



Title	原位置土攪拌工法によって施工される地下ダム連続壁体の工学的性状に関する実験的検討
Author(s)	宮城, 調勝; 小宮, 康明
Citation	琉球大学農学部学術報告 = The Science Bulletin of the Faculty of Agriculture. University of the Ryukyus(50): 125-130
Issue Date	2003-12-01
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/3604
Rights	

原位置土攪拌工法によって施工される地下ダム連続壁体の工学的性状に関する実験的検討

宮城調勝・小宮康明

Norikatsu MIYAGI and Yasuaki KOMIYA

Experimental examination on engineering properties of continuous underground wall of underground dam constructed by Soil mixing wall method

キーワード：地下ダム、地下連続壁体、ソイルセメント、圧縮強度、透水係数、収縮沈下、打継目

Key words : Underground dam, Continuous underground wall, Soil cement, Compression strength, Hydraulic conductivity, Shrinkage settlement, Cold joint

Summary

In the construction of continuous underground wall by SMW (soil mixing wall method), three problems have been indicated. The first is to generate the shrinkage settlement under curing. The second is that engineering properties change under construction by material separation of soil cement and contamination of the groundwater. The third is that many cold joints occur. Therefore, the shrinkage behavior of soil cement during water curing period was examined, and next, expression process of hydraulic conductivity and compression strength of soil cement were clarified, and the effect of gravel rate and water cement ratio on them was examined. In addition, permeability

test and shear strength test were carried out on the cold joint model test-pieces. Then, hydraulic conductivity and shear strength of the cold joint in soil cement were clarified. Finally, the some countermeasures for the construction of continuous underground wall were proposed.

緒言

地下ダムの堤体となるソイルセメント連続壁体（以下、連壁という）の施工法には幾つかの方法があり^{1)~2)}、現在、主として採用されているものは柱列式原位置土攪拌工法で

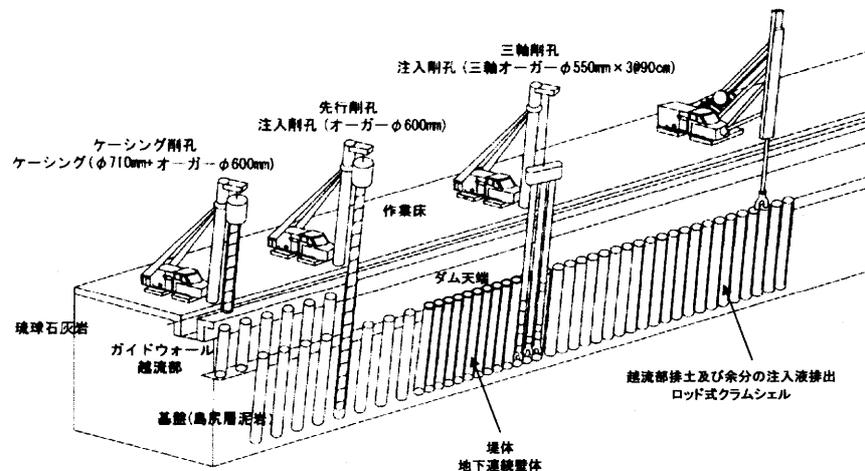


図-1 原位置土攪拌工法による堤体建設概念図¹⁾

ある。この工法は、図-1に示すように、まず施工鉛直精度を向上させるため単軸オーガーによってケーシング削孔および先孔削孔を行い、さらに、その孔をパイロット孔として三軸オーガーによって削孔し、所定の深度まで削孔したらセメントミルクを注入しながら削孔した土を攪拌して柱状のソイルセメントを連続して造る工法である¹⁾。

この工法ではブリージングやセメントの水和反応等に起因するソイルセメントの収縮が発生すること、施工中に材料分離や地下水の混入によってソイルセメントの水セメント比や礫率が変化して透水係数や圧縮強度が変化すること³⁾、連壁には硬化したソイルセメントと新たなソイルセメントが接合する打継目（コールドジョイント）が数多く生じることなどの問題点が上げられる。

打継目は、接合箇所が翌日に接合されることもあれば、空洞の出現や予算の関係から工事が中断し接合箇所が長期間放置されることもある。打継目はコンクリート構造物では強度、耐久性などの観点から構造物の弱点となるため、その対策として打継目の位置、方向、および施工方法が考慮されている。しかしながら、ソイルセメント連壁ではあまり打継目について注意が払われておらず、その工学的性状はほとんど知られていない。このような打継目を減らすため堀溝式原位置土攪拌工法²⁾もあるが、地下ダムの連壁としての実績がないことから採用されるに至っていない。

本研究では、まず、養生期間中のソイルセメントの収縮挙動を調べ、次に、ソイルセメントの透水係数や圧縮強度の発現過程を明らかにし、それらに及ぼす礫率や水セメント比の影響を検討する。さらに打継目モデル供試体を作成して、ソイルセメント打継目の透水性やせん断強度を把握し、地下ダム連壁の施工中の収縮や打継目に対する対策について提言する。

試験方法

1. 試料および供試体の作製方法

実験に用いたセメントミルクは水、普通ポルトランドセメント、ベントナイト、膨張剤、増粘剤を混合したもので、その配合を表-1に示す。この配合は沖縄県下で行われてきた地下ダム事業に用いられた配合と同一である。このセメントミルクに現位置土攪拌工法にて混合されるであろう琉球石灰岩を砕いた2~10mmの礫を混入した。カンジン地下ダムでは柱状ソイルセメントの下部ほど礫含有量は増加する傾向がみられたが、定量的な測定ができなかったため、実験では礫率を0%、24%、57%の3種類に設定した。これ

表-1 セメントミルクの配合 (単位量 kg/m³)

混合材料	水 W	普通ポルトランドセメント C	膨張剤	増粘剤	ベントナイト B	W/C %	B/C %
質量	720	720	60.3	2.3	23	100	3.3
質量(%)	47	47.2	3.95	0.16	1.56	-	-

表-2 ソイルセメントの配合

試料	水 W (g)	普通ポルトランドセメント C (g)	膨張剤 (g)	増粘剤 (g)	ベントナイト B (g)	表乾状態の礫 (g)	W/C %	礫率 %
基準	6000	6000	502.5	19.8	199.5	0	100	0
A	6000	6000	502.5	19.8	199.5	8990	100	57.0
B	6000	6000	502.5	19.8	199.5	3529	100	24.0
C	4800	6000	502.5	19.8	199.5	4000	80	26.8
D	4200	6000	502.5	19.8	199.5	4000	70	26.1
E	3600	6000	502.5	19.8	199.5	4000	60	25.4

表-3 打継目モデル供試体の配合

試料	水 W (g)	普通ポルトランドセメント C (g)	膨張剤 (g)	増粘剤 (g)	ベントナイト B (g)	表乾状態の礫 (g)	W/C %	礫率 %
F	5000	5000	419	15.9	159.7	5000	100	32.1
G								

F:円柱供試体、礫:2~5mm

G:角型供試体、礫:2~10mm

ら3通りの配合(表-2参照)で混練りしたソイルセメントをB25×L40×T20cmの試料箱に詰めて湿潤養生し、1週間後に硬化した試料を内径70mmのコアドリルでくり抜いたものを最大42日まで水中養生し、透水試験及び一軸圧縮試験に供した。また、養生1週間以内の収縮を調べるため、同じ配合で混合した試料を内径70mm、高さ120mmの型枠に詰め、経時的に収縮量を測定した。さらに、礫率が24~27%の範囲のソイルセメントの水セメント比W/Cを100%、80%、70%、60%の4段階に変化させ、4通りの配合(表-2参照)で混練りし、収縮量、透水係数、圧縮強度に及ぼすW/Cの影響を調べた。

次に、打継目の透水性や力学性を把握するため打継目モデル供試体として打継目の施工間隔を数段階変えて円柱供試体(図-2参照)と角型供試体(図-3参照)を作製した。その配合を表-3に示す。打継目は前者では中央にあって1面で、後者では供試体を3等分するところにあつて2面で、それぞれ剪断するようにしている。

2. 実験方法

収縮試験では供試体の長さや直径をノギスを用いて測定した。圧縮試験は適当な材齢の水中養生の供試体について1%/min程度のひずみ速度のもとで測定した。透水係数は三軸試験機を用いて供試体の周面からの漏水を防ぐため、3.5 kgf/cm²の側圧をかけ、透水圧2 kgf/cm²のもとで透水試験を行った⁴⁾。

打継目モデル供試体についても透水試験は上記のとおりであるが、打継目の力学的性質を明らかにするため、円柱供試体については図-2のように試料の上端の片側に荷重が加わらないように片側を2mm程度削り取り、その下端に支持板を置き、反対側の下端には荷重が伝わらないように厚

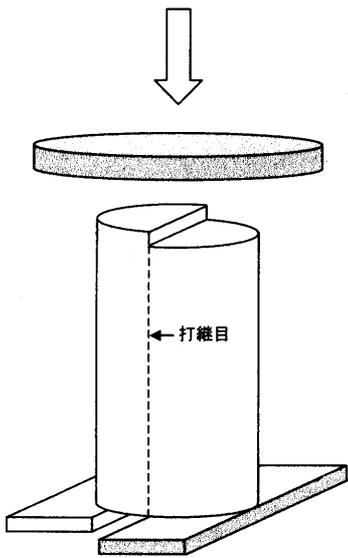


図-2 円柱供試体のせん断試験

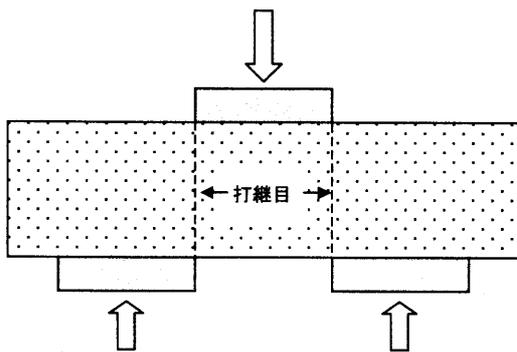


図-3 角型供試体のせん断試験

紙を敷き、圧縮荷重を加えて打継目でせん断破壊が生じるように試験を行った。角型供試体については図-3のように載荷板と支持板を置いて圧縮荷重を加え、直接せん断試験⁴⁾を行った。

実験結果及び考察

1. ソイルセメントの収縮挙動

図-4は養生中のセメントミルク供試体の2箇所の長さおよびそれらの平均値を用いて算出した体積と材齢の関係を示したものである。長さおよび直径の収縮は打設後1日目に最も大きく、打設後1週間まで収縮は継続し、その後落ち着く傾向にある。打設後1日目の供試体の表面には水が存在していたことからブリージングが発生したことが認められたので、収縮はブリージングおよびセメントと水の水和反応に伴う自己収縮によって生じたと思われる⁵⁾。このことは実際の工事に際して、打設時に連壁の高さに余裕高を考慮しておく必要があることを示唆している。

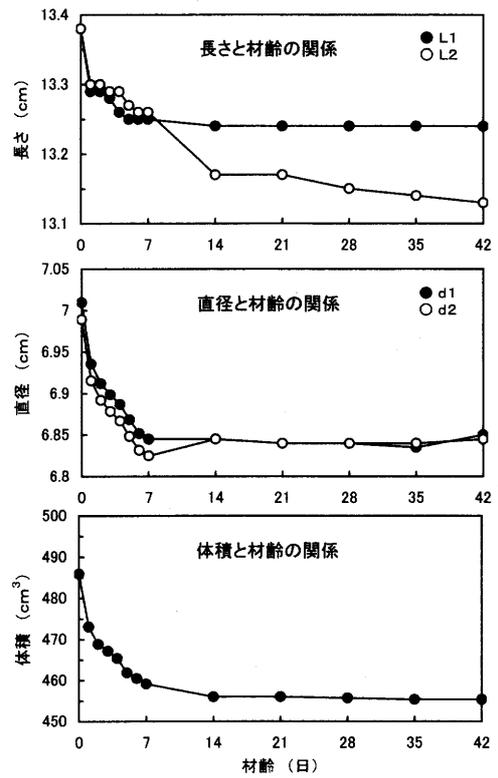


図-4 養生中のセメントミルクの収縮

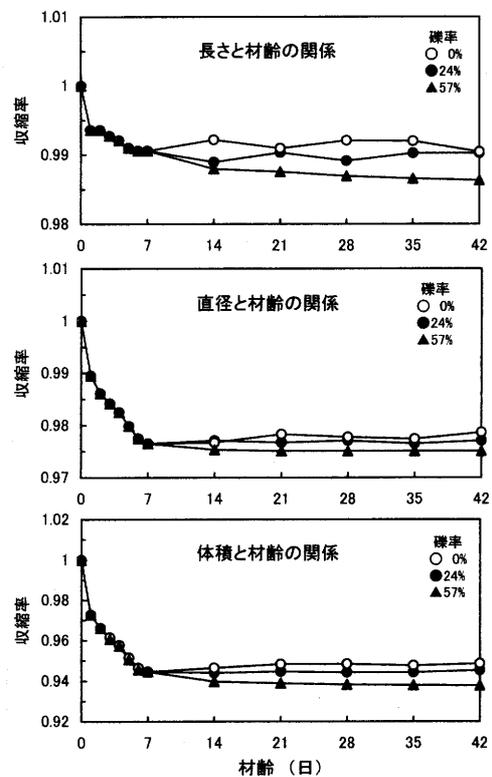


図-5 収縮率と材齢の関係に及ぼす礫率の影響

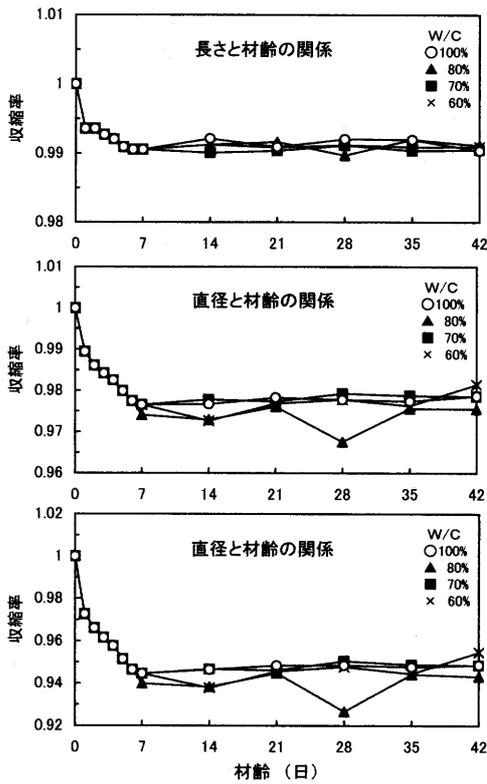


図-6 収縮率と材齢の関係に及ぼす水セメント比 W/C の影響

図-5は収縮に及ぼす礫率の影響を示したものである。礫の含有量を礫率24%と57%に変化させた結果、礫率が大きいものほど収縮率が大きいことが分かる。この実験では材料分離が生じて礫が下方に集まる傾向がみられたため、材料分離も収縮に影響を及ぼしていることが伺える。また、礫率が24%付近で水セメント比W/Cを60%、70%、80%、100%と変化させて作製した供試体について長さ、直径、体積の収縮量を測定したところ(図-6参照)、W/Cが大きい試料ほど収縮は大きくなる傾向を示した。これはW/Cが大きいほど材料分離が生じやすくなるためと考えられる。

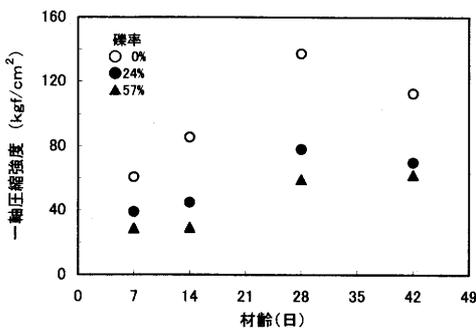


図-7 一軸圧縮強度と材齢の関係に及ぼす礫率の影響

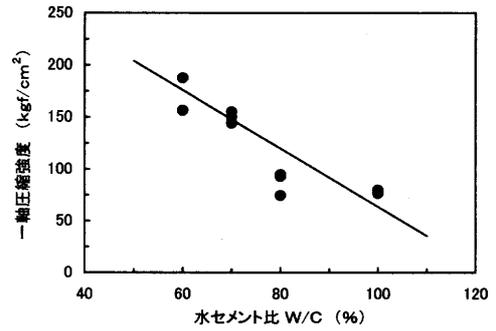


図-8 一軸圧縮強度と水セメント比 W/C の関係

2. ソイルセメントの圧縮強度に及ぼす礫率と水セメント比の影響

図-7はソイルセメントの一軸圧縮強度に及ぼす礫率の影響を示したものである。材齢が増すほど圧縮強度は増加し、通常であれば、礫の増加とともに圧縮強度も増加するはずである。しかし、それとは逆に、圧縮強度は礫率が大きいほど小さくなる傾向を示している。これは混入した礫が琉球石灰岩の碎石であったため礫の強度が小さかったことが原因している可能性がある。

図-8は礫率が24%付近のソイルセメントの圧縮強度に及ぼす水セメント比 W/C の影響を示したものである。図から圧縮強度と W/C の関係はおおよそ直線関係で示され、圧縮強度は W/C に敏感に反応し、W/C が大きいほど圧縮強度は小さくなることが分かる。したがって、礫や地下水の混入によりセメントミルクの圧縮強度は低下することも考えておく必要がある。

3. ソイルセメントの透水係数に及ぼす礫率と水セメント比の影響

図-9はセメントミルクだけの試料および礫率が24%と57%の試料の透水係数を打設後の材齢ごとに測定したものである。礫が混入していないセメントミルクの透水係数はすべて 10^{-8} cm/s のオーダーにあって、材齢の影響が小さい。しかし、礫が混入しているソイルセメントの透水係数はセメントミルクの

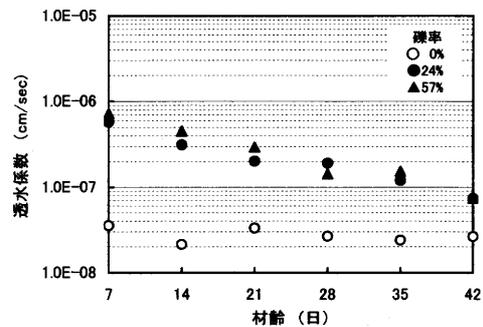


図-9 透水係数と材齢の関係に及ぼす影響

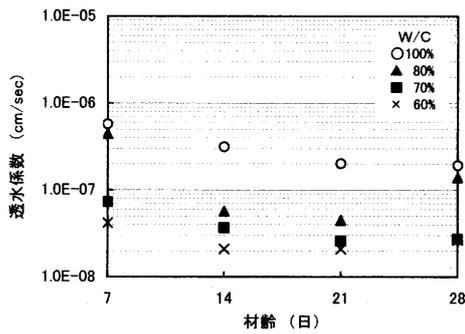


図-10 透水係数と材齢の関係に及ぼす水セメント比 W/C の影響

透水係数より大きくなり、材齢とともに減少する傾向にある。琉球石灰岩の透水係数は $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm/s}$ のオーダー程度¹⁾であるので、礫の混入による透水係数の増加は妥当な結果と考えられる。また、材齢が増加するにつれ透水係数が減少するのはセメントと水の水和による水和物が徐々に増え、水が流動できる間隙が減少するためと思われる。

図-10 は W/C の異なる試料の透水係数を材齢 4 週間まで測定した結果である。図から分かるように W/C が小さい試料ほど透水係数は小さく、また透水係数は材齢とともに減少する傾向がみられる。水セメント比が小さく材齢が増すほど、水和物の量が多くなるので透水係数が小さく考えられる。

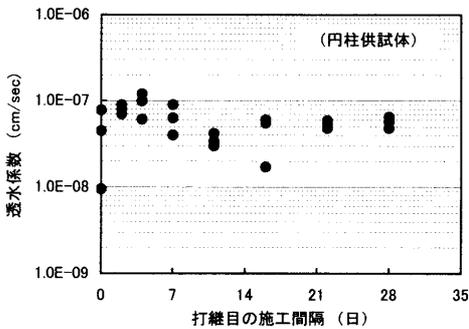


図-11 透水係数に及ぼす打継目の施工間隔の影響

4. ソイルセメントの透水係数とせん断強度に及ぼす打継目の影響

図-11 は打継目の施工間隔が透水係数に及ぼす影響を示したもので、透水試験は打継目の打設から 28 日目に測定している。施工間隔 0 日の透水係数は打継目のない供試体の透水係数を表している。打継目は透水係数にほとんど影響を及ぼしておらず、また、施工間隔の影響もほとんどみられない。

図-12 は打継目の施工間隔を変化させ、打継目の打設から

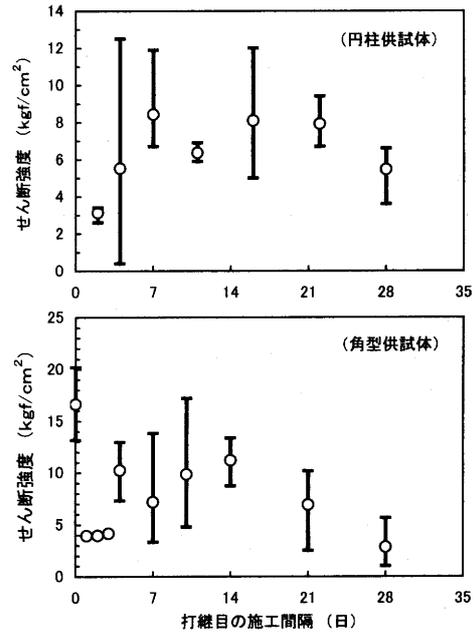


図-12 せん断強度に及ぼす打継目の施工間隔の影響

28 日目に圧縮試験を実施し、打継目の施工間隔が打継目のせん断強度にどのように影響するかを示したものである。施工間隔 0 日の値は打継目のない供試体のせん断強度を示している。打継目の粗度は、円柱供試体では鍍仕上げの粗度であり、角型供試体では仕切板であるベニヤ板の粗度程度である。

円柱供試体、角型供試体を問わず、打継目のせん断強度はばらつきが大きい、打継目のせん断強度は打継目でない部分のせん断強度よりも著しく小さいのが分かる。また、打継目のせん断強度は、施工間隔 1 日と 3 日で小さく、不安定な値を示しているが、施工間隔が 1~2 週間程度開くとほぼ一定値に落ち着き、さらに施工間隔が開くと、減少する傾向がみられる。

地下ダム連壁に打継目があるということは地震時に地盤にかかる剪断力のためせん断強度が弱い継ぎ目部分から破壊する危険性があり、また漏水の原因にもなる恐れがある。ただし一般に石灰岩地盤の剛性、地盤の強度等については不明な点が多いので、どの程度の地震から危険を伴うかということについては一切分からない。万一、連壁に亀裂が生じた場合は、亀裂位置を特定することが困難なため、出来る限り施工時に継ぎ目を作らない工法をとることが必要である。しかし、前述のように現在のところそのような適当な工法がないので、施工時に打継目となる箇所を補強しておく必要がある。県営地下ダムにおいては打継目の施工間隔が長期間開いた場合は補間杭を打継目を囲むように 1~3 本打つことによって対処している。

摘 要

ソイルセメントの収縮量は施工後1週間程度進行する。特にブリージングと初期硬化が起こる1日目の収縮が4~5%と極端に大きい。この収縮率を現行の地下ダムに適用すると、連壁の高さを60mとすれば2.4~3.0mに相当する連壁の高さが施工の翌日までに落ち込むことになる。この高さは明らかにダムの洪水吐の高さ、あるいは総貯水量に大きな影響を与えることになるので、施工時に収縮量を考慮した高さとしておくよう十分な配慮が必要である。

また、施工中の材料分離や地下水の混入によってソイルセメントの水セメント比や礫率が大幅に変化するようなどころでは透水係数や圧縮強度が変化することも考慮しておく必要がある。

さらに、地下ダム連壁に打継目が存在することは、地震の場合に地盤の揺れに同調出来ない打継目で連壁に亀裂が生じることになる。連壁の連続施工ができるまでは連壁の打継目は補間杭などによって補強するなど、それなりの対策を講じて対処する必要がある。

本研究を進めるに際し、資料収集から実験材料の提供までいろいろとご協力を頂いた沖縄県南部農林土木事務所のカンジン地下ダム担当の方々、実験にご協力頂いた元専攻生の原園智子、北村知周、嶺井志麻、仲村裕志の各氏に謝意を表す。

引用文献

1. 緑資源公団九州支社編 2001：地下ダム工事誌、緑資源公団、pp.2-206
2. TRD 工法協会 2001：TRD 工法—技術資料—、pp.3-46
3. 宮城調勝・小宮康明・神谷嘉明 2002：カンジン地下ダムの連続壁体の工学的性状、琉球大学農学部学術報告、No.49,pp151-157
4. Carpenter, G. W. and Stephenson, R. W. 1986：Permeability Testing in the Triaxial Cell, Geotechnical Testing Journal, No.9, pp.3-9
5. 竹村和夫・戸川一夫・笠原篤・庄谷征美 1998：建設材料、森北出版、pp.87-93