「2009 年 4 月 6 日ラクイラ地震被害調査」緊急報告会発表資料概説(地盤災害・その他)

東京大学生産技術研究所

小長井 一男

発表に用いる図面の概要を以下に示す。内容については今後の調査結果の集約を俟って後 に変更される可能性があるものである。

Fig. 1: Location of sites investigated 主な調査地点を示す。以下に続く図面に対応する位置を記載。

Fig. 2: Cracks that appeared near Aterno River, Onna

被害の著しかった Onna 村の南にある橋梁に続く道路の路面に現れた亀裂の概要を示す。全体的に揺すりこみ沈下や側方移動の痕跡が見られる(八嶋先生のコメント参照)。ただし本図面は道路盛土両肩部分の亀裂は記載していない。わずかに川に向かって地盤が押し出されている可能性。正断層が伏在することによる可能性も棄却できないことを Aydan 先生が言及。いずれにせよ軟弱な地盤が地震動を増幅した可能性あり。しかし Onna 村内の道路沿いにある街灯の支持部分には何の亀裂や損傷も認められない。橋桁は背面盛土の沈下に追随して両端が下がり、結果的に上に折り曲げられた形になっている。

## Fig. 3: Fallen bridge and water depths near Fossa

Fossa 村東北東 1.2km あたりにある Aterno 川に架かる橋。流速を計測し忘れるが概ね 1.5m/s 程度か?曲率半径 150m程度の屈曲部に架かる。両側堤防の内水側の石積護岸などには目立 った変化は認められず、また橋に至る道路舗装にも目立った亀裂や変状が見当たらない。 地震動が主要な原因か?水深を計測した結果を示す。攻撃側のほうが浅い水深になってい る(落ちた桁が一部水を堰き止めている効果を加味しないといけない)。洗掘の可能性につ いては八嶋先生がコメント。

Fig. 4: Major crack openings due to lateral spreading around Lake Sinizzo

カルスト地形内のドリーネかと思われる。地形図では連続するドリーネやウバーレ列があって断層の存在を示唆しているように思われる。この地点に限らず丘陵地での谷密度が小さく、これは強度の高く、かつ透水性の高い(亀裂の多い)状況を示唆するものと考えられる。小規模の陥没地形や、差別的に侵食が進んだ結果、空洞の形成されている部分もある。図面では湖周辺の亀裂郡を大きく4つに区分けしているが Zone, A, B は湖の谷側に開いた部分を一部盛り立てた場所に生じた側方移動によるもので、これらはまとめて考えても良いかもしれない。Zone D の背後で石灰質斜面の崩壊。

## Fig. 5: Rock fall locations near Stiffe

石灰岩落石の位置と南西側背面の丘に見えるドリーネとの位置関係を示す。この山地にも ドリーネ列が顕著に認められる。Stiffe 村背後に垂直に鉈で割ったような谷が見えるが、も ともと大きな陥没地形(ドリーネ、あるいはウバーレ)の平地側が切れたものか?平地と 丘陵地の境に沿って多くの落石や斜面崩壊があるとの報告があり、おそらく類似の亀裂を 多く含む石灰岩質の急斜面が連続しているものと思われる。谷密度が小さいこともそのよ うな地質的特徴を物語っていると考えられる。不安定な岩塊が残っている可能性が高くそ の存在を確認する調査が今後の防災対策上重要である。

Fig. 6: Rock fall A

同上の落石の痕跡の位置関係をディジタルコンパス内臓のレーザー距離計で計測したものである。

Fig.7: L'Aquila downtown spreading over calcareous conglomerate terrace and Aterno River L'Aquila の中心部で消防隊の案内で入った行路を GPS で押さえたものである。市街地南を 流れる Aterno 川沿いの谷から比高 100m程度の丘の上に町が広がっている様子がわかる。 この丘は石灰岩質礫岩で cementation でしっかり固まっているが、内部には侵食による空洞 が存在するものと考えられる。2 箇所の陥没孔の位置を図示している。このうち陥没孔 B は 埋め戻しが行われているが、陥没孔 A については計測可能な範囲で確認した寸法を次の Fig. 8 に示している。排水管の施工時に地表から 3.7mまで掘り下げた時点で、cementation の大 きい石灰岩質礫岩の空洞天井にノッチをつけた形になったため、地震でこの部分が崩落し た可能性がある。空洞底部をレーザーで届く範囲で計測した地表からの深さはほぼ 13mで あるが、さらに西側に向かって深くなっているものと推測される。空洞調査が合理的な復 興戦略に当たって重要である(詳細な指摘は八嶋先生のコメント参照)。表面波探査は空洞 も含めての浅い部分の緩み領域を推定する意味でも効果があるものと考える。

Fig. 8: Hollow A in Fig. 7 同上の陥没孔 A の計測結果。

Fig. 9: Normally dislocated layers and expanded crack in the basement of an apartment at Paganica Paganica の集落の北西部の団地のあたり、正断層が存在すると推定されるあたりの標高を GPS で確認したものを示す。Fig.9(b)は断層によるものか地滑りによるものか不明。今回活動したものではない。また付近の擁壁や、アパートの階段室とその背面にある平屋建ての部分をつなぐ壁の間に生じた亀裂の開口の変化を計測している様子(Fig.9(c)), 擁壁のひずみ計は地震後も徐々に亀裂が拡大している様子であると担当者(Geological Survey of Italy?)の言。

Fig. 10: Buckled silos at VIBAC Factory

以下の多くは VIBAC 社工場の Director Renato Ferella 氏の説明に拠る。

ポリエチレンやポリプロピレン等の樹脂は製造後、取り扱いが容易なように通常直径約 2 ~3mm程度のペレットに成型され、ステンレスやアルミニウム 等の金属製で高さ 15~20 m、直径 3~4mの直胴部と、下部に逆円錐状のコーン部を有する貯蔵サイロに一時的に保 管された後に、コンテナーや樹脂袋・紙 袋に充填して最終的に成型・加工等を行うために 出荷される。

サイロA

アルミニウム製、半径: R = 2.0 m、高さ: 16.6 m(サイロ部分) 厚さ: t = 0.006 m基礎部: 杭で支えられた  $5 \text{m} \times 9 \text{m}$ のフーチングに 2 基のサイロがそれぞれ 24 本のボルトで 固定される。基礎部および周辺舗装に顕著な亀裂や開口なし。容量いっぱいに貯槽された 4 つが倒れ、容量の 65%のものは部分的被害。扉の枠が剛性あり、扉と反対側に傾く。扉は 跳ね飛ばされた。

座屈したコーン以下の部分は消防隊がバーナーで切断。象足状の座屈は最下部 1.2mほどに 現れる。ダイヤモンドバックリング的な周期的な座屈モード。周方向に $n_{\theta} = 6$ 程度、軸方 向に $n_{z} = 3$ 程度。

倒れたサイロの東南東方向の工場の壁(高さ約 4.5m、サイロとの距離 1.5m 程度)に衝突の 跡あり。

サイロ B アルミニウム製、半径: *R* = 1.5 m、 高さ:20m、厚さ:*t* = 0.006 m ポリプロピレンペレット比重 0.91 同上嵩比重 1/1.8 =0.55

参考までに Donnel-type cylindrical shell が軸力を受けて軸対象座屈をするときの古典的応力 解は

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-v^2)}} \frac{t}{R} \quad v = 0.3 \text{ clt } \sigma_{cr} = 0.6E \frac{t}{R}$$

曲げを受ける場合の古典座屈応力も、座屈前変形で膜理論を適用すると同じ値としてよい との報告(Seide, Weingarten, 1961)があるが、実際には*R/t*が大きいほど応力が低減する傾 向があり、それは軸圧縮の場合と曲げの場合で異なっている(NASAの実験式(1968)など)。 今回のサイロでは100%貯槽のサイロが倒れ、65%のものが部分的損傷でとどまっているこ とから、現地での加速度を大まかに推定できる可能性がある。ただし扉の影響やコーン下 部の構造など考えなければならないのであくまで目安。



Fig. 1: Location of sites investigated



(a) Satellite imagery of Onna village, L'Aquila (IKONOS)



Fig. 2: Cracks that appeared near Aterno River, Onna



(a) Location of the fallen bridge near Fossa



(b) water depths measured across the river at every 1m interval (Photo taken at 42.3041894194N, 13.5031249747E)

Fig. 3: Fallen bridge and water depths near Fossa



Fig. 4: Major crack openings due to lateral spreading around Lake Sinizzo



(a) Hollows (dolines, sinkholes) on hilly terrain behind Stiffe



(b) Yellow zone in Fig. 3(a)

Fig. 5: Rock fall locations near Stiffe



Fig. 6: Rock fall A (42.2550929245 N, 13.5473723710E)



(b) Central part of L'Aquila downtown Fig.7: L'Aquila downtown spreading over calcareous conglomerate terrace and Aterno River

「2009年4月6日ラクイラ地震被害調査」緊急報告会発表資料概説(小長井)





Fig. 8: Hollow A in Fig. 7 (42.3460997734 N, 13.3947872836E)



(b) normal dislocation of layer (42.3653487302 N, 13.4682724345E) This dislocation didn't move this time.

(c) Expanded crack between staircase and wall in Apartment A. (42.3642645311N, 13.4694865532E)

Fig. 9: Normally dislocated layers and expanded crack in the basement of an apartment at Paganica



(a) VIBAC factory



(b) some dents remaining on silos (42.3417356517N, 13.4579160903E)



(c) silos cut down with burner (42.3422065470N, 13.4584688768E)



(d) buckled bottom of silo (e) foundation of silo (42.3417356517N, 13.4579160903E) (42.3414352443N, 13.4586328268E) Photos (b) (d) and (e) were taken by Rangelow P. on April 21, 2009.

Fig. 10: Buckled silos at VIBAC Factory