

繰返し圧密特性に関する研究 (第4報)

—生石灰パイル工法による改良効果について—

齋藤二郎 平間邦興
木村薫 丸山誠

Studies on Consolidation Characteristics of Cohesive Soil under Repeated Loads (Part 4)

—Stabilization effect of line pile method—

Jiro Saito Kunioki Hirama
Kaoru Kimura Makoto Maruyama

Abstract

There are many problems in analyses and applications of consolidation characteristics of cohesive soil under continual repeated loads and it is unknown how they should be considered in design. There has been a tendency for low embankments on poor ground to be adopted in recent highway construction and it is urgently required for a method of analysis of consolidation characteristics of cohesive soil under repeated loads such as traffic loads to be established and applied to design conditions. Many repetitive consolidation test results on various soil samples have been obtained so far in the authors' studies. This report is on the results of studies on the effect of the lime pile method where undisturbed samples of soil before and after application of this method were used.

概要

繰返し応力を継続的に受ける場合の粘性土の圧密性状については、未だ種々の問題点が解明されず、設計においてどのように考慮するかが明確にされていない。最近の高速道路建設においては、軟弱地盤上に低盛土方式が採用される傾向にあり交通荷重のような繰返し応力条件下での圧密沈下特性について、その解析方法の確立と設計条件への導入が急がれているのが現状である。

これまでの研究では、各種の土質試料を用いて繰返し応力下での沈下特性などについて、繰返し圧密試験を行ってきた。ここでは生石灰パイル工法施工前後に採取した不かく乱試料を用いて、生石灰パイル工法による改良効果について検討した結果のいくつかを報告する。

1. まえがき

交通荷重のような繰返し応力を継続的に受けるような場合の圧密性状については、未だ種々の問題点が解明されておらず、例えば道路構造の設計に対して、どのように繰返し効果を考慮するかが明確にされていない。現在、軟弱地盤に低盛土造成された道路において原因不明の沈下が続いている報告が多数あり、その交通荷重による沈下現象の原因究明とともに、設計条件への組み入れなどが急がれている。

筆者らは、かねてより粘性土の繰返し応力下での沈下特性などについて、各種の土試料を用いて一連の繰返し圧密試験を行ってきた。ここでは生石灰パイル工法施工前後に採取した不かく乱試料を用いて、まず、生石灰パイル工法による影響を明らかにするため

土質性状の比較を行なうとともに、理論沈下量と実測沈下量との比較と繰返し圧密特性の比較を通して生石灰パイル工法による改良効果について、検討した結果のいくつかを報告する。なお、繰返し圧密試験については、ある単一仮想土層を有する道路盛土を想定して試験条件を決め、長期間における繰返し載荷を行なった。

2. 繰返し圧密試験方法と試験試料

2.1. 使用した試験試料について

繰返し圧密試験に使用した試料は、千葉県佐倉市の某道路盛土工事において、生石灰パイル工法による地盤改良前後にフォイルサンプリングした不かく乱試料である。当該地区は、地理的に千葉県北東部の印幡沼付近に位置し、地質的には下総台地とこれを削る谷底

に沖積層が厚く堆積した開析谷である。土層分布は、大略腐植土・シルト・粘土および細砂より形成されており、G.L.-10m 付近までがN値=0できわめて軟弱である。特に表層2m 付近に分布している腐植土層は高含水比で、多量の有機質分を含有している劣質な土質性状を有し、典型的な泥炭性土の性状を示している。土層分布と試験試料の土質性状を一括表示したのが図-1である。生石灰パイル工法施工前後の各土層ごとにそれぞれ土質試験を行なったが、このうち繰返し圧密試験に使用した試料は、

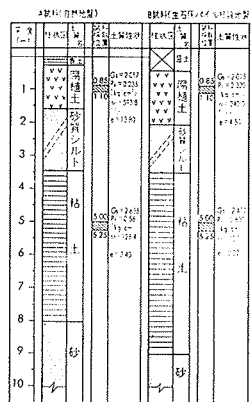


図-1 土層分布と試験試料位置 (標準圧密, 繰返し圧密試験)

G.L.-1.0m 付近の腐植土層と、G.L.-5.0m 付近の粘土層の2種類である。

2.2. 設定した試験条件

今回の試験条件を一括して示したのが表-1である。繰返し圧密試験と比較するために静的圧密試験を行なうとともに、試験後にそれぞれ標準圧密試験を実施して、その履歴性状について調べた。なお、不カク乱試料のままの標準圧密試験は別途行なっている。

繰返し圧密荷重および静的圧密荷重については、ある道路盛土の仮想の単一土層断面を想定して決定した。繰返し圧密荷重は交通荷重として最大輪荷重を8tとし、接地半径を20cmに仮定して接地圧Paを算出した。(Pa=6.4kg/cm²) 求めた接地圧を Boussinesq 式によって深度1.0mにおける垂直方向増加応力を繰返しおよび静的圧密荷重(0.35kg/cm²)とした。また、これらの圧密荷重の他に予圧密荷重としては、1mの盛土地盤におけるG.L.-1.0m付近の土被り圧に相当する0.2(kg/cm²)を試験前に載荷した。載荷時間については、長期間の繰返し載荷による圧密特性を調べるため、載荷除荷の時間周期を5秒に設定、5日間載荷しつづけた。

なお、バックプレッシャーは試料採取時のカク乱を考慮して、試験中0.5(kg/cm²)を負荷した。

土質名	標準圧密試験	繰返し圧密試験 Pd=0.35kg/cm ²			静的圧密試験 Ps=0.35kg/cm ²
		載荷1秒/除荷4秒	載荷25秒/除荷3秒	載荷4秒/除荷1秒	
腐植土 (0.85~1.10)	N	D-1/4	D-2.5/2.5	D-4/1	S
粘土 (5.00~5.25)	N	D-1/4	D-2.5/2.5	D-4/1	S
腐植土 (0.85~1.10)	N'	D-1/4	D-2.5/2.5	D-4/1	S'
粘土 (5.00~5.25)	N'	D-1/4	D-2.5/2.5	D-4/1	S'

表-1 試験条件一覧

3. 生石灰パイル工法による土質性状の変化

生石灰パイル工法とは、生石灰と水との消化反応過程で発生する吸水・膨脹・発熱作用の原理を利用して生石灰パイルの周辺地盤を強制脱水、圧密させて、地盤改良を行なうことを目的としている。対象地盤はシルト・粘土・有機質土とあらゆる軟弱地盤に適用され、主に、盛土基礎地盤のスベリ破壊の防止や沈下低減対策などに用いられている工法である。

ここでは、生石灰パイル工法による地盤改良前と、地盤改良後すでに生石灰の消化反応がかなり進行していると思われる約2ヶ月後の土質調査結果(サウンディング)と、フォイルサンプリング試料による土質試験結果についてそれぞれ比較してみた。全般的にみると、かなりの改良効果が認められる。

3.1. サウンディング結果について

オランダ式コーン貫入試験結果を土質柱状図と対応させて示したのが、図-2である。全体にかなりの改良効果が認められるが、特にG.L.-2.2m~-3.5mに分布する砂質シルト層は顕著な効果を示して、また、腐植土層についてはあまり大きな改良効果は得られていないと言えそうである。

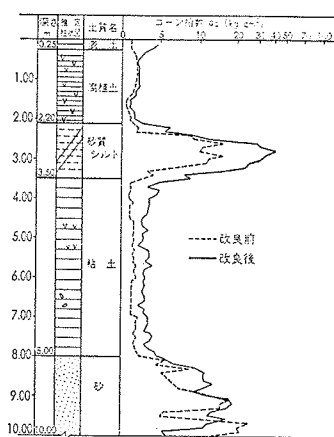


図-2

3.2. 土質性状について

生石灰パイル工法による土質性状の変化について、物理試験結果を深度方向に一括表示したのが図-3である。おのおの土質性状に、一応の改良効果を認めることができる。例えば含水比を例にとると、改良前600%近くの腐植土層が改良後には250%までに低下している結果が得ら

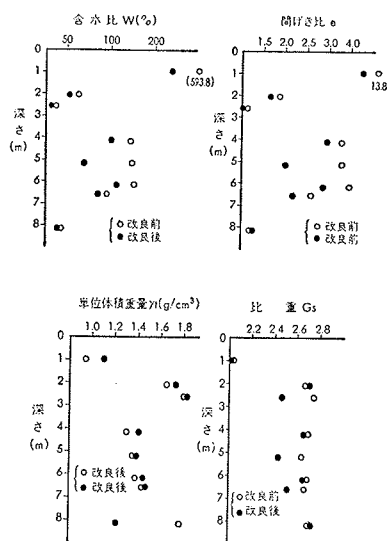


図-3 土質性状の変化

れた。また、間ゲキ比、単位体積重量についても同様の傾向が認められ、比重については改良によってやや小さくなる結果が得られている。

3.3. 圧密性状について

圧密諸特性値の変化を深度方向に一括示したのが、図-4であり、個々の圧密性状の変化について、G.L.-1.0mの腐植土層とG.L.-5.0mと-6.5m付近の粘土層の圧密試験結果を示したのが図-5, 6, 7である。

e-log P 関係については、今回の腐植土層の土質試験結果からは直線部分の勾配に変化が認められ、圧密降伏応力も増大しているが他の土層については初期間ゲキ比が大きく異なっているだけで、曲線形状そのものには大きな変化は認められない。この状況は圧縮指数のばらつきからも理解できる。全体的に圧密降伏応力は増加しており、履歴応力として記憶されているようであるが、その増加幅は深層部のばらつきを除いて、深度とともに減少している様子がわかる。

体積圧縮係数、圧密係数

についても多少のばらつきがあるものの、生石灰パイルの吸水膨脹作用によると推定される強制圧密の影響が非常に小さいと判断できる。

以上の試験結果から土質によって異なるが、圧密諸特性値について、生石灰パイル工法による改良効果を一応確認することができた。また後述するが沈下抑制に対応する主たる効果は生石灰の消化反応過程で生ずる生

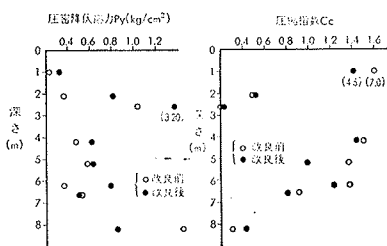


図-4 圧密諸特性の変化

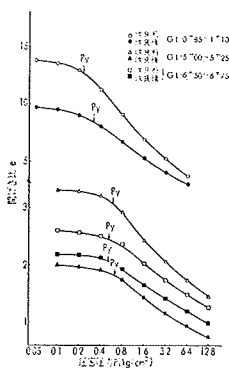


図-5 e-log P

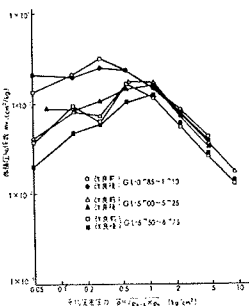


図-6 mv-log P

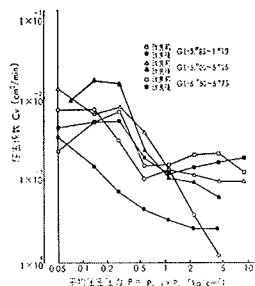


図-7 Cv-log P

石灰パイル周辺地盤の間ゲキ比の大きな減少にあると判断するのが妥当のようである。また、特に腐植土層における土質性状の変化については土質試験結果の少ないこともあって今後の研究課題としたい。

4. 生石灰パイル工法による沈下抑制効果の検討

4.1. 沈下抑制効果について

生石灰パイル工法とは、生石灰と水との消化反応で地盤改良を行なうことを目的としているが、設計にあたってはこれら生石灰パイルの化学的作用と、地盤の強度や圧密特性などとの関連性を十分検討する必要がある。

まず、生石灰パイルのクイ効果を考慮すれば上載荷重の一部をパイルが分担するとして、パイル周辺地盤の増加応力が低減することになる。生石灰パイルと周辺地盤の応力分担比を一般的な4として計算すると地盤の分担応力は実際の上載荷重の56%に減少されることになり、このクイ効果によって沈下量は大幅に低減することになる。また、生石灰パイルの吸水膨脹発熱作用により、パイル周辺地盤の一部が強制的に圧密され、パイルは周辺地盤から間ゲキ水を排出し、地盤の強度が増大するとともに間ゲキ比が減少することになる。したがって、生石灰パイル打設地盤に盛土をした場合の圧密沈下量は必然的に改良前のそれよりも小さくなりいわゆる沈下阻止効果があらわれることになる。

4.2. 実測沈下量との比較

生石灰パイル工法の圧密沈下抑制効果について検討を行ない、実測沈下量との比較を試みたのが図-8である。参考のために近接地区で施工したファブリドレーン打設区域の実測沈下量も併記してある。(計画盛土高2.5m)

最終理論沈下量は29.4cmと無処理地盤の理論値と比較して約50%近い沈下抑制効果が期待できると推定される。そこで実測沈下量と比較してみると、理論値とほぼ同程度の実測値を示していることがわかる。また、隣接地区のファブリドレーン打設区域の実測沈下

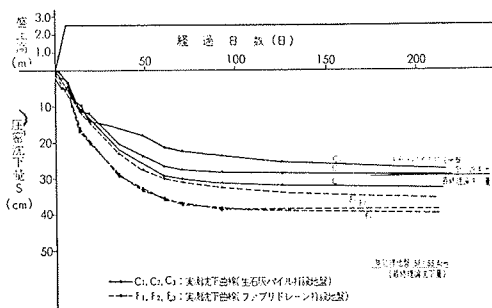


図-8 実測沈下量との比較

量よりも明らかに小さくあらわれており、生石灰パイル工法による沈下抑制効果が十分にあらわれていると判断できる。しかも、実測沈下速度を調べてみると、ファブリドレーンの場合のように、徐々に圧密が進行しているのに比べて、生石灰パイルの場合、盛土開始後60~70日前後に急激に沈下がおさまっており、ここにはっきりした沈下阻止効果があらわれている。以上の検討の結果、生石灰パイル工法についての沈下抑制効果は明確であると判断して差し支えない。

5. 繰返し圧密試験結果と考察

5.1. 繰返し圧密特性について

自然地盤(非改良土)と生石灰パイル打設地盤(改良土)について、それぞれ腐植土と粘土の繰返し圧密沈下曲線を一括して示したのが図-9, 10であり、全沈下量と弾性沈下量の経時変化を調べたのが表-2, 3である。また、繰返し圧密沈下量と静的圧密沈下量との比較を載荷エネルギーでまとめたのが図-11である。

沈下性状については、全般的な傾向として粘土に比較して腐植土の沈下量が著しく大きく、しかもそれがより長時間にわたって継続していることがわかる。これに反して粘土の沈下量はきわめて少ない結果となっている。これは、事前載荷の静的荷重と繰返し荷重の和が、腐植土の場合は圧密降伏応力 $P_y = 0.24 \text{ kg/cm}^2$ を大幅に超過しているのに対して、粘土の場合はそれと ($P_y = 0.56 \text{ kg/cm}^2$) ほぼ同じであるための当然の結果といえる。

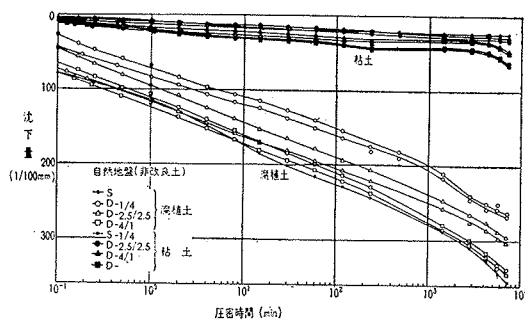


図-9 沈下時間曲線 (非改良土)

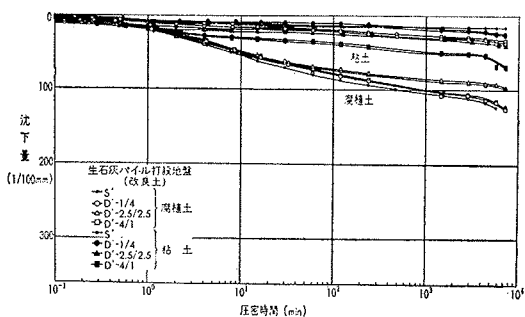


図-10 沈下時間曲線 (改良土)

土質名	略号	1 min	1 hr	24 hr	120 hr
自然地盤 (非改良土)	S	61.3	20.1	18.6	
	D-1/4	57.3	25.2	17.5	
	D-2.5/2.5	64.2	20.5	15.3	
	D-4/1	59.9	23.2	16.9	
	S	76.2	14.3	9.5	
	D-2.5/2.5	63.6	21.2	15.2	
生石灰パイル打設地盤 (改良土)	D-2.5/2.5	66.7	8.3	25.0	
	S	60.9	9.5	20.2	
	S	63.0	21.3	15.7	
	D-1/4	43.5	47.7	10.8	
	D-2.5/2.5	74.2	15.5	10.3	
	D-4/1	61.9	23.8	14.3	
九段川打設地盤 (改良土)	S	62.5	21.4	16.1	
	D-1/4	54.2	12.5	33.3	
	D-2.5/2.5	61.5	20.5	18.0	
	D-4/1	52.2	23.9	23.9	

表-2 沈下量の経時変化

土質名	略号	1 min	1 hr	24 hr	120 hr
自然地盤 (非改良土)	D-1/4	18.9	6.5	2.6	1.7
	D-2.5/2.5	16.8	8.1	4.2	2.9
	D-4/1	9.9	4.0	2.3	1.5
	D-1/4	21.6	16.8	10.2	7.1
	D-2.5/2.5	17.4	12.9	7.3	4.7
	D-4/1	4.7	3.9	2.0	1.0
生石灰パイル打設地盤 (改良土)	D-1/4	23.4	15.3	8.4	6.6
	D-2.5/2.5	17.5	12.4	5.7	2.1
	D-4/1	10.8	6.8	3.5	1.2
	D-1/4	24.0	19.1	12.1	8.4
	D-2.5/2.5	22.1	14.6	10.3	5.2
	D-4/1	6.2	6.0	2.2	1.6

表-3 弾性沈下量の経時変化

果といえる。

載荷除荷時間比の影響については、いずれも載荷時間の長いものほど沈下量が大きくあらわれている。しかし、静的圧密沈下量と比較してみると、粘土ではいずれも繰返し圧密沈下量が大きく、これまでの試験結果と同じ傾向を示しているが、腐植土については逆に繰返し圧密による沈下量が静的圧密に比べて小さくあらわれている。この傾向は従来と相反する結果である。これは、腐植土についていわゆる土の構造的な強さがほとんど期待できないために、繰返し荷重が構造的強さを破壊し、カク乱効果として沈下を促進させることを期待するよりは、むしろ沈下性状が載荷時間に依存する結果からあらわれたものと想定される。この傾向を図-4の載荷エネルギーでまとめてみると、腐植土と粘土の沈下傾向の違いをはっきりさせることができる。今回の繰返し圧密時間の範囲内では、腐植土については載荷エネルギーが大きくなっても繰返し圧密沈下量が静的

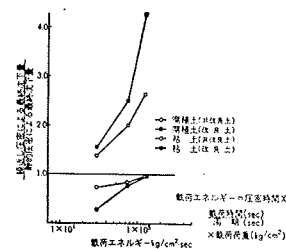


図-11 静的沈下量との比較

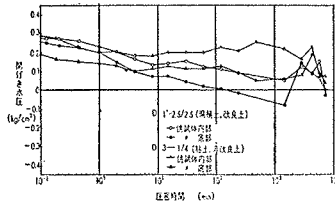
圧密沈下量よりも大きくなることはないが、載荷エネルギーとともに静的圧密沈下量に近づく傾向が認められる。粘土については、いずれも静的圧密沈下量よりも大きい沈下量を示していることがわかる。

弾性沈下量の経時変化をみると、いずれも載荷時間とともに減少しており、最終的には一定値に落ちつく傾向がある。また、載荷除荷時間比によって明らかに弾性沈下量に差がでており、載荷時間が長いほど小さい。これは前述した傾向とつじつまが合うことになる。

生石灰パイル工法による繰返し圧密特性の変化について調べてみると、特に腐植土では沈下量がすべて大幅に減少しており、また沈下特性を比較してみると、生石灰パイル打設にともなう沈下抑制効果が顕著にあ

らわれていることがわかる。また、弾性沈下量では、腐植土および粘土のいずれについても、生石灰パイル工法による地盤改良によって増加している傾向がうかがえる。

繰返し圧密時に発生する間ゲキ水圧については、測定方法の困難さもあって未だ不明な点が多い。そこで、従来行なってきた供試体底部における測定に加えて、供試体内部の間ゲキ水圧の測定を試みた。その測定結果を代表試料について比較したのが図一12である。間ゲキ水圧特性は土質の種類あるいは載荷除荷時間比によって異なるが、いずれも供試体底部よりも内部のほうが大きい値を示していることがわかる。また、供試体底部では負圧が発生している結果が認めら

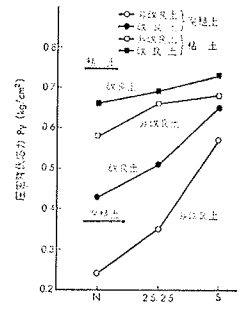


図一12 間ゲキ水圧特性

れるが、供試体内部の測定結果からは正圧が得られており、繰返し圧密機構の一端をうかがい知ることができる。

5.2. 繰返し圧密特性による履歴特性について

繰返し圧密による履歴特性への影響を比較するために、圧密諸特性について腐植土と粘土に分けて、それ



図一16 圧密降伏応力

ぞれ非改良土、改良土で比較したのが図一13, 14, 15で、圧密降伏応力の変化を調べたのが図一16である。

e-log P 曲線においては、繰返し載荷を受けた試料と静的載荷を受けた試料には明確な履歴特性の違いを認めることは困難である。また、載荷除荷時間比による変形特性は初期値のばらつきが大きく、明確な把握はできなかった。圧密降伏応力で比較してみると、静的および繰返し応力履歴のいずれについても、標準圧密試験結果より大きい値を示し、その影響を認めることができる。特に、静的応力履歴が最も顕著にあらわれている。

mv-log P 曲線では応力履歴による影響をある幅をもたせて示してある。土質によってはあまり判然としない面があるが、繰返し履歴よりも静的履歴による変形特性への影響が大きく出ている傾向がある。また、非改良土、改良土に明確な差異が認められ、生石灰パイル工法によっていずれの試料も体積圧縮係数が小さく、ある種の構造的強さが増大していることがわかる。

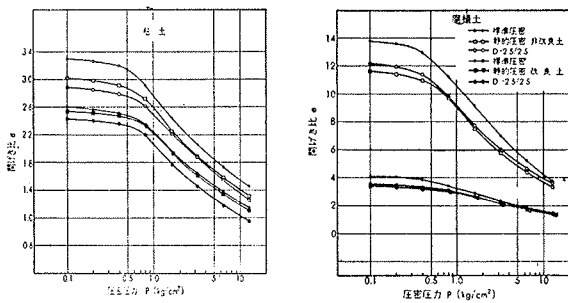
Cv-log P 曲線でも同様にある幅をもって示したが、静的応力履歴を受けた試料は繰返し応力履歴を受けた試料よりも一般に大きな圧密係数を示す傾向が認められ、繰返し応力のかく乱作用と推定される。

6. あとがき

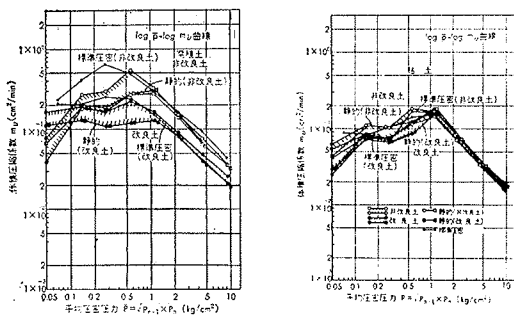
生石灰パイル工法施工前後のかく乱試料の、主に土質性状や繰返し圧密特性などについて、その改良効果を比較・検討してみた。繰返し圧密の長期間載荷による影響については不十分であるが、生石灰パイル工法による改良効果については明確にさせることができた。また今回示した腐植土についての種々の特殊性については今後の研究課題として取り組むつもりである。

参考文献

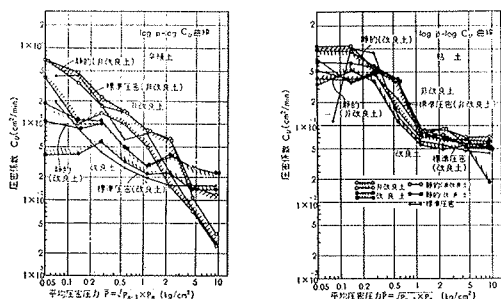
木村他, 生石灰パイル工法による圧密沈下の抑制効果についての調査例, 第30回土木学会 (1975), 木村他, 粘性土の繰返し圧密特性について (第4報), 第11回土質工学会 (1976)



図一13 履歴特性 (e-log P 曲線)



図一14 履歴特性 (mv-log P 曲線)



図一15 履歴特性 (Cv-log P 曲線)