

年間
特集

2011年東日本大震災における地盤 災害から得た教訓

安田 進¹

Lessons Learned from the Geotechnical Disaster Caused by the 2011 Great East Japan Earthquake

Susumu YASUDA¹

Abstract

The range of liquefaction caused by the 2011 Great East Japan Earthquake was very wide, from the Tohoku region to the Kanto region. Post-earthquake studies have shown that the reasons for this wide range were the long duration of shaking and continuous aftershocks. In many residential areas, roads and lifelines were damaged at the same time as wooden houses, making it difficult to live in these areas. Therefore, measures such as lowering the groundwater level were taken to prevent an entire city area from liquefying due to future earthquakes. In the hills, many areas where valleys had been filled with soil to make them residential areas suffered severe damage, such as slides of slopes and subsidence of the fill. Since many similar filled residential areas have been constructed in Japan, their stability during future earthquakes is currently being checked.

キーワード：東日本大震災，地盤災害，住宅地，液状化，盛土宅地の被害

Key words: Great East Japan Earthquake, geotechnical disaster, residential area, liquefaction, damage of filled residential area

1. はじめに

地震による建造物の被害に地盤特性が与える影響としてまず挙げられるのは、増幅特性であろう。1923年関東地震の際の横浜市の木造建物の被害率に沖積層厚が影響しているなど、古くから関連性が研究されてきた。ところが、地盤の挙動として

はこれだけに留まらず、大きく変形し、遂には破壊に至ることが発生する。最悪の破壊現象は斜面崩壊や地盤の流動といったものであるが、破壊に至らないまでも大きく変形する現象が種々ある。液状化による建造物の沈下や、盛土の変形などである。これらを総称して地震時の地盤災害と呼ん

¹ 東京電機大学総合研究所
Research Institute for Science and Technology, Tokyo
Denki University

でいる。

このように地盤特性に起因した地震時の被害の種類は多く、さらに国内・外に分布する地盤も多種多様なため、地震の度に種々の災害が発生している。2011年東日本大震災でも様々な被害を受けたが、その中でも特に深刻であった市街地の住宅地における液状化被害と盛土造成宅地の被害を取り上げて、被害の特徴や地震後の対応を述べてみる。

2. 住宅地の液状化に関して

2.1 被害の特徴

(1) 液状化が発生した範囲に関して

東北地方太平洋沖地震は震源域が広がったため、液状化した範囲も大変広がった。若松・先名¹⁾の調査によると、液状化の発生が確認されたのは青森県から神奈川県を南北約650 kmの範囲で、1都12県の193市区町村に及び、震央から最も遠い地点は神奈川県平塚市(震央距離440 km)とのことである。ただし、液状化発生地点は東北地方で少なく、関東地方で図1²⁾に示すように多かった。これは、東北地方の太平洋側には仙北平野や仙南

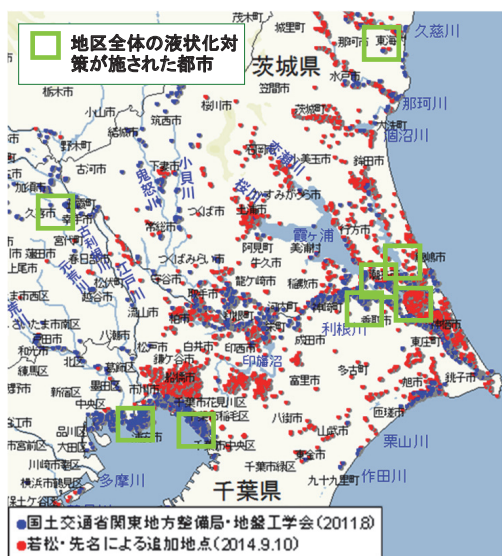


図1 関東地方の液状化発生地点(若松・先名²⁾の図に市街地全体の液状化対策が行われた都市を加筆)

平野以外に液状化が発生し易い広い平野がなく、また、海岸低地では液状化していても津波で痕跡が消された箇所がかなりあるためと考えられる。逆に関東地方では住宅地の開発のために、後述するように埋立地などの液状化し易い人工地盤が多く造成されていた。関東地方の低地では1923年関東地震の際に各地の自然堆積地盤で液状化が発生したが、今回はそのような箇所が殆ど液状化しなかったことも特徴である。なお、過去の地震において、液状化が及んだ最も遠い震央距離と地震のマグニチュードの間に関係があることがいくつか提案されているが、今回の関係もほぼこれらの関係上にあり、特に広い範囲というわけでもないようである。

(2) 液状化による構造物の被害に関して

これだけ広い範囲で液状化した割には、過去の地震で液状化により被害を多く受けてきた橋梁や中層建物などの被害は目立たなかった。例えば、写真1に示す京葉線の高架橋の基礎は液状化を考慮して設計しており、一面に液状化した浦安市内にあっても被害を受けなかった。一方、戸建て住宅、住宅地の平面道路、ライフライン、河川堤防は各地で甚大な被害を受けた。この違いは、大型の構造物では液状化を考慮した設計や液状化対策を行うようになってきたことが主な要因と考えられる。地盤の液状化による被害が広く認識される契機になったのは、1964年に発生した新潟地震とアラスカ地震である。これらの地震以降、日本や



写真1 液状化で被災した新浦安駅前と被災しなかった京葉線の高架橋



写真2 液状化により沈下・傾斜した家屋 (浦安市)



写真4 水平方向にずれた下水道のマンホール (浦安市)



写真3 液状化により突き上げた道路 (浦安市)



写真5 継手が抜けた水道管 (浦安市, 千葉県の撮影⁵⁾による)

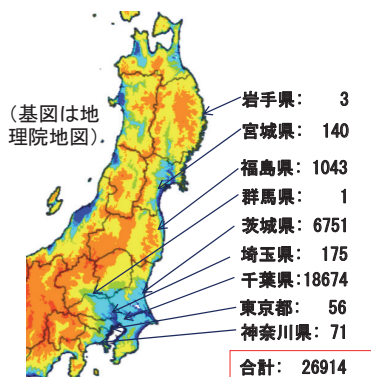
米国を中心に液状化に関する研究・技術開発が急速に進められた。日本では新潟地震から10年も経たない間に、港湾、道路橋、建築、鉄道、タンクの構造物の設計に液状化が早速考慮され始め、20年後にはライフラインなども含めて殆どの構造物の設計に液状化が考慮されるようになった。同時に、締固めや固化など液状化の発生を防ぐ工法や、液状化しても被害を受けない工法の開発が熱心に行われてきた。これが功を奏してきたと言えよう。

ところが、戸建て住宅や平面道路では液状化を考慮して建設が行われてこなかった。また、住宅地を造成した時点では設計に液状化を考慮していなかったライフラインが多く存在していた。このため、多くの住宅地で液状化による甚大な被害が発生した³⁾。代表的な例として、写真2に沈下・傾斜した家屋を、写真3に突き上げた生活道路、写



写真6 段差が生じたアパートの入り口 (浦安市)

真4に水平方向にずれたマンホール、写真5に継手が抜けた水道管を示す。写真3～5のようなタイプの被害は過去にあまり発生していなかった。なお、建物自体は被災しなかったアパートにおいても、写真6に示すように入口の段差が発生し、



- * 国土交通省都市局調べ（平成23年9月27日調査時点）
- * 津波により家屋が流出した場合等については、上記被害件数に計上されていない。

図2 液状化による戸建て住宅の被害数

ライフラインが被災したため、しばらくはマンション内で生活が出来ない状況に陥った。

このような住宅地の被害は、当然、東日本大震災以前にも1983年日本海中部地震や1995年阪神・淡路大震災などで発生してきていた。2000年鳥取県西部地震でも米子市の2つの住宅団地で被害が発生していた。ところが、東日本大震災で被災した住宅地は数えきれないほど多数に及んだ。国土交通省の調べによると図2に示すように26,914棟が液状化により被害を受け（ただし、津波により流出した場合等は計上されていない）、その殆どが関東の千葉県と茨城県に集中した。これらの県では宅地開発のために、①海岸・浦・河川沿いの湿地や旧河道・砂利や砂鉄の掘削跡地を埋め立て、②後背湿地や谷底低地に盛土して、住宅地が多く造成されてきており、それらが液状化して被害を受けた。

2.2 東日本大震災を対象に取り組んできた研究

(1) 長い継続時間や余震が液状化の発生や構造物の被害に与えた影響に関する研究

浦安市～千葉市にかけての東京湾岸の埋立地では震央から約380 kmも離れていたのに液状化が一面に発生したことが注目された。そして、本震時の揺れの継続時間が非常に長かったことや、29分後には大きな余震が襲ったことが影響している

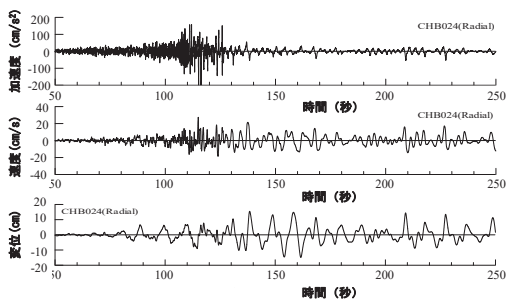


図3 K-NET 稲毛の記録⁴⁾から求めた変位波形（末富による解析）⁵⁾

のではないかと考えられ、被災状況の調査や室内実験などによって研究が行われてきた。

図3に東京湾岸の埋立地に位置するK-NET稲毛での加速度記録⁴⁾と、それを積分して速度、変位波形を推定した結果⁵⁾を示す。この観測地点では噴砂が生じており液状化したと判断されている。加速度波形を見ると126、7秒付近から急に振幅が小さくなり周期も長くなっているため、この時点で液状化したと判断できる。ピーク加速度はNS方向で232 cm/s²、EW方向で203 cm/s²であった。近くの東京湾岸の埋立地で記録された地表ピーク加速度をまとめると160～230 cm/s²程度であり、例えば1995年阪神・淡路大震災で記録された値の半分程度以下と小さい。それでも浦安市から千葉市にかけて一面に液状化したような状況になったのは、図3に見られるように継続時間が長かったため、とまず考えられた。液状化は土がせん断応力を繰返し受けて遂に粒子構造が壊れる現象であり、せん断応力振幅が大きなくても繰返し回数が多いと液状化してしまうからである。

ところで、この地震は昼間に発生し、しかも市街地で液状化したため、貴重な写真や動画が多く撮られていた。浦安市の住民の方は液状化した地区の状況を地震直後から連続して撮られていた³⁾。それらのうち本震発生16分後に噴水が道路に出ている状況を写真7に示す。そして、29分後に発生した大きな余震から5分後に、同じ道路を反対側から撮影されたものを写真8に示す。前者に比べて道路は厚い泥水で完全に覆われ、家屋が大きく沈下している。浦安市の他地区における噴水など



写真7 本震発生16分後(15:03)の状況(小川の撮影による)³⁾

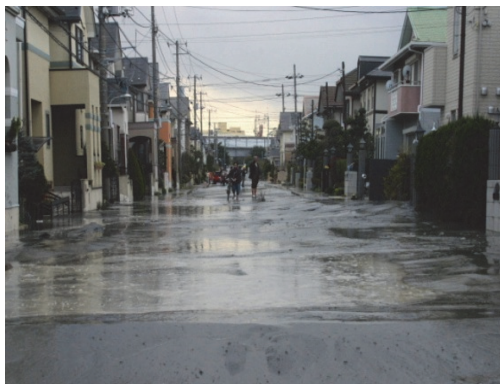


写真8 余震発生5分後(15:21)の状況(小川の撮影による)³⁾

の状況をアンケート調査した結果⁶⁾を図4に示す。本震では地震直後から10分後位までの間に噴水・噴砂が発生し始め、約4割の地点で29分後の余震までに一度噴出が止まったが、残りの地点では余震時まで噴出が継続していた。また、本震で噴水や噴砂が発生し一度噴出が止まった地点でも、余震直後に再び噴出が発生したようである。したがって、上述したように本震の継続時間が長かっただけでなく、29分といった短い時間において発生した余震が液状化による被害を甚大にした可能性があり、短時間で続いて発生する余震の影響も今後頭に入れておかないといけなことが示された。

この他、千葉市の幕張で住民の方が主要動後に撮影された動画によると、液状化だけでなく

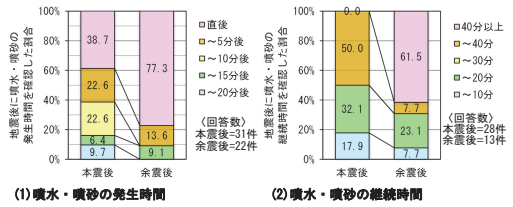


図4 噴水・噴砂の発生に関する住民の方からのアンケート結果⁶⁾

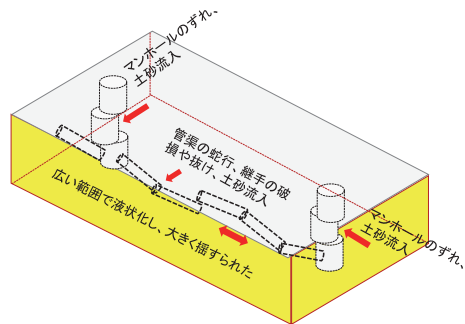


図5 下水道管渠とマンホールに生じた特異な被害の模式図

3~4秒の周期で歩道が突き上げることが繰り返されている。図3の記録がとれたK-NET 稲毛はここから3kmと近い。図3で加速度波形を積分して推定した変位波形を見ると、液状化した時点あたりから変位振幅が両振幅で30cm程度と急に大きくなり、周期も3~4秒と長くなってこれが1分以上も続いている。したがって液状化して泥水化した地盤がさらに揺すられ続けたため、地盤が揺動する現象が発生したのではないかと考えられた。そして、写真3~5に示すような歩道の突き上げや水道管などの継手の抜けが生じたと考えられた⁷⁾。なお、下水道のマンホールや管渠は液状化により浮き上がるのが一般的であるが、東京湾岸では揺動により図5に示すようにマンホールのズレや管の継手が外れによって土砂がはいったため、浮き上がらずに土砂で詰まる被害となったと考えられる。このような揺動現象およびそれによる構造物の被害は過去の地震では見られず、東北地方太平洋沖地震は巨大で継続時間が長かったためと考えられる。

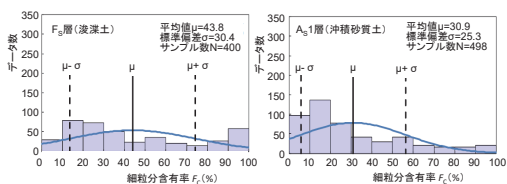


図6 浦安市の埋立土(浚渫土)と沖積砂質土の細粒分含有率 F_c ⁽⁸⁾

(2) 細粒分や経年変化が液状化強度に与える影響に関する研究

浦安市から千葉市にかけての埋立地は、主に沖合の海底から浚渫した土砂で埋め立てられている。地震後に地盤データを収集してみるとこの浚渫土は全体に細かい土であり、さらに、砂質土と粘性土が水平・鉛直方向に混在して分布する大変不均質な地盤となっていた。その下部には沖積砂層が堆積しており、この層も細粒分が多い砂層であった。浦安市等⁸⁾で地震後に調べられた両層の細粒分含有率 F_c の度数分布を図6に示す。 F_c の平均値は浚渫土(埋立土)で43.8%、沖積砂質土で30.9%と多く、また、両層ともバラつきが非常に大きかった。このように細粒分が多くバラつきも大きいため、地震後に行われた液状化した深度の推定においても、例えば埋立層は液状化せず沖積砂層が液状化するという判定結果になったりして、解釈に困難を極めてきた。また、細粒分含有率が多いだけでなく、埋立層と沖積砂層の液状化強度の経年変化(エイジング効果)をどのように液状化判定に含めるかも議論が行われてきて、まだ続いている。例えば、東畑らは「 N 値に基づく既存の液状化抵抗推定法に比べ、400年を経た地盤は、実用上、液状化対抗が4割増しになっていると考えられる。」と述べている⁹⁾。

2.3 復旧・復興の過程を経て出てきた新たな考え方

住宅地で発生した液状化による被害に対し、従来から、個々の住宅は住民で、道路やライフラインは各施設管理者で別々に復旧することが行われてきた。しかも、原型復旧が基本であった。一度液状化した地盤は、同様な地震動が再び襲うと再

液状化し易い性質を有しているため、原型復旧では将来の地震で再度被災する危険性を有している。また、宅地だけ液状化対策を施しても周囲の道路やライフラインが被災してしまうと、生活が長期間困難になってしまう。

これに対し、東日本大震災の8か月後に国土交通省により「市街地液状化対策事業」が創設された。ある地区内の道路や下水道などの公共施設と民間の宅地とを、一体化して液状化対策を施そうとするものである。ただし、この事業に必要な費用は公共施設を公費で賄う一方、宅地内は住民が負担する方式であり、この事業を適用できる条件としては、i) 面積が3,000 m^2 以上でありかつ区域内の家屋が10戸以上のもの、ii) 土地所有者・借地権者それぞれの2/3以上の同意が得られるもの、iii) 公共施設と宅地との一体的な液状化対策が行われているものと認められるもの、とされた。この事業では二つの大きな課題があった。一つ目は技術的な課題で、既存の住宅地を家が建ったままでどんな方法で対策を施せるかであり、二つ目の課題は住民の合意形成をいかにとるかである。前者に関しては技術的に可能な工法が委員会で検討され、地区全体の地下水位を下げると、各戸の宅地を格子状に囲って地盤改良する方法が候補にあがり、その調査・検討のためのガイダンスが国土交通省によって出された¹⁰⁾。地下水位低下工法では、①低下量の設定方法、②低下方法、③低下のための排水管や浅井戸の設置間隔、④低下に伴う地盤の沈下量の推定方法、⑤稼働中の排水量と維持管理方法といった課題があり、実証実験や解析により検討が行われた¹¹⁾。図7には③に関して千葉市

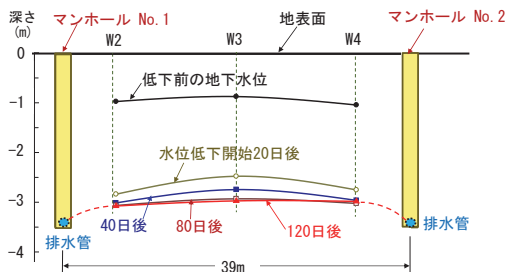


図7 千葉市で行われた実証実験での地下水位低下状況¹²⁾

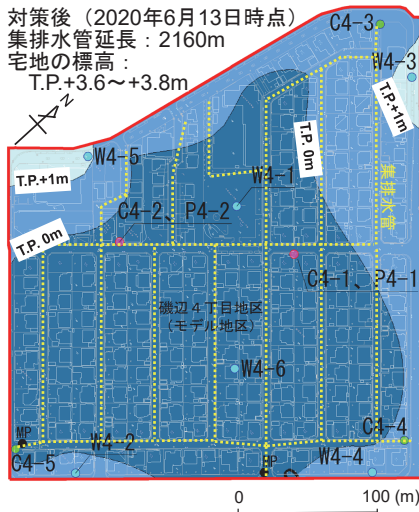


図8 千葉市美浜区磯辺4丁目の集排水管と対策後地下水水位分布 (千葉市¹³⁾の資料をもとに作成)



写真9 千葉市における集排水管設置状況

で行われた実験結果¹²⁾を整理して示す。二列で家屋が並んでいる住宅地において、約40 m離れた両側の道路下に排水管を設置するだけで、宅地内の地下水位が下がることが確かめられ、実施に踏み切る重要なデータになった。

この事業の適用可否は千葉県、茨城県、埼玉県の12の都市で検討されてきた。そして、図1に示すように最終的に地下水位低下工法で6都市 (他の事業で行ったものを含んだ数)、格子状地中壁工法で1都市、側方流動対策で1都市が対策された。また、その後の2016年熊本地震の復旧にあっても地下水位低下工法が適用されている。千葉市で実際に集排水管を施工されたレイアウトと、低下後の地下水位の分布¹³⁾を図8に示す。ここ地区

では写真9に示すように推進工法で集排水管が地中に設置された。

2.4 分野を統合した防災・減災のための智慧

液状化による戸建て住宅の被害は、写真2に示すように少し沈下し傾くだけで窓ガラスも割れないことが多い。そのため震動による被害と違って被害の深刻さが認識され難い。ところが少し傾いただけで、次第に眩暈や吐き気などの健康障害が生じてきて生活できなくなる。5/1000~15/1000程度傾くと健康障害が発生することが、2000年鳥取県西部地震による米子市安倍彦名団地での被害から分かっていた¹⁴⁾が、東日本大震災による被害を受けて、被害の程度を沈下量や傾斜角で判定する方法が内閣府や地震保険から出された。沈下・傾斜した家屋では建物を持ち上げて基礎を直し、再び建物を基礎に設置する沈下修正が行われ、1棟あたり300万円~400万円程度かかった。

このように液状化による戸建て住宅の被害の深刻さが認識されるようになってきたのに対し、既設の住宅はもとより、新設の住宅でもまだ液状化対策を施さないことが続いている。これは、住民、住宅メーカー、自治体の方々が液状化による被害のリスクを共有していないためと考えられる。そこで国土交通省では検討委員会が開かれ、2021年2月に「リスクコミュニケーションを取るための液状化ハザードマップ作成の手引き」¹⁵⁾が公開された。これは住民・事業者と行政との間のリスクコミュニケーションを促進するツールとして、宅地用の液状化ハザードマップの作成および活用方法を示した手引きである。従来自治体で液状化ハザードマップは作成されてきたが、宅地には適しないこともあるので、宅地の被害に特化したマップを作成する手法を示してある。また、地盤調査結果をもとに実際に発生する被害の程度 (沈下量や傾斜角) まで推定できる手法が示され、これにより住民・事業者は対策の必要性が定量的に判断できるようになっている。さらに、市街地の液状化は火災や津波からの避難行動に障害を与えることなど、実際に生じる種々の被害のリスクも明記されており、今後これを活用していくことが望ま

れている。なお、精度が良いハザードマップを作成するためには、それなりの地盤情報が必要である。既往の地盤調査データを集大成する作業が学会や自治体などで進められてきているが、共同して早急に全国的に整備する必要がある。

2.5 早急になすべきこと

東日本大震災を契機に実施された地区全体の液状化対策は、地震前の予防対策として宅地耐震化推進事業の中に取り入れられたので、今後全国の市街地で適用されることが望まれる。また、コンビナートでは大型のタンクや建物は液状化対策を施すようになっているが、道路や倉庫などの小規模構造物では対策が施されていないので、このような敷地全体の対策を施すと良いと考えられる。

一方、個々の戸建て住宅に対する液状化対策工法の技術開発は遅れている。東日本大震災の後でも少ししか新工法が開発されていない。個々の対策の場合、安価でないといけないことと、敷地が狭いため大型の施工機械を用い難いといった制約がある。新設の場合に比べて、既設はさらに難しくなる。これらに対し、産官学が協力して技術開発を行っていく必要がある。

3. 盛土造成宅地の被害に関して

3.1 被害の特徴

戦後の人口増加や核家族化に伴い、1960年代頃から都市の近郊の丘陵地に宅地が多く造成されてきた。このため、1968年十勝沖地震から盛土造成宅地の被害が開始し、1978年宮城県沖地震、1993年釧路沖地震、1995年阪神・淡路大震災、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震と被害が続くようになってきていた。これに対し、東日本大震災では図9に示すように岩手県から茨城県の各地で被害が発生し、被災した宅地の数も桁違いに急増した。特に仙台市で被害数が多く、仙台市の北～西の丘陵地の各地で被害を受けた。被災数は2013年7月現在で5,728宅地と集計されている¹⁶⁾。

丘陵地に宅地を造成する場合、一般的に丘の部分を削って谷部に盛土する。この場合、谷部の表層の軟弱層を取り除き、地下水処理のために暗渠

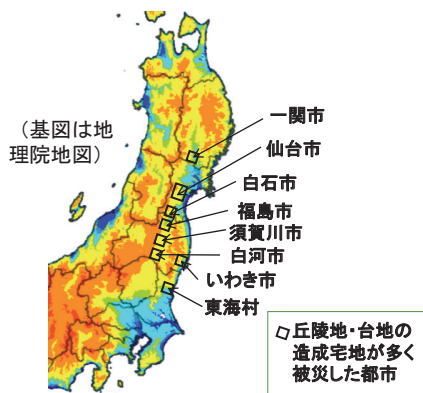


図9 造成盛土地の変状により宅地が多く被災した都市

排水管を設置し、適切な土を用いてきちんと締め固めて盛土すれば、地震を受けても変状を起こすことはない。ところがどれかが守られていないと、法面のすべりや変形を起こしてしまう。東日本大震災で法面のすべりや変形を生じた例を写真10、11に示す。前者は法面が崩壊し家屋が転倒・崩落した例である。後者では法面の崩壊は道路で留まって宅地まで及んでいないものの、住宅基礎周辺に亀裂が走るなどの被害が生じた。

このように盛土法面が崩壊や変状した以外にも、擁壁の転倒による住宅の被害、盛切境の段差による住宅の被害など、種々の被害を受けた。仙台市泉区南光台で被災した宅地を切土・盛土分布図にプロットしたもの¹⁷⁾を図10に示す。この地区内でも種々の被害が発生した。筆者が現地を調査してみると、A～Fの地点で次のようなパターンの被害が発生したと考えられた¹⁸⁾。

- 1) A：法面の変形や崩壊による盛土上の被害
- 2) B：切盛境の段差や揺れの違いによる被害
- 3) C：本・支谷の合流点の強い震動による被害
- 4) D：沼に盛った土の液状化による被害
- 5) E：緩傾斜地盤の液状化に伴う流動による被害
- 6) F：出口が狭く地下水位が浅い支谷の液状化による被害

これらを模式的に描くと図11のようになる。なお、図中のG、Hは他地区で見られた被災パターン



写真10 のり面の崩壊により転倒・崩落した住宅 (仙台市青葉区西花苑)



写真11 のり面の崩壊による上部の道路の被害 (仙台市青葉区北中山)

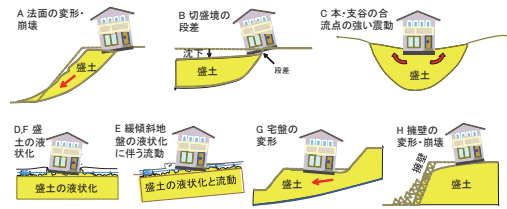


図11 被災パターンの模式図¹⁸⁾



写真12 崩壊した土砂が下部の道路へ与えた被害 (仙台市青葉区北中山)

ンである。

被害は住宅だけではなく、道路とライフラインも甚大な被害を受けた。写真11は盛土上の被害を示しており道路や電柱の被害が見られるが、盛土下でも写真12に示すように崩壊した土砂が道路を覆い1名の犠牲者が出た。

3.2 東日本大震災を対象に取り組んできた研究

(1) 被災形態の整理および被災原因の研究

過去の地震による盛土造成宅地の被害は被災箇所数がそんなに多くなく、また、各都市によって盛土に用いた土質も異なっており、被災要因の分析はなかなか行えていなかった。それに対し、東日本大震災では仙台市で上述したように約5,000箇所の宅地が被災し、さらに、「造成宅地滑动崩落緊急対策事業」が適用されて復興が行われた過程で地盤条件も明らかになってきたので、詳細な分析が行われた。

佐藤ら¹⁹⁾は、被害宅地データとして、被災宅地危険度判定に基づいて判定された結果のうち、「危

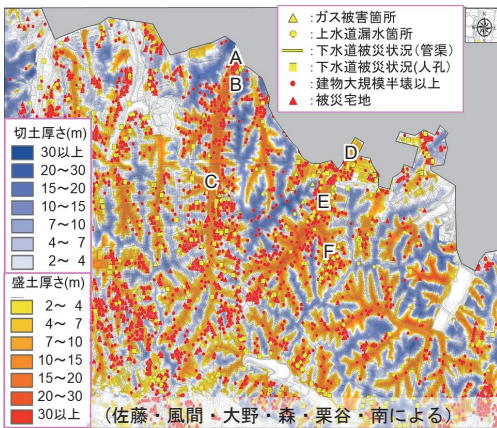


図10 仙台市泉区南光台における宅地とライフラインの被災箇所と切土・盛土分布図 (地盤工学会¹⁷⁾に一部加筆)

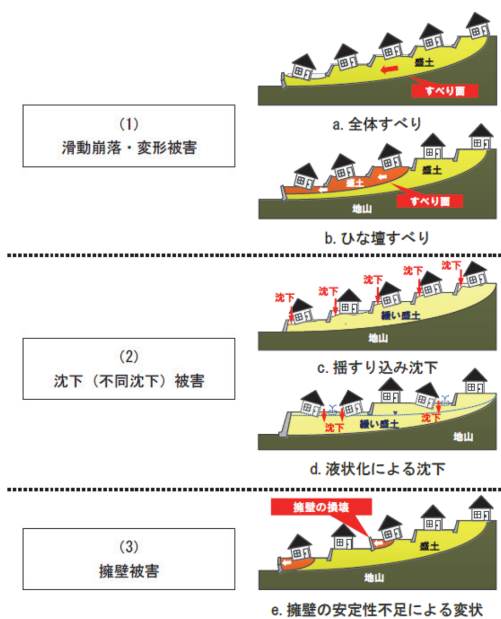


図12 仙台市における造成宅地の被災形態¹⁹⁾

険」または「要注意」に判定された全4,766宅地を用いた。木造建物被害データとしては、仙台市内全域の丘陵地造成宅地における罹災判定棟数の全46,608箇所を用いた。また、仙台市全域の切盛図を造成前後の地形図や空中写真をもとに地震前に作成してあったのでこれを用いた。さらに、45箇所の地震動観測点データ、宅地の造成年代等の情報を収集して、盛土・切盛境界・切土の3区分における宅地被害率と木造建物被害率を各種被害要因別に分析した。造成宅地の被害には、①谷埋め盛土の滑動に起因、②腹付け盛土の滑動に起因、③切盛境界に起因、④のり面の安定性不足に起因、⑤擁壁の安定性不足に起因、⑥緩い盛土状態に起因、⑦地盤の液状化に起因したものの7つの被害要因と、図12に示すような被害形態があったとされている。分析の結果出された結論のうちの一部を以下に示す。

1) 宅地被害では、盛土の被害率は切土の概ね3～5倍、切盛境界は概ね2～4倍を示す。同様に、木造建物全壊被害では、盛土は2～10倍、切盛境界は2～7倍を示し、半壊以上では盛土・切盛境界ともに概ね2倍を示す。これよ

り、盛土および切盛境界における地盤の影響が大きいたことが推測される。

- 2) 造成年代では、宅地被害および木造建物被害(全壊)ともに平成元年付近以前の造成地で被害が発生し、昭和40年付近(仙台市が宅地造成等規制法に基づく宅地造成工事規制区域の指定を開始した年)を境界として被害率に差が認められた。
- 3) 現地盤勾配では、勾配に概ね比例して被害率が増加し、6度未満、6～10度、10度以上で宅地被害率および木造建物被害率(全壊)に差が認められた。
- 4) 盛土厚が8m付近までは盛土厚に比例して被害率が増加するが、盛土厚が8m付近よりも厚くなると宅地被害率は同じかやや低くなる傾向が認められる。
- 5) 木造建物被害の推定には計測震度が優れ、宅地地盤被害と木造建物被害を同時に推定する場合はPGVが適する。

佐藤らは、この他に、甚大な被害を受けた宅地では盛土の耐震強度が非常に低い、すなわち、 N 値が0～4程度で盛土の締固め度が85%以下の非常に緩い締固め状態にあることや、地下水位が地表面下1～2m程度と非常に高いことを報告している。

なお、図10には上・下水道、ガス導管の被害箇所がプロットされている。このうちガス導管に関しては、上述した地盤変状のパターンと比較して、①切土部ではほとんど被害が発生していない、②パターンBのように切盛境付近に被害箇所が多い、③パターンEやFが発生した区域の被災箇所も多く発生している、といった傾向が見られている¹⁸⁾。

(2) 過去の復旧工法の効果の検証

仙台市では1978年宮城県沖地震の際にいくつかの盛土造成地で被害が発生していた。それらの箇所は地震後に対策を施した復旧が行われており、東日本大震災の際にその対策効果があったのかどうか調べられている。吉田ら²⁰⁾は、それらのうち太白区緑ヶ丘の1, 3, 4丁目の3つの地区で対策効果に差が見られたことを調べている。1丁目では宮城県沖地震の復旧にあたって、集水井が設



写真13 ひな壇の変形によって被災した家屋
(仙台市太白区緑ヶ丘3丁目)



写真14 盛土の移動・すべりによって被災した家屋
(仙台市太白区緑ヶ丘4丁目)

けられた他、中央部には地すべり抑止杭（H型鋼及びコンクリートを充填したφ318.5mm鋼管杭）が、端部にはバットレス型擁壁が設置されアースアンカーも設置されていたため、東日本大震災では被害を受けなかった。3丁目でも宮城県沖地震の後集水井が設けられ、5段にわたって同様の抑止杭が設置された。東日本大震災では盛土全体のすべりは発生しなかったものの、杭が少し変形し亀裂が発生して、家屋も写真13に示すように被害を受けた。4丁目では宮城県沖地震で発生した亀裂が表層地すべりと判断され、旧地形の勾配も緩かったので防止対策工は施工されなかった。ただし、地下水位が異常に高いので排水路を兼ねた暗渠が設けられていた。東日本大震災では盛土の移動・すべり状の変形が発生し、写真14に示すよう

に甚大な被害が発生した。

なお、1丁目と3丁目の対策効果の違いは明らかではないが、1丁目では抑止杭の列の間隔が狭く施工され堅固な擁壁も造られていたのに対し、3丁目では抑止杭が道路だけしか打設されなく間隔が広がったため、ひな壇の小さいすべりが発生したのではないかと筆者は考えている。

3.3 復旧・復興の過程を経て出てきた新たな考え方

仙台市で滑动崩落が発生したような大きな被害箇所では、東日本大震災後に「造成宅地滑动崩落緊急対策事業」が適用されて復興が行われてきた。また、一部地区ではそこでの復旧は諦めて、別の地区へ集団移転が行われた。

さて、2004年新潟県中越地震による宅地の被害を契機に宅造法が2006年に改正になり、既設の大規模盛土造成地に対して地震時の安定性を検討することが必要とされ、大規模造成地の変動予測の調査手法「大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドラインの解説(案)」が国土交通省から示された。そして、2015年には東日本大震災の経験も入れて「大規模盛土造成地の滑动崩落対策推進ガイドライン及び同解説」²⁾が策定された。このガイドラインでは、図13に示すような手順で防災区域の指定

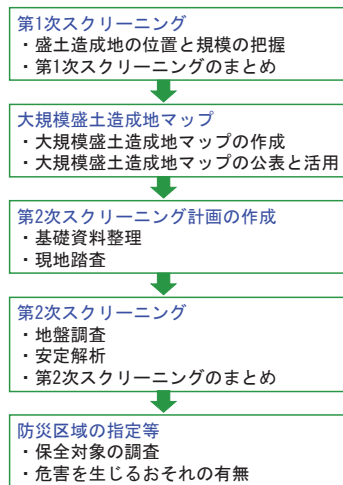


図13 大規模盛土造成地の変動予測調査等の流れ
(ガイドライン²⁾の図を簡略化したもの)

等を行うようになってきている。既設の造成宅地なので、まず盛土造成した箇所の位置と規模の把握を行う第1次スクリーニングから始まる。この調査では造成前後の空中写真や地形図を比較することによって盛土箇所と規模が抽出されてきた。そして必要に応じて現地を確認された後、大規模造成地マップを作成し公表されてきた。国土交通省によると、2020年3月に全国で公表し終わり、大規模盛土造成地は全部で51,306箇所（面積約10万 ha）存在するとのことである。

3.4 分野を統合した防災・減災のための智慧

全国に大規模盛土造成地は多数あり、横浜市だけでも3,271箇所存在する。これらに対し、第2次スクリーニングまで進んでいる自治体はまだ少なく、大半がこのための優先度の評価をしている段階である。したがって、第2次スクリーニングが終わって実際に対策を施すまでにかなり長期間を有すると考えておく必要がある。

したがって、優先度評価が進んできた段階で被災の概略の想定を行い、被害を最小限に留めるような対処の仕方を検討しておく必要があると考えられる。古い造成地には狭い道路しかなく、それも行き止まりになっているものも多い。したがって、地震時の宅地や道路・ライフラインの被害およびそれによる人的被害のみならず、道路の通行障害が避難行動に与える影響なども想定する必要がある。そして、これらを住民に知らせ、住民と行政、関連機関がリスクを共有しておく必要がある。

また、丘陵地の宅地化は戦後の人口増加や核家族化に伴って行われてきた経緯がある。少子高齢化に伴って土地利用を考え直す必要もあろう。

3.5 早急になすべきこと

盛土造成宅地を耐震化した事例の殆どは地震後の復旧にあたって行われたものであり、既存の盛土造成宅地を予防として耐震化した事例はほんのわずかである。住宅が建っている既存の造成地に対策を施すことは容易でなく、また、その場所特有の条件を考慮する必要がある。したがって、こ

のような対策工法の技術開発を早急に行う必要がある。

また、宅地だけでなく道路など一般の盛土は施工した後に徐々に安定化していくため、地震に対しては強くなっていくと考えられてきた。ところが、例えば、東名高速道路で発生した被害²²⁾のように、盛土材料によっては経年変化で強度が低下する場合もある。また、谷に盛土する場合には一般に暗渠排水管を埋設するが、それが経年劣化で排水機能が低下して地下水位が上昇したり、排水管から盛土が吸い出されて周囲に空洞を形成するといったことも発生する。このように、盛土も場合によっては経年変化で弱くなっていつていることも想定されるので、橋梁などと同様に盛土造成地も定期的に点検する仕組みを考えていく必要がある。

4. あとがき

2011年東日本大震災で受けた地盤災害のうち、特に深刻であった市街地の住宅地における液状化被害と、盛土造成宅地の被害を取り上げて、被害の特徴や教訓に関して述べた。液状化による被害は首都圏に及んで、市街地の戸建て住宅やライフライン、平面道路に甚大な被害を与えた。ところが、同様に埋立地で広く液状化が発生した1995年阪神・淡路大震災の時の被害と比べると、大きく異なったことが二つあった。阪神・淡路大震災では液状化した地区において中層建物や橋脚などの杭基礎が多数被害を受けたのに対し、東日本大震災ではこれらの杭基礎の被害は殆ど報告されていない。また、阪神・淡路大震災では岸壁や護岸が数mも大きく孕み出し、背後の100m程度の地盤が流動して橋脚や建物に被害を与えたのに対し、東日本大震災では船橋市などで少し発生して護岸が孕み出したことが報告されているだけである。このように違った理由は詳細に検討されていないが、一つは地震動の違いにあると考えられる。東日本大震災は海溝型の巨大地震であったのに対し、阪神・淡路大震災は陸域の直下地震であった。首都圏で懸念されている首都直下地震は後者のため、それが発生したら阪神・淡路大震災と同様の被害

が発生する可能性もあると考えられ、その意識を持って首都圏では対応を考えておく必要がある。逆に阪神地区では、東日本大震災で生じた被害を意識して、南海トラフで発生すると予想されている地震に対応していく必要がある。

参考文献

- 1) 若松加寿江・先名重樹：2011年東北地方太平洋沖地震による東北地方と関東地方の液状化発生地点とその特徴，第14回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.2281-2290，2014.
- 2) 若松加寿江・先名重樹：2011年東北地方太平洋沖地震による関東地方の液状化発生条件と土地条件，日本地震工学会論文集，Vol.15，No.2，pp.25-44，2015.
- 3) Yasuda, S., Harada, K., Ishikawa, K. and Kanemaru, Y.: Characteristics of liquefaction in Tokyo Bay area by the 2011 Great East Japan Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.52, Issue 5, pp.793-810, 2012.
- 4) 防災科学技術研究所：強震観測網.
- 5) 安田進・石川敬祐・五十嵐翔太・田中佑典・畑中哲夫・岩瀬伸朗・並木武史・齊藤尚登：東日本大震災における浦安市の水道管被害メカニズムの解明，日本地震工学会論文集，Vol.16，No.3，pp.183-200，2016.
- 6) 石川敬祐・安田進・萩谷俊吾：千葉県浦安市の液状化現象の発生状況調査，日本地震工学会論文集，Vol.12，No.4，pp.56-64，2012.
- 7) 安田進・石川敬祐・五十嵐翔太・田中佑典・畑中哲夫・岩瀬伸朗・並木武史・齊藤尚登：東日本大震災における浦安市の水道管被害メカニズムの解明，日本地震工学会論文集，Vol.16，No.3，pp.183-200，2016.
- 8) 浦安市・地盤工学会・土木学会・日本建築学会：平成23年度浦安市液状化対策技術検討調査報告書，2012.
- 9) 東畑郁生・田口雄一・林田敏彦・濱田悠貴・青山翔吾・後藤茂：砂の液状化抵抗が年代とともに増加する現象，日本地震工学会論文集，Vol.15，No.7，pp.121-130，2015.
- 10) 国土交通省都市局都市安全課：市街地液状化対策推進ガイドランス，https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_fr_000005.html，2021年2月24日.
- 11) 安田進：市街地の液状化対策について，日本地震工学会誌，No.28，pp.18-23，2016.
- 12) 千葉市：千葉市液状化対策推進委員会資料，2014.
- 13) 千葉市：千葉市液状化対策推進委員会資料，2020.
- 14) 安田進：鳥取県西部地震による団地の被害，日本建築学会総合論文誌，第2号，pp.45-46，2004.
- 15) 国土交通省都市局都市安全課：リスクコミュニケーションを取るための液状化ハザードマップ作成の手引き，https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_tk_000044.html，2021年2月26日.
- 16) 仙台市：仙台市被災宅地状況図，<https://www.city.sendai.jp/takuchihozen/shise/daishinsai/fukko/takuchihigai/itakuchijo.html>，2021年8月26日.
- 17) 地盤工学会：東日本大震災合同調査報告，共通編3，地盤災害，p.128，2014.
- 18) 安田進・岸野洋也：丘陵の造成宅地の変状とガス導管の被害との関係，日本地震工学会第10回年次大会梗概集，pp.439-440，2013.
- 19) 佐藤真吾・風間基樹・大野晋・森友宏・南陽介・山口秀平：2011年東北地方太平洋沖地震における仙台市丘陵地造成宅地の被害分析—盛土・切盛境界・切土における宅地被害率と木造建物被害率—，日本地震工学会論文集，第15巻，第2号，pp.97-126，2015.
- 20) 吉田望・若松加寿江・飛田善雄：仙台市緑ヶ丘造成地の1978年宮城県沖地震時の復旧の効果，地盤工学会誌，Vol.61，No.4，pp.14-17，2013.
- 21) 国土交通省：大規模盛土造成地の滑動崩落対策推進ガイドライン及び同解説，2015，http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_tk_000015.html，2018年3月31日.
- 22) 高木宗男・横田聖哉・菅浩一・安田進・太田秀樹：東名牧之原地区における盛土のり面災害の実態，第55回地盤工学シンポジウム，pp.193-196，2010.

(投稿受理：2021年9月9日)

要 旨

2011年東日本大震災で液状化が発生した範囲が東北地方から関東地方にかけて大変広がった。地震後の研究によると地震動の継続時間が大変長く引き続き余震も発生したことが、このように広い範囲で液状化した原因であることが分かった。多くの市街地では戸建て住宅の被害に加えて道路やライフラインも被災したため、生活が困難になった。そこで、復旧にあたって、将来の地震の際に地区全体が液状化しないように地下水位を下げるなどの対策が施された。丘陵地では、谷に盛土した造成宅地が盛土の法面のすべりや沈下によって甚大な被害を受けた。日本には同様な盛土造成宅地が多く造られてきているため、それらの将来の地震時における安定性が現在点検されている。