

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 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail:k.fujioka.aa@ri-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、図-1に示すように大きく沈下・崩壊する被害が発生した¹⁾。



図-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、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等が判明した。盛土材が地震動による間隙水圧の上昇に伴う剛性の低下が(以下「軟化」という。)起き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、被災した盛土の飽和・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、繰返し三軸試験と繰返しねじり試験を用いて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)}中越沖地震での北陸自動車道の盛土材料⁴⁾および、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-2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(図-1)¹⁾。

214.5KPの盛土材料は他の材料よりも礫分が多いことが判る。能登有料道路の盛土材は、横田IC、別所岳は細粒分が80%以上の細粒土である。縦9は礫分が混じ

表-1 試験に用いた盛土材料の物性値

	関東自動車道						北陸道	能登有料道路			東名		穴水	富津館山
	213.6KP 攪乱	214.5KP 攪乱	215.9KP 攪乱	川口11 攪乱	小千谷2 ソフリング	小千谷 攪乱	曹地BS ソフリング	横田IC 攪乱	別所岳 攪乱	縦9 攪乱	厚木 ソフリング	大井 攪乱	攪乱	攪乱
$d_{max}[g/cm^3]$	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 $[\%]$	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 $S_r(\%)$	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

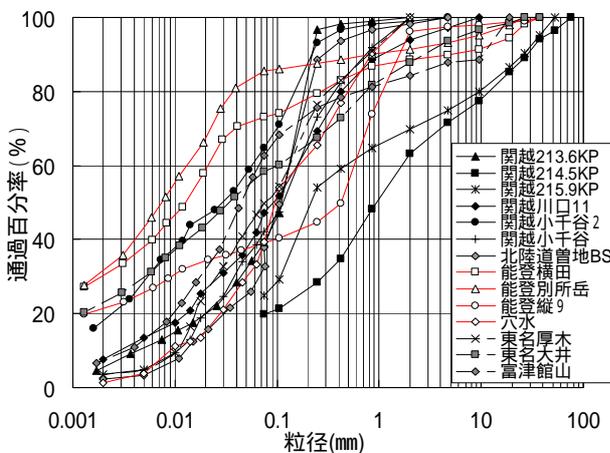


図-2 試験に用いた盛土材料の粒径加積曲線

っているものの、横田ICおよび別所岳と同様な盛土材料である。その他の材料は、粒度分布的には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

試験装置には、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。供試体は、最適含水比で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、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、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。これを飽和条件とした。もう一方は、最適含水比のまま圧密を行った。これを不飽和条件とした。

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-3 に示す⁵⁾。

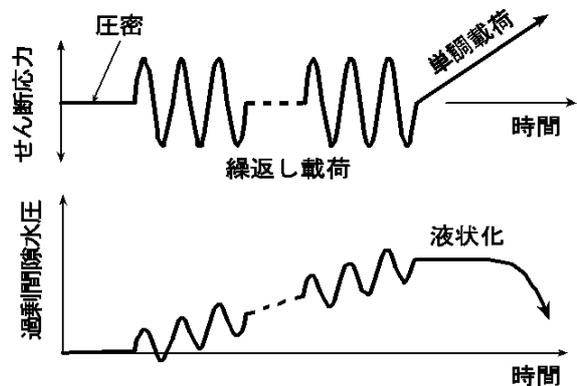


図-3 せん断応力の載荷方法

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 1 g 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 R と 20 波目のせん断ひずみ両振幅 D_A の関係から $D_A=7.5\%$ とな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(ゆるい砂の場合は「液

状化強度比」という。) , 試験結果については表-1 に示した。

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-4に, 不飽和条件の場合を図-5に示す。

なお, 表-1に示す塑性指数は採取した盛土材料の物性試験のデータを記載しており, サンプル試験料による塑性指数は, 試験に用いた供試体の値を用いたことから, 表-1と図-4, 図-5の値とは異なっている。

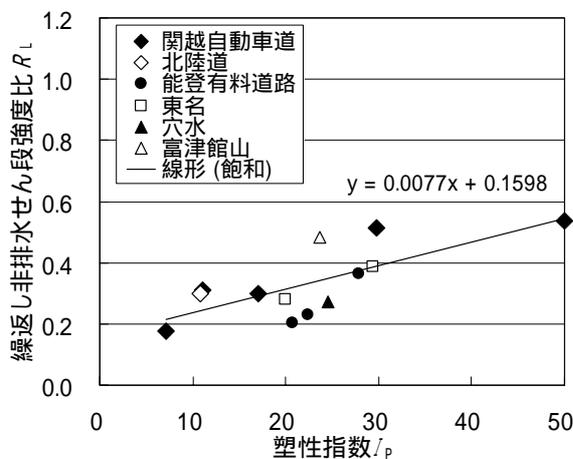


図-4 塑性指数 I_p と R_L の関係 (飽和条件)

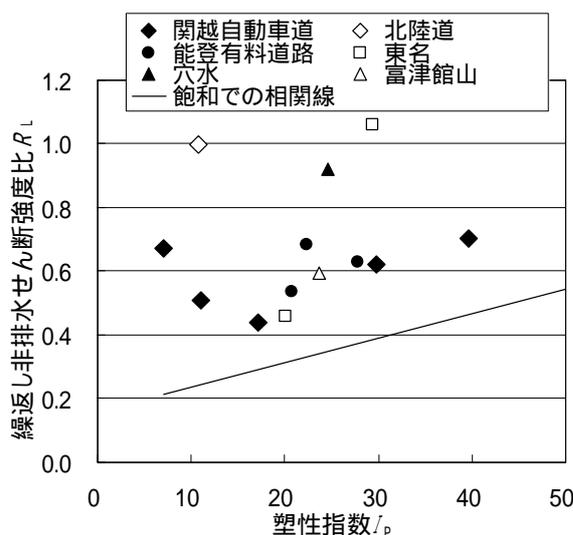


図-5 塑性指数 I_p と R_L の関係(不飽和条件)

図-4および図-5より, 不飽和条件のほうが R_L の値が大きく, 特に塑性指数の小さい材料において不飽和条件での強度が高くなる傾向にある。したがって, 塑性

指数の小さい材料は, 排水対策の効果が高い材料といえ, 排水対策などにより間隙水圧の上昇を低下させることにより, 地震時の軟化により大きな変形に至る危険性が低くなると考えられる。

加えて, 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, 特に飽和条件での相関性は高く, 飽和時の R_L は, 塑性指数によりある程度想定できるものと考えられる。また, 塑性指数が30程度以上の材料であれば, 飽和条件であっても地震動による軟化の影響は少ないものと考えられる。

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が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, サンプル試験料においては現場での締固め度となっていることから, 若干繰り返し破壊強度比は高めの値となっている。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たため, R_L のばらつきが大きくなったものと思慮される。したがって, 塑性指数より R_L を推定するにあたっては, 締固め度, 含水比の設定などの条件ごとに相関性について更に詳細に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

飽和条件での繰り返し中空ねじりせん断試験後のせん断剛性比 G_1/c' と繰り返しせん断破壊に対する安全率 F_L (以下「 F_L 」という。)の関係を図-6に示す。

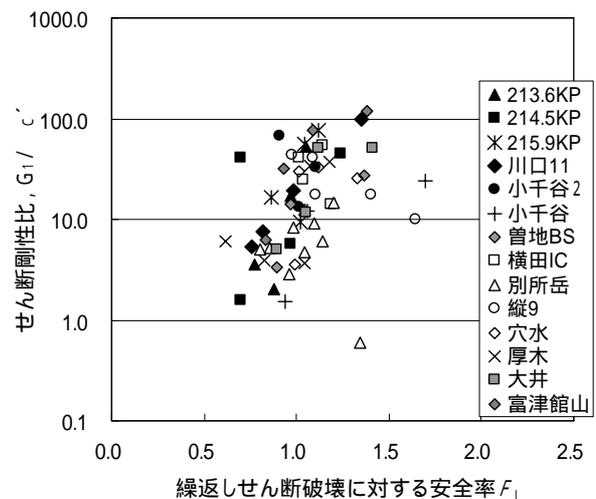


図-6 F_L とせん断剛性比の関係 (飽和条件)

ここでは単調載荷時の応力-ひずみ関係のせん断ひずみ γ が1%時の割線勾配を地震後のせん断剛性 G_L とした⁵⁾。 F_L は繰返しせん断破壊強度比を供試体に加えた応力比で除したものである。

いずれの材料も $F_L = 1.0$ 付近でせん断剛性が著しく低下している。また、全体的に塑性指数が小さい材料のほうがせん断剛性比が低く F_L が1.0より小さくなったときの低下の程度が大きくなっている傾向がみられる。

不飽和条件での繰返し中空ねじりせん断試験後のせん断剛性比 G_L/c' と F_L の関係を図-7に示す。

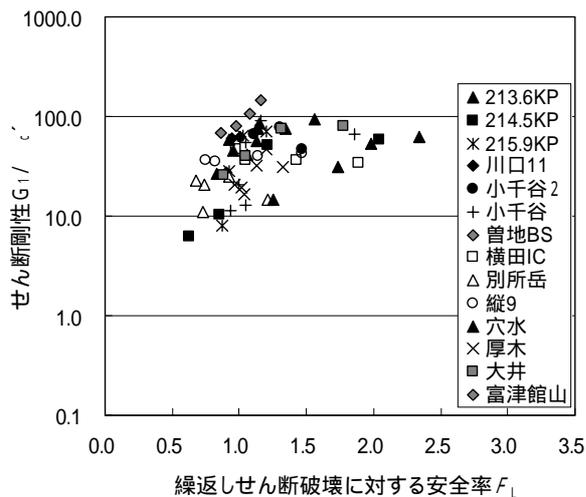


図-7 F_L とせん断剛性比の関係（不飽和条件）

図-7より、不飽和条件の方が飽和条件に比べて $F_L = 1.0$ 付近でのせん断剛性が大きく F_L 値も高い。また、 F_L が1.0より小さくても剛性低下は比較的小さい傾向がみられる。

6. 締固め度と R_L との関係

関越自動車道215.9KPは、砂分が比較的卓越した材料であり中越沖地震において図-8に示すように盛土のり尻から80m程度崩落土砂が流動した。

この盛土材料を採取し締固め度と飽和条件を変えて、繰返し中空ねじりせん断試験を実施した。また比較のために関越自動車道の芋川橋より東京側の213.6KPの盛土材料においても同様に実施した。

芋川橋付近の盛土部は、良好な水平地盤上の盛土で中越地震において揺すり込み沈下が若干生じたものの比較的健全な箇所といえる。

なおそれぞれの、材料物性等は表-1、図-2に併せて記載している。



図-8 大規模な盛土崩壊（関越自動車道215.9KP）

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-9に示す。

図-9より、締固め度が高いほど R_L は高くなる傾向がみられ、また不飽和条件の 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。

215.9KPの盛土材料はNPであり、NP材料の場合は、飽和・不飽和にかかわらず締固めの効果は高いことが示唆される。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。

また、213.6KPのように細粒分が多い材料で飽和条件の場合は、あまり締固めの効果がみられない。

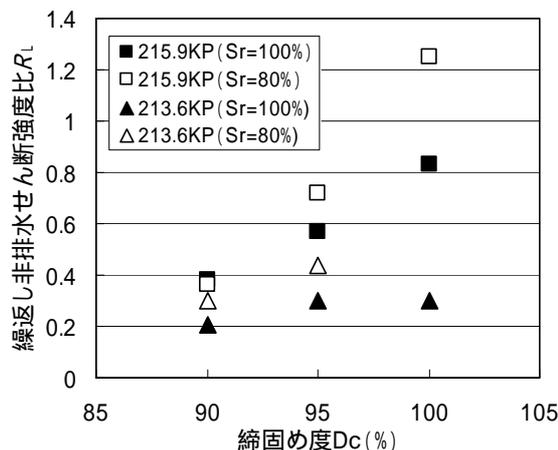


図-9 締固め度と R_L の関係

締固め度と飽和度を変化させた場合の繰返し中空ねじりせん断試験後のせん断剛性比 G_L/c' と F_L の関係を図-10に示す。

図-10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

り小さくなくても剛性低下の程度が比較的大きい傾向がみられる。

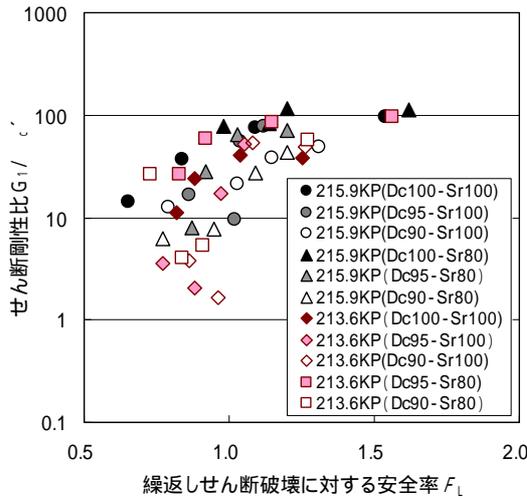


図-10 F_L とせん断剛性比の関係

213.5KPと215.9KPの材料を比較すると前者の方が地震動に対するせん断強度が低いが、実際の被害が後者の方が大きい。

215.9KPの地震後の調査では、締固め度は95%程度であることを確認しており、大きな被害に至った原因としては、地盤の傾斜と盛土内の水位の違いではないかと推察される。

7. R_L とせん断剛性比の関係

F_L が1.0のときのせん断剛性比と R_L との関係を図-11に示す。

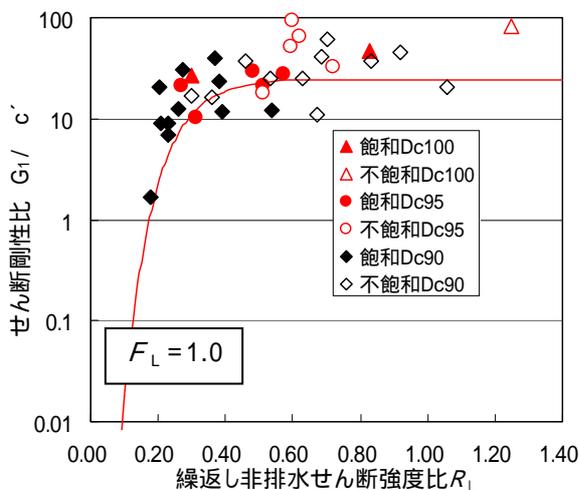


図-11 R_L とせん断剛性比の関係

図-11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-11中の実線は、安田・稲垣ら⁹⁾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、この関係式と同様の傾向を示すことが確認できた。さらに不飽和条件においても、この関係式と同様の傾向がみられた。

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。

同様な粒径加積曲線でも、繰返し破壊強度は異なり、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。

不飽和条件と飽和条件では動的特性は大きく異なり、不飽和条件の盛土のせん断剛性はかなり高いことが判明した。一方、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ることが確認できた。

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る。

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、特に盛土内に水位が存在する場合において、同式を用い変形量を算定することが可能となること示唆される。

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、地震動による影響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，2009.(投稿中)

- 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 / - 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.

CYCLIC STRENGTH OF ROAD EMBANKMENT SOILS

Kazuyori FUJIOKA and Susumu YASUDA

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.