

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560595

研究課題名(和文) 既設宅地造成盛土の地震時安全性の定量的評価手法の研究

研究課題名(英文) Study on the appropriate method to evaluate the seismic stability of the existing banks in housing lots

研究代表者

安田 進 (Yasuda, Susumu)

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号：90192385

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：都市近郊に造られた宅地盛土の地震時安定性評価手法を研究するため、北海道、八戸、埼玉、神戸、鹿児島で造成に使われている土と、東日本大震災で被災した宅地の土を用い、物理特性、締固め特性や液状化特性などを試験した。その結果、液状化強度などは締固め度に大きく影響していることがわかった。次に、東日本大震災で被災した福島県と宮城県の盛土に、新しい地震時変形解析を適用してみた結果、これらの方法で解析して実被害を再現できることや、地下水位が盛土の変形に大きく関係することなどがわかった。また、常時に宅地や擁壁が変状している箇所は地震時も不安定なことが解析的に求められた。

研究成果の概要(英文)：Cyclic torsional shear tests for banking soils in housing lots were conducted to demonstrate the strength and shear modulus during earthquakes. The banking soils were taken at nine sites from Hokkaido to Kyushu. Test results showed undrain cyclic shear strength and shear modulus after cyclic loading increase with degree of compaction and fines content. Based on these test results, deformation of three banking lands where severe damage occurred during the Great East Japan Earthquake, were analyzed by residual deformation method and Newmark method. Analyzed deformations are fairly coincided with the actual deformations. Stability analysis for an embankment which had been deformed before the earthquake and failed due to the earthquake was also conducted.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学、地盤工学

キーワード：盛土 地震 室内試験 変形解析 東日本大震災

1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期より大都市近郊の丘陵に数多く造成されてきた宅地において、1968年十勝沖地震以来、地震のたびに宅地造成盛土がすべりや沈下といった地盤変状を生じ、その上に建てられている家屋が被害を受けるケースが最近急増している。最近では2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震と被害が続出するようになってきている。また、研究計画を立てた後に東日本大震災が発生し、岩手県から茨城県にかけて非常に多くの宅地造成盛土が変状を生じ、家屋が甚大な被害を受けた。

2. 研究の目的

都市近郊に造られた造成宅地盛土の地震被害が最近目立つようになってきていた。これに対し、宅地造成等規制法が改訂になり全国の自治体で耐震点検と対策を行う必要がでてきた。ところが、その検討手順で必要な(1)危険箇所の絞り込み方法、(2)現地の宅地や擁壁の変状からの危険性の判断方法、(3)盛土とともに住宅の安全性を評価する方法、に関して研究がほとんど行われていない。そこで、単なる盛土のすべりではなく、最近行われるようになってきた性能設計に基づき、盛土および住宅の地震時変形・不同沈下量を求めることによって、(1)~(3)を定量的に評価できる手法を研究開発する必要がある。

また、全国の造成宅地で盛土材として使用されている土は千差万別である。北は北海道の火山性砂質土から、関東のローム、九州のしらす、と強度、変形特性が大きく異なる。したがってこれらの土質特性を試験して、性能設計に使えるようにする必要がある。

さらに、本研究が始まる直前に発生した2011年東日本大震災では東北から関東にかけて数多くの造成盛土が崩壊や沈下などの変状を生じ、家屋に被害を与えた。そして、被災のパターンやメカニズムを明らかにする必要が出てきた。

そこで本研究ではこれらのことを研究することとした。

3. 研究の方法

造成宅地盛土といっても、盛土材料、盛土高さ・勾配、締固め度、地下水位、地山勾配などの条件は千差万別である。そこで、研究目的である地震時における盛土の変形・住宅の不同沈下量を対象とした解析を行うため、まず、全国各地から盛土材を採取した。また、東日本大震災で被災した盛土からも不攪乱および攪乱試料を採取した。そして、種々の条件で繰返しねじりせん断試験を行い、地震時の変形解析に必要な動的・静的強度・変形特性を求めた。

次に、地震時の盛土の変形量を求めうる解析手法を選択した。そして、2011年東日本大震災で被災した宮城県および福島県の造成盛土3か所に対し、実験結果を用いて盛土形

状や材料、締固め度、地下水位などの条件を種々変えて解析を行った。また、仙台市の崩壊箇所ですでに丁度常時でクラック等の変状がある箇所が見つかったため、常時の変形解析を用いて、常時でクラック等の変状がある箇所における地震時の変形量の増加を定量的に求めた。

4. 研究成果

(1) 各地の盛土材の土質特性

宅地造成を行う場合、その周辺の地山を切土して盛土をすることが一般的である。そこで、盛土材料は地山の地質に関係することになり、全国の地山の地質は地域によって異なるため、各都市では多種多様な盛土材が宅地造成に使われている。そこで、北海道、青森、埼玉、神戸、鹿児島から採取した試料に対し、物理試験および締固め試験、繰返し中空ねじりせん断試験装置を用いた液状化試験と繰返し載荷後の静的単調載荷試験を行い各試料の強度特性を検討した。また、東日本大震災により造成宅地が被災した福島県須賀川市の2か所と宮城県仙台市の1か所においても試料を採取して試験を行った。

物理試験および締固め試験結果を表1に示す。宮城県の試料と神戸の土はまさ土であり、液性限界や塑性限界も試験で得られない砂質土であった。北海道の土は火山灰砂質土、鹿児島はしらすで、これらも砂質土であった。それに対し、青森の土や埼玉の土はロームであり、塑性指数も求まる粘性土であった。福島は砂質土と粘性土中間土であった。このように、各地で用いられている盛土材は粒径だけからみても様々なものとなっていた。

表1 物理試験および締固め試験結果

土の種類	宮城 まさ土	福島 火山灰	北海道 火山灰	青森 ローム	埼玉 ローム	神戸 まさ土	鹿児島 しらす
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.687	2.714	2.436	2.579	2.677	2.671	2.439
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.874	1.732	1.087	0.989	1.377	1.996	1.337
最適含水比 $w_{opt}$ (%)	14.7	20.3	41.8	51.8	31.7	10.2	28.8
細粒含有率 $F_{200}$ (%)	0.00	25.0	33.6	93.8	21.9	2.79	26.6
液性限界 $w_L$ (%)	NP	35.8	NP	59.4	64.0	NP	NP
塑性限界 $w_P$ (%)	NP	NP	NP	NP	35.6	NP	NP
塑性指数 $I_p$	NP	NP	NP	NP	28.4	NP	NP

東日本大震災において被災した盛土に関しては、福島において被災箇所ブロック状に乱れずに崩壊して転がっていた試料を採取し、密度を測定した。そして締固め試験もを行い、原地の締固め度を推定した結果、72.4%や86.8%との低い値が得られた。崩壊した盛土より採取した塊状試料から測定した結果であり、盛土全体の実際の密度が同じであるかはわからないが、崩壊した盛土部はかなり緩い状態であったと考えられる。

(2) 液状化強度および繰返し載荷後のせん断剛性

繰返しねじりせん断試験装置を用いて液状化試験および繰返し載荷後の静的単調載荷試験を行った。試験方法としては所定の締固め度に突き固めて供試体を作成し、その後、

飽和条件では間隙水圧係数  $B=0.95$  以上となるように飽和させた後に有効拘束圧  $50\text{kPa}$  で等方圧密を行った。不飽和条件では、最適含水比の試料を突き固めて供試体を作成し、所定の飽和度を確認した後、有効拘束圧  $50\text{kPa}$  で等方圧密を行った。その後、両者とも非排水状態で一定のせん断応力で所定の回数 ( $N=20$ ) だけ繰返し载荷を行い、繰返し载荷後、非排水状態を保ったまま静的単調载荷を行なった。繰返し载荷から得られた液状化強度比  $R_L$  と締固め度  $D_c$  との関係を図 1 に示す。ここには研究代表者らが過去に道路盛土に対して同様の試験を行った結果 (横田、関越の 3 種類の土) も合わせて示した。この図から各試料共に締固め度が高くなるに従い液状化強度比も高くなり、特に締固め度が  $90\%$  以上になると急激に液状化強度が大きくなる結果となった。したがって、液状化が発生しないためには  $90\%$  程度以上締め固める必要があることが分かった。

細粒分含有率  $F_c$  と液状化強度比  $R_L$  の関係を図 2 に示す。全体に細粒分含有率  $F_c$  が増加するに従い、液状化強度比  $R_L$  は増加する傾向が見られた。ただし、細粒分が  $100\%$  近くても液状化強度比は低地に堆積している沖積粘性土に比べて大きくなかった。これは細粒分を多く含むといっても、粘土分は沖積粘性土ほど多く含まないということと考えられる。

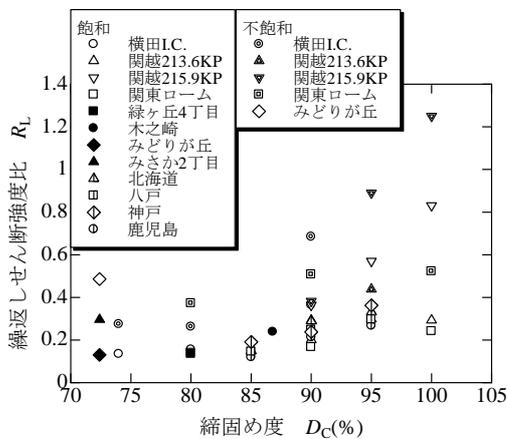


図 1 締固め度～液状化強度比関係

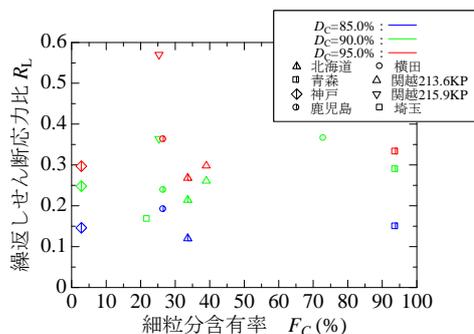


図 2 細粒分含有率～液状化強度比関係

次に繰返し载荷後の静的単調载荷試験結果から得られたせん断剛性  $G_L$  と液状化に対する安全率  $F_L$  の関係例を図 3 に示す。 $F_L=1$  つまり液状化するかしないかの境でせん断剛性は急激に変わり、液状化するとせん断剛性は  $1/100$  やそれ以下に急減する結果となった。そして、液状化の度合いが激しい、つまり  $F_L$  が小さくなるほどせん断剛性が低下していく結果となった。このような傾向は液状化しやすい河川や海岸の砂で顕著であるが、宅地の盛土材でもその傾向はあり、締固め度が小さくて液状化してしまうと、せん断強度が急減して滑り易くなるだけでなく、滑らないまでも宅地が動きだしたり沈下する変状が生じ易くなることを示唆しているといえる。

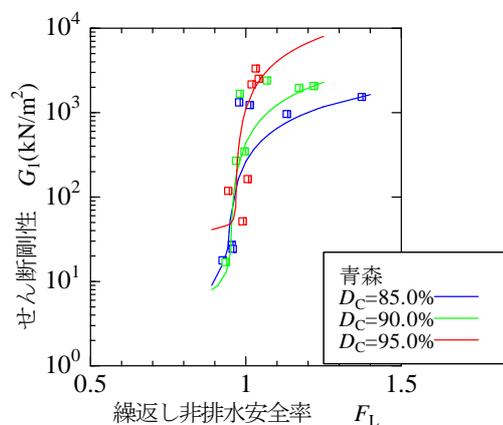


図 3 八戸の繰返し液状化に対する安全率～せん断剛性関係

### (3) 締固め度と地下水位が盛土の変状に与える影響

盛土の締固め度と地下水位が地震時の盛土の変状に与える影響に関して、まずモデル地盤を対象に研究代表者達が開発した解析コード ALID (残留変形解析) を用いて解析を行った。その結果、締固め度が緩い場合や地下水位が浅い場合には地震時に盛土が変形して、上にある家屋が被害を受けやすいことが分かった。

また、東日本大震災で被災した福島県と宮城県の盛土に、この解析を適用してみた結果、実被害を再現できることや、地下水位が盛土の変形に大きく関係していたことなどがわかった。

### (4) 常時に変状を生じていた造成宅地盛土の地震時の変形

2011年東日本大震災の約2年前に研究代表者が仙台市太白区を調査した際に、写真1上のように擁壁を補修したような跡が目にとまり気になっていた。そして地震の17日後に現地を訪れてみると写真1下のように右側の法面が写真で右側の方向に変状していた。



写真1 検討箇所の地震前・後の状況

また、写真奥行き方向にも数軒にわたる比較的広い範囲で地盤変状を生じていた。このため、補修箇所の少し下の緑色のシートがかけられているところで擁壁が奥行方向に開き、また、右側に少し傾いていた。つまり、補修してあった箇所から下流側で地盤変状が発生したと言えよう。近隣の方にお聞きするとこの箇所は1978年宮城県沖地震で崩壊し、その後復旧したが豪雨で変状を生じたとのことであるが、詳細は分からない。いずれにせよ、地震前に変状していたようなので、この箇所を検討の対象として断面の推定と解析を行ってみた。

解析に先立ちまず現地で簡単な測量をして崩壊した形状の概略を求めた。次にこの箇所の造成前・後の航空写真を用いて測量し造成時の盛土の厚さの分布を求めた。図4に写真1において右側に下りていく測線の盛土厚さ分布を示す。このようにして盛土厚さを詳細に調べてみると、この測線と写真で奥行方向の測線とも、変状していた擁壁は丁度盛切り境に位置していたことが分かった。そして、震災後の復旧にあたって調査されている資料を参考にして、図4の測線に沿った解析用断面を図5のように設定した。なお、断面図では盛土2の左上の地表面に写真1の擁壁がある。

次に、崩壊箇所から試料を採取し、物理試験、締め固め試験及び中空ねじりせん断試験装置を用いた液状化試験などを行い、盛土材の力学特性を求めた。

解析はFEMによって、①初期応力解析、②地震応答解析 (FLUSHによる)、③液状化

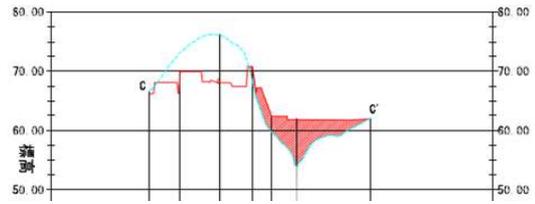


図4 地震前後の航空写真を用いた測量によって得た断面

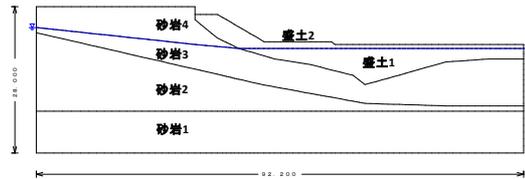


図5 解析用断面

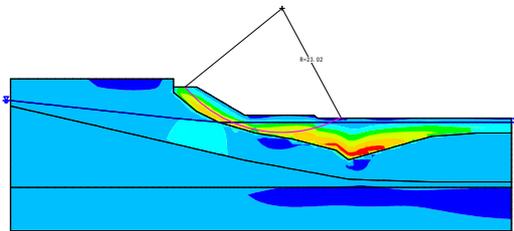


図6 初期応力解析におけるせん断ひずみの分布

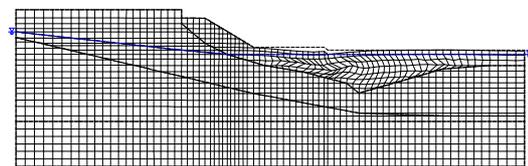


図7 ALIDの解析で求めた地震後残留変形

に対する安全率  $F_L$  の推定、④残留変形解析 (ALIDによる) を行った。解析結果のうち、初期応力解析において自重を載荷したときのせん断ひずみ分布を図6に示す。擁壁の位置では載荷だけで4cm程度の沈下、2cm程度の水平変位を生じ、せん断ひずみも1%程度出る結果となった。したがってこのような変形によって施工時に擁壁に変状が生じた可能性があると考えられた。ただし、入力定数の不確かさや変状の詳細が分からないので、定量的にこれで変状を生じたとは言いきれない。次に④の残留変形解析によって生じた変形図を図7に示す。盛土下部では地下水位が浅くさらに盛土が緩かったため液状化が発生し、下部で大きな変形が生じる結果となった。なお、現地調査に行った際に下部では噴砂らしきものも見られた。

以上のような解析手法を用いると、常時に変状している宅地は地震時に被災し易いことが定量的に評価できるのではないかと考

えられた。

(5) 東日本大震災による造成宅地盛土の変状のパターン

東日本大震災では盛土のすべりや盛切り境の段差など種々の被害が発生した。そこで、仙台市の南光台における被災のパターンとメカニズムに関して、現地調査などをもとに検討した。その結果、被害には①のり面の崩壊、②切盛境の段差や揺れの違い、③本支谷合流地点の大きな揺れ、④沼の盛土の液状化、⑤緩やかな傾斜地盤の液状化にともなう流動、⑥地下水が浅い箇所での盛土の液状化といった種類があったことが分かった。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計6件)

- ① 安田進・石川敬祐・中畝将太：常時に変状していて東日本大震災で被災した造成盛土の安定性の解析，第49回地盤工学研究発表会，2014年7月15日，北九州国際会議場（北九州）.(投稿済)
- ② 安田進・石川敬祐・中畝将太：地震時の造成宅地盛土の変形に関する強度・変形試験と解析，地盤工学会特別シンポジウム－東日本大震災を乗り越えて－，pp.359-365，2014年5月14日，東京電機大学（東京）。
- ③ 安田進・中畝将太：東日本大震災における造成宅地盛土の強度特性，土木学会第68回年次学術講演会講演集，Ⅲ，pp.665-667，2013年9月5日，日本大学（千葉）。
- ④ 安田進・佐藤真吾・石川敬祐：東日本大震災で被災した造成宅地における切盛地図を用いた現地調査，日本地震工学会・大会－2012梗概集，pp.26-27，2012年11月8日，国立オリンピック記念青少年総合センター（東京）。
- ⑤ Yasuda, S., Ishikawa, K., Watanabe, M. and Yoshida, M.: Study on the Mechanism of the Damaged Housing Lots during the 2011 Tohoku - Pacific Ocean Earthquake in Japan, *Proc. of the 15<sup>th</sup> WCEE*, Paper No. 1291, 2012年9月24日，Centro Congressos de Liboa（リスボン、ポルトガル）。
- ⑥ 安田進・渡辺綱：造成宅地盛土の締固め度が地震時変形に与える影響に関して，第47回地盤工学研究発表会，pp.1359-1360，2012年7月14日，八戸工業大学（八戸）。

[その他] (計1件)

- ① 安田進：造成宅地の地震被害と課題，地盤工学会誌，総説，Vol.61，No.4，pp.1-5，2013年4月。

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

安田 進 (YASUDA Susumu)

東京電機大学・理工学部・教授  
研究者番号：90192385

(2)研究分担者

石川 敬祐 (ISHIKAWA Keisuke)  
東京電機大学・理工学部・助手  
研究者番号：00615057