

スマトラ島沖大地震によるバンダ・アチェ市の 地盤災害の実態調査

本多剛¹・東畑郁生²・Ilyas Suratman³・Ruta Wicasono⁴

¹東京大学大学院助手 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:honda@geot.t.u-tokyo.ac.jp

²東京大学大学院教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:towhata@geot.t.u-tokyo.ac.jp

³バンドン工科大学 (Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia)

E-mail:rully_yasradi@yahoo.com

⁴東京大学大学院 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:ruta@iis.u-tokyo.ac.jp

2004年12月26日にスマトラ島沖で発生した大地震 (Mw = 9.0) に伴う津波によって、インド洋の沿岸国にて大規模な津波被害が発生し、大津波の脅威が連日にわたり報道された。また大規模地震では強震動による構造物被害の発生も予測されたが、津波の発生前の地震動による被害状況の情報はほとんど皆無であった。そこで、強震動による地盤災害と構造物被害の状況を把握するためにインドネシア共和国ナングロアチェ州バンダアチェ市にて被害調査を行なった。調査に際して、手動式のスウェーデン式サウンディング試験装置を持参し、大きな地盤変状が見られた地点において地盤調査を行い地盤変状のメカニズムについて検討を行なった。

Key Words : Earthquake, Swedish weight sounding, liquefaction, subsidence

1. はじめに

2004年12月26日にスマトラ島沖で発生した地震を受けて、スマトラ島北端のバンダ・アチェ市及び周辺で被害状況に関する調査を行なった。調査期間は2005年2月25日から3月6日であった。筆者らの調査分野は地盤災害に関するものであり、斜面崩壊、液状化及び後述する広域地盤沈降現象を調査項目と想定し、それらの発生の有無と、もし現象が確認できれば、その発生状況を中心に、調査を計画した。

調査事前に入手した現地の衛星写真などから、バンダ・アチェ市や周辺地帯の海岸線が大幅に後退し、陸地が水没していることが知られていた。このような現象が起こる理由としては、津波による浸食、強い震動にともなう軟弱地盤の締め固め(砂地盤の液状化)が考えられるが、過去の巨大地震の事例では、広域に地盤が沈降したことも報告されている(これを広域地盤沈降現象と呼ぶことにする)。例えば、1946年の南海地震における高知市や須崎市の地盤の水没、1960年のチリ地震におけるヴァルディヴィア Valdivia 市の水没、1990年のフィリピン・ルソン地

震に際してのリングエン湾地域の水浸がそれである。また1999年のトルコ・コジャエリ地震でも、イズミット湾の南岸で断層運動に伴うらしい地盤沈降が発生した。そこで、これらの陸地水没のメカニズムを把握するために地盤変状の著しい地点にてスウェーデン式サウンディング試験や港湾施設の水深測定を行なった。

2. バンダ・アチェ市内の状況

津波の襲来した沿岸地域(市の北部)では、図-1のように、見渡す限り破壊の跡であった。地表面には瓦礫や海砂が堆積し、液状化の証拠とされる噴砂口などは発見不可能であった。津波警報が出されても、これほど広大な地域から速やかに非難を行うことはかなり困難ではないだろうか。一方、津波の襲来しなかった市の南部(内陸部)では、筆者らの滞在した民家(図-2)のように、まったく無被害の建物が大半であった。体験をたずねても、給水器が一台倒れた以外は家具や食器の損害も無く、体感した震動も、継続時間が長い意外は、さして強いもので



図-1 アチェ市の津波襲来地域の例



図-2 アチェ市南部の民家



図-3 ウレレー港護岸の跡



図-4 ウレレー港における橋梁基部



図-5 ウレレー新港内部の状況



図-6 津波襲来後のウレレー港の水深（単位：m）
（写真出典：UNOSAT Satellite Imagery for all）



図-7 ウレレー港西方の状況

はなかった．それにもかかわらず震動で倒壊した建築物が存在するのは事実であるが、その比率は1%にも満たない程度であり、全般的に震動は弱いものであったと考えている．なお、バンダ・アチェ地域では、地震動記録として満足なものは存在しない．

初めに斜面崩壊現象の有無について探索した．スマトラ島には火山が多く存在するが、当該地域にはそれがなく、石灰岩と泥岩、砂岩などの堆積岩が、基盤を構成している．市の西部には植生の失われた斜面が見られ、当初は地震に伴う斜面崩壊か、とも考えられたが、市内のシア・クアラ大学で確認したところ、土取り場であることがわかった．結局、現地では、地震動に起因する斜面崩壊と呼べる現象は、発見できなかった．このことも、地震動が強烈ではなかったことを意味している．

3. バンダ・アチェ市の臨海部の状況

市の臨海部には、ウレレー（Uleheh）と呼ばれ

る港がある．その中でも西部に属する旧港地域では陸地の喪失がはなはだしく、図-3のように護岸の一部を残して、裏の地盤が消滅した．また沖合い100m以上のところに港湾の構造物が顔を出しており、津波による物質移動が確認できた．図-4はウレレー港にある橋梁の基部である．この橋は津波にも破壊されなかった．写真には貝殻が付着している様子が示されている．地震後もなお水面上にこのような状況が見られるということは、広域的な地盤沈降がウレレー港地域では発生しなかったことを意味している．東部に位置するウレレー新港は、砂洲に掘り込まれた港湾である．その内部では図-5のように、棧橋や護岸には大きな被害は起きていない．しかし、港湾の管理棟は壊滅的な被害を受けており、また砂洲が消滅して外海と入り江につながったため新港へのアクセス道路は分断されていた．

陸地の水没状況を把握するために、漁船を貸し切り、これら新港と旧港の内外にて水深を測定した．この結果を図-6に示す．旧港の外洋側では5-8m、内側では水深が1-2mと極端に浅くなっている箇所が



図-8 ルブン（Leupung）村の被災状況



図-9 ルブン村の海浜の状況



図-10 ルブン村の道路舗装の跡



図-11 地盤調査の実施状況

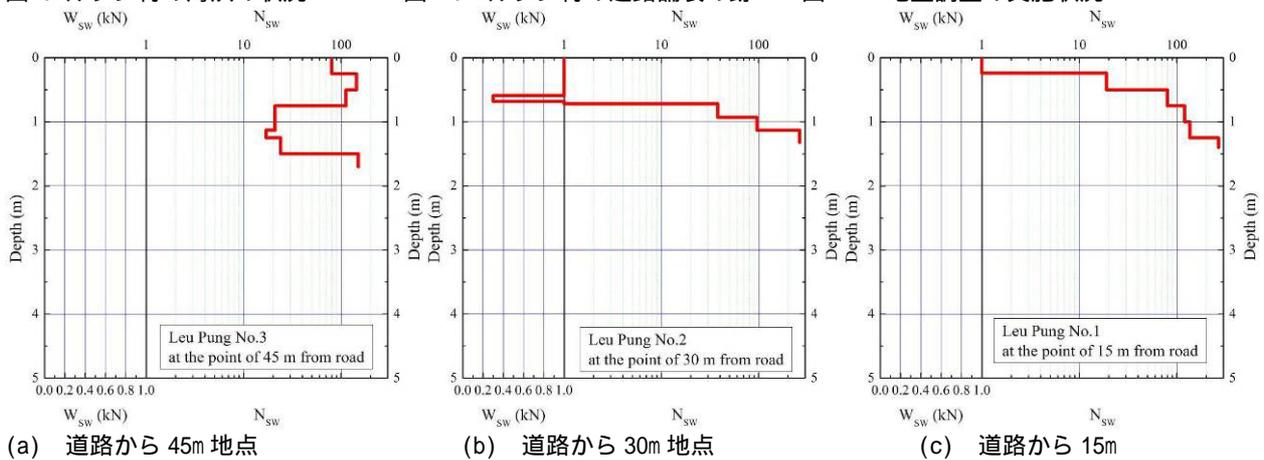


図-12 スウェーデン式サウンディング試験の結果

確認された。漁師の話によると、津波前後で水深が深くなった地点と堆積物によって水深が浅くなった地点があるとのことであった。新港の地点では5-7mの水深であった。

ウレレー港の西側に位置する海岸部は養殖場が多数存在した地域である。この地域は、図-7のようになって陸地であったところが水没した跡が広い範囲にわたって広がっている。その水深は2-4mであった(図-6)。

4. 西海岸の被災状況

外洋に面した地域はバンダ・アチエ市内より襲来した津波が高かった。ルブン（Leupung）村はそのような地域にあり、村落は全面的に破壊された(図-8)。村の裏手は急傾斜の山地になっており、津波の襲来が前もって知られていたとしても、そこへ逃げることは難しい。また海岸は100ないし200 m幅で消滅した(図-9)。図-9では家屋の基礎の高さが海水

面とほとんど等しいことから、少なからず地盤沈下が発生したのではないかと考えられる。

図-10は道路の跡である。舗装自体には変状が見られないので、道路の位置に限っては大規模な浸食が起きていないこと、液状化のように路面に凹凸や亀裂を生じさせる現象も起こらなかったことがわかる。村人に尋ねたところ、彼らは砂浜が縮小したことは認識しているものの、周辺の島などが沈降したとは考えていなかった。

この海岸線に沿った道路から海側の3地点（道路から15m、30m、45mの3地点）にて、スウェーデン式サウンディング試験を行い、地盤の強度を調べた。図-11には試験の実施状況を、図-12には試験結果を示す。道路から15mと30mの地点では、表層から約1mの深さまで軟らかい層（Nsw値30未満）が堆積しており、それ以下ではかなり固い層が存在していることが分かる。また、45mの地点においても表層から1mの深さ付近に軟弱層が堆積しており、深さ1m以下に固い層がある。このことから、この地層で液状化が起こったとは考えにくい。また調査結果



図-13 アチェ市東方の道路沿い陥没？孔



図-14 建物基礎周辺の陥没？孔

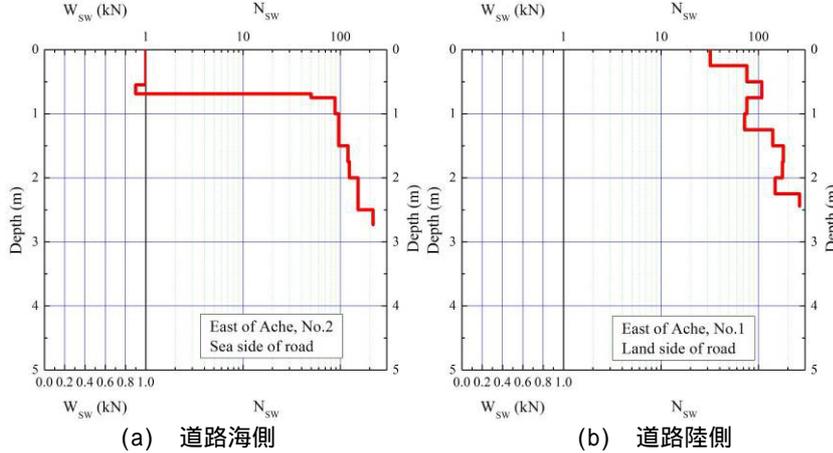


図-15 アチェ市東方の海岸沿いのスウェーデン式サウンディング試験結果



図-16 シグリの液状化発生地点

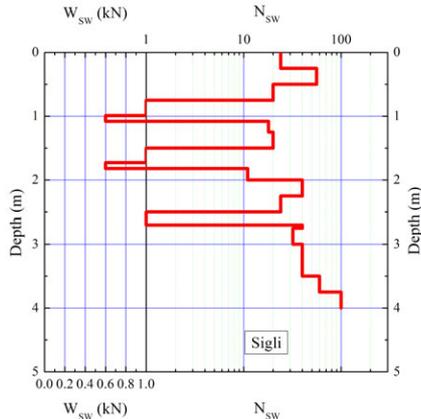


図-17 シグリの地盤調査結果

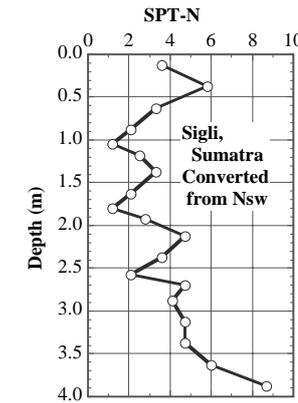


図-18 換算 N 値

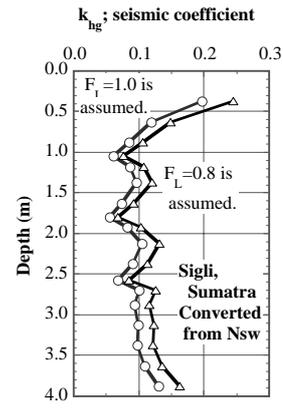


図-19 地表面加速度系数

からも分かるように、表層の軟らかい層が存在しており、この地層が津波の侵食によって失われたと考える方が妥当である。

5. バンダ・アチェ市東方の状況

バンダ・アチェ市の東方では、浜堤裏の低地に養魚池が広がっている。おそらくここは元来、潟ないし沼沢地であったものと思われる。この地域にも津波が襲来し、家屋などを破壊した。ここで海岸線に平行に走る道路沿いに、図-13のような陥没？孔が多数見受けられた。当初は液状化による噴砂口か、とも考えられたが、道路盛土（高さ50 cm程度）の陸側に限って多く見られること、スウェーデン式載荷試験で地盤の状況を調査したところでは道路の両側で大きな差異が見受けられないこと（図-15）、図-14のように建物跡の周辺に深い陥没が起きてい

て、これが橋梁基礎に起きる洗掘と似ていること、最後に目撃者を発見し、地震直後には陥没孔は見られず、津波が引いた後、初めてこれを見たとの証言を得たことから、津波襲来時に盛土裏で洗掘が起きた、と判断した。なお、地震動と津波の襲来との間の時間間隔は、20分程度との証言を得ている。

6. シグリ市方面の状況

バンダ・アチェ市から140 km東方のシグリ市周辺をも調査した。ここはマラッカ海峡に面して浜堤が続く、その裏の潟を養魚池に利用していた。津波で養魚施設は破壊されたが、津波の高さが低く、津波にさらわれながらも生還した人物から、いくつかの証言を得ることができた。

図-16は、砂と水が噴出した(液状化)地点である。



図-20 海岸に残る施設と洗掘



図-21 浜堤裏の道路法肩の洗掘



図-22 サマランガの海岸

ただし家屋基礎に変状が見られないので、軽微な液状化であった、と考えられる。ここでスウェーデン式載荷試験を実施した(図-17)。その結果、N値に換算して5以下のゆる詰め砂層が確認された。軽微な液状化であることから、液状化抵抗率 F_L に、わずかに1を下回る値を想定すれば、地表の加速度が逆算できる。図-18にはスウェーデン式サウンディング試験の結果から標準貫入試験のN値を換算したものを、図-19には液状化抵抗率 F_L を1.0と0.8と仮定したときの地表面加速度係数を示す。この図より、シグリでは最大で100 gal程度の加速度が発生したと推定される。

図-20は、マラッカ海峡に面する砂浜で洗掘によって露出したトーチカである。村人は、地震前には銃眼も砂に埋まっていた、というが、表面の色合いから判断して、洗掘は銃眼より下に限られるのではないだろうか。洗掘の跡は図-21の道路法肩にも見られたが、これも海側から襲来した津波によって裏面に生じた洗掘である。またさらに20 km東方のサマランガでは、河口沖の砂洲が消滅したが、地盤沈降は起きていない(図-22)。

8. 結論

バンダ・アチェ市内の地震動の揺れは、継続時間は長いものの然程大きくなく、斜面災害の発生は見

られなかった。しかし、この地震の揺れにより被災した構造物が市内の何箇所かにおいて確認された。西海岸での地盤調査結果から、この地域は外洋に接していることもあって固い層が堆積していることが分かった。このため、液状化に伴う地盤の締め固めによる地盤沈下の可能性は低い。一方、ウレレー港では津波の影響が激しく、液状化の発生の確認はできなかった。海岸部での被害を見ると、津波の侵食による影響が非常に大きい。そして、陸地水没の主要原因は津波流れによる浸食・洗掘であった。

シグリではの液状化の証言を得ることができた。この地点において、スウェーデン式サウンディング試験結果から地震動加速度の推定を試みたところ、約100gal程度であった。

謝辞：このたびの調査においては、振興調整費の補助（緊急に対応を必要とする研究開発等「スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究」）、調査チームの家村浩和教授、後藤洋三氏のご支援を受けた。また調査に先立ち、東京大学地震研究所の都司嘉信博士から貴重な情報をいただいた。感謝の意をささげます。

(2005. 6. 16 受付)

Damage investigation on geotechnical disaster in Banda Ache due to Sumatra earthquake

Tsuyoshi Honda, The University of Tokyo
 Ikuo Towhata, The University of Tokyo
 Ilyas Suratman, Institute of Technology Bandung
 Ruta Wicasono, The University of Tokyo

Tsunami induced by Sumatra earthquake ($M_w = 9.0$) damaged in the coastal countries of the Indian ocean. It was expected that the seismic strong motion caused damages in structures. However, there was little information on them, because tsunami washed damaged structures completely. The investigation of the structure damages due to seismic motion was carried out in Banda Ache, Indonesia. This paper focused on damages in geotechnical disaster such as liquefaction, slope failure and subsidence of land. Swedish weight sounding was carried out in the region where ground deformation was observed. Mechanisms of ground deformation were discussed.