

2009 年イタリア・ラクイラ地震による土木施設の被害

川島 一彦¹, アイダン・オメール², 小長井一男³, 八嶋 厚⁴

Kazuhiko KAWASHIMA¹, Aydan OMER², Kazuo KONAGAI³
and Atsushi YASHIMA²

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻

² 東海大学海洋学部海洋建設工学科

³ 東京大学生産技術研究所

⁴ 岐阜大学工学部社会基盤工学科

本文は、2009年4月6日午前3時32分頃（現地時間）にイタリア中部のラクイラ(L' Aquila)において発生した $M_L=5.8$, $M_w=6.2$ の地震に対する、(社)土木学会、(社)地盤工学会、(社)日本建築学会および日本地震工学会の4学会合同調査団による現地調査結果に基づいて、地震及び地震動の特性、地盤及び落石被害、交通施設の被害、生産施設の被害を示すものである。被害調査はラクイラ市を中心として、オクレ、オンナ、パガーニャ、コピート等の地区において実施された。

キーワード：ラクイラ地震、地震被害、土木施設

1. はじめに

2009年4月6日午前3時32分頃（現地時間）にイタリア中部ラクイラ(L' Aquila)において $M_L=5.8$, $M_w=6.2$ の地震が発生し、多数の犠牲者を出すなど、大きな被害が生じた。ラクイラはイタリア半島の脊梁山脈にあたるアペニン山脈の山間に位置し、標高675m~900mに位置する。日本人にはあまり知られていないが、山間の寒冷地であることから、夏の避暑地やウィンターリゾート地としてイタリア人にはよく知られた観光地である。ラクイラの歴史をたどると1254年までには独立した一つの市として形成されたとされており、長い歴史を有している。Abruzzo 州の州都であり、人口は約7万人である。

今回の地震による犠牲者は294名、負傷者は1,000人以上と言われており、被災地では、ほとんどの住民が当局の撤去命令によりテント村等に避難している。ラクイラ市では数棟が崩壊、被災家屋数は数千棟に上ると見られている。

地震後、(社)土木学会、(社)地盤工学会、(社)日本建築学会および日本地震工学会は、4学会協同による合同調査団を現地派遣することとなり、グループによって多少異なるが、著者らは2009年4月18日~21日にかけて、ラクイラ及び周辺地域の現地調査を実施する機会を得た。

以下には、4学会合同調査団報告書^{1) 2)}に基づいて、土木施設の被災概要を示す。なお、イタリア側からも最近被害報告書が刊行されている³⁾ため、一部この情報も紹介する。

2. 地震の概要

地震被害が著しかったのはラクイラ市及び周辺の Coppito, Onna, Ocre, Paganica, Fossa 地区等で、これ

らはいずれも Aterno 川沿いの沖積軟質地盤上に位置する。写真-1 はラクイラ市街地を示したものである。ラクイラ周辺地域では、これまでも1315年、1349年、1461年、1703年、1915年(Fucino地震)、1984年(Greco地震, $M_L=5.8$)、1996年(Umbria地震, $M_S=6.1$)と、度々、地震被害を経験してきている⁴⁾。ラクイラ地震は長さ15~20km、幅10~15kmのNW-SEの正断層によって生じたとされており、マグニチュードは $M_L=5.8$, $M_w=6.2$ である。ラクイラ市は、上述したCoppito, Onna, Ocre, Paganica, Fossa等町村はいずれも断層の上盤側に位置する。



写真-1 ラクイラ旧市街及び周辺地区(Web)

3. 強震記録

イタリア強震観測ネットワーク(2009)によれば、56地

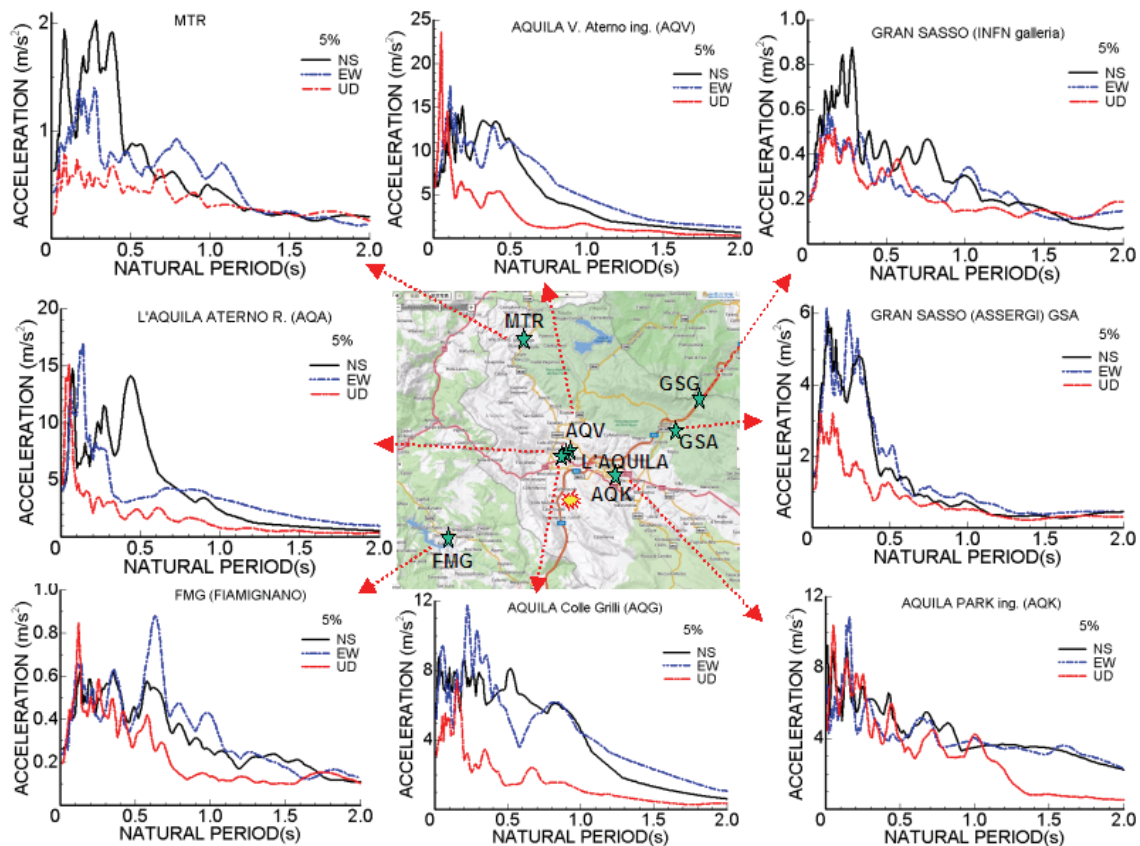


図-1 ラクイラ周辺の8観測点における加速度応答スペクトル

点に置いて強震記録が得られている⁵⁾。図-1 はラクイラ周辺の8地点における強震記録の加速度応答スペクトルを示したものである。周期0.5sの応答加速度に着目すると、AQAのNS成分では 10 m/s^2 、AQGのNS成分では 8 m/s^2 程度の値となっている。地盤、地形条件等との関連を詳細に検討しなければならないが、周期0.5sより短い領域で卓越する地点(AQV, Gran Sasso, Aquila Park), 周期0.5s付近で卓越する地点(MTR, L'Aquila, Aterno, Fiamignano), 周期0.5~1s付近で卓越する地点(AQG)がある。

塊が池側に流動しており、池に最も近い土塊は湖に流出して水没している。この部分の地盤は、盛土であったと想像される。北東に位置する2つの名前が付けられているきれいな泉は枯れていたが、その北側に新たに活発な泉が形成されていた。このことから、背面斜面から豊富な伏流水が供給され、また地下水もかなり高いことがわかる。地震動により表土層内の水圧が上昇したことが考えられる。また、地盤の変位により地下水流の経路が変わったことがわかる。南側の護岸は、明瞭な滑落崖を示しながらすべり土塊が池中に滑動している。

4. 地盤及び落石被害

(1) Sinizzo 湖周辺の側方流動と地すべり

直径約120mのSinizzo湖周辺では、写真-2に示すように地盤が側方流動した。特に、湖の北側では数多くの土



写真-2 Sinizzo 湖周辺に生じた地盤流動

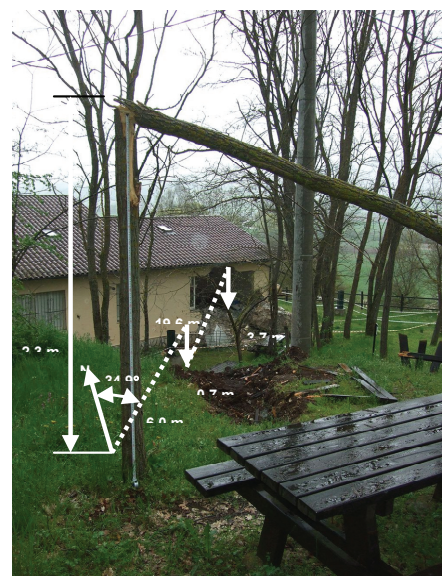


写真-3 落石の通り道(木が折れ、地盤上に落石の落下による穴が開いている)

(2) Grotte di Stiffe の落石

Grotte di Stiffe では2箇所で落石があった。1つは、大きさ $1.5\text{ m} \times 1.6\text{ m} \times 1.9\text{ m}$ で質量約 12 t の石灰質礫岩のブロックである。写真-3 に示すように、この落石が公

園最下部の建物の壁を直撃し壁を破壊した。落石表面には新鮮な白色はほとんど見られず、長い間空気に接触した黒色を呈している面が大部分であるため、発生源において岩盤表面に露出していたか、浮石・転石状態であったことと推定される。

跳躍距離から衝突時の速度を計算すると 15 m/sec 程度であり、衝突時のエネルギーは $2,700\text{ kJ}$ となることから、通常の建物の壁では抵抗できない。

もう1つの落石は、最初の落石から 100 m 程度東側の地点で生じた。大きさも上記の落石よりも多少小さめであるが、斜面の最下端まで到達している。

(3) 液状化痕と斜面崩壊

沖積低地が Aterno 川沿いに広がっているが、液状化の痕跡はあまり見られなかった。しかし、Martini 地区と呼ばれる旧ラクイラ市街の南端に位置する Aterno 川沿い地区では、写真-4 に示すように河川近くの畑と駐車場において、噴砂が見られた。噴砂厚さは最大 100 mm 程度で大規模なものではないため、液状化による構造物への影響は生じていない。図-2 は持ち帰った噴砂を東海大学とトルコの Pamukkale 大学で分析した粒径加積曲線である。 $0.2 \sim 1\text{ mm}$ の粒径が卓越しており、液状化しやすい砂層に相当する。



写真-4 Martini 地区における液状化

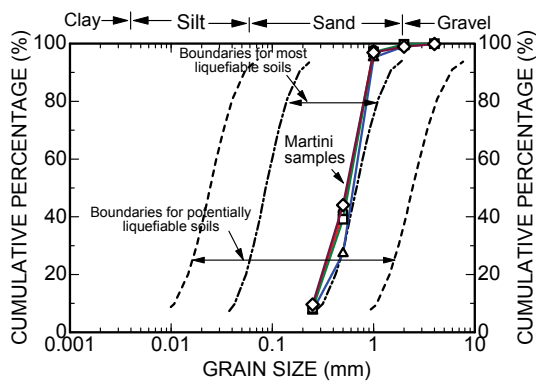


図-2 粒径加積曲線

(4) Paganica 北部の落石

Paganica 北部の西側斜面において新しい崩壊跡が数多く確認された。写真-5 に示すように、一部の岩塊は道路まで達しており、さらに道路を通り越えて東側河川にまで達したものも数多くある。道路に近接している岩斜面では覆式ロックネットが施工され、小規模落石には十分抵抗して

いる。今後の道路への2次災害を防ぐために、不安定岩塊の点検が必要と考えられる。



写真-5 Paganica 北部の西側斜面における新しい崩壊跡



写真-6 自然空洞の崩壊による路面陥没 (web による)



写真-7 自然空洞の崩壊による路面陥没 (図-3 参照)

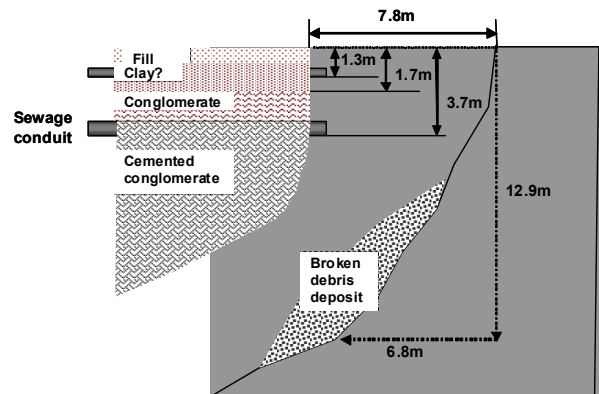


図-3 自然空洞アーチ部の破壊による陥没

(5) 自然空洞アーチ部の破壊による路面陥没

ラクイラ旧市街では、2箇所で自然空洞アーチ部の破壊による路面の陥没が生じた。最初の箇所は写真-6 に示すように、路面が陥没して車が落下した箇所で、著者らが調査した時点ではすでに崩壊ガラなどで埋め戻されていた。

もう1箇所はここから約100 m離れた地点で、写真-7 に示すように、直径は約8 m、深さは確認できた範囲で13 mの陥没孔がそのままの形で残されていた。孔の構造は図-3 に示すようになっており、孔の底面はさらに深くまで広がっている可能性がある。路面から3.7 mの深さに、石灰質礫岩を掘削してコンクリート製下水路が埋設されていた。下水路を建設するために空洞アーチの肩部を掘削していることから、空洞のアーチクラウンが弱くなっていたところに地震動が加わって崩壊したと考えられる。

なお、このような陥没はラクイラ旧市街地内には他にもあると言われている。ラクイラ旧市街地には、陥没を生じる可能性のある地下空洞が広域的に多数存在する可能性があるため、地下空洞の存在を明らかにし、今後の安定性を確認することが重要だと考えられる。

6. 交通施設の被害

(1) 橋梁の被害

ラクイラ市北部には、東西方向に高速道路(A24)が走っており、写真-8 に示すように、ほぼ高架構造となっている。支間長36 m程度のPC単純箱桁橋で、橋脚高さは場所により異なるが、11 m~20 m程度である。高架橋では一部区間で写真-9³⁾ に示すように、桁端で200 mm程度の段差が生じていた。写真-10 は場所が不明であるが、桁端の段差のために損傷した救急車である。

写真-11 に示すように、本高架橋では多数の桁が橋軸方向に200 mm程度残留変位を生じた。直接、被災箇所の支承部を調査することはできなかったが、高架橋には鋼

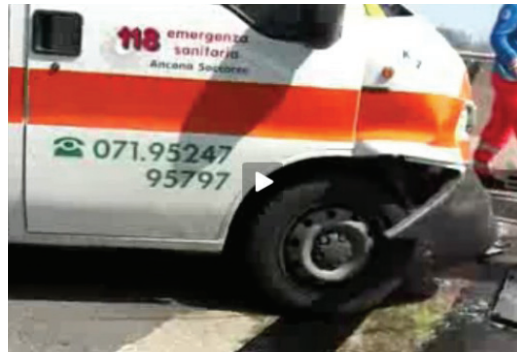


写真-10 桁端の段差のため損傷した救急車(ウェブ)



写真-11 橋軸方向への桁の残留移動



Fig. 3



写真-8 ラクイラ市北部を横断するA24高架橋



写真-9 ジョイントの段差(文献3)による)

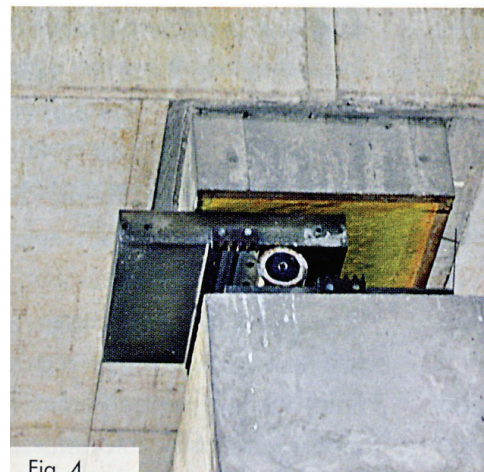


Fig. 4

写真-12 支承の損傷(文献3)による)

写真-13 ローラーの逸脱(文献3)による)



写真-14 3径間連続橋の落橋 (Fossa 駅近く)



写真-15 床版を突き破って突出した橋脚

製の固定支承及びローラー支承の他、積層ゴム支承も使用されていた。橋軸方向の桁の応答変位が大きかったため、鋼製固定支承及びローラー支承が逸脱し、路面に段差を生じたと考えられる。写真-12 及び写真-13 はイタリア側の調査による鋼製支承の損傷である³⁾。

一部の橋脚では基部においてかぶりコンクリートが剥落していた。橋脚としては、ほぼ降伏を上回る程度の状態に達していたのではないかと考えられる。

一方、SR261 と Fossa 村を結ぶ道路がアテルノ川を横断する箇所に位置する橋長 35 m の 3 径間連続 3 主桁 RC 橋が写真-14 に示すように落橋した。幅員は約 5m、径間割は 10 m+15 m+10 m である。主桁と剛結合された径 300mm の六角形状の RC パイルベント橋脚により支持されていたが、河面付近で橋脚が折損すると同時に主桁との剛結部が破断し、橋脚が外側にずれた結果、写真-15 に示すように、パンチングシアによって床版を打ち抜き、4 基の橋脚頭部が床版上に現れた。橋脚に使用されていた軸方向鉄筋は径 17 mm の丸鋼で六角形の各コーナーに 1 本、計 6 本が、また、主桁との固定用に径 9 mm の丸鋼も数本配置されていた。帯鉄筋としては径 6 mm の丸鋼が配置されていた。コンクリートはかなり貧配合で、おそらく強度は 20 MPa 以下と考えられる。低鉄筋であるため、塑性ヒンジを形成しておらず、もろい破壊をしている。ただし、損傷状況から判断すると、今回の地震により被害を受ける前に、何らかの理由によりもともと折損していたように見受けられる。橋脚の横に主桁が見えるが、鉄筋がむき出しになっており、配筋自体も程度の良いものではない。橋脚、主桁ともに、コンクリートのかぶりがほとんどないため、地震前から著

しく鉄筋が錆びていたと考えられる。以上から見て、本橋では、地震前に何らかの原因で橋脚の損傷が生じ、これが地震動によってさらに進展すると同時に、橋脚上部と主桁との結合部が破壊し、パンチングシアによって橋脚が床版を突き破って床版上に現れたと考えられる。

(2) 盛土、擁壁の被害

Aterno 川沿いの地域では、路面の沈下やクラックが各所で生じた。一例を挙げると、SS17 と SR615 の交差点近くにおいて、写真-16、写真-17 に示すように盛土の一部が最大 350mm 程度局所的に沈下し、擁壁の上部が折れ曲がり変形した。変形した側の斜線は規制し、残りの 1 車線を開放していたが、その側方には迂回用の新規盛土が施工され、2 車線として切りまわし開放できるようになっていた。

(3) 交通車両の被害

写真-18 に示すように、各所で沿道建物の倒壊等による車両被害が発生した。地震の発生が早朝であったせいもあり、直接の運転者の犠牲は少なかったようであるが、地震発生時間帯によっては、甚大な被害が発生した可能性がある。



写真-16 盛土の変形とこれに対する応急復旧



写真-17 沈下した路面

7. 生産施設の被害

ポリプロピレンのペレットを貯蔵する高さ約 20m、直径 4m のサイロ (VIBAC 社工場) が写真-19 に示すように被害を受けた。一例を挙げると、高さ 16.6m、直径 3.9m、厚さ 6mm のアルミニウム製サイロ 4 基が倒壊した。消防隊がバーナーでサイロを切断した結果、写真-20 に示す象足状の座屈が最下部 1.2m ほどに生じているのが確認された。



写真-18 建物の倒壊により埋没された車両（ラクイラ旧市街地）



写真-19 被災した産業用サイロ



写真-20 象の足座屈

8. まとめ

2009年ラクイラ地震はM6クラスの地震が山岳地に生じた場合の被害特性に関して、貴重な経験を与えた。すでに個々の施設の被害やそのメカニズムに関しては該当する章で示したとおりであるが、これらをまとめると、以下のようになる。

1) イタリアはヨーロッパ諸国のなかでは最も地震活動の活発な国の一つであり、我が国と並んで、現在までにも繰り返し地震被害を受け、耐震設計法の充実を図ってきた国である。しかし、今回のように中程度の規模の地震によっても手ひどい被害を受けた。これらは大部分が無補強組石造建築物の倒壊によるものである。広範囲にこうした建物が使用されている実情から見て、今後の地震リスクの軽減には遠い道のりがあると考えられる。

2) 被災地は人口が7万人程度の小規模都市と周辺町村から構成されるローカルな地域である。このため、交通系施

設としては、交通量の少ない小規模橋梁が落橋した他は、全般的には被害を受けるような構造物は存在せず、したがって、被害は限定されたものであった。

3) 特異な地盤構成を有するラクイラ市とAterno川沿いの沖積軟弱地盤上に散在する中小の村落において被害が著しい。

4) ラクイラ市で観測された強震記録によれば、加速度応答スペクトルは周期0.1~0.5秒で1gを上回る箇所があり、断層近傍の強震動としてはかなり強いものであった。

5) ラクイラ旧市街では、地下空洞の崩壊に伴う路面陥没が生じた。

6) Aterno川沿いでは、地盤の滑り、液状化、流動化が、また、周辺の山岳地では落石等が発生した。

謝辞

地震被害調査に際して、4学会合同調査団の受け入れ窓口となり、被災地への立ち入り等各種の事務手続きや共同調査の実施等、各種の協力をいただいたトリノ工科大学のGiovanni Barla教授に厚くお礼申し上げる。また、被災地への立ち入りを許可して頂いた市民防災局のMauro Dolce局長の他、パドバ大学のClaudio Modena教授、Francesca Da Porto教授、Nicola Mazzon技師、トリノ工科大学のDonato Sabia教授、Alessandro De Stefano教授、ジェノバ大学のSergio Lagomarsino教授、Stefano Podesta教授、パビア大学のMichele Calvi教授、ローマ大学のPaolo Pinto教授、VIBAC Plant工場Renato Ferella氏等、多数の方々の協力を得た。

さらに、4学会合同調査団の派遣に際して、土木学会、地盤工学会、日本建築学会、日本地震工学会の関係各位に多大なご尽力を得た。ここに記して厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) Kawashima, K., Aydan, O., Aoki, T., Kisimoto, I., Konagai, K., Matsui, T., Sakuta, J., Takahashi, N., Teodori, S. and Yashima, A.: Reconnaissance investigation on the damage of The 2009 L'Aquila, central Italy earthquake, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 14, pp.816-841, 2010.
- 2) 川島一彦, アイダン・オメール, 青木孝義, 岸本一蔵, 小長井一男, 迫田丈志, スペン P. テオドリ, 高橋典之, 松井智哉, 八嶋厚: 2009年4月イタリア・ラクイラ地震による被害速報, 震災予防, Vol. 227, pp. 1-53, 2009
- 3) Calvi, G.M., Pinto, P.E., Franchin, P. And Marnetto, R.: 2.9 The Highway Network in the area Struck by the Event, Progettazione Sismica, 03 Special Issue for L'Aquila, April 6th 2009, 3/32 am, pp. 173-177, IUSS Press, Pavia, Italy, 2010.
- 4) Bagh, S., L. Chiaraluce, P. De Gori, M. Moretti, A. Govoni, C. Chiarabba, P. Di Bartolomeo, M. Romanelli, (2007) "Background seismicity in the central Apennines of Italy: The Abruzzo region case study," Tectonophysics, 444, 80-92.
- 5) Italian Strong Motion Network (RAN managed by the Italian Department of Civil Protection, DPC. (<http://www.protezionecivile.it/minisite/>).
- 6) (社)日本道路協会, (2007), "道路震災対策便覧(震災復旧編)", 丸善, 東京.