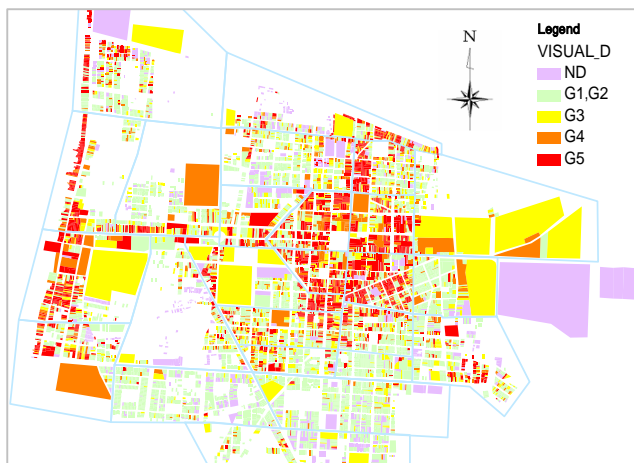


図 4 ピスコ市の全区画の目視判読結果の GIS 表示

表 2 衛星画像判読結果と地上調査結果の比較

地上調査 \ QB	被害なし or 軽度	著しい 被害	崩壊	Sum
G1,G2	4900	735	725	6360
G3	714	266	240	1220
G4,G5	570	501	2175	3246
Sum	6184	1502	3140	10826

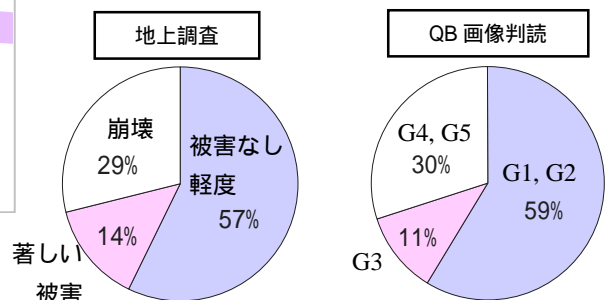


図 5 地上調査と目視判読による各被害ランクの割合

表 3 エラーマトリクスによる精度の評価

	地上調査				User's Accuracy
	被害なし 軽度	著しい 被害	崩壊	Sum	
G1,G2	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₁ /C ₁₄
Q G3	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₂₂ /C ₂₄
B G4,G5	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	C ₃₃ /C ₃₄
Sum	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	
Producer's Accuracy	C ₁₁ /C ₄₁	C ₂₂ /C ₄₂	C ₃₃ /C ₄₃		

$$\text{Overall accuracy} = (C_{11} + C_{22} + C_{33}) / C_{44}$$

表 4 衛星画像による全棟判読精度の評価

	地上調査				User's Accuracy
	被害なし 軽度	著しい 被害	崩壊	Sum	
G1,G2	4900	735	725	6360	77.0%
Q G3	714	266	240	1220	21.8%
B G4,G5	570	501	2175	3246	67.0%
Sum	6184	1502	3140	10826	
Producer's Accuracy	79.2%	17.7%	69.3%		

$$\text{Overall accuracy} = 67.7\%$$

という結果になった。プロデューサ精度が低いことは、誤判読によるカウントもれ(Omission error)の多さを表している。またユーザ精度が低いことは、判読作業結果の正解率の低さを表している。崩壊状態の建物はそれほど時間を要せず容易にそれと判断することが可能であるが、中程度の被害の場合にはどのランクに該当するかの判断が難しく、著しい被害(G3)の精度は20%前後ときわめて低い。

画像判読結果と地上調査結果で、被害ランクが大きくかけ離れた建物もみられる。例えば、実際には大破した建物が画像で変化が判読されなかった場合であるが、その食い違いは、多くは観測方向の違いによるものと思われる。画像情報は鉛直方向からの観測情報のみとなるので、壁柱などの部材の被害は判断しづらい。同様の理由で中小規模の被害も判読が難しい。逆に、衛星画像では変化がはっきりとえられるが地上調査で被害なしと判断されたケースでは、地上調査では敷地の奥や構造物の後ろとなって被害状況が確認できなかったことが考えられる。

ほかにも、敷地データ作成と画像取得、地上調査の時期のずれの問題が考えられる。被災現場での調査においても、地震直前の建物・敷地状況データを参照して調査することが望ましいと考えられる。なぜなら事前画像でも事後画像でも空地であるのに地上調査で崩壊と判断された区画があり、そうした事例では、例えば現地調査担当者が参照した敷地データが更新されておらず、建物が地震前に撤去されているにもかかわらず建物が地震時に存在したと認識されて、崩壊被害に分類されたということが考えられる。また地上調査の終盤では地震から3ヶ月以上が経過しており、すでに取り壊し・新築・補修に入っている建物もあり、地震直後の状況が正確に調査できなかったということもありうる。ただし、どの地震災害の場合でも地上調査には大変な労力がかかり²⁰⁾、幾分の時期的ずれは生じるものと考えべきである。

5. 航空写真を使用した目視判読との比較

衛星画像での全区画判読の精度を確認するため、地震翌日の航空写真と事前の衛星画像を用いて被害判読を行った。航空機からの写真や映像も被害情報の取得のためによく利用され、それらによる被害把握も数々検討されている²¹⁾。この方法による目視判読結果を事前・事後の衛星画像から判読した場合と比較した。対象エリアは比較的被害の大きかった市街中心部(セントロ)のブラサ・デ・アルマス周辺の425区画とし、その位置を図1で市街中心部と示した。

図6に使用したそれぞれの画像の一部分を示す。QuickBirdのパンシャープン画像の解像度は0.61mであるが、航空写真の解像度は0.2m程度と判断され、かなり低空より撮影されたことが想像できる。人の姿や重機、落ちた屋根材の竹の母屋までも判読できる。これだけの解像度であると、衛星画像ではおおまかにしか判断できない変化が、どの部分のどの程度の被害であるのか詳細に確認することができる。図8の中央の建物では屋根が崩落して壁だけが残っていることが確認できる。なお入手できた航空写真は単画像であり、実体視(立体視)判読は実施していない。

表5と表6に判読精度を示す。航空写真は2枚のモザイク写真を使用したため、画像が切れて判読のできなかった建物が5区画あり420区画の判読となっている。衛星画像判読と航空写真判読との精度を比較すると、航空写真を用いた場合で、崩壊レベル(G4、G5)で約12%、著しい被害レベル(G3)において約8%、総合精度でも9%の精度の上昇がみられる。市街地の低層建物密集地域においては、解像度の変化が判読精度の向上に大いに関係すると判断できる。

全区画判読結果よりも総合精度が高いことは、被害の大きかったエリアを選択したことによるものと



図6 QB衛星画像(左・中)と航空写真(右)の比較

表5 衛星画像のみによる判読精度の評価
(ピスコ市街中心部)

	地上調査				User's Accuracy
	被害なし	著しい被害	崩壊	Sum	
G1,G2	59	15	36	110	53.6%
Q G3	14	5	18	37	13.5%
B G4,G5	22	20	236	278	84.9%
Sum	95	40	290	425	
Producer's Accuracy	62.1%	12.5%	81.4%		

Overall accuracy = 70.6%

表6 航空写真による判読精度の評価
(ピスコ市街中心部)

	地上調査				User's Accuracy
	被害なし	著しい被害	崩壊	Sum	
G1,G2	61	3	10	74	82.4%
Q G3	15	8	10	33	24.2%
B G4,G5	18	29	266	313	85.0%
Sum	94	40	286	420	
Producer's Accuracy	64.9%	20.0%	93.0%		

Overall accuracy = 79.8%

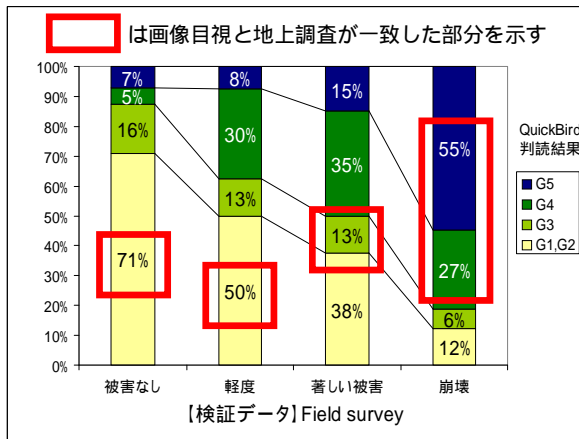


図7 地上調査基準の衛星画像判読の被災度割合
(ピスコ中心部のプロデューサ精度を示す)

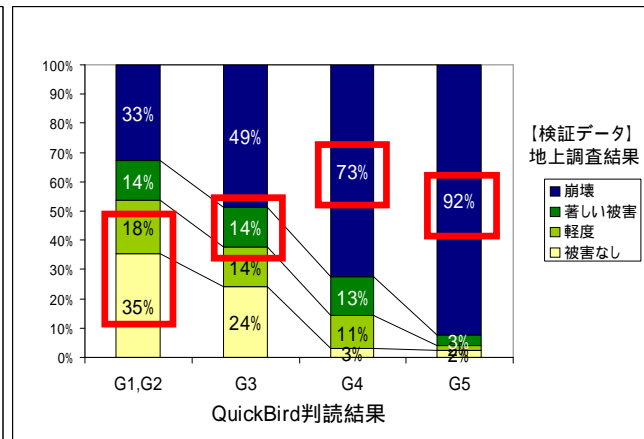


図8 目視判読基準の衛星画像判読の被災度割合
(ピスコ中心部のユーザ精度を示す)

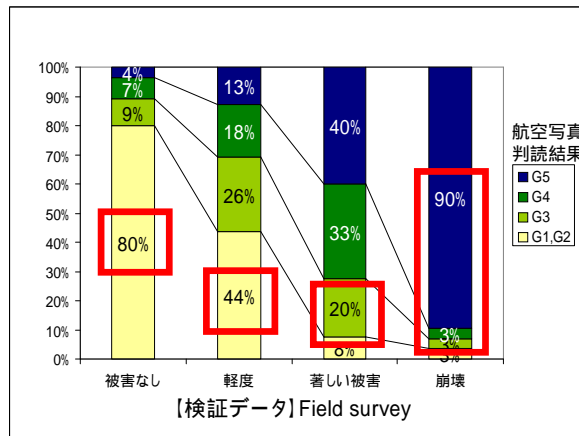


図9 地上調査基準の航空写真判読の被災度割合
(ピスコ中心部のプロデューサ精度を示す)

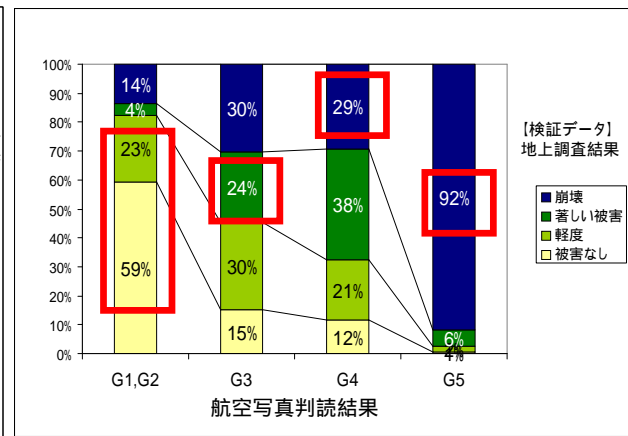


図10 目視判読基準の航空写真判読の被災度割合
(ピスコ中心部のユーザ精度を示す)

思われる。また高解像度の航空写真を使用しても、上空からという限定された観測方向に起因する誤判読がみられた。

図7～図10に、判読結果4分類と地上調査結果4分類の被害ランクの割合をグラフに示した。航空写真判読に比較すると衛星画像判読では、崩壊建物についてG4と判読した割合が27%と高いが、解像度の違いが被害を小さめに判読させたものと思われる。今回の検討では、G4とG5の判定を地上調査の崩壊ランクとまとめて精度を算出しているが、G4・G5レベルに限るとどのケースでも80%以上の精度を示しており、大きい被害の把握に関しては衛星画像の利用の価値があるといえる。

6. 目視判読結果の考察

前章までの検討内容を整理して、衛星画像目視判読の特徴と作業の留意点を以下に述べる。既往の研究で指摘され、本研究でも確認された点は、まず判読作業に時間がかかること(とくに G3 ~ G4 の中程度ランクでの迷い)、崩壊や部分崩壊に比べて壁や柱の一部損傷の判読は非常に困難であること、また建物密集地域は判読が比較的困難で、全体的に被害クラスを小さめに判断する傾向がある。判読作業に関しては、地震後画像に加え地震前画像も判断材料とすべきこと(とくに小規模建物密集地域)、そして画像を左右に並べるよりも上下に重ね、表示画像を切り替えて判読をすると作業が容易なことなどである。

また本研究の実施条件や対象地域の特徴に関係することとして、建物構造種別、建物の影の影響、被害ランクの分類法、データ取得の時期などがある。

組積造建築物では、中程度の被害にとどまらずに崩壊してしまう傾向が強くなり人的被害が大きくなる要因でもあるが、軽度被害か深刻被害かどちらかに分かれる傾向のため画像判読の上ではわかりやすい。しかしそれが判読の精度を大幅に向上させるとは言いがたく、既往の研究と比較しても精度は同程度にとどまった。影に関しては、低緯度地域で低層建物が多い場所では建物影が小さいので、濃く大きい影に隠されて判読困難となることが少なく、むしろ小さい影は画像上で建物を識別し、地震前後の変化を捉えるうえで必要である。そして調査によって違う被害分類を用いる場合、可能な限り定量的指標を定義したり、判定サンプルを多めに設定したりするなど、その違いに開きがないか留意する必要がある。

最後に、精度検証に用いる検証データと衛星画像の取得時期に相違が大きいと検証自体の信頼性に影響することを考慮しておくべきである。対象国によっては地震前の敷地・建物データの信頼性が乏しいこともありうる。

7. まとめ

本研究では、2007年8月のペルー・ピスコ地震を事例に、地震前後の2時期の QuickBird 衛星画像を用いて、約10,800区画の建物被害の把握を目視で行い、その結果を地上からの被害調査結果と比較した。その結果、衛星画像による判読では被害レベルを若干小さめに判定する傾向があるものの、崩壊被害・深刻被害のレベルについてはその約70%を画像から判読することができた。しかし軽微・中程度の被害や、上空からでは観察できない壁・柱などの鉛直方向部材の被害は誤判読の傾向(判読もれ)がみられた。また一部地域について航空写真による目視被害判読結果とも比較した結果、画像解像度の上昇により判読もれは減少し、80%以上の崩壊・深刻被害を判読した。判読精度を左右する要因には、上空からという限定的な観測方向のほか、建物影の影響、被害分類方法、データの取得時期などがある。

本研究の被害判読結果は、画像処理による被害の自動抽出を行う場合の比較資料として有用なものと考えられる。作業時間の低減のためには各種研究されている自動抽出法が有効であると考えられるが、目視判読以上の精度を期待することは難しい。

今後は、建物構造種別と判読精度の関係を既往の事例を含めて再検討し、対象地の状況を画像判読の活用法に活かす手法を構築し、被害把握の効率的なシステム化につなげてゆくことを考えている。被災現場を歩いて被害を調査することは確実ではあるが、画像判読とは比較にならないほど時間と人手を必要とし、混乱する現地で適正な被害判定を行うのは容易ではない。衛星画像の利用技術が被害把握システムに活用されてゆくことが強く望まれている。

参考文献

- 1) Rathje E. M., Adams B. J. : The Role of Remote Sensing in Earthquake Science and Engineering: Opportunities and Challenges, Earthquake Spectra, Vol.24, No.2, 2008, pp.471-492.
- 2) Eguchi R. T., Huyck C. K., Ghosh S. and Adams B. J. : The Application of Remote Sensing Technologies for Disaster Management, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, 2008.
- 3) 国土交通省総合技術開発プロジェクト「災害等に対応した人工衛星利用技術に関する研究」総合報告書、災害復旧作業における高分解能衛星データ利用に関する研究、2003年。

<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/eiseireport/no4/1-2-10.pdf>.

- 4) 津留宏介、峰島貞治、古本秀明、馬河紘子：航空・衛星写真画像ハンドブック、古今書院、2008.
- 5) 三富創、松岡昌志、山崎文雄：最尤法を用いた空撮画像からの建物被害抽出とその早期被害把握への応用、土木学会論文集、No.717/I-61,2002年、pp.137-148.
- 6) Kouchi, K., Yamazaki, F., Kohiyama, M., Matsuoka, M., and Muraoka, N. : Damage Detection from QuickBird High-Resolution Satellite Images for the 2003 Boumerdes, Algeria Earthquake, Proc. 1st Asia Conference on Earthquake Engineering, Vol.2, 2004, pp.215-226.
- 7) Yamazaki F., Yano Y., Matsuoka M. : Visual Damage Interpretation of Buildings in Bam City Using QuickBird Images Following the 2003 Bam, Iran, Earthquake, Earthquake Spectra, Vol.21, No. S1, 2005, pp. S329-S336.
- 8) Chiroiu L., André G. : Damage Assessment Using High Resolution Satellite Imagery: Application to 2001 Bhuj, India, Earthquake, Proc. 7th National Conference on. Earthquake Engineering, 2002.
- 9) 三浦弘之、翠川三郎：人工衛星光学センサ画像の目視判読による 2008 年中国四川地震での北川県南東部の建物被害分布、日本地震工学会論文集、第 10 巻、第 3 号(災害とリモートセンシング)、2010 年.
- 10) 石山祐二：日本・ペルー地震防災センタープロジェクト、住宅 H17 年 10 月号、(社)日本住宅協会、2005 年、pp.61-66.
- 11) 国土交通省総合技術開発プロジェクト「災害等に対応した人工衛星利用技術に関する研究」総合報告書、高解像度衛星データの災害時利用のための基本仕様に関する調査・研究、2003 年.
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/eiseireport/no4/1-2-04.pdf>
- 12) Johansson J., Mayorca P., Torres T., Leon E., Reconnaissance Team by Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Japan Association for Earthquake Engineering (JAEE) and University of Tokyo(2007) : A Reconnaissance Report on the Pisco, Peru Earthquake of August 15, 2007.
- 13) Elnashai A. S., Hurtado J. A., Pineda O., Kwon O. S., Yanez L. M., Huaco G., Pluta G. : The Pisco-Chincha Earthquake of August 15, 2007 Seismological, Geotechnical, and Structural Assessments,MAE Center Report 08-01 November 2008, Mid-America Earthquake Center, University of Illinois at Urbana, 2007.
- 14) INEI, 2007 年国勢調査結果(スペイン語) Censos Nacionales de Población y Vivienda, Perfil Sociodemográfico del Perú 2007,
<http://www.onu.org.pe/upload/documentos/INEI-Perfil-Sociodemografico-Peru.pdf>, 2008.
- 15) 安藤尚一：2007 年 8 月 15 日ペルー南部地震被害および対応状況報告、UNCRD 兵庫事務所、2007 年. <http://www.jaee.gr.jp/disaster/2007/2007peru/uncrd.pdf>.
- 16) 目黒公郎：2005 年パキスタン北部地震による一般住宅の被害と簡便で低価格な耐震補強法の提案、自然災害科学 79、Vol.25、2006 年、No.3.
- 17) 榎府龍雄、今井弘、花里利一、箕輪親宏、小林康太：枠組レンガ組積造の振動台実験の報告、住宅 H21 年 1 月号、(社)日本住宅協会、2009 年、pp.68-74.
- 18) 小林一郎、榎府龍雄、中江肇：ペルー国 2007 年ピスコ地震災害復興支援報告、社団法人国際建設技術協会、国建協情報 NO.803 (2009 年 10 月)、pp.10-18.
- 19) Grünthal,G. : European Macroseismic Scale 1998, European Seismological Commission, 1998.
- 20) 鎌田泰子、高田至郎、柴田安啓：写真測量による街区建物群の地震被災度調査・診断方法の開発、地域安全学会論文集 No.10,2008 年.
- 21) 丸山喜久、山崎文雄、用害比呂之、檜作正登、岡本拓：新潟県中越地震における高速道路被害状況と航空写真を用いた被害早期把握に向けた基礎的検討、土木学会地震工学論文集、Vol. 28、CD-ROM、2005 年.