道路盛土材料の動的強度特性

藤岡 一頼¹・安田 進²・白鳥 翔太郎³

¹正会員 中日本高速道路株式会社 名古屋支社
(〒442-0802 愛知県豊川市麻生田町茶木畑101)

E-mail:k.fujioka.aa@c-nexco.co.jp

²フェロー会員 東京電機大学 理工学部 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂)

E-mail:yasuda@g.dendai.ac.jp

³学生会員 東京電機大学 理工学部 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂)

E-mail:07smg10@ms.dendai.ac.jp

2004年10月23日に新潟県中越地震(マグニチュード 6.8)が発生し、関越自動車道の堀之内IC付近から小千谷ICの付近まで盛土が大きく沈下・変形する被害が生じた。地震後に土質調査を実施したところ盛土内の水位が存在し、盛土下部は飽和していることが判明した。そこで、いくつかの盛土材料を用いて繰返し非排水せん断強度および繰返しによるせん断剛性の低下を繰返しねじり試験により調べた。その結果、繰返しせん断強度比は、不飽和土が飽和土より大きいことや、その値は塑性指数と相関があること、高い繰返しせん断応力比が作用した場合には、不飽和条件においても材料の軟化が生じることなどが判明した。

Key Words : *Cyclic strength of soils, Road embankment, Laboratory soil test*

1. はじめに

2004年新潟県中越地震では、関越自動車道の堀之内IC付近から小千谷IC付近までの盛土が大きく沈下・崩壊する被害が発生した(写真-1)¹⁾。

写真-1 大規模な盛土崩壊(関越自動車道214.5KP)

地震後に被災箇所の詳細な地質調査を実施したところ、台風23号に代表される地震前の集中的な降雨により盛土内の水位が周辺地盤の地下水位より上昇していることが判明した。被災した箇所の盛土材が地震動による間隙水圧の上昇に伴う剛性低下(以下「軟化」という。)の発生しやすい材料であれば、盛土内水位以下の飽和した盛土材料の軟化も大きな沈下・変形に至った要因のひとつと考えられる。

さらに、新潟県中越地震では、高速道路直近で1.7gと大変大きな加速度が記録されており、非常に強い地震動により盛土内水位よりも上部の不飽和部分においても破壊に近い応力状態に至ったことも考えられる。

本報告では、被災した盛土材を用いて飽和・不飽和の状態での繰返し非排水せん断強度(液状化強度)と繰返しによるせん断剛性の低下を、繰返しねじり試験により盛土材の動的変形特性について検討を行なった結果について紹介する。

なお、検討にあたっては、比較のため能登半島地震で被災した能登有料道路の盛土箇所の材料^{2),3)}、中越沖地震で被災した北陸自動車道の盛土材料⁴⁾および、地震による被災箇所ではないが、東名高速道路や富津館山道など関東近辺の盛土材料についての試験結果も併せて整理している。

2. 試験に用いた試料

試験に用いた盛土材料の物性一覧を表-1に、粒径加積曲線を図-1に示す。

関越自動車214.5KPは緩い傾斜地盤上の盛土で大きく変形した箇所である(写真-1)¹⁾が他の材料よりも礫分が多いことが判る。

表-1 試験に用いた盛土材料の物性値

	関越自動車道						北陸道	能登有料道路				東名		穴水	富津館山
	213.6KP	214.5KP	215.9KP	川口11	小千谷2	小千谷	曹地BS	横田IC	別所岳	縦9	厚木	大井			
	攪乱	攪乱	攪乱	攪乱	ガソリガ	攪乱	ガソリガ	攪乱	攪乱	攪乱	ガソリガ	攪乱	攪乱	攪乱	攪乱
dmax[g/cm³]	1.48	1.86	1.46	1.62	1.49	1.53	-	1.26	1.32	1.70	1.12	1.08	1.32	1.36	
opt[%]	24.1	14.3	25.6	19.8	25.2	24.5	-	38.5	34.6	17.9	43.0	49.3	32.8	30.0	
液性限界w _L [%]	39.2	32.0	NP	55.3	57.8	35.5	32.7	70.5	62.5	53.0	58.8	66.9	64.7	54.7	
塑性限界w _P [%]	22.1	20.9	NP	25.5	30.0	28.4	23.7	42.7	40.1	32.2	38.8	37.5	40.1	31.0	
塑性指数IP	17.1	11.1	NP	29.8	27.8	7.1	10.8	27.8	22.4	20.8	20.0	29.4	24.6	23.7	
細粒分含有率F _c (%)	39.0	27.0	25.3	47.0	64.7	42.0	14.7	73.0	85.5	40.7	49.7	58.4	39.3	62.6	
採取時の ₀ [%]	26.9	19.6	36.1	22.3	40.2	66.1	31.0	27.9	29.3	30.0	31.7	46.6	27.1	35.9	
締固め度D _c [%]	95	95	95	95	-	90	-	90	90	90	-	93	90	95.0	
液状化強度比(飽和時) R _L	0.298	0.310	0.570	0.512	0.536	0.178	0.300	0.365	0.230	0.202	0.280	0.388	0.273	0.482	
液状化強度比(不飽和時) R _L	0.438	0.510	0.890	0.621	0.702	0.670	0.630	0.685	0.535	0.460	1.059	0.833	0.920	0.596	
飽和度Sr(%)	83.5	67.0	80.0	85.7	90.0	72.8	92.2	75.2	76.4	69.6	69.9	72.0	70.0	91.0

図-1 試験に用いた盛土材料の粒径加積曲線

能登有料道路の盛土材は、横田IC、別所岳は細粒分含有率 F_c が80%以上と多い材料であり、縦9は砂分が多少多く混入している。

その他の材料は、粒度分布的には細粒分含有率 F_c が50%程度と似通っているものの表-1の最適含水比により比較すると東名高速道路の厚木・大井の盛土材料がその他の盛土材料より高いことがわかる。これは、厚木・大井が関東ロームで、その他は砂岩・泥岩などが風化した材料であることから、堆積・風化など土砂材料の生成過程による違いによるものと考えられる。

3. 試験方法

試験装置は、単調載荷用の電動モーターを有した繰返し中空ねじりせん断試験装置を用いた。供試体の含水比は、能登有料道路、穴水および関越自動車道小千谷において最適含水比で、その他の盛土材料は現地調査により飽和度が判明している場合は、調査時の含水量で作製し、サンプリング試料についてはそのままの飽和度により試験を実施し、試験後含水比を確認した。

締固め度は高速道路など現場の締固め度が判明している箇所においては、現地と同等の締固め度となるように、その他の材料は $D_c=90\%$ となるように突固めた。

また、供試体の寸法は、外径10cm、内径6cm、高さ10cmの中空円筒形で作製した。

試験は2条件実施し、ひとつは、飽和条件とし間隙水圧係数 B 値が0.95以上になるように飽和させた後に等方圧密を行った。もう一方は、不飽和条件とし最適含水比のまま圧密を行った。

圧密終了後、両条件とも非排水状態で正弦波荷重を一定の繰返し応力比で20波載荷を行い、その後非排水状態を保ったまま静的単調載荷を行った。せん断載荷方法のイメージを図-2に示す⁵⁾。

図-2 せん断応力の載荷方法

静的単調載荷は、ひずみ制御で行い載荷速度は10(%/min)とした。飽和した供試体における液状化試験では通常0.1~0.4程度の大きさの繰返しせん断応力比で行うが、地表最大加速度が1gを超すような大きな地震動が加わると地盤内においては1.0程度の大きな繰返しせん断応力比が発生する可能性があることから、不飽和条件の供試体には1.0前後の通常実施しない大きな繰返し非排水せん断応力比まで与えた。

このような条件で繰返しせん断応力比と 20 波目のせん断ひずみ両振幅 γ_{DA} の関係から $\gamma_{DA}=7.5\%$ となる（繰返し三軸圧縮試験の場合では、両振幅軸ひずみ 5% の値で判断しているが、今回は中空ねじり試験であるため両振幅軸ひずみをせん断ひずみに換算し $\gamma_{DA}=7.5\%$ としている。）繰返しせん断応力比を繰返し非排水せん断強度比 R_L （以下「 R_L 」という。）とし、試験結果については表-1 に示した。

次章以降に飽和・不飽和条件での物理特性、動的特性および、締固め度などについて整理した結果を示す。

4. 塑性指数と R_L との関係

表-1 より、強じん性を示す塑性指数 I_p に着目し、塑性指数 I_p と R_L の関係を整理した。飽和条件の場合を図-3 に、不飽和条件の場合を図-4 に示す。

なお、表-1 に示す小千谷 2 の物性値は、ボーリングにより採取した乱れの少ない試料を用い試験を実施しているため、不飽和条件での供試体での試験結果を記載している。飽和条件で用いた小千谷 2 の供試体の塑性指数は 50.0 であり、図-3 はこの値を用いている。

図-3 塑性指数 I_p と R_L の関係（飽和条件）

図-3 および図-4 より、全体に不飽和条件のほうが R_L の値が大きく、飽和・不飽和条件ともに塑性指数が大きい材料ほど R_L の値が大きくなる傾向がみられる。

このことから、盛土材料においても塑性指数が小さい（砂っぽい）材料であれば液状化もしくは軟化しやすいということが、飽和・不飽和条件に関わらず確認できた。

図-3 より、飽和条件ではある程度の相関性がみられ、図中に示す関係式を用いることで、塑性指数から R_L の値をある程度想定できるものと考えられる。

図-4 塑性指数 I_p と R_L の関係（不飽和条件）

図-4 より、塑性指数の小さい材料において不飽和条件でのせん断剛性比が高くなる傾向にある。したがって、塑性指数の小さい材料ほど、排水対策により盛土を不飽和状態にすることで、地震時の盛土材料の軟化に伴う変形に至る危険性が改善される考えられる。

不飽和条件においては、ほとんどの材料が、 $R_L=0.4$ 以上であり、 $R_L=1.0$ 以上の材料もある。このことより、盛土の不飽和部分は、かなり強いせん断力加わらない限り崩壊しないといえる。

ただし、高速道路の供試体は締固め度 95% で作製していることや、サンプリング試料においては現場での締固め度となっていることから、若干繰返し破壊強度比は高めの値となっていると考えられる。また、不飽和条件においても、飽和度などを現場の含水条件を反映して供試体を作製しているものもあるため、 R_L のばらつきが大きくなったものと思慮される。今後、不飽和条件において塑性指数による R_L の推定方法を検討するにあたっては、締固め度、含水比もしくは飽和度の設定などの条件を整理し相関性の有無について検討する必要がある。

5. せん断破壊に対する安全率とせん断剛性の関係

繰返し非排水せん断破壊に対する安全率 F_L （以下「 F_L 」という。）とせん断剛性比 G_1/σ'_c （ σ'_c ：有効拘束圧）との関係を整理し、繰返しせん断力に対するせん断剛性比の変化について整理を行った。飽和条件について図-5 に、不飽和条件について図-6 に示す。

なお、ここでは単調載荷時の応力-ひずみ関係のせん断ひずみが 1% 時の割線勾配を地震後のせん断

剛性 G_1 とした⁵⁾。また、 F_L は R_L を供試体に加えた応力比 R_d で除したものである($F_L = R_L / R_d$)。

図-5、図-6より、いずれの材料も $F_L=1.0$ 付近でせん断剛性が低下する傾向がみられる。また、不飽和条件のせん断剛性は10から100の範囲に分布しており、飽和条件と比較して大きい。また、 F_L 値も最大2.5と高い。また、 F_L が1.0以下となっても剛性低下は比較的小さい。

図-5 F_L とせん断剛性比の関係 (飽和条件)

図-6 F_L とせん断剛性比の関係 (不飽和条件)

6. 締固め度と R_L との関係

表-1から、関越自動車の215.9KPと213.5KPの材料を比較すると後者の方が地震動に対するせん断強度比が低い、実際の被害は以下に示すように前者の方が大きい。

215.9KPは、芋川橋より2km程度新潟寄りの傾斜地盤上の盛土である。盛土材料は、単粒度の砂分が卓越した材料 (図-1参照) であり中越沖地震において盛土のり尻から80m程度崩落土砂が流動した (写真-2)。

写真-2 大規模な盛土崩壊 (関越自動車道215.9KP)

213.6KP付近は芋川橋より300m程度東京寄りの水平地盤上の盛土である。図-7に建設時の土質調査結果を示すが比較的良好な地盤といえる。当該箇所は、震源に最も近い場所であるにもかかわらず揺すり込み沈下が若干生じたものの比較的健全であった (写真-3)。

図-7 建設時の土質調査結果 (関越自動車道213.6KP)

写真-3 水平地盤における被災状況 (関越自動車道213.6KP)

両者の動的物性を確認するため、締固め度と飽和条件を変えて、繰り返し中空ねじりせん断試験を実施した。

締固め度と R_L との関係を飽和条件と不飽和条件とで整理したものを図-8に示す。

図-8より、締固め度が高いほど R_L は高くなる傾向や、不飽和条件の R_L のほうが値が大きく、その差は締固め度が高いほど顕著になることが確認できた。

図-8 締固め度と R_L の関係

215.9KPと213.6KPの盛土材料の物性を比較した場合、215.9KPの盛土材はNPで、飽和・不飽和にかかわらず締固めの効果は高いが、逆に90%程度の締固め度では R_L は飽和度にあまり影響されないことも言える。

一方、213.6KPのように細粒分が39%と多い材料で飽和条件の場合は、あまり締固めによる効果がみられない。

締固め度を変化させた場合の異なる繰り返し中空ねじりせん断試験後のせん断剛性比 G_1/σ_c' と F_L の関係を飽和・不飽和条件を併記したものを図-9に示す。

図-9 F_L とせん断剛性比の関係

図-9より、215.9KPの材料および213.6KPの材料の双方において締固め度が高いほどせん断剛性比が高い傾向がみられる。また、213.6KPの材料の方が F_L が1.0より小さい場合、剛性低下の程度が比較的大きい傾向がみられる。

盛土材料の物性としては、215.9KPの材料の方が繰り返し非排水せん断強度比が高く、地震動に対して比較の変状しづらい材料といえる。さらに地震後の調査において、215.9KPの盛土材料の締固め度は95%程度であることを確認している。一方215.9KPにおいては盛土内に水位が確認されたことや、水抜きボーリングからの湧水も確認している。また、213.6KPについては、地下水位は地表面付近に観測され、盛土内には水位は観測されなかった。

これらのことから、215.9KPが大きな被害に至った原因としては、地形条件のほかに盛土内の水位の影響が大きいものと推察される。

7. R_L とせん断剛性比の関係

安田・稲垣らは、繰り返しせん断強度比 R_L とせん断剛性比の関係を F_L ごとに整理すると良好な関係性を有していると報告されている⁶⁾。

今回の試験結果も同様に関係性を調べてみた。 F_L が1.0のときのせん断剛性比と R_L との関係を飽和条件および不飽和条件とあわせて図-10に示す。

図-10 R_L とせん断剛性比の関係

図-10より、 R_L が0.3から0.1にかけてせん断剛性比が低下していることがわかる。また、 R_L が大きいほどせん断剛性比は増加する傾向にある。

図-10中の実線は、安田・稲垣ら⁶⁾が提唱した関係式で $F_L=1.0$ のケースを図示したものである。この実線は種々の基礎地盤から採取した試料に対する飽和条件での試験結果をまとめたものであるが、今回試験を実施した飽和条件での盛土材料の試験結果においても、この関係式と概ね同様の傾向を示すこと

が確認できた。さらに不飽和条件（図-10の白抜き）においても、ばらつきはあるものの安田・稲垣らが提唱した関係式に近い傾向がみられ、この関係式を用いて飽和・不飽和部を含む盛土の残留変形量を概略値を推定することが可能となると考えられる。

8. まとめ

新潟県中越地震で被災した盛土材料などを用い、飽和・不飽和の条件で繰返しねじりせん断試験により動的特性について比較検討したその結果を以下に示す。

- ① 同様な粒径加積曲線でも、繰返し非排水せん断強度は異なる。飽和条件での繰返し非排水せん断強度は塑性指数をパラメーターにすることで動的な特性が推定できる可能性がある。
- ② 不飽和条件の盛土のせん断剛性はかなり高いことが確認できた。ただし、不飽和条件においても F_L が1.0付近となるとせん断剛性が低下することから、かなり大きな地震動においては不飽和土であっても材料の軟化現象が生じ変形・崩壊に至る可能性がある。
- ③ 盛土材料の締固め度を変え動的試験を行った結果、不飽和条件においては、締固め度が高くなるほど R_L は大きく、NPの材料のほうがより顕著であり、耐震性を向上させるためには、十分な締固めと適切な排水対策が不可欠であることを再確認できた。
- ④ 盛土材料の動的特性は、安田・稲垣らが提唱し

た関係式に近い挙動を示すことから、同式を用い変形量を算定することが可能となると考えられる。

今後、これら一連の試験により得られた知見をもとに、盛土内に水位がある盛土において、地震動による過剰間隙水圧の上昇に伴う盛土の変形量を把握する手法について検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 地盤工学会：新潟県中越地震災害調査委員会報告書，pp. 187-204, 2007.
- 2) 安田進,白鳥翔太郎,毛利龍司：能登半島地震で被災した盛土材の飽和・不飽和動的特性第 43 回地盤工学研究発表会平成 20 年度発表講演集，pp.353-354, 2008.
- 3) 安田進,毛利龍司,三木佑介,鶴田隆文：能登半島地震などで被災した道路盛土材の繰返しせん断強度や過剰間隙水圧特性 第 44 回地盤工学研究発表会平成 21 年度発表講演集，pp.1387-1388, 2009.
- 4) 安田進,大窪克己,藤岡一頼,白鳥翔太郎,毛利龍司：新潟県中越地震で沈下した道路盛土の土の強度特性 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集，3-06, 2009.
- 5) 安田進,吉田望,安達健司,規矩大義,五瀬信吾,増田民夫：液状化に伴う流動の簡易評価法土木学会論文集 №638/Ⅲ-49,pp.71-89,1999.
- 6) 安田進,稲垣太浩,長尾和之,山田真一,石川敬祐：液状化を含む繰返し軟化時における種々の土の変形特性 第40回地盤工学研究発表会平成13 年度発表講演集，pp.525-526, 2005.

(原稿受理2009年6月28日)

CYCLIC STRENGTH OF ROAD EMBANKMENT SOILS

Kazuyori FUJIOKA, Susumu YASUDA and Shotaro SHIRATORI

On October 23 in 2004, the Niigataken-chuetsu earthquake, of Magnitude 6.8, has occurred. Road embankment of the Kan-etsu Expressway slumped between Horinouchi IC and Ojiya IC. According to the soil investigation conducted after the earthquake, lower part of the embankment was saturated. Then cyclic torsion tests were conducted for some embankment soils to examine cyclic strength and shear modulus after cyclic loading. Test results showed the cyclic strength and shear modulus of partially saturated soil is greater than that of saturated soil. And the strength and shear modulus are affected by plasticity index. And, under high cyclic shear stress, failure occurred even though the sample was not saturated.