

土 木 研 究 所 資 料

フィルダム土質材料の締固め、透水試験に関する考察

平成2年1月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright © (1990) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

フィルダム土質材料の 締固め，透水試験に関する考察

フィルダム研究室 研究員 山口 嘉一
安仁屋 勉
室 長 松本 徳久

要 旨

フィルダム土質材料の透水試験には、締固め試験により作製された供試体を流用するのが一般的である。その際、JISで規定されている試料の許容最大粒径の条件を締固め試験においては満足するが、透水試験においては満足しない場合がある。しかし、フィルダム土質材料は粒度範囲が広く、細粒分をある程度含むため、透水試験についても締固め試験と同様に試料の最大粒径とモールド内径の比が $1/5 \sim 1/4$ 程度までであれば、十分な精度の試験結果が得られた。

また、締固めにより作製された供試体はその底面に細粒分が集中して難透水の薄膜を形成し、結果として透水係数を実際よりも小さく評価してしまう恐れがある。しかし、そのような薄膜は形成されないか、あるいは形成されたとしても透水試験結果に大きな影響を与えないことを実証した。

キーワード：フィルダム，土質材料，締固め試験，透水試験

**A Study on Compaction and Permeability Tests
for Soil Materials of Filldams**

Yoshikazu YAMAGUCHI
Research Engineer, Fill Type Dam Division
Tsutomu ANIYA
Engineer
Norihisa MATSUMOTO
Chief

Synopsis :

In case of permeability tests for soil materials of filldams, we usually use the specimens which are made in compaction tests. Even if allowable maximum grain size condition is satisfied in compaction tests, that cannot be in permeability tests. However soil materials have wide grain-size distribution and some fine particles (-0.074mm). Our study has proved that accurate test results can be obtained in not only compaction tests but permeability tests, if the ratio between maximum grain size of soil materials and diameter of permeameter (D_{max} / ϕ) is smaller than $1/5 \sim 1/4$.

Furthermore we were very afraid that we underestimate permeability of specimen made with compaction because of the concentration of finer particles at the bottom of specimen. However we have proved that we don't have to pay attention to the above-mentioned phenomenon in permeability tests for soil materials.

Keywords: Filldam, Soil Material, Compaction Test, Permeability Test

目 次

1. はじめに	1
2. 試料	2
3. 試験方法	13
3.1 許容最大粒径確認試験	13
3.1.1 突固めによる締固め試験	13
3.1.2 透水試験	14
3.2 難透水薄膜の形成による影響確認試験	14
3.2.1 突固めによる締固め試験	14
3.2.2 透水試験	14
4. 試験結果と考察	16
4.1 許容最大粒径確認試験	16
4.1.1 締固め試験結果	16
4.1.2 締固めによる破碎率	34
4.1.3 透水試験結果	37
4.1.4 まとめ	42
4.2 難透水薄膜の形成による影響確認試験	43
4.2.1 締固め試験結果	43
4.2.2 透水試験結果	46
4.2.3 まとめ	51
5. まとめ	52
6. おわりに	53
参考文献	54

参考資料－１	55
--------	----

透水試験における試料の許容最大粒径

－細粒分を含まない試料の場合－

参考資料－２	69
--------	----

礫率補正に関する考察

1. は じ め に

フィルダムは、その特徴としてダムサイト周辺に存在する土や岩を主材料に築造されるということが挙げられる。これらの材料のうち土質材料は、均一型フィルダムの大部分やゾーン型フィルダムの遮水ゾーンの築造に用いられ、前者においては堤体の安定性と遮水性の両方を、後者においては主に遮水性を受け持つ。土質材料の密度は、強度や透水性に大きな影響を持ち、かつ比較的短時間に結果が得られるので、密度が含水量や締固めエネルギーによりどのように変化するかを知るための締固め試験は基本的かつ重要な試験である。

一方、密度の他にもうひとつの重要な物性値として透水係数がある。この透水係数を求めるための透水試験用の供試体は、通常締固め試験時にモールド内に締固められた試料を流用するか、たとえそのまま流用しなくても締固め試験と同様の方法で作製される。しかし、この透水試験用供試体の作製方法には、以下に示すような問題点を挙げることができる。

1) 締固め試験 (JIS A 1210 T-1979)¹⁾においては、乾燥法か非乾燥法か、繰返し法か非繰返し法か等によって若干の差異はあるものの、使用するモールド内径 ϕ の $1/5 \sim 1/4$ 程度までの最大粒径 D_{max} を持つ試料の使用を許容している (ϕ が100mmの場合の D_{max} は25.4mm, ϕ が150mmの場合の D_{max} は38.1mm) のに対して、透水試験 (JIS A 1218 T-1979)¹⁾においては円筒内壁周辺に大きな間隙が発生することを防ぐために D_{max} は ϕ の $1/10$ 以下でなくてはならないと規定している。そのため、締固め試験により、あるいは同じ仕様で別途作製された供試体を透水試験に用いると試料の許容最大粒径の条件を満たさない場合がある。

2) 締固めて作製された供試体はその底面に細粒分が集中して難透水の薄膜を形成し、結果として透水係数を実際よりも小さく評価してしまう恐れがある。

まず1)の問題点については、締固め試験が許容している最大粒径を有する試料を全て透水試験にも使用することができ、かつ十分な精度の結果が得られることが実際の試験上望ましく、そのためにはどのような条件を満たせばよいのかの検証実験をフィルダムの土質材料を対象に行う。仮にこのことが実証できれば、土質材料に対する精度の高い透水試験が比較的小型の供試体を使用して実施できることになり、その検証価値は高い。2)の問題点については、仮にその影響が大きいとするとフィルダム堤体の透水係数を実際よりも小さく評価し、遮水性に関して危険側の設計になるので、同様の締固め仕様で作製された供試体の底面部分を一部除去した場合としない場合で得られる透水係数にどの程度の差が発生するかを確認する。

2. 試 料

試料には、沖縄県国頭郡宜野座村に建設中の漢那ダム脇ダムコア材に使用されている砂岩と粘板岩の互層からなる風化土を採用した。なお、漢那ダムのコア材には、図-2.1に粒度分布を示す細粒な c_f 材と図-2.2に粒度分布を示す比較的粗粒な c_m 材を質量比1:1でブレンドしたものが使用されている。そのため今回の試験に用いる試料も c_f 材と c_m 材をそれぞれ原石山より採取し調整したものである。図-2.3に我が国のフィルダムの土質材料の代表的な粒度分布曲線と漢那ダム土質材料の粒度分布曲線を、表-2.1に主なフィルダムの土質材料の物理的性質と漢那ダム土質材料の物理的性質を示す。以上の図表からわかるように、試験に使用する試料の粒度は他ダムの土質材料に比較して若干細粒分を多く含むが、その他の諸物性値は我が国のフィルダムの土質材料として一般的なものである。

表-2.1 主なフィルダムの土質材料の物理的性質と漢那ダム土質材料の物理的性質³⁾

ダム名	材 料	G	ρ_d max	含水比 (%)			アッターベグ限界			設計値 ρ_d (t/m ³)	透水係数 k	C ϕ の 試験方法	転圧施工			
				自 然	最 適	施工目標	I.L.	P.L.	P.I.				転圧機械	まき出し厚さ	締固め 回数	走行 速度
十 勝	崖堆積物及びシルト	2.73	1.88	15.4	9.5	$w_{0\sim+2}$	30.2	18.4	11.8	2.05	8.7×10^{-4}	三軸	自走式コンパクトドーザー 33t(CAT 825B)	0.2仕上	8	km/h
高 見	崖堆と風化頁岩の混合 (1:1~1:3)	2.75	2.19	9.2	8.3	$w_{0\sim+2.5}$	36 35	20 22	16 13	1.90 2.00	1.7×10^{-4}	三軸	振動ローラ 8t (BW 200)	0.3 0.2	6	
白 川	花崗岩の風化したもの	2.65	2.03	10	9.3	9~12	27	15	12	2.00	5×10^{-4}	三軸	タンピングローラ 15t (K300)	0.2仕上	8以上	8以上
御 所	凝灰岩が風化したものと河床礫の混合 (1:3)	2.536	1.766	17.5	16.4	17~20	47.9	28.3	19.6	1.66	5×10^{-4}	三軸 CU	タンピングローラ 30t(CAT 825B)	0.22	12	—
寒河江	安山岩の崖堆と玄武岩岩屑の混合	2.75	1.89	20	14.9	$w_{-1\sim+3}$	52.9	25.5	27.4	1.65	1.2×10^{-4}	三軸	タンピングローラ 30t(CAT 825B)	0.2仕上	12	4以下
四 時	片岩の風化したもの	2.69	1.96	7~27	17~25	$w_{-1\sim+25\%}$	38	27	11	1.75	4×10^{-4}	三軸	シープスフートローラ 20t (RF14)	0.25仕上	10	3
七北田	玄武岩の風化残積土と泥炭堆積物の混合(4:1)	2.84	1.79	28	26	$w_{0\sim+3}$	80	45	35	1.70	1×10^{-4}	三軸	タンピングローラ 20t (RF14)	0.2仕上	12以上	4
手取川	風化岩及び崖堆	2.72	1.90	6~22	14.2	$w_{+1\sim+3}$	42	21	21	1.96	3×10^{-4} 以下	三軸	シープスフートローラ 20t (RF14)	0.20	12	
岩 風	石英斑岩がマサ伏崖堆積岩	2.63	1.75	15.3	17.2	$w_{0\sim+3}$	41.2	25.6	15.6	1.762	6.7×10^{-4}	三軸	タンピングローラ WS-21 CAT-825	0.2	12	
瀬 戸	頁岩及び砂岩風化堆積岩	2.74	1.96	12.4	11.5	$w_{0\sim+3}$	34	20	14	1.87	1×10^{-4}	三軸	振動ローラ 8t (BW 200)	0.30	6	
黒 川	古生層の粘板岩とチャートの互層からなる風化土	2.68	1.83		15.5	$w_{0\sim+2}$	31	21	10	1.75	$0.2 \sim 10 \times 10^{-4}$	三軸	振動ローラ 8t (BW 200)	0.3	6	
稲 村	緑色片岩風化残積土 (混合)	2.85	2.00	7~14	11.7	$w_{0\sim+3}$	34	22.4	11.6	1.89	3.1×10^{-4}	三軸	振動ローラ (BW 200)	0.2	6	2
下 郷	凝灰岩及びチャートの混合 (1:1)	2.68	2.01	10.2	11.4	$w_{0\sim+2.5}$	38.6	20.1	18.3	1.90	1×10^{-4}	三軸 CU	タンピングコンパクター(30t) シープスフートローラ(20t)	(CAT 825B) 0.2 (RF14) 0.2	12 12	6 4
漢 那	砂岩と粘板岩の互層からなる風化土	2.75	1.79	17	16	$w_{-1\sim+2}$	38	14	25	1.65	3×10^{-4}	三軸	タンピングローラ 22t	0.2	10	4

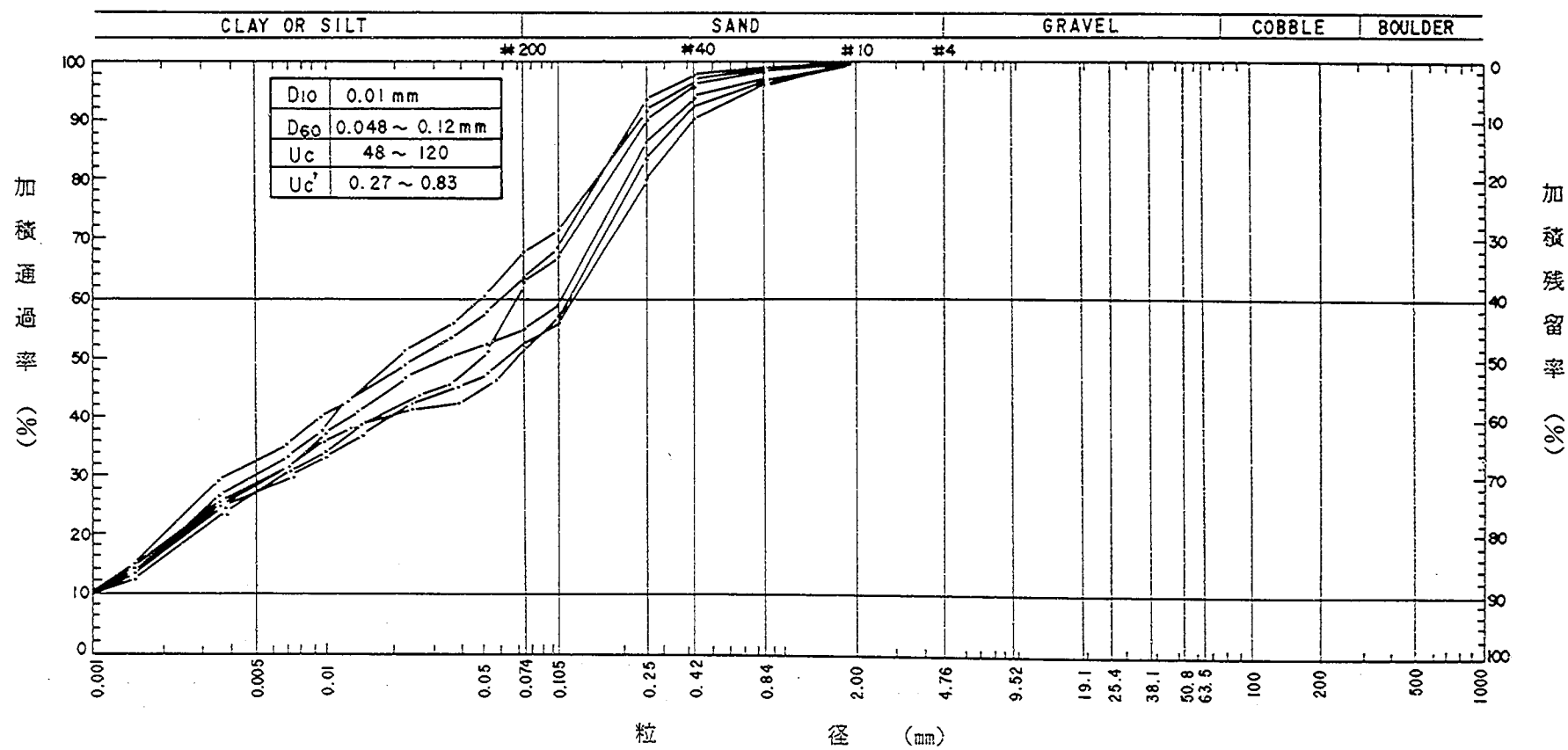


図-2.1 c_r材の粒度曲線

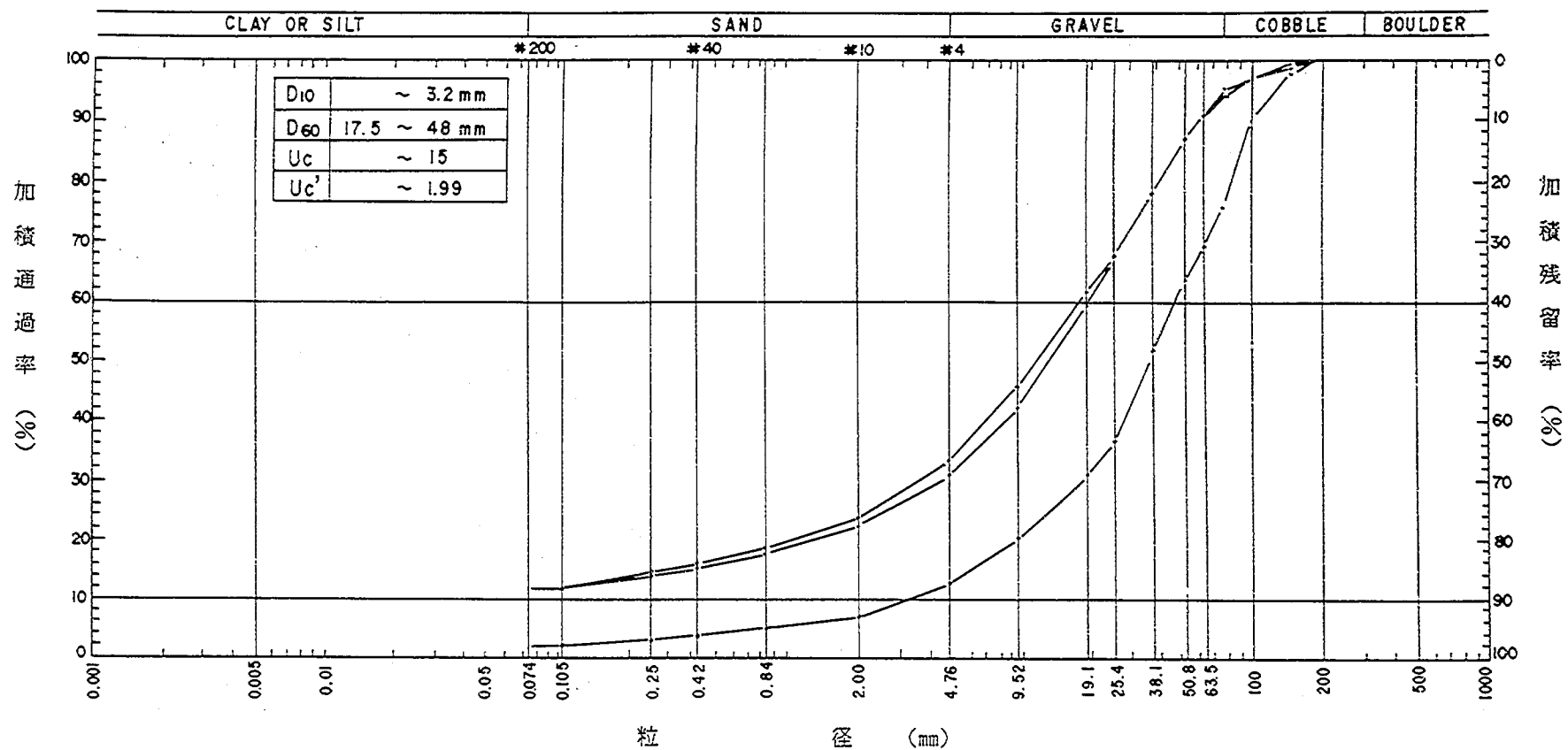


図-2.2 c_m 材の粒度曲線

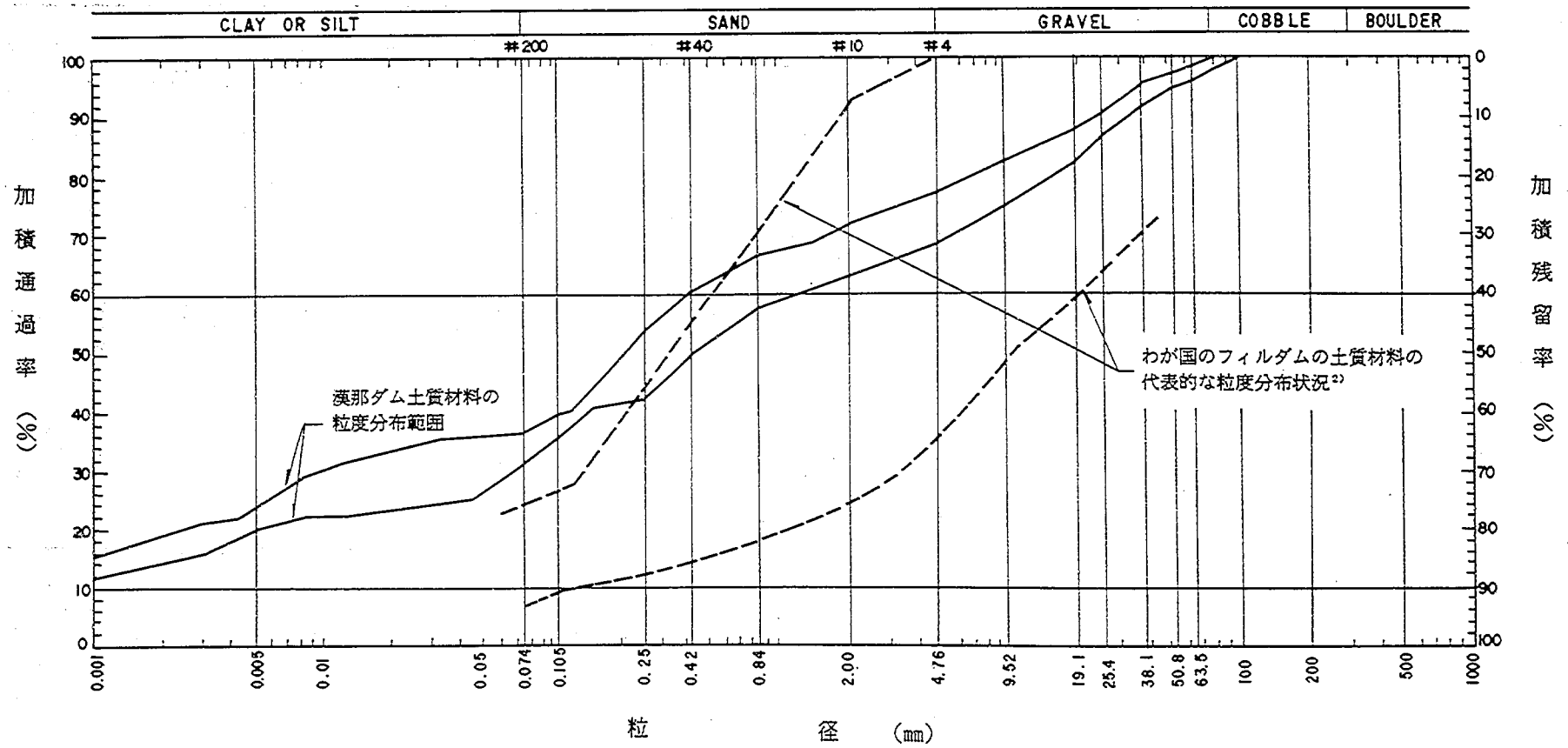


図-2.3 我が国のフィルダム土質材料の代表的な粒度分布曲線と漢那ダム土質材料の粒度分布曲線

今回の試験目的の一つは、フィルダムのコア材のような粒度分布の良い材料に対する透水試験の許容最大粒径を見直すために最大粒径 D_{max} の異なる 3 種類の材料と内径 ϕ の異なる 3 種類のモールドを組み合わせて突固めによる締固め試験および透水試験を実施し、同一試料において得られる透水係数に ϕ/D_{max} の違いによる差が生じるか否かを確認することにある。よって、試験用の試料は以下の手順で準備した。

- ① 図-2.3 に示す漢那ダムコア材の粒度分布範囲より代表粒度（図-2.4 参照）を定め、それを 25.4mm でオーバーサイズカットした粒度を目標に基本試料を作成する。この際、19.1mm 以下、9.52mm 以下、2.00mm 以下の含有率はそれぞれ 93.1%、87.5%、76.5% である。
- ② ① で得られた粒度を持つ基本試料をさらに 19.1mm、9.52mm でオーバーサイズカットし、最大粒径がそれぞれ 25.4mm、19.1mm、9.52mm の 3 種類の試料を作成する。調整した試料の粒度曲線を図-2.5～図-2.7 に示す。

以上のようにして作成した調整試料に対して土粒子の比重試験、粗粒材に対する比重吸水試験および液塑性試験等の物理試験を実施した。なお、粗粒分と細粒分の分級点は 4.76mm とした。試験結果を表-2.2 に示す。

表-2.2 物理試験結果一覧

試 料 名		最大粒径 9.52mm	最大粒径 19.1mm	最大粒径 25.4mm	平 均
比重	G_s (2mm以下)	2.722	2.721	2.710	2.718
含水量	w (%)	10.0	9.4	8.8	9.4
液塑性試験	液性限界 w_L (%)	33.0	33.1	33.4	33.2
	塑性限界 w_P (%)	18.6	19.0	18.7	18.8
	塑性指数 IP	14.4	14.1	14.7	14.4

試 料 名			No. 1	No. 2	No. 3	平 均
比 重 吸 水	9.52 ～ 4.76 (mm)	表 乾 比 重	2.582	2.583	2.578	2.581
		絶 乾 比 重	2.500	2.505	2.499	2.501
		真 比 重	2.721	2.719	2.713	2.718
		吸 水 率	3.250	3.138	3.146	3.178
	19.1 ～ 4.76 (mm)	表 乾 比 重	2.593	2.590	2.592	2.592
		絶 乾 比 重	2.532	2.525	2.530	2.529
		真 比 重	2.698	2.700	2.696	2.697
		吸 水 率	2.436	2.574	2.438	2.438
	25.4 ～ 4.76 (mm)	表 乾 比 重	2.607	2.607	2.618	2.611
		絶 乾 比 重	2.554	2.554	2.568	2.559
		真 比 重	2.696	2.697	2.704	2.699
		吸 水 率	2.072	2.076	1.955	2.034

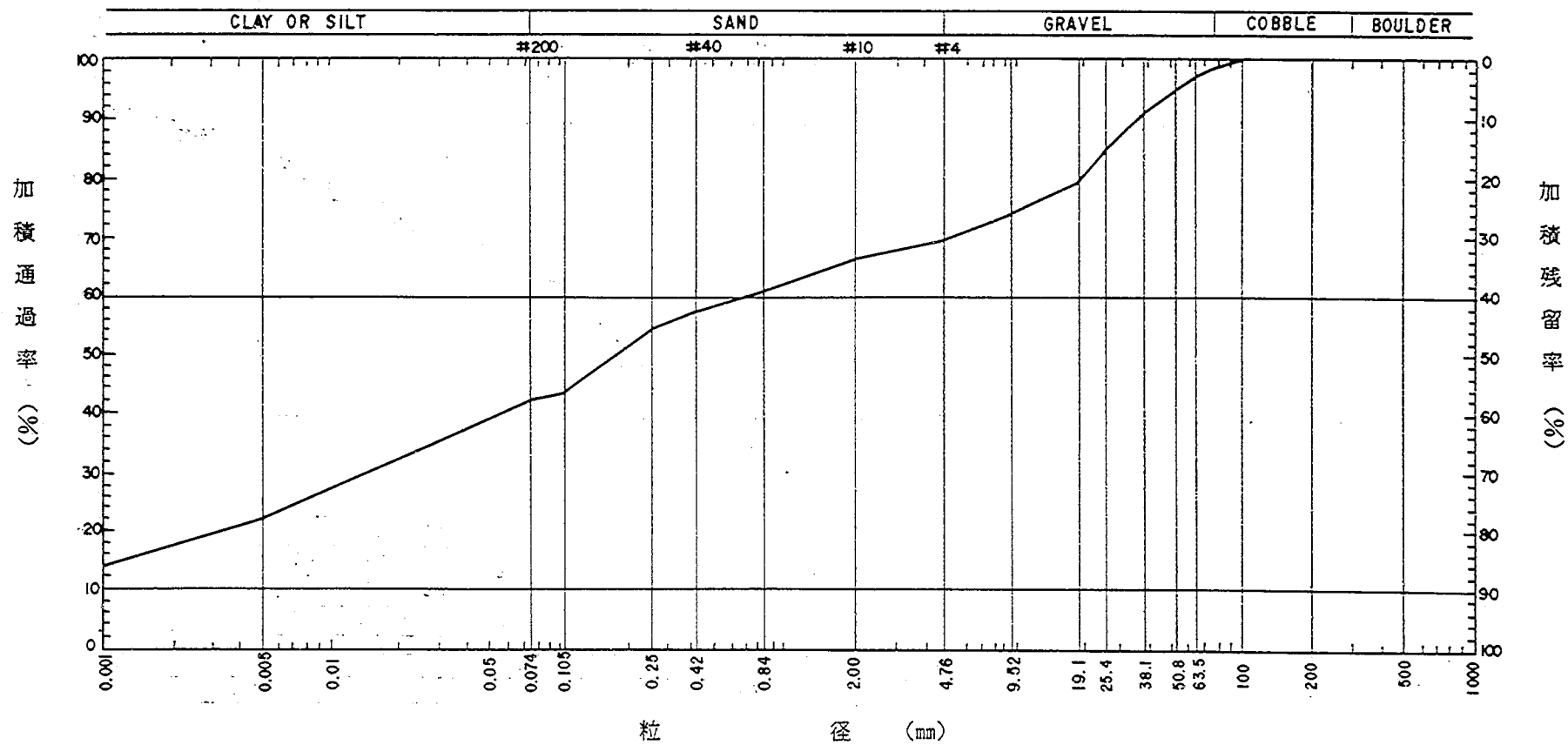


図-2.4 漢那ダムコア材の代表粒度

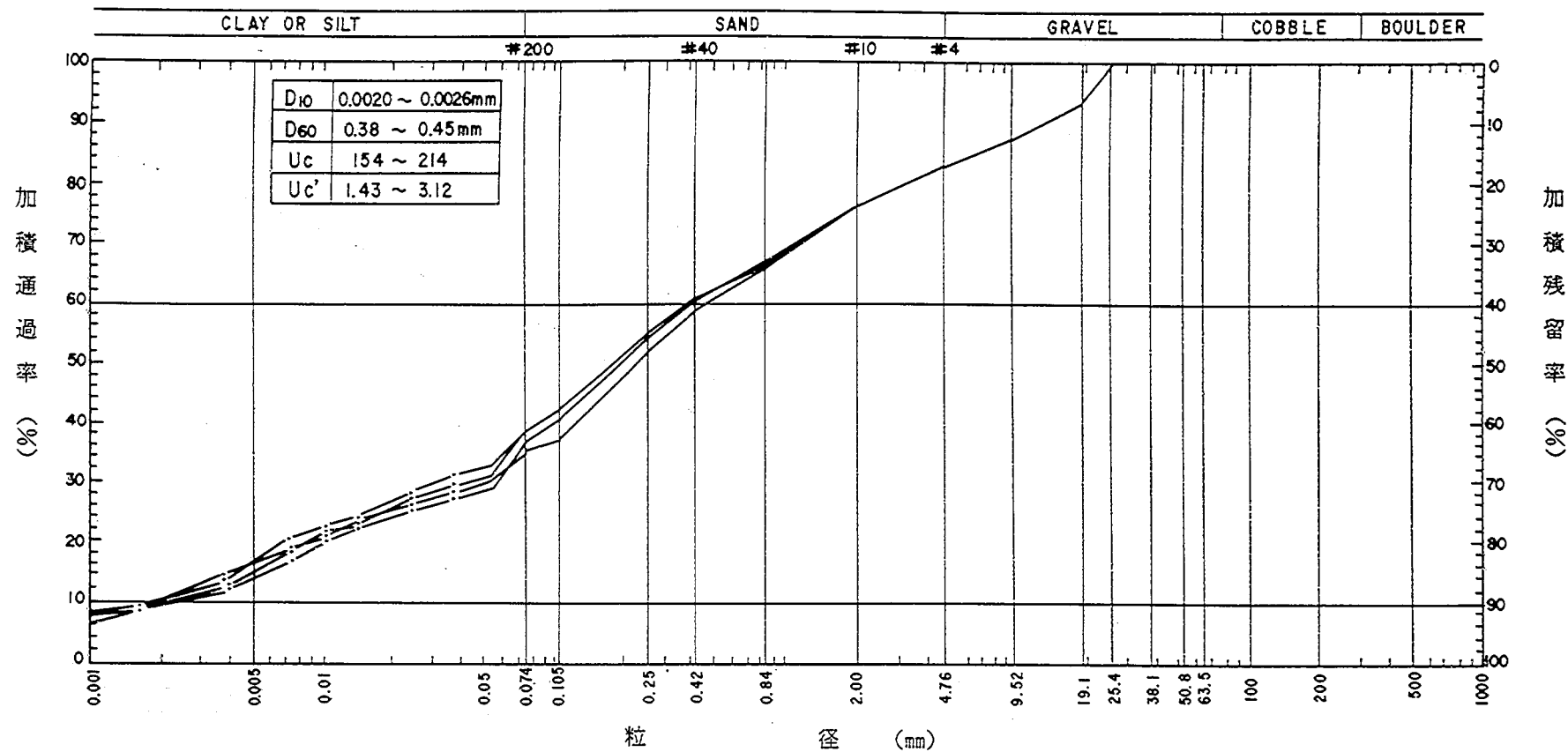


図-2.5 試験前粒度 (D_{max} 25.4mm)

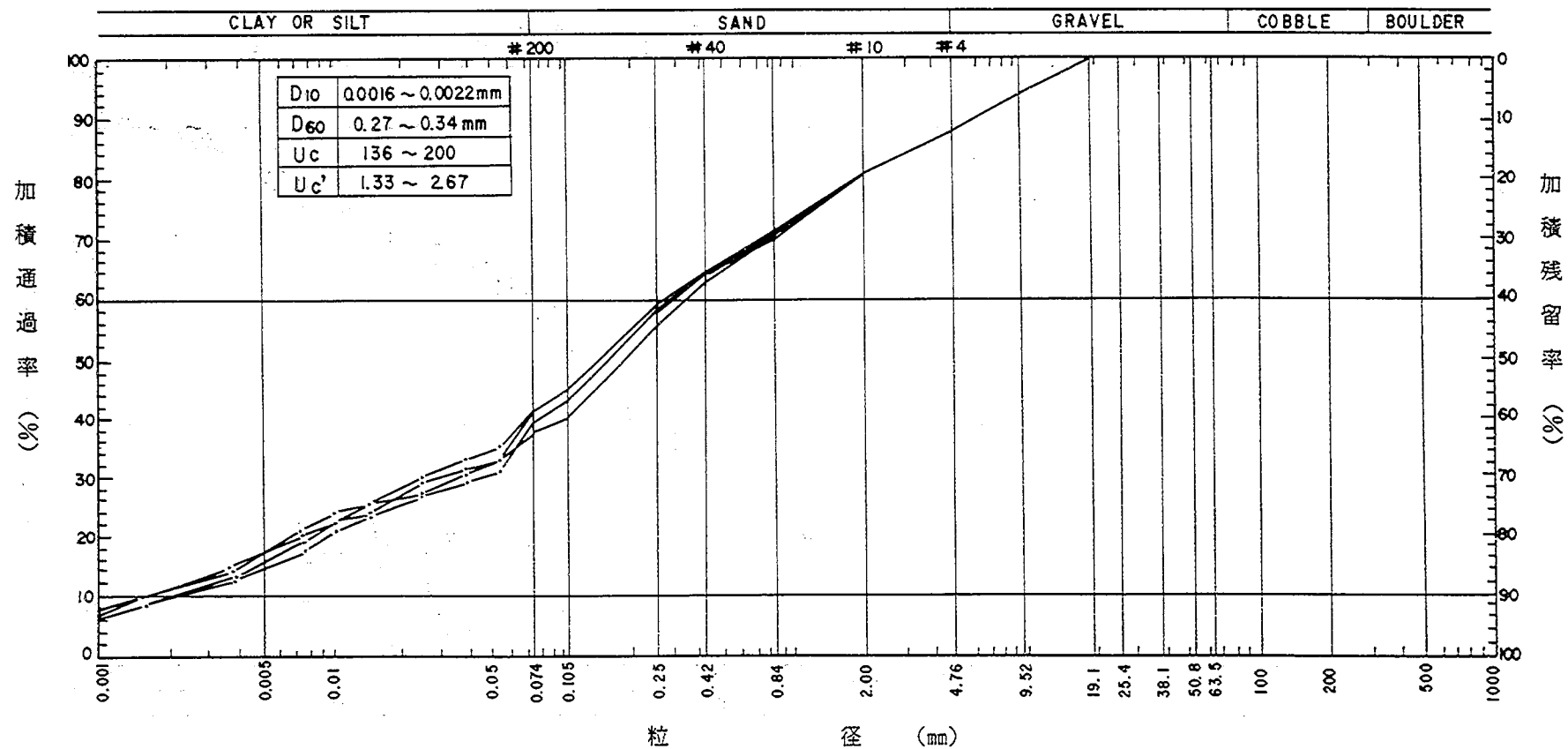


圖-2.6 試驗前粒度 (D_{max} 19.1mm)

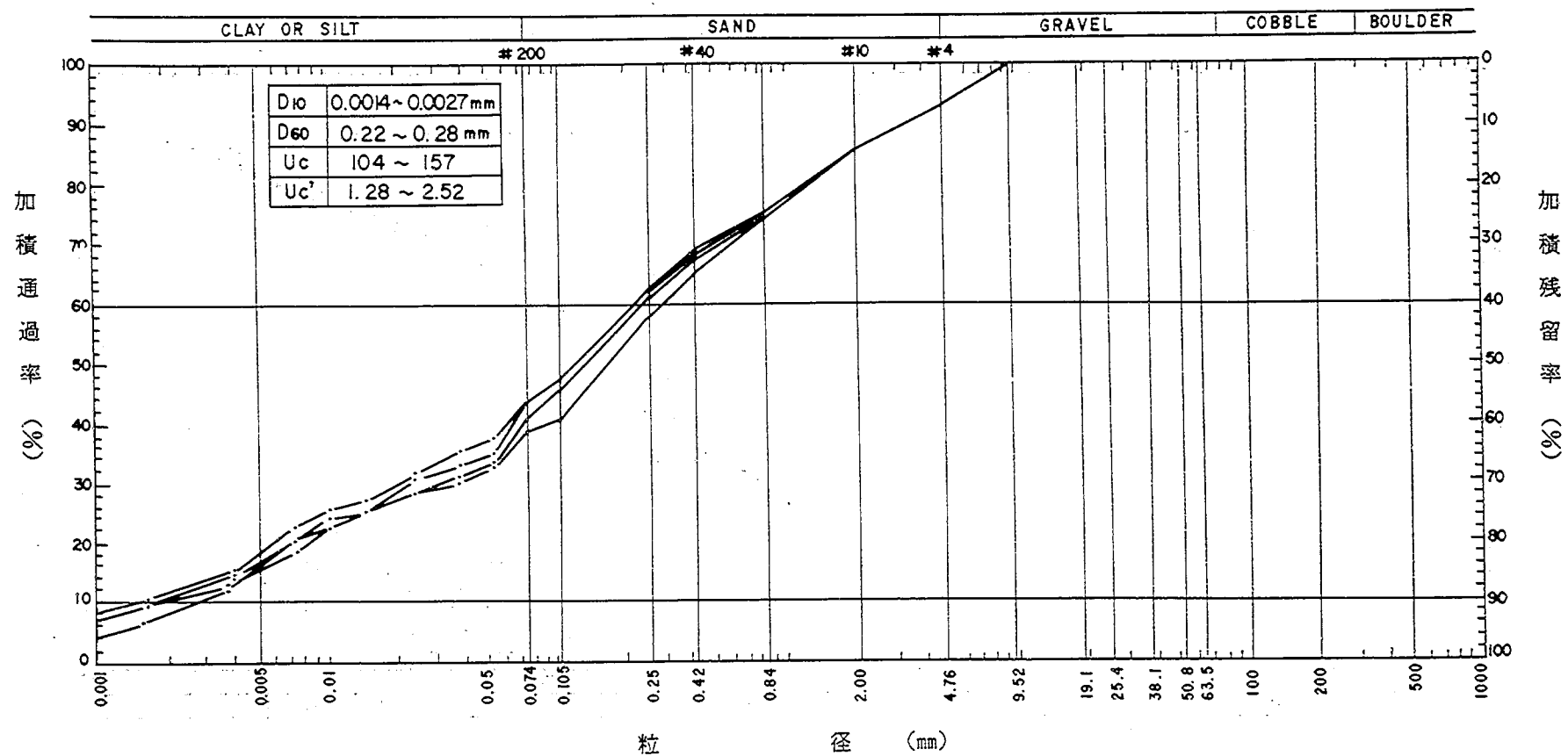


圖-2.7 試驗前粒度 (D_{max} 9.52mm)

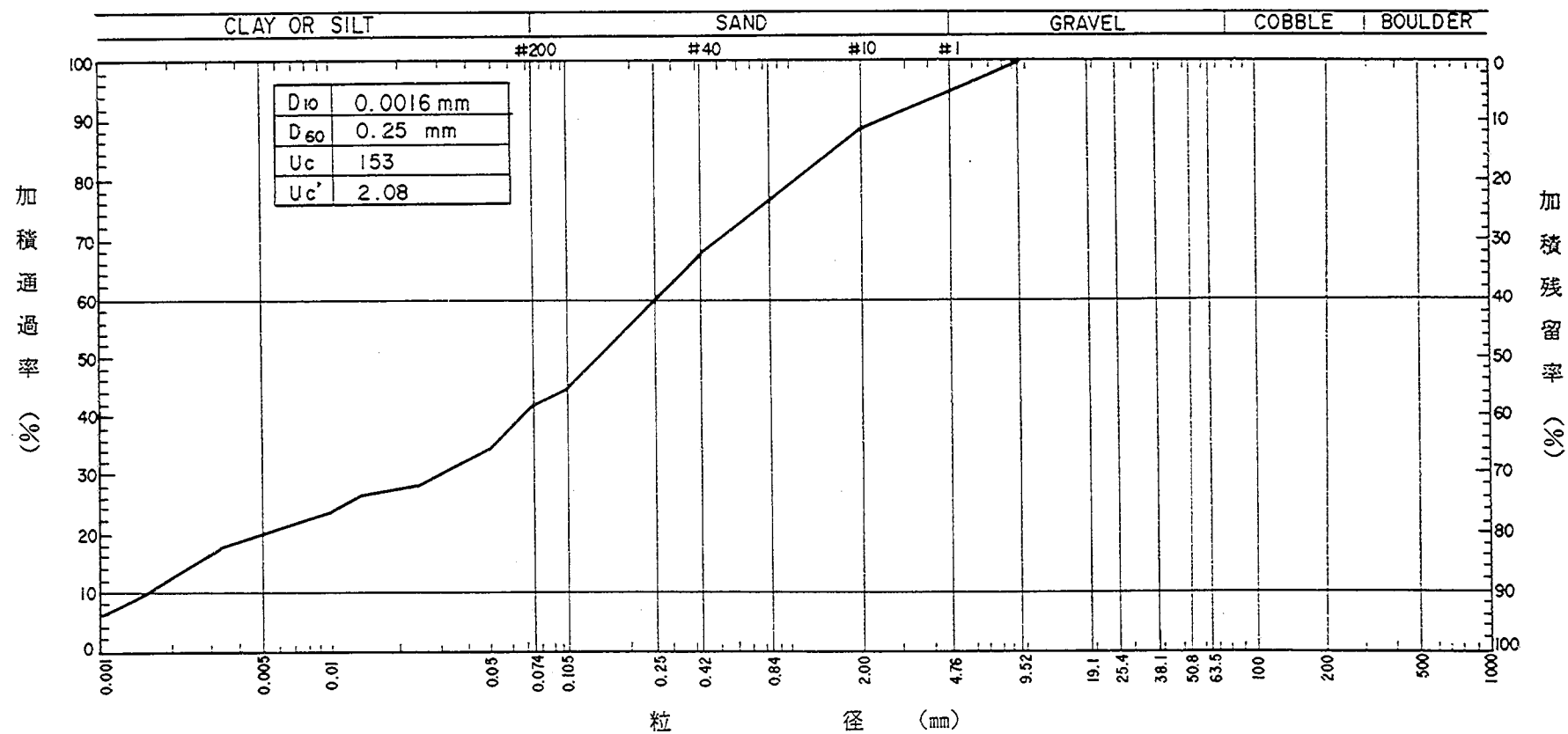


図-2.8 試験前粒度 (D_{max} 9.52mm) (難透水薄膜の形成による影響検討試験用試料)

また、試料の締固めに伴う供試体底面での難透水薄膜の形成による透水試験の精度への影響検討においても上記の最大粒径9.52mmの試料を使用した。なお、この試験の実施に先立っても種々の物理試験を実施している。粒度分布曲線は図-2.8に、物理試験結果は表-2.3に示す。これらの試験結果より、2つの目的のために使用した試料はその物性のばらつきが非常に少ない形で供給されていることがわかる。

表-2.3 物理試験結果一覧(難透水薄膜の形成による影響検討試験用試料)

試 料 名			最大粒径 9.52mm	最大粒径 19.1mm	最大粒径 25.4mm	平 均
比重	G, (2mm以下)		2.711	2.718	2.726	2.718
含水量	w (%)		10.0	9.4	8.8	9.4

試 料 名			No.1	No.2	No.3	平 均
比 重 吸 水	9.52 ~ 4.76 (mm)	表乾比重	2.584	2.582	2.577	2.581
		絶乾比重	2.506	2.498	2.487	2.497
		真 比 重	2.718	2.726	2.731	2.725
		吸 水 率	3.115	3.345	3.589	3.350
	19.1 ~ 9.52 (mm)	表乾比重	2.601	2.602	2.596	2.600
		絶乾比重	2.527	2.541	2.533	2.534
		真 比 重	2.729	2.707	2.705	2.714
		吸 水 率	2.921	2.416	2.514	2.617
	25.4 ~ 19.1 (mm)	表乾比重	2.606	2.599	2.600	2.602
		絶乾比重	2.556	2.544	2.548	2.549
		真 比 重	2.692	2.692	2.690	2.691
		吸 水 率	1.982	2.165	2.075	2.074

3. 試 験 方 法

3.1 許容最大粒径確認試験

現行の JIS の基準⁹⁾によると、締固め試験においては、使用するモールド内径の $1/5 \sim 1/4$ 程度までの最大粒径を持つ試料の使用を許容しているのに対して、透水試験においては、モールド内壁周辺に大きな間隙が発生するのを防ぐために、試料の最大粒径はモールド内径の $1/10$ 以下でなくてはならないと規定している。

一方、フィルダムの土質材料に対しては、実用性および経済性から締固め試験により作製された供試体を透水試験へ流用しているため、JIS の基準を満足しない場合がある。しかし、フィルダムの土質材料のように粒度分布が広く、細粒分をかなり含む場合は、モールド壁面と粒径の大きい土粒子が接することにより大きな間隙が形成され、結果として透水試験の精度を落とすような現象（透水係数を実際よりも大きく評価する）は起こらないと考えられる。そのことを検証するために、2 で準備した試料を用いて以下に示す締固め試験と変水位透水試験を実施した。

3.1.1 突固めによる締固め試験

突固めによる締固め試験は、2 で準備した最大粒径が25.4mm、19.1mm、9.52mmの3種類の試料に対してその締固め特性を把握するために、各試料とも以下の3種類のモールドを使用して、非乾燥・非繰返し法で行った。

- (1) モールド1：内径 ϕ 100mm、高さh12.7cm（標準モールド）
- (2) モールド2：内径 ϕ 150mm、高さh17.5cm（CBRモールド）
- (3) モールド3：内径 ϕ 300mm、高さh35.4cm（大型モールド）

締固めエネルギーは、すべて1Ecとした。各モールドに対する締固め仕様を表-3.1に示

表-3.1 モールド別の締固め仕様（締固めエネルギー：1Ec）

モールドの種類	モールド1	モールド2	モールド3
モールド内径 (cm)	10.0	15.0	30.0
モールド高さ (cm)	12.7	17.5	35.4
モールド体積 (cm ³)	1000	3092	25000
ランマー質量 (kg)	2.5	4.5	10
ランマー径 (cm)	5.0	5.0	10.0
落下高 (cm)	30.0	30.0	50.0
締固め層数	3	3	5
1層当り締固め回数	25	43	56

す。また、1 ケース当りの試験点数は10点（10含水比）とし、試験後の試料粒度の変化を確認するために締固め後に粒度試験を10点のうち6点を選択して実施した。これは、今回の試験が試料の最大粒径に着目しているため、締固め後の粒度分布、特に最大粒径の変化には十分な注意を払わなければならないからである。

なお、試料の最大粒径 D_{max} とモールド内径 ϕ の関係を表-3.2 に示す。この D_{max} と ϕ の組み合わせは JIS の締固め試験に対する基準では容認されている。

3.1.2 透水試験

透水試験用の供試体は、締固め試験結果を参考に、各試料とモールドの組合せとも最適含水比付近を中心に6含水比状態のものを締固め試験と同じ仕様で作製した。

ϕ/D_{max} が10に満たない試料とモールドの組み合わせは9つ中4つである（表-3.2 参照）。なお、透水試験は変水位法で実施した。

3.2 難透水薄膜の形成による影響確認試験

締固め試験により作製された供試体を透水試験に流用する際に、締固め時に供試体底面に細粒分が集中し薄膜を形成する恐れがある。こうした現象がフィルダムの土質材料の締固め透水試験において発生するのか、また、発生した際に試験精度にどの程度の影響を与えるのかを以下の手順で確認する。

3.2.1 突固めによる締固め試験

締固めて作製された供試体は底面に、細粒分集中による難透水薄膜が形成されるか否かを確認する試験は、最大粒径9.52mmの試料と標準モールド（モールド1）のみを用いて実施する。よって、締固め試験は、3.1.1 で既に実施されているが念のために3.1.1 と同仕様で再度実施した。

3.2.2 透水試験

透水試験は、以下に示す3種類の供試体に対して変水位法で実施した。

a) ケース(1)：底面カットなし

締固め試験結果は後述するが、含水比を10%、13%（最適含水比付近）、16%に調節した試料を標準モールド中で1 Ec で締固めて供試体を3本ずつ作製し、変水位透水試験を実施した。

この試験で得られた供試体の乾燥密度、湿潤密度、含水比をそれぞれ全体乾燥密度、全体湿潤密度、全体含水比とした。

供試体含水比は設定値に対して $\pm 0.5\%$ の範囲に収まったもののみを有効な結果として取り

表-3.2 ϕ/D_{max}

ϕ D_{max}	100mm	150mm	300mm
9.52mm	10.5	15.8	31.5
19.1mm	5.2	7.9	15.7
25.4mm	3.9	5.9	11.8

$$\phi/D_{max} = 10$$

扱った。

b) ケース(2)：底面カットあり (I)

ケース(I)と同様な方法で変水位透水試験用の供試体を原則として3 (含水比) × 3 (本) の計9本作製した。ただし、使用したモールドは図-3.1に示す通り二分割可能なものである。

締固めて作製された供試体を二分割し、その上部の試料長の長い方を透水試験に使用した。この時、供試体の上部および下部の乾燥、湿潤密度および含水比を測定し、全体、上部、下部の乾燥密度、湿潤密度および含水比を求めた。

なお、供試体全体の含水比が設定値に対して $\pm 0.5\%$ の範囲に収まったもののみを有効な結果とした。

c) ケース(3)：底面カットあり (II)

ケース(I), (2)と同仕様で作製した供試体の底面 (締固めに対して) を1 cmほど除去し、その部分を標準砂で置き換えてから標準砂がモールドからこぼれないように便宜上、標準砂置換部を上にして透水試験装置に設置した。このとき、供試体全体、1 cm程度除去した後の残りの部分、1 cm程度除去した部分の乾燥、湿潤密度および含水比を測定し、全体、上部、下部の乾燥密度、湿潤密度および含水比を求めた。なお、供試体は原則として3 (含水比) × 3 (本) の計9本作製した。

なお、供試体全体の含水比が設定値に対して $\pm 0.5\%$ の範囲に収まったもののみを有効な結果とした。

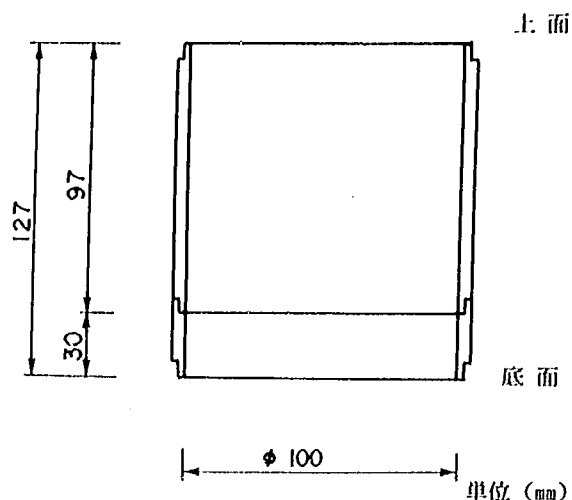


図-3.1 二分割モールド

4. 試験結果と考察

4.1 許容最大粒径確認試験

4.1.1 締固め試験結果

(1) 試験結果

締固め試験結果を図-4.1～図-4.6および表-4.1に示す。図-4.1～図-4.3は試験結果を使用したモールド径ごとに整理したもので、図-4.4～図-4.6は試験結果を使用した試料の最大粒径ごとに整理したものである。締固め曲線中のゼロ空気間隙曲線を求める際の比重 G_s には2mm以下の土粒子の比重 G_s を用いた。その理由は、今回の試験では2mm～4.76mmの礫の比重の測定を行っていないことと、表-2.2からわかるように2mm以下の比重と4.76mm以上の礫の真比重に大差がないため、得られる曲線形状に大きな差がでないと判断したためである。

図-4.7には試料の最大粒径と最大乾燥密度の関係を、また図-4.8には最大粒径と最適含水比の関係を示す。

これらの図表から以下のことがわかる。

- ① 試料が同じであれば、モールド径によらずほぼ同様な締固め曲線が得られた。当然のことながら得られる最大乾燥密度 ρ_{dmax} および最適含水比 w_{opt} もほぼ同じ値である（表-4.1参照）。
- ② 同一モールドを用いて締固め試験を行うと、試料の最大粒径が大きくなるにしたがい最大乾燥密度は大きくなり、最適含水比は小さくなるという傾向を示している。
- ③ 高田ら⁴⁾は今回と同様な剪頭粒度材を用いた締固め試験を行い、試料の最大粒径 D_{max} の対数に対して最大乾燥密度 ρ_{dmax} が直線的な関係を持つことを示している（以下、この考えに従い密度の礫補正を実施する方法を剪頭粒度試料法と呼ぶ）が、本試験でも図-4.7に示すように $\log_{10} D_{max}$ と ρ_{dmax} にほぼ右上りの直線的な関係が得られた。

表-4.1 締固め試験結果

試験条件		試験試料の最大粒径 (Dmax)		
モールド径	項目	9.52mm	19.1mm	25.4mm
$\phi 100\text{mm}$	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (t/m ³)	1.920	1.944	1.980
	最適含水比 w_{opt} (%)	13.6	12.4	11.1
$\phi 150\text{mm}$	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (t/m ³)	1.926	1.944	1.982
	最適含水比 w_{opt} (%)	13.2	12.3	11.2
$\phi 300\text{mm}$	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (t/m ³)	1.918	1.960	1.986
	最適含水比 w_{opt} (%)	13.5	12.8	11.8

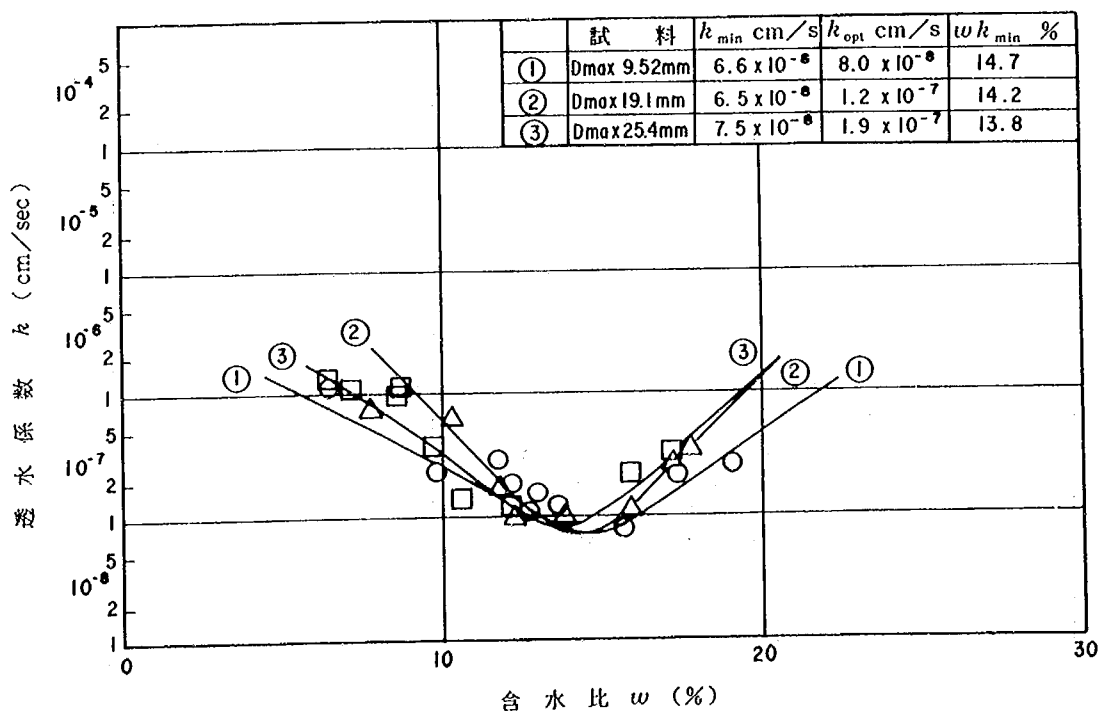
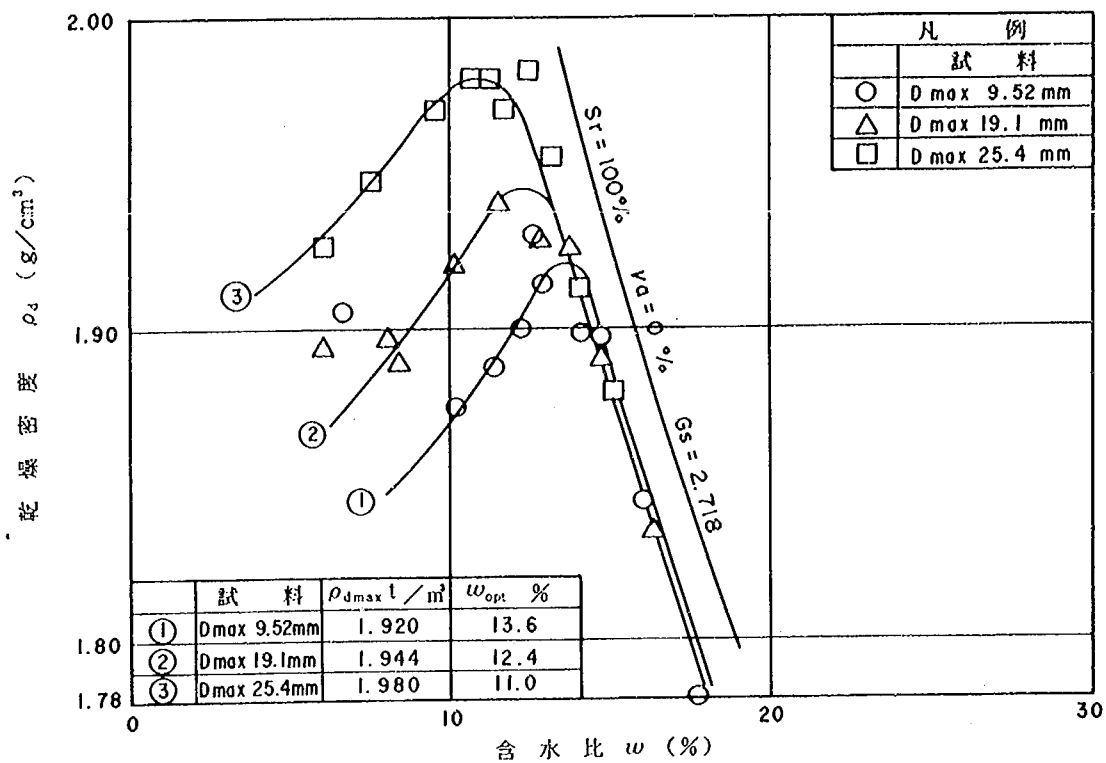


図-4.1 乾燥密度、透水係数と含水比の関係 (モールド径 $\phi 100$ mm)

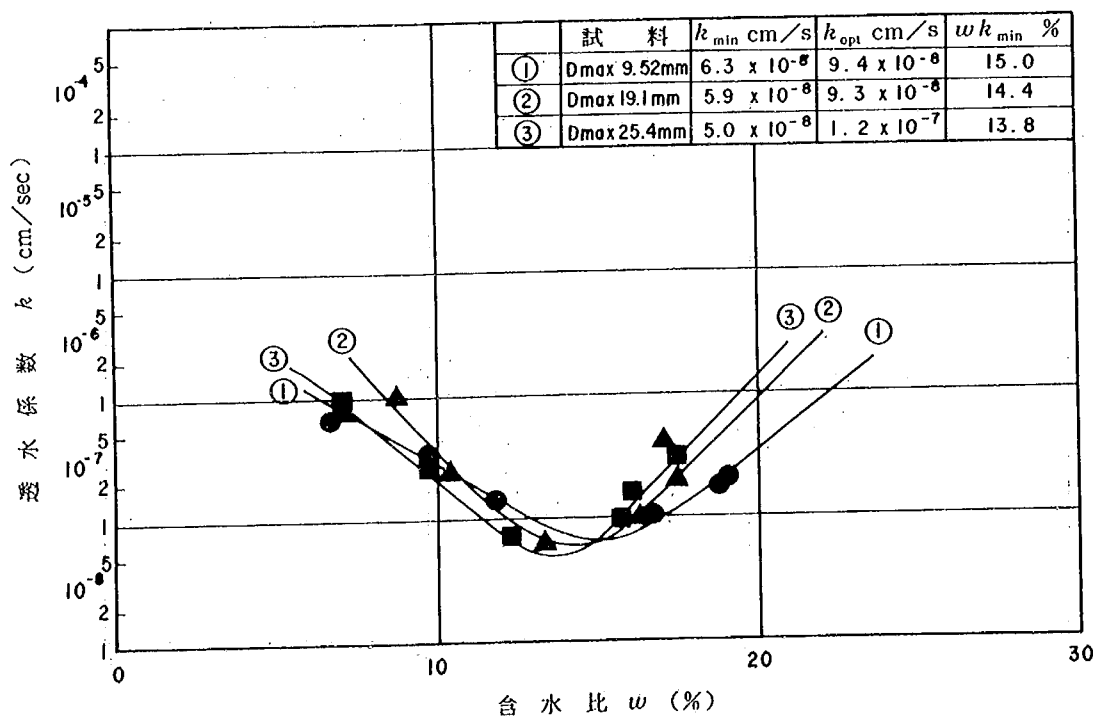
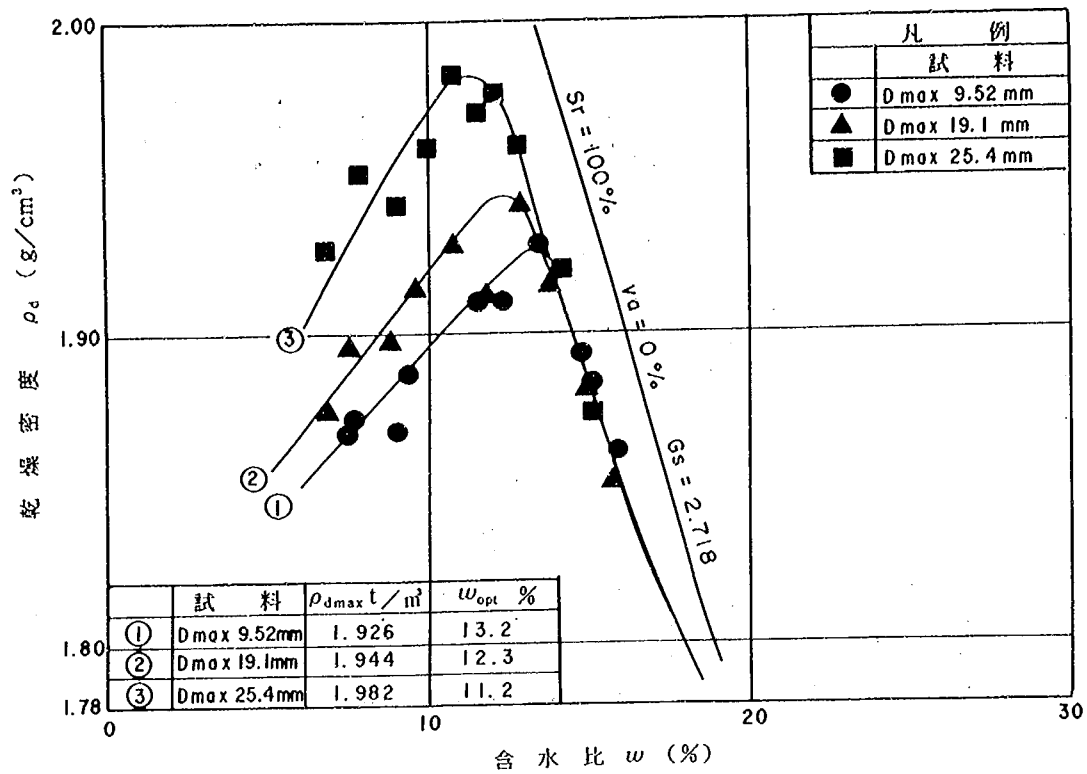


図-4.2 乾燥密度，透水係数と含水比の関係（モールド径 $\phi 150$ mm）

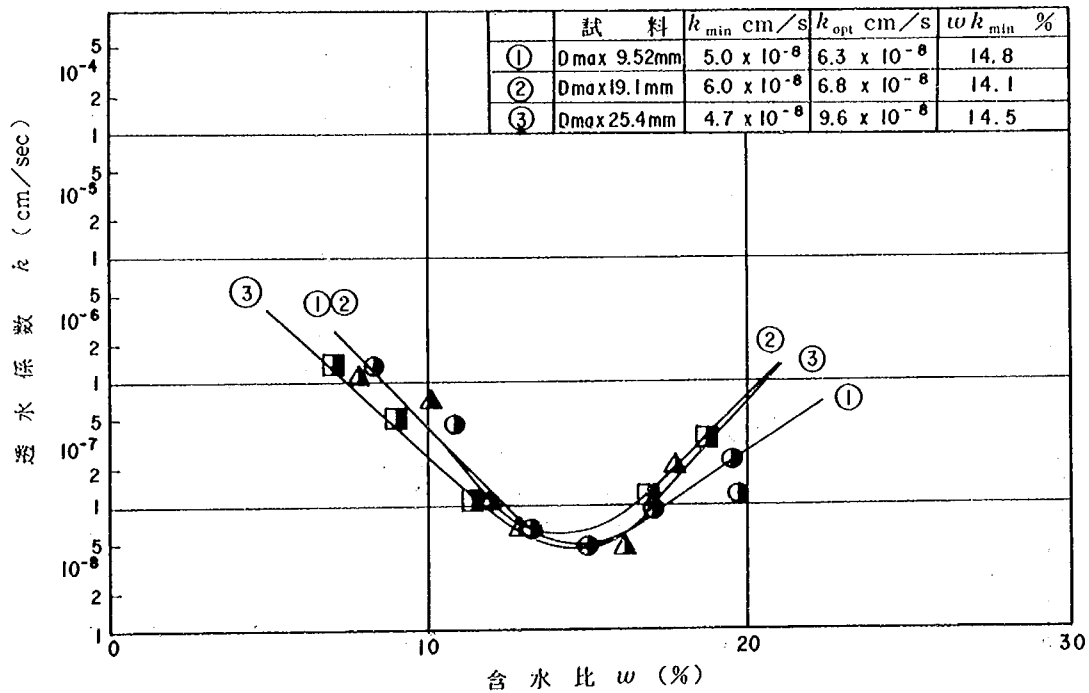
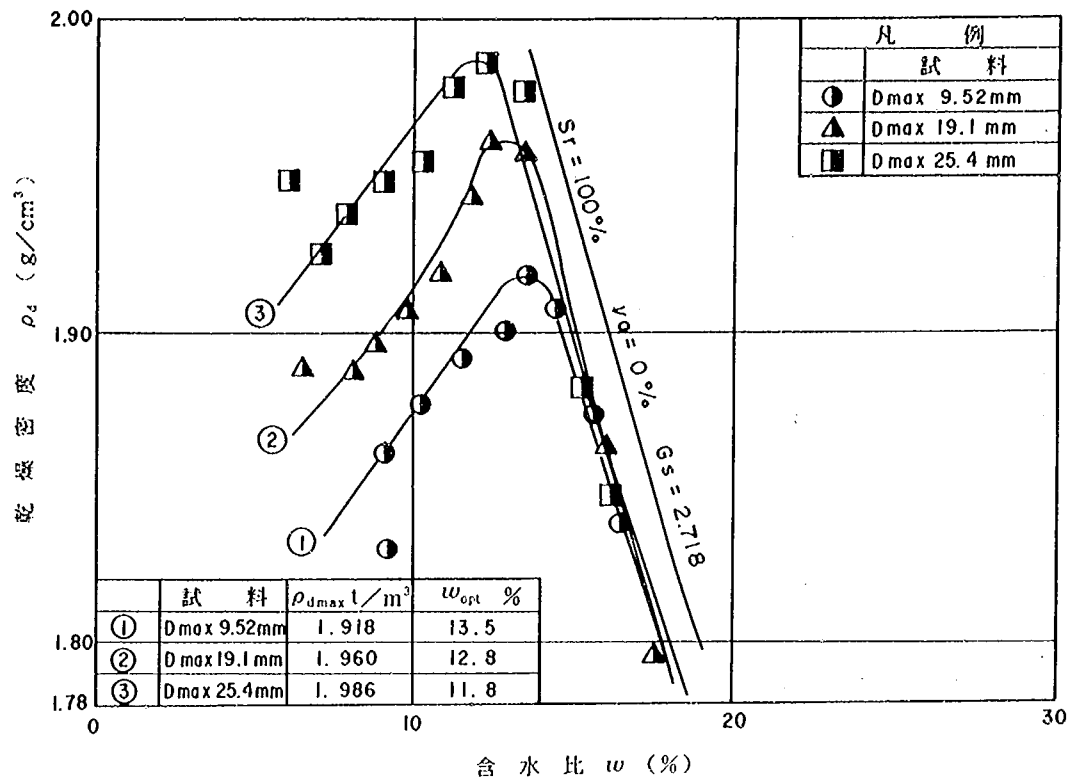


図-4.3 乾燥密度、透水係数と含水比の関係（モールド径 $\phi 300$ mm）

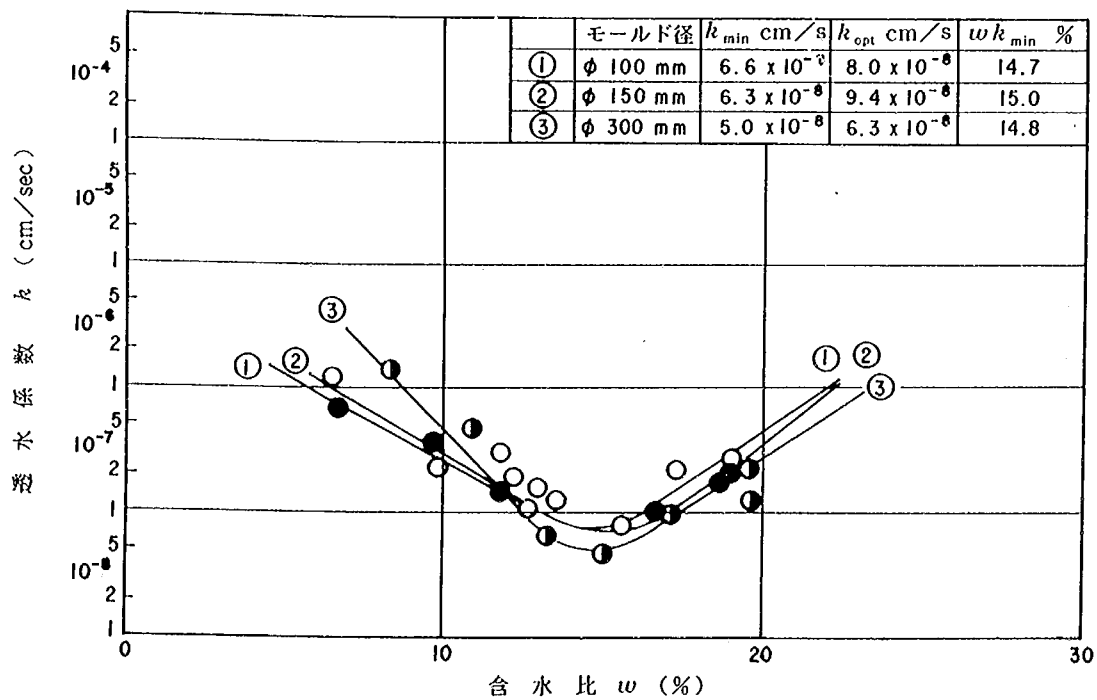
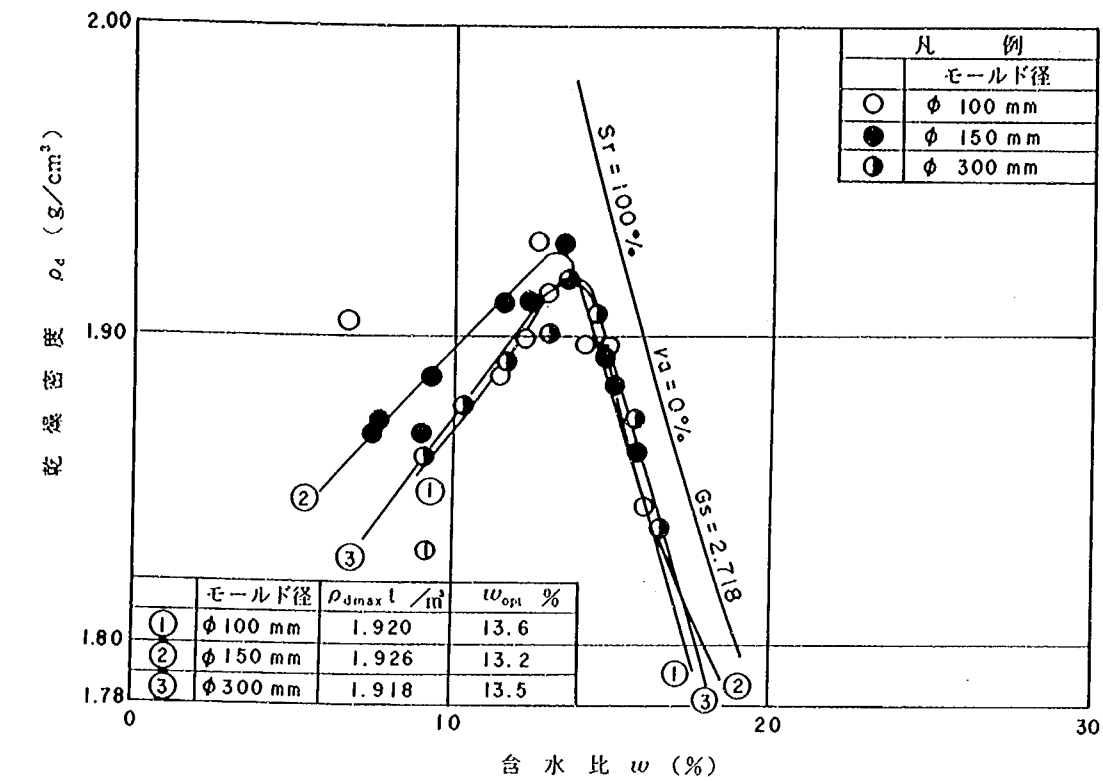


図-4.4 乾燥密度、透水係数と含水比の関係 (最大粒径 D_{max} 9.52mm)

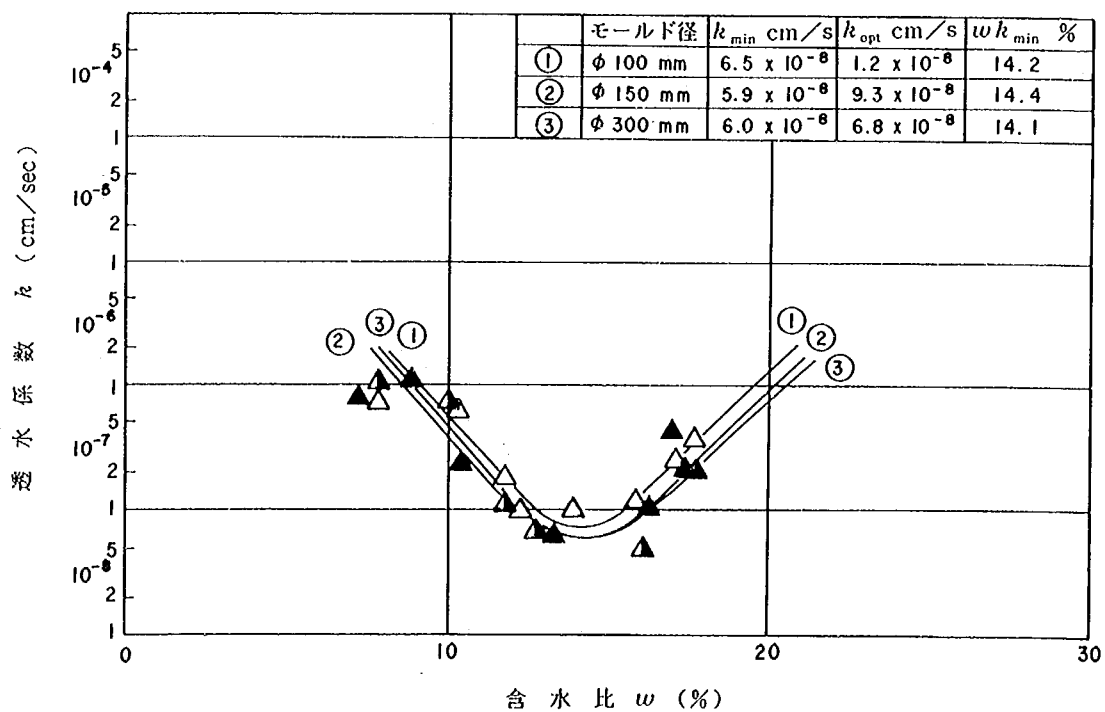
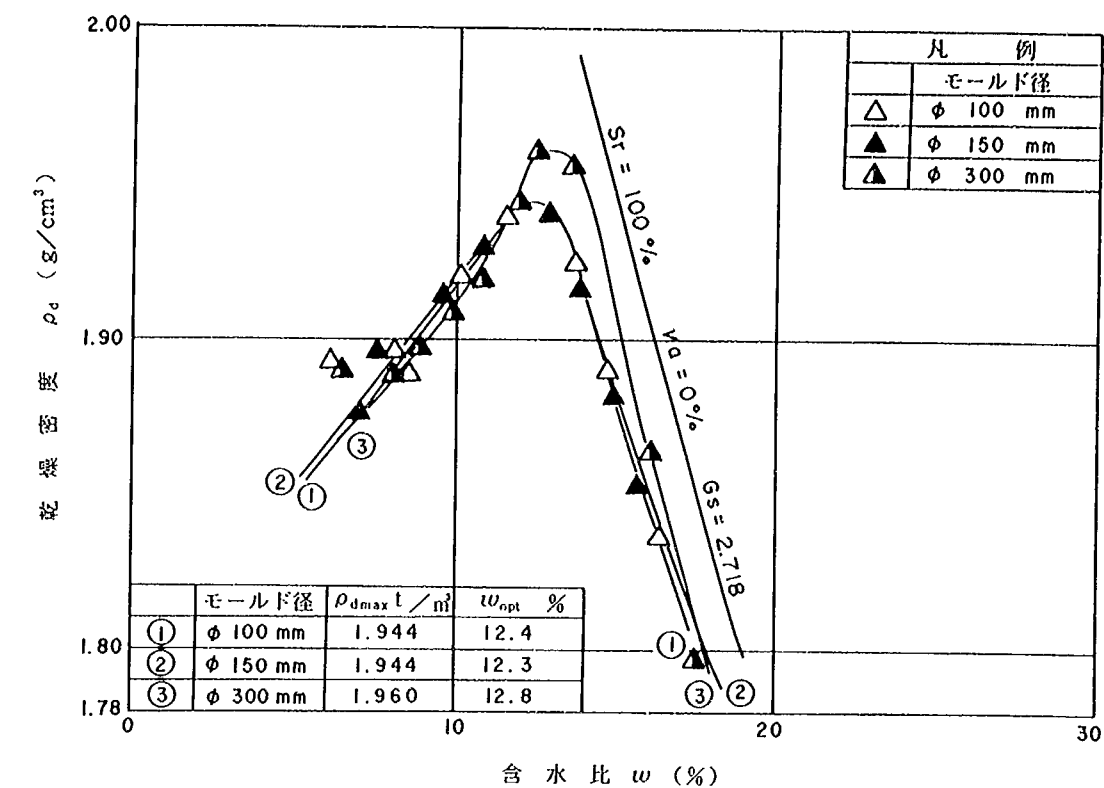


図-4.5 乾燥密度、透水係数と含水比の関係 (最大粒径 D_{max} 19.1mm)

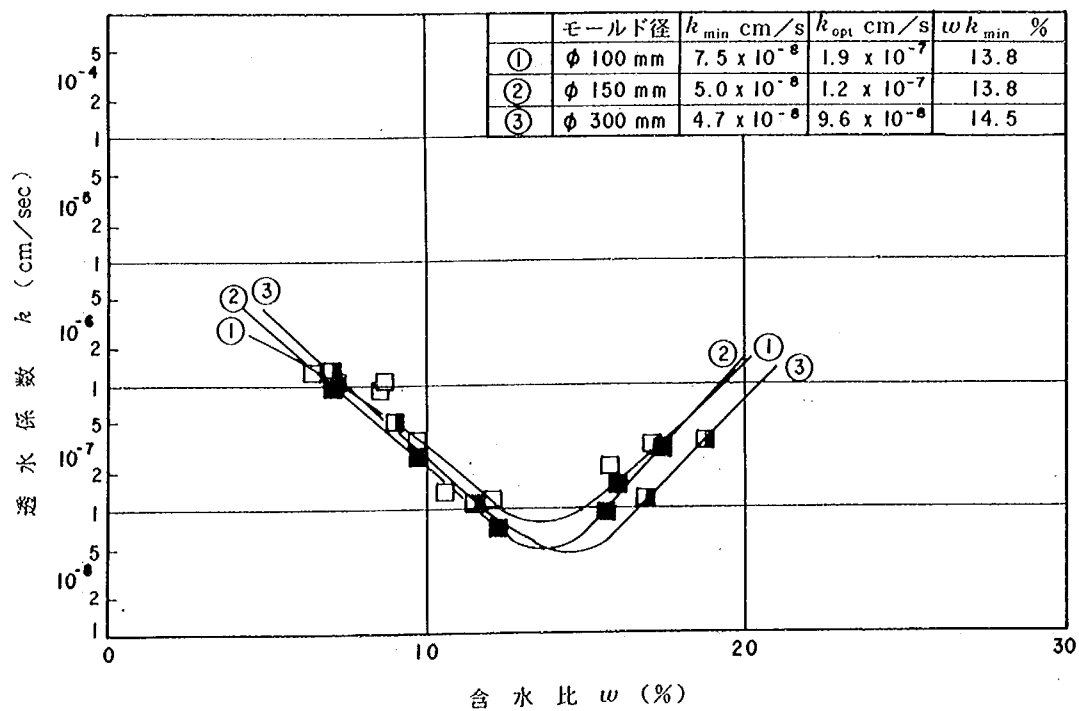
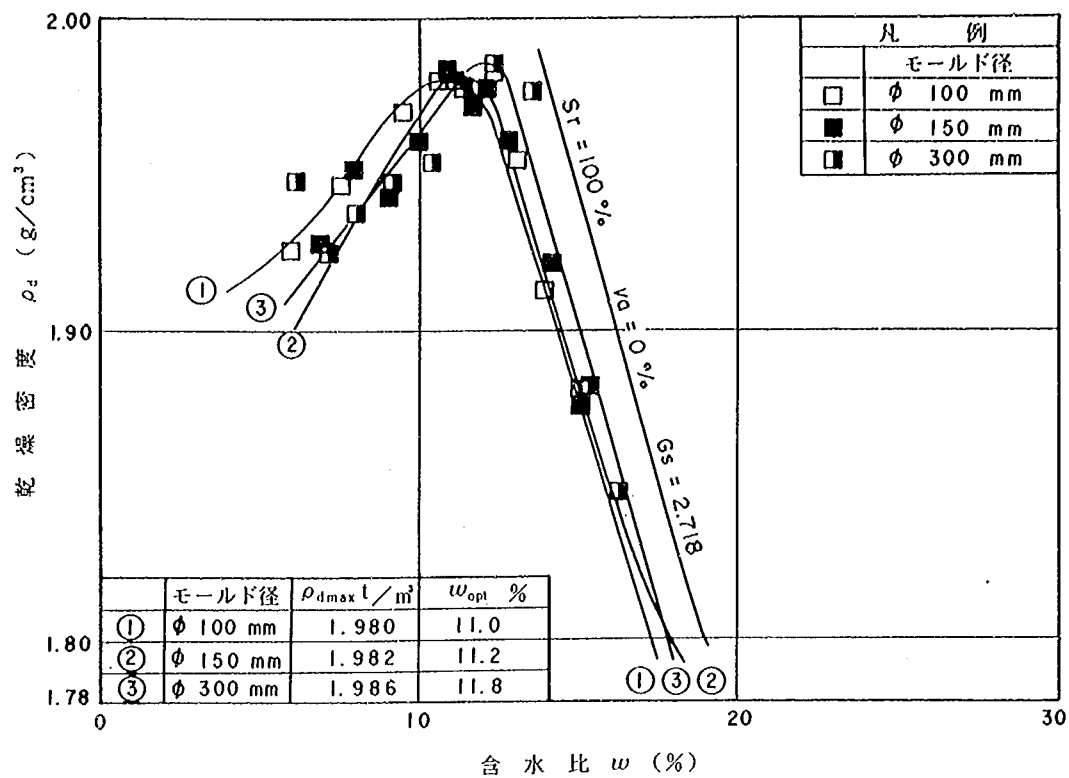
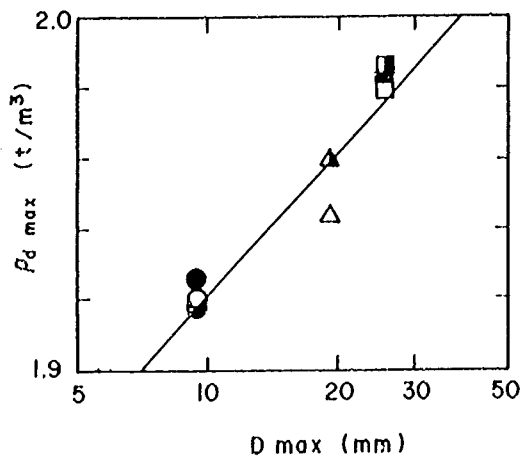


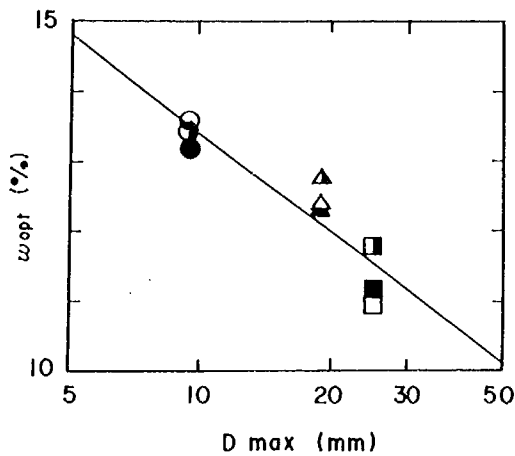
図-4.6 乾燥密度，透水係数と含水比の関係（最大粒径 D_{max} 25.4mm）



図－4.7 最大粒径と最大乾燥密度の関係

試料	凡 例		
	モールド径 φ100 mm	φ150 mm	φ300 mm
D max 9.52 mm	○	●	◐
D max 19.1 mm	△	▲	▴
D max 25.4 mm	□	■	▣

—— 近似直線



図－4.8 最大粒径と最適含水比の関係

試料	凡 例		
	モールド径 φ100 mm	φ150 mm	φ300 mm
D max 9.52 mm	○	●	◐
D max 19.1 mm	△	▲	▴
D max 25.4 mm	□	■	▣

—— 近似直線

- ④ 図－4.8 から $\log_{10} D_{max}$ と最適含水比 w_{opt} の間にもほぼ右下りの直線関係が見い出せた。

上記の締固め試験は，JIS の基準で許容するかそれに準拠する最大粒径の持つ試料に対して実施している。その結果，その範囲においては試料の正確な締固め特性が把握できることが判明した。

(2) 礫率補正に関する考察

ここでは，試料の最大粒径の違いによる締固め密度の違いを説明するために，4.76mmのふるいを通過する試料を土と称し，それ以上の粗粒分を礫と称して礫補正を施し，土のみの密度と含水比を算出してみる。礫率の補正法としては，Walker, Holtz の方法⁵⁾を適用することとし，具体的には以下の手順で行った。

この方法は土と礫の混合物を締め固めた場合，礫の間隙は全て土が満たし，間隙中の土はその

締固め仕事量で土のみを締固めた場合の密度になっているという仮定から出発している。この仮定は礫の混入率が小さい間は妥当であるが、混入率が大きくなると礫の間隙中の土のみの密度は、締固めのエネルギーが礫の存在によって土に完全には伝達されにくくなるため減じ、仮定が実際の状況に合わなくなってくる。適用の限界は礫率が30～40%程度までといわれている。

締固まった土・礫混合物の状態を模型図を図-4.9に示す。図-4.9の表現によれば土の粒子の比重 G_{s1} 、礫の粒子の比重 G_{s2} はそれぞれ

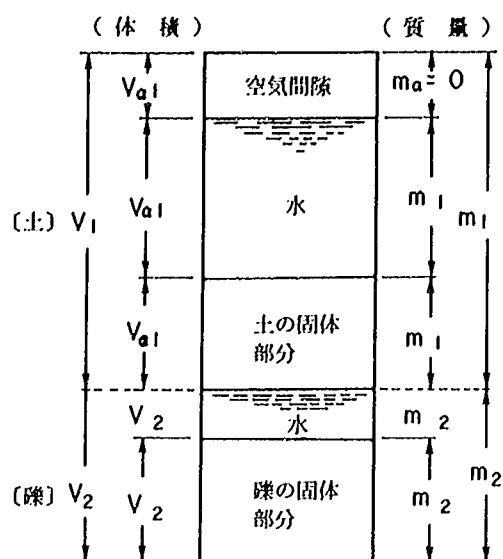


図-4.9 Walker, Holtz の方法説明の模型図

$$G_{s1} = \frac{m_{s1}}{V_{s1} \cdot \rho_w}, \quad G_{s2} = \frac{m_{s2}}{V_{s2} \cdot \rho_w}$$

であり（ ρ_w は水の密度 = 1 t/m³），土の含水比 w_1 ，礫の含水比 w_2 はそれぞれ

$$w_1 = \frac{m_{w1}}{m_{s1}}, \quad w_2 = \frac{m_{w2}}{m_{s2}}$$

となる。ここでは式を簡略化するために含水比を百分率でなく小数で表わすことにする。

また、礫の混合率 P を次のような乾燥質量比で表わすことにする。

$$\frac{m_{s2}}{m_{s1} + m_{s2}} = P$$

これは粒径加積曲線上の粗細分級点粒径に対する残留率である。これも簡単化のために百分率でなく少数で表わす。

図-4.9 から混合後の土と礫の混合物の乾燥密度 ρ_d は、

$$\rho_d = \frac{m_{s1} + m_{s2}}{V_1 + V_2} = \frac{\rho_{d1} \rho_{d2}}{P \rho_{d1} + (1 - P) \rho_{d2}} \quad (4.1)$$

となる。ここに、 ρ_{d1} は土のみの乾燥密度で m_{s1}/V_1 、 ρ_{d2} は礫のみの乾燥密度で m_{s2}/V_2 である。

いま、礫の絶乾比重を G_b とすると、

$$G_b = \frac{m_{s2}}{\rho_w V_2} = \frac{\rho_{d2}}{\rho_w} \quad (4.2)$$

ここで、式(4.1)を ρ_{d1} について解くと、

$$\rho_{d1} = \frac{(1-P)\rho_{d2}\rho_d}{\rho_{d2}-P\rho_d} = \frac{(1-P)\rho_w G_v \rho_d}{\rho_w G_v - P\rho_d} \quad (4.3)$$

となる。

なお、注意しておかなければいけないのは、Walker, Holtzの方法では礫中の間隙はすべて水で満たされていると仮定しているということである。(図-4.9参照)

また、土と礫の混合物全体の含水比 w は、

$$w = w_1(1-P) + w_2P \quad (4.4)$$

礫の吸水率を Q とすると、

$$Q = w_2 \quad (4.5)$$

さらに、式(4.4)を w_1 について解くと、

$$w_1 = \frac{w - w_2P}{1-P} = \frac{w - QP}{1-P} \quad (4.6)$$

前述の礫補正法に従い求めた粒径が4.76mm以下の土部分のみに着目した締固め試験結果を図-4.10～図-4.15に示す。図-4.10～図-4.12はモールド径ごとに、図-4.13～図-4.15は試料ごとに試験結果を整理したものである。なお、 G_v と Q には表-2.2に示した値を用いた。これらの図より以下のことが言える。

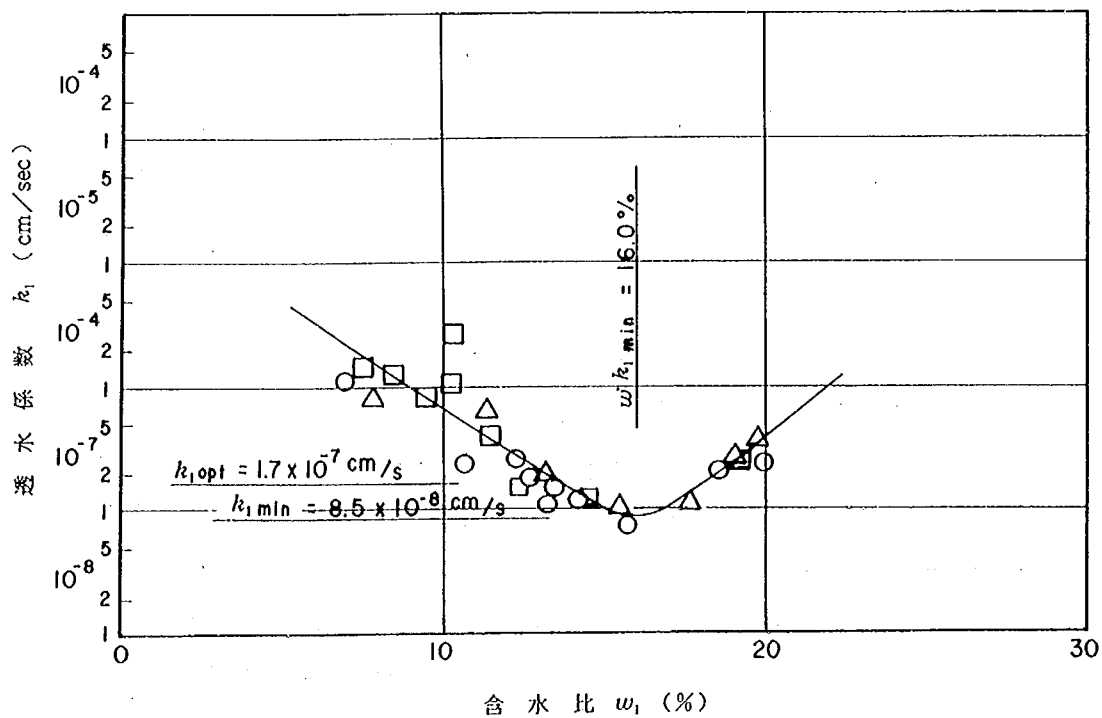
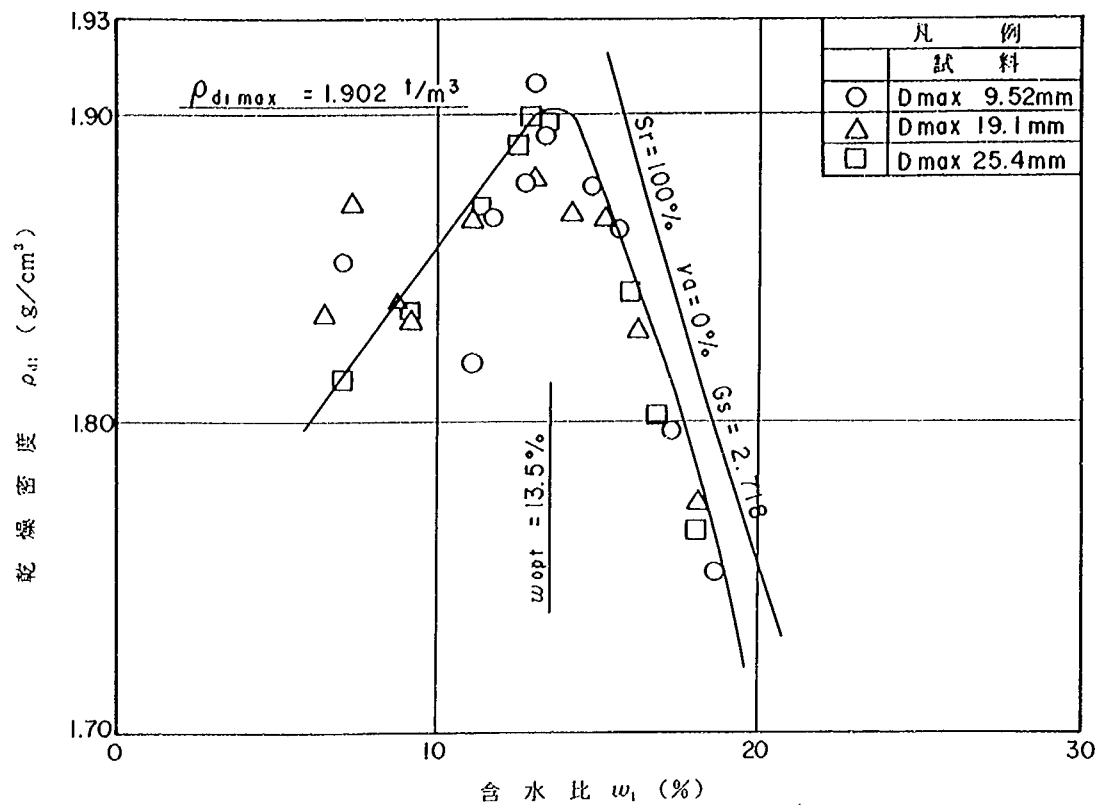
- ① いずれの試験ケースにおいても土部分については同様な締固め曲線が得られた。
- ② 土部分の最大乾燥密度は、どの試験ケースにおいても1.90 t/m³程度である。
- ③ 土部分の最適含水比は、13.5%程度で試験ケースによる差は見られない。

以上より、今回実施した漢那ダムのコア材に対する締固め試験結果については明らかにWalker, Holtzの方法による礫補正が成立していることがわかる。その大きな原因としては、今回使用した試料のうち礫率が最も大きい最大粒径が25.4mmの試料においてもその礫率が20%程度(図-2.5参照)と、Walker, Holtzの礫率の補正の適用範囲内にあったことが挙げられよう。

(3) 原粒度コア材の乾燥密度の推定

(2)の結果より、今回使用した試料については密度に関する礫率補正が成り立つことが判明した。そこで次に上記の礫率補正の考え方によって漢那ダムコアの原粒度材を1 Ecのエネルギーで締固めた場合の乾燥密度を推定する。

図-4.16は最大粒径 D_{max} と最大乾燥密度 ρ_{dmax} の関係と漢那ダムコア材の粒度分布曲線をならべて示したものである。 $D_{max}-\rho_{dmax}$ 図中で最大粒径が9.52mm, 19.1mm, 25.4mmの ρ_{dmax} は $\phi 300$ mmモールドを用いた締固め試験による実験値であり、それ以外の実線で結んだ点はその



図一 4.10 土部分の乾燥密度，透水係数と含水比の関係（礫補正後，モールド径 $\phi 100\text{mm}$ ）

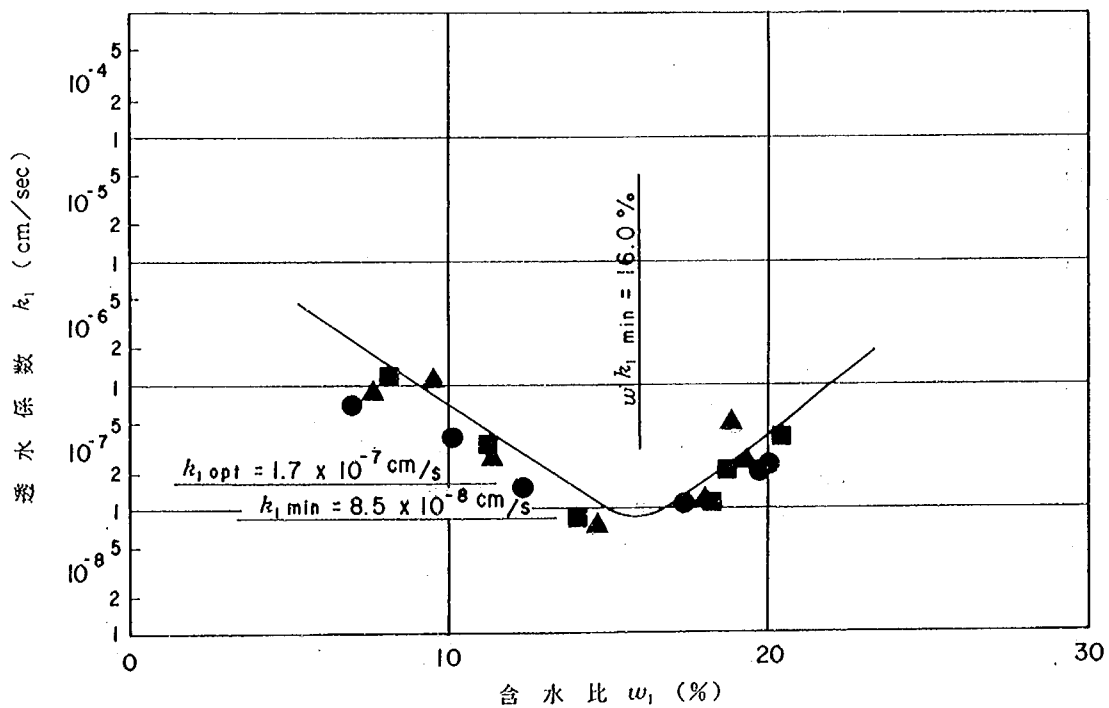
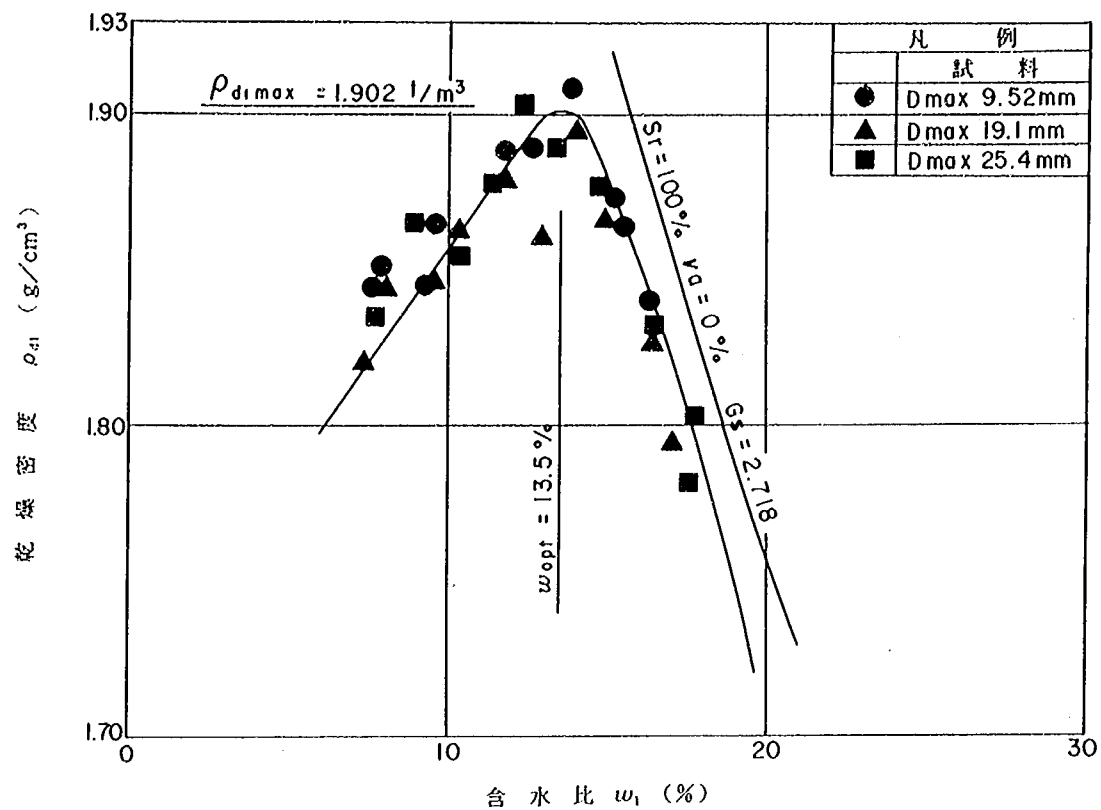


図-4.11 土部分の乾燥密度、透水係数と含水比の関係（礫補正後、モールド径 $\phi 150\text{mm}$ ）

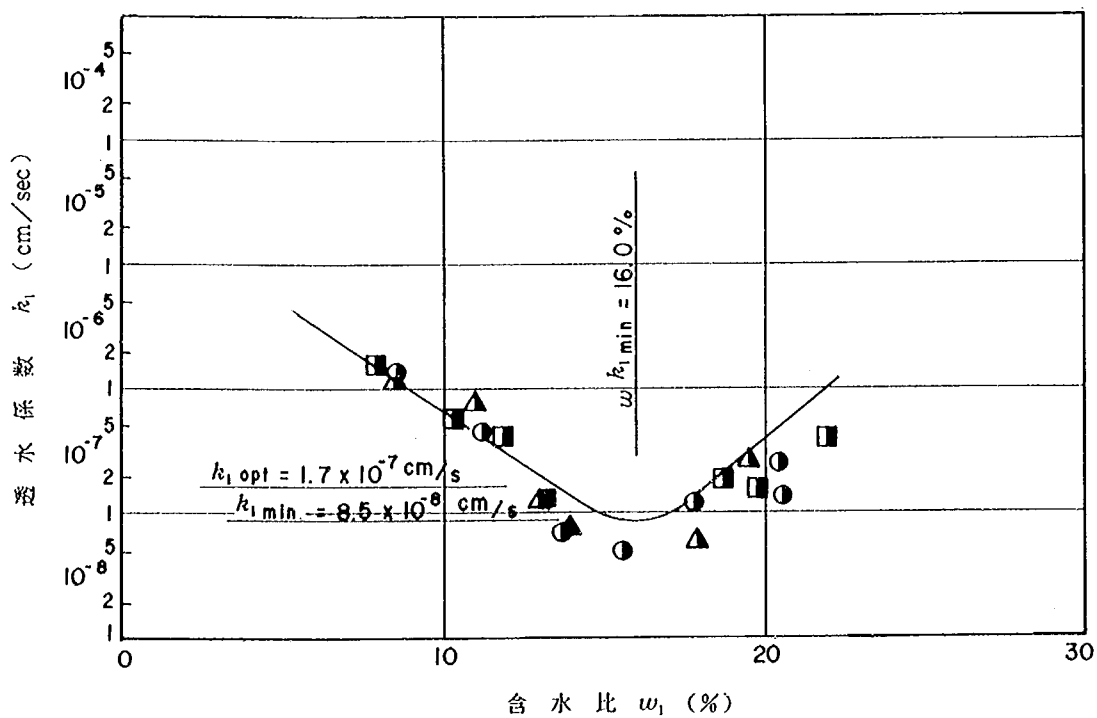
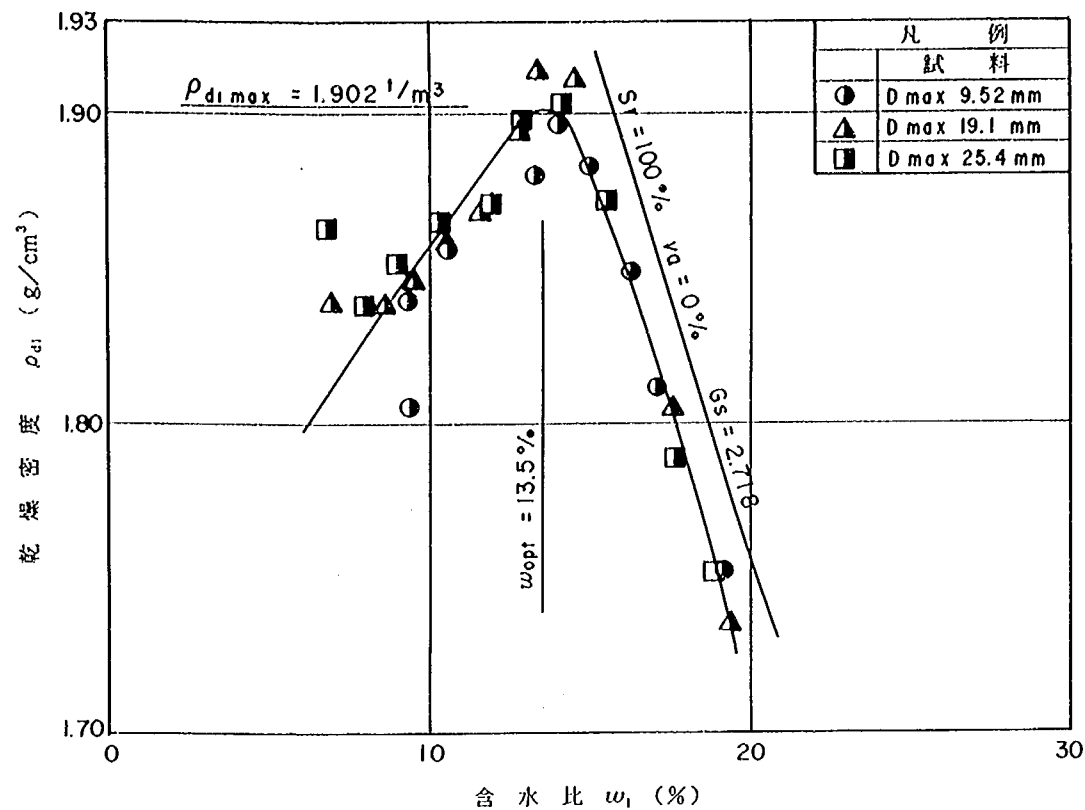


図-4.12 土部分の乾燥密度，透水係数と含水比の関係（礫補正後，モールド径 $\phi 300\text{mm}$ ）

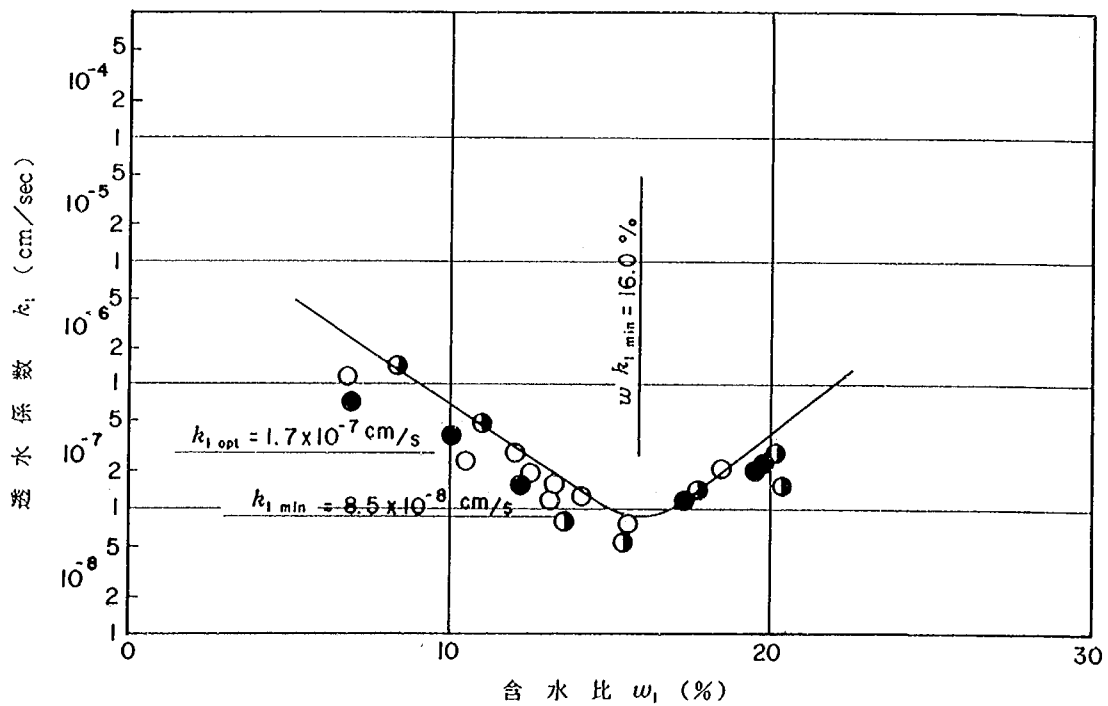
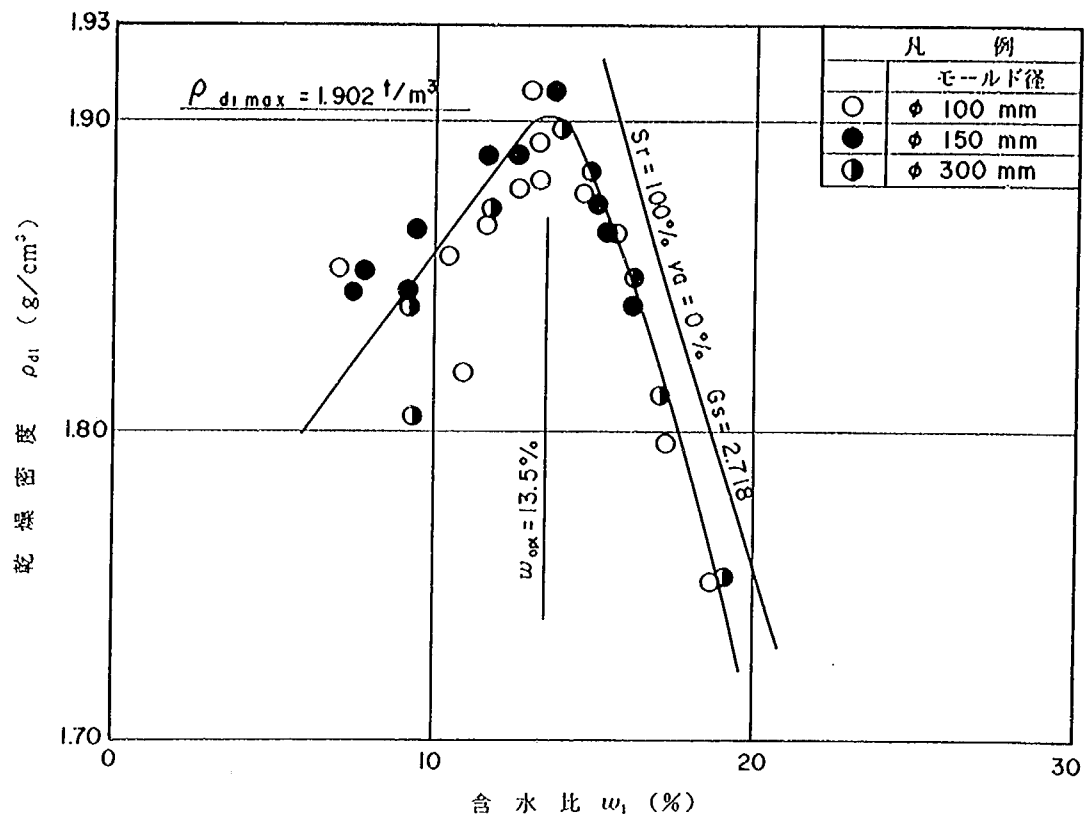


図-4.13 土部分の乾燥密度、透水係数と含水比の関係（礫補正後、モールド径 φ150mm）

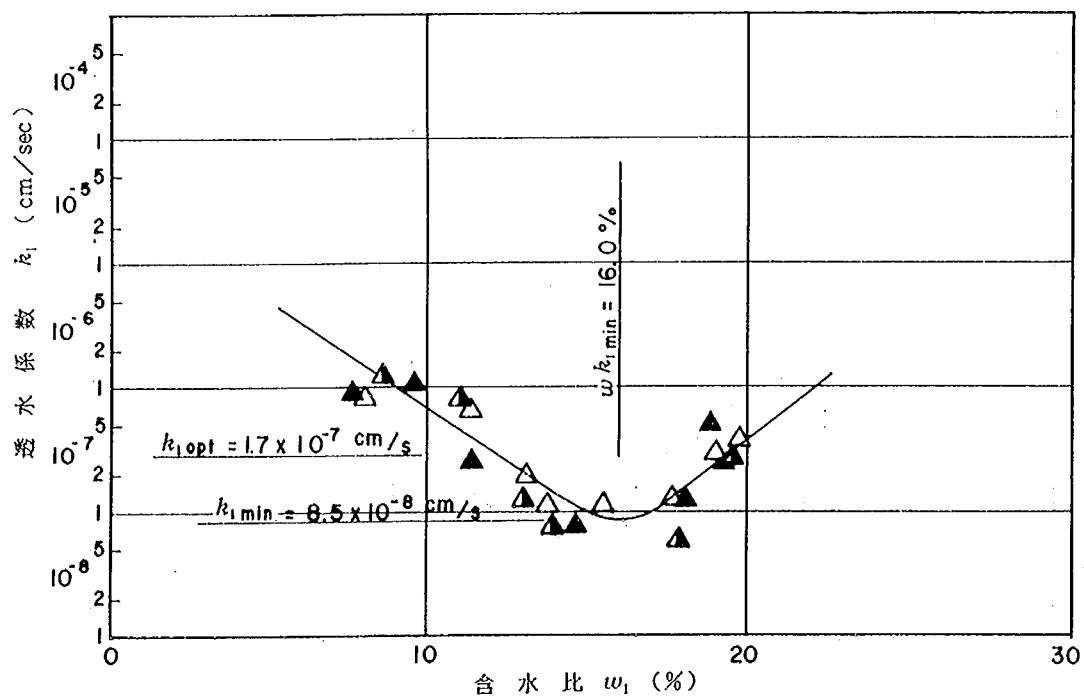
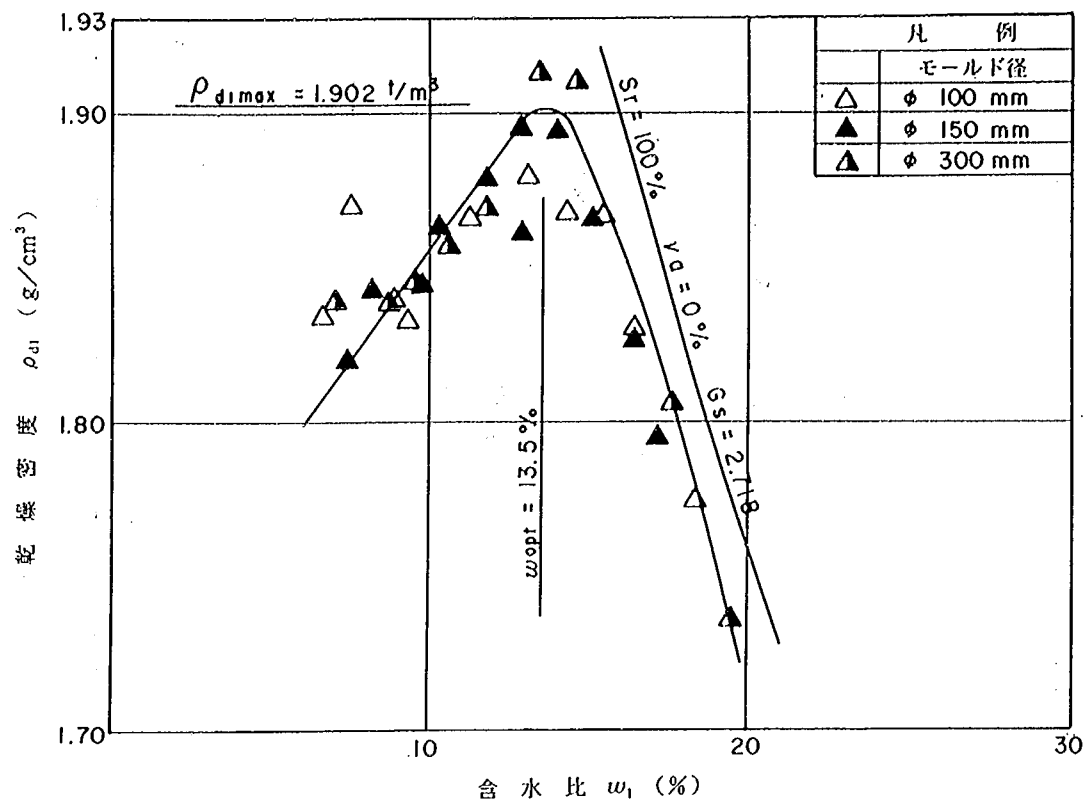


図-4.14 土部分の乾燥密度、透水係数と含水比の関係（礫補正後、最大粒径 $D_{max} 19.1\text{mm}$ ）

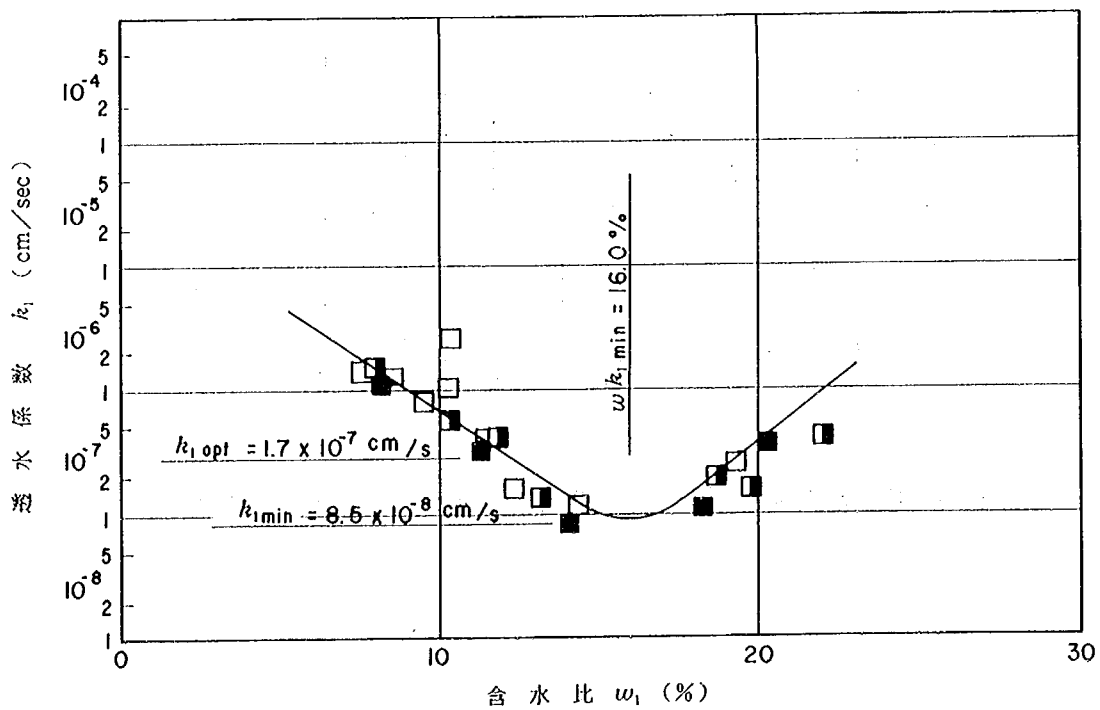
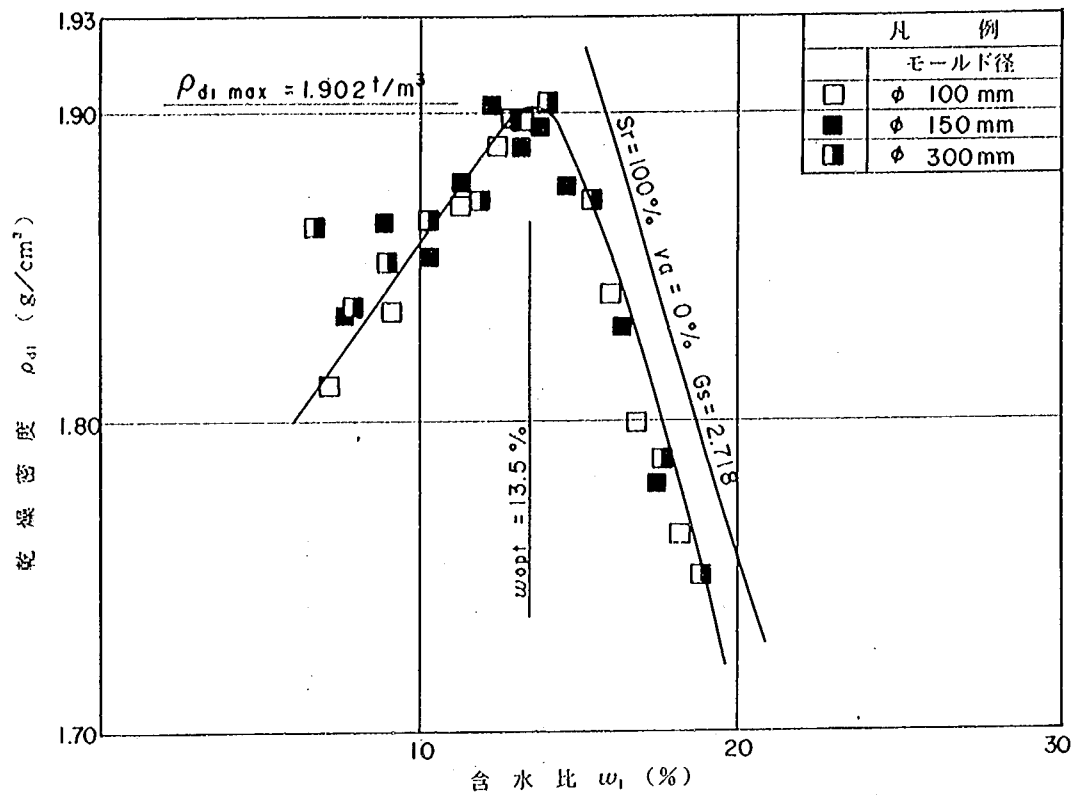


図-4.15 土部分の乾燥密度，透水係数と含水比の関係（礫補正後，最大粒径 $D_{\max} 25.4\text{mm}$ ）

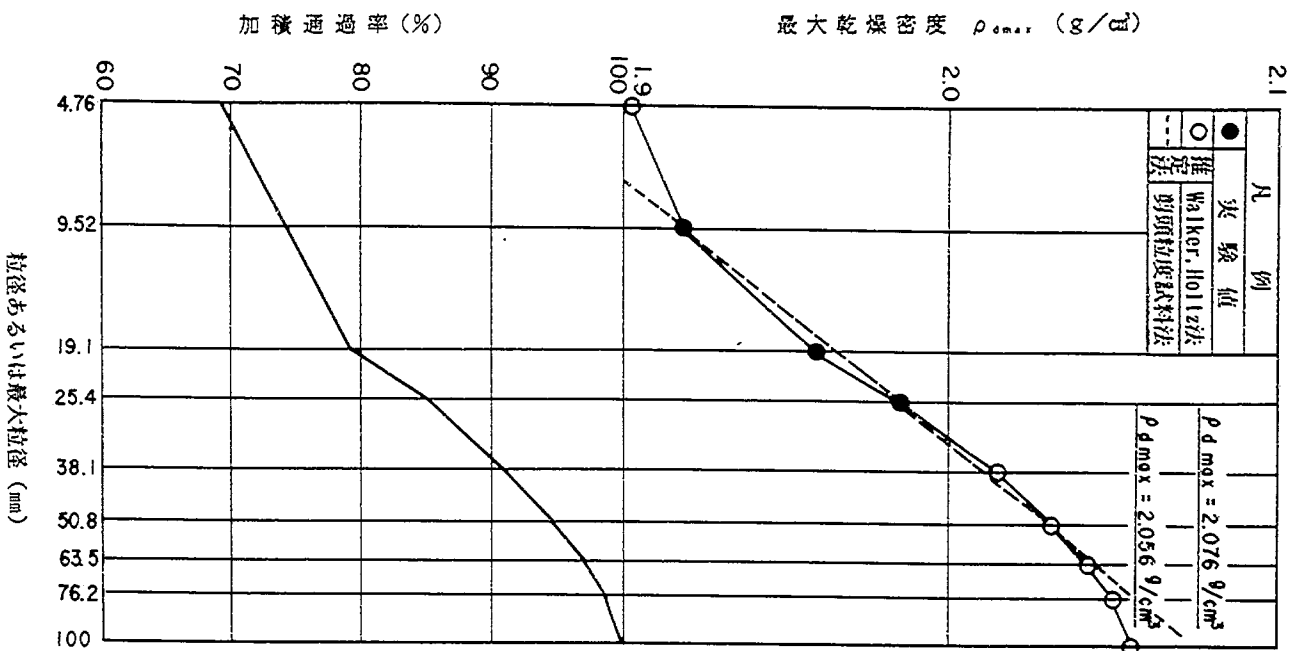
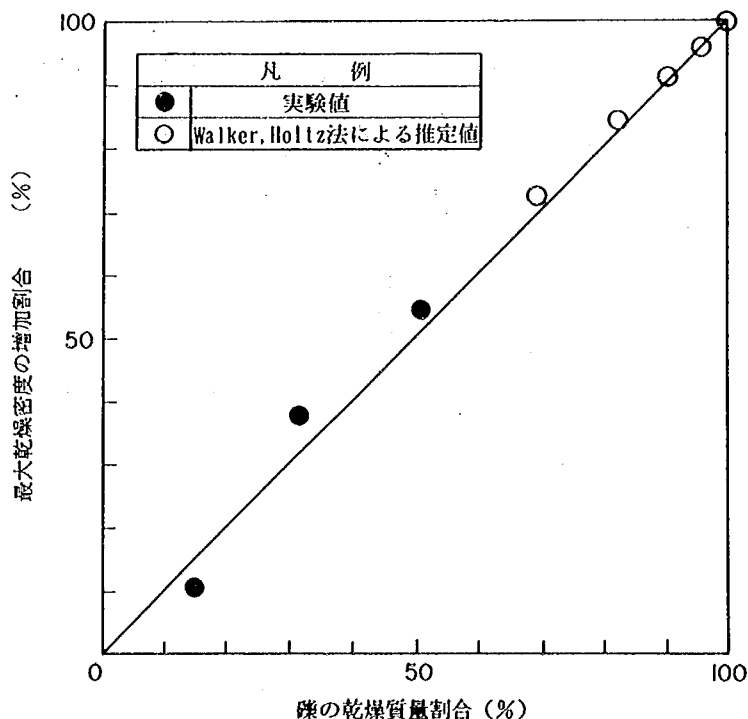


図-4.16 最大粒径と $\rho_{d\max}$ の関係と漢那ダムコア材の粒度曲線

点での粒径を最大粒径と考え最大粒径よりも1つ小さいふるい目を通過する試料を土とし、それに留まる試料を礫として最大粒径 D_{max} が25.4mmでモールド径が $\phi 300$ の場合の ρ_{dmax} を基に順次礫率補正を行うことによって求めたものである。なお、礫率補正により最大粒径が38.1mm以上の場合の ρ_{dmax} を求める際、礫の絶乾比重 G_s には25.4mm～4.75mmの試料の絶乾比重 G_s （表－2.1参照）を用いた。その理由は、今回の試験では25.4mm以上の礫の比重を測定していないことと、試料全体に締める礫の割合が小さいため得られる結果にほとんど差がないと判断したためである。また、図中の点線は高田らの剪頭粒度試料法に従って求めた実験値3点の回帰直線である。以上の2方法により求めた D_{max} 100mmの場合の ρ_{dmax} の値は図－4.16に示すよう Walker, Holtz法で2.076 g/cm³、剪頭粒度試料法で2.056 g/cm³とほとんど差がなく、原粒度材の密度に近いものとする。このように理論点に根拠のない剪頭粒度試料法から求めた ρ_{dmax} と Walker, Holtz法より求めた ρ_{dmax} がよく一致したのは、礫補正により得られた最大粒径と乾燥密度の関係を示す曲線形状が粒径9.52mm以上がほぼ直線である粒度分布曲線形状にほぼ相似であるためである。

ここで、図－4.16中の礫補正により得られた最大粒径と乾燥密度の関係を示す曲線と粒度分布曲線とがどの程度の相似関係があるのかを確認する。図－4.17は漢那ダムコア材の最大乾燥密度が4.76mm以上の礫の混入率の増加により増加する割合と4.76mm～100mmの礫の乾燥質量に対する4.76mm～各粒径の礫の乾燥質量の比の関係を示したものである。図の縦軸は最大乾燥密度の増加割合の百分率表示であり、

$$\text{最大乾燥密度の増加割合} = \frac{\rho_{dmax}(\text{各粒径}) - \rho_{dmax}(4.76\text{ mm})}{\rho_{dmax}(100\text{ mm}) - \rho_{dmax}(4.76\text{ mm})} \times 100$$



図－4.17 礫の乾燥質量割合と最大乾燥密度の増加割合の関係

横軸は礫の乾燥質量割合の百分率表示であり、

$$\text{礫の乾燥質量割合} = \frac{m_{4.76} (4.76 \text{ mm} \sim \text{各粒径})}{m_{4.76} (4.76 \text{ mm} \sim 100 \text{ mm})} \times 100$$

である。

図中の原点を通る傾き45°の直線は両者の完全な相似を示すが、各データポイントはほぼこの直線上にある。よって、礫率補正が成立すると仮定すれば、 ρ_{dmax} とDmaxの関係は粒度分布曲線とほぼ相似な形状となることがわかる。ただし、両者の相似関係は常に成立するものではなく、本試料において25.4mm以上の礫の混入率が15%と小さかったことによる。その具体的な理由については参考資料-2で詳しく述べる。

4.1.2 締固めによる破碎率

今回の試験は、試料の最大粒径に着目しているので締固め後の粒度分布には十分な注意を払わなければならない。そこで各試験ケースについて締固め試験点数10点（10含水比）のうち最適含水比付近を中心に6点を選択して締固め後の粒度試験を行った。破碎率は Marsal の破碎率⁹⁾で求めた。Marsal の破碎率とは試験後の各粒度毎の残留百分率から試験前の残留百分率を差引き、その値の同符号のみをたしあわせたものの絶対値で表現されるものである。なお、破碎率の算定に際して用いたふるい目は、25.4, 19.1, 9.52, 4.76, 76, 2.00mmである。

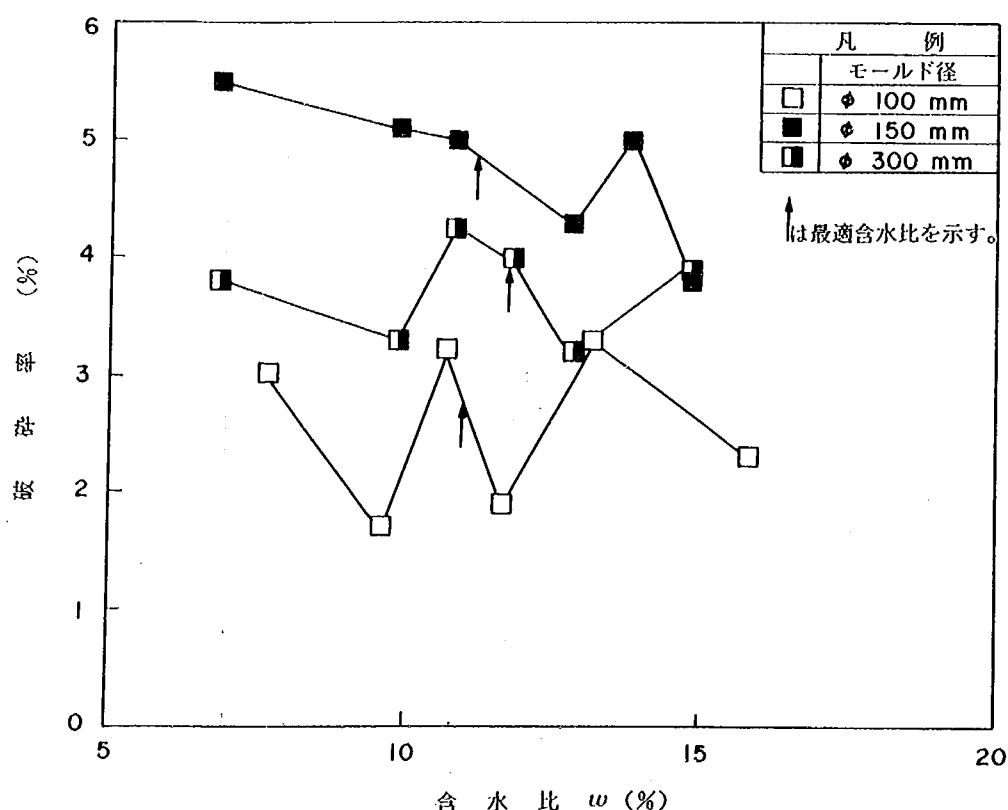


図-4.18 破碎率と含水比の関係 (Dmax 25.4mm)

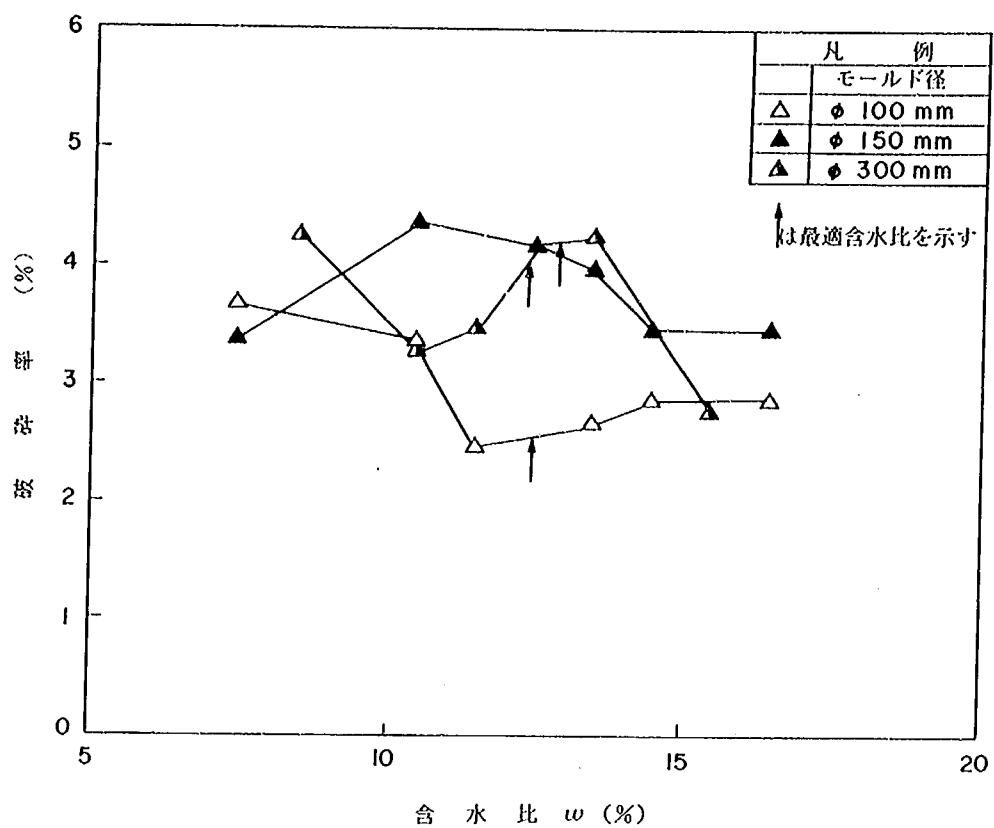


図-4.19 破碎率と含水比の関係 (D_{max} 19.1mm)

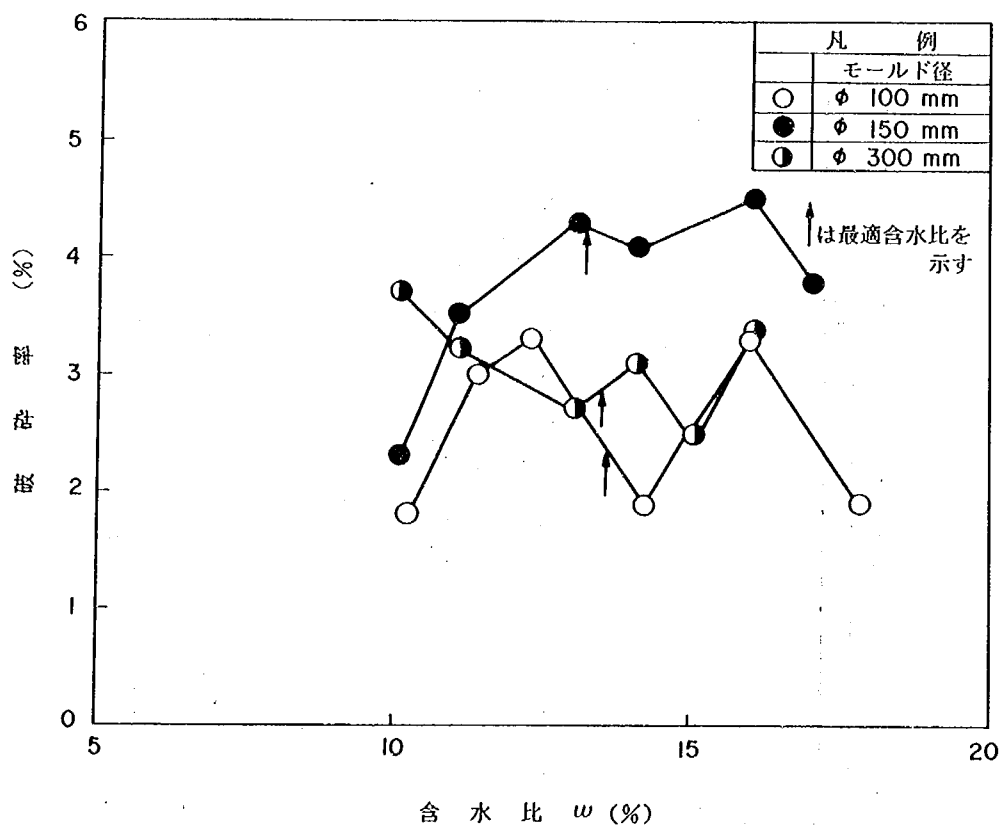


図-4.20 破碎率と含水比の関係 (D_{max} 9.52mm)

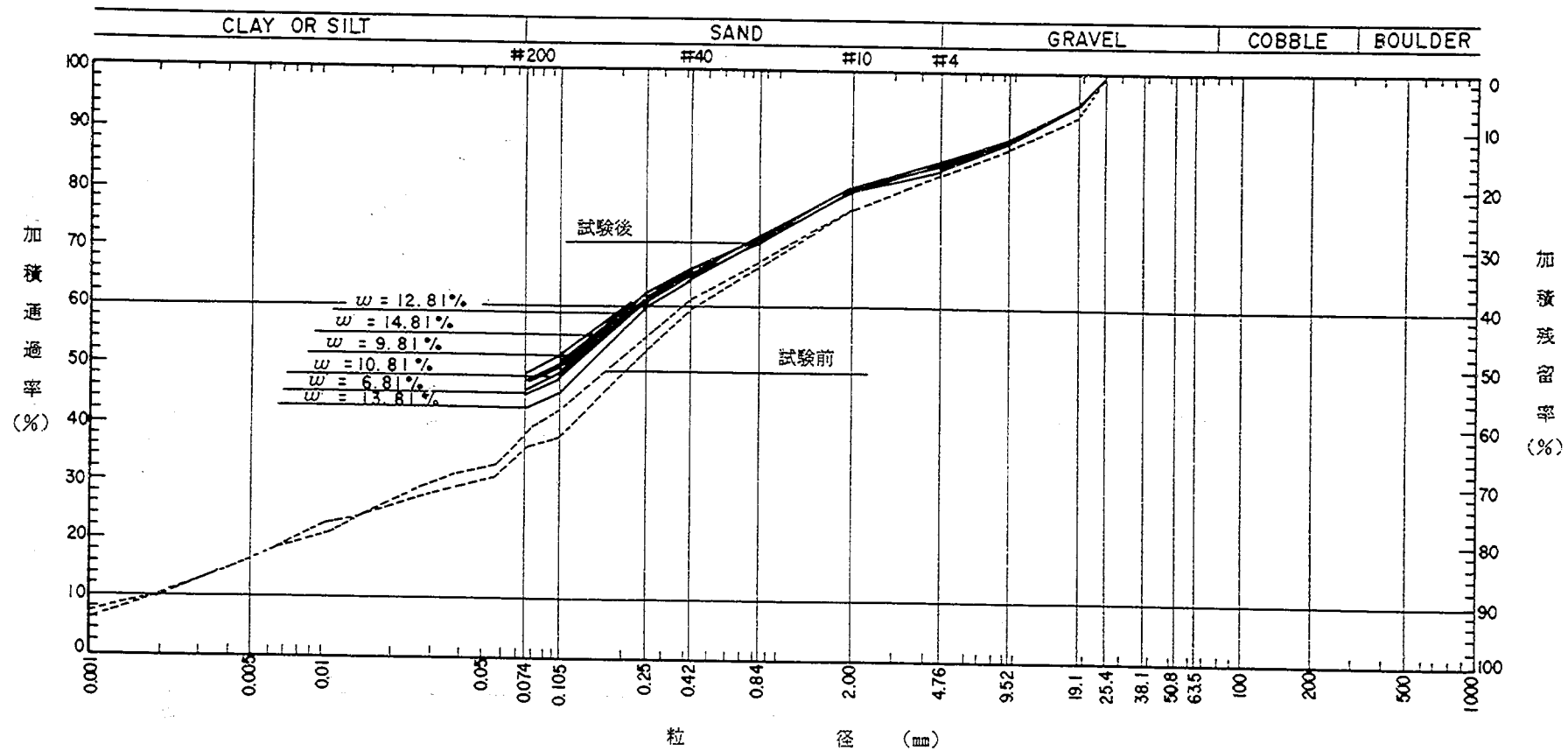


図-4.21 締固め試験前後の粒度 ($D_{max} 25.4\text{mm}$, $\phi 150\text{mm}$)

破碎率と含水比の関係を試料ごとに整理したものを図－4.18～図－4.20に、また破碎率の平均値が最も大きいケース（Dmax 25.4mm， ϕ 150mm）の試験前後の粒度分布を図－4.21に示す。これらの図より以下のことがいえる。

- ① 破碎率は1.7～5.5％程度であり、概して小さい。
- ② 含水比と破碎率の間には、特定の傾向がみられない。特に、最適含水比をはさんで乾燥側と湿潤側での破碎状況の差はみられなかった。
- ③ モールド径の違いによる破碎率の差は明確ではない。
- ④ 試料の違いによる破碎率の差は明確ではない。
- ⑤ 粒度ごとに破碎の状況を細かく見ると、4.76mm以下の部分では粒子破碎がややみられるが、それ以上の部分ではほとんどみられない。これは、4.76mm以下の部分は強風化のc₁材が主体であり、それ以上の部分は比較的硬いc₂材が主体であったことが挙げられる。

以上より、今回の試料は締固めにより大きな粒度の変化はなく、ましてや最大粒径の変化がないことがわかった。このことから、以下に続く透水試験用の供試体作製に際しても締固めによる試料の粒度変化は小さいであろうと推察される。

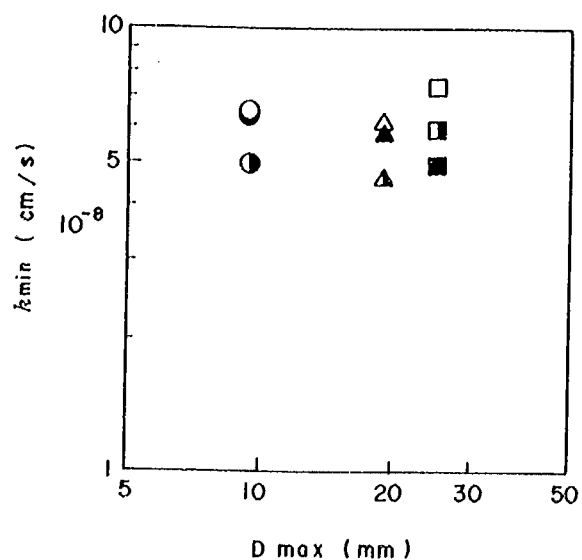
4.1.3 透水試験結果

(1) 試験結果

透水試験結果は締固め試験結果と同じ図－4.1～図－4.6および表－4.2に示す。なお、 $\rho_d \sim w$ 曲線と $k \sim w$ 曲線においてデータポイントの含水比が一致していないのは、前述した通り、締固め試験により作製された供試体の大部分は破碎状況確認のための粒度試験に用いたため、透水試験用に新たに供試体を作製したことによる。透水試験用供試体を作製した際の締固め曲線は4.1.1に示したそれにほぼ一致していた。図－4.22には試料の最大粒径と最小透水係数の関係を、図－4.23には試料の最大粒径と最適含水比での透水係数の関係を、図－4.24には試料の最大粒径と最小透水係数発生点での含水比の関係を示す。また図－4.25にはモールドの内径 ϕ の試料の最大粒径 Dmax に対する比 $\phi/Dmax$ と最小透水係数の関係を、図－4.26には

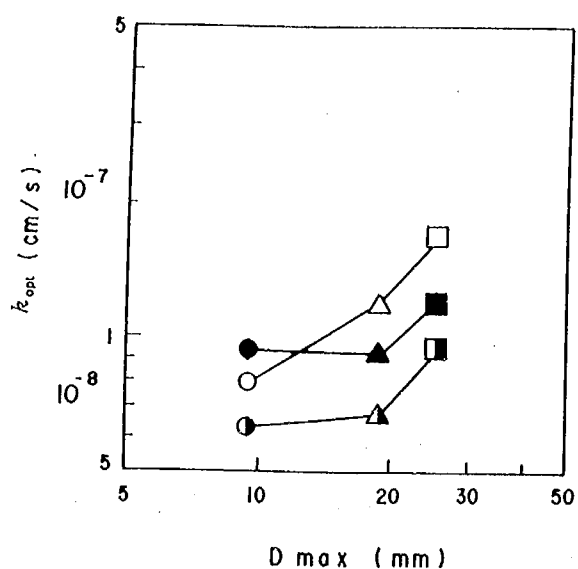
表－4.2 透水試験結果

試 験 条 件		試験試料の最大粒径 (Dmax)		
モールド径	項 目	9.52mm	19.1mm	25.4mm
ϕ 100mm	最小透水係数 k_{min} (cm/s)	6.6×10^{-8}	6.5×10^{-8}	7.5×10^{-8}
	最小透水係数での含水比 (%)	14.7	14.2	13.8
ϕ 150mm	最小透水係数 k_{min} (cm/s)	6.3×10^{-8}	5.9×10^{-8}	5.0×10^{-8}
	最小透水係数での含水比 (%)	15.0	14.4	13.8
ϕ 300mm	最小透水係数 k_{min} (cm/s)	5.0×10^{-8}	4.7×10^{-8}	6.0×10^{-8}
	最小透水係数での含水比 (%)	14.8	14.5	14.1



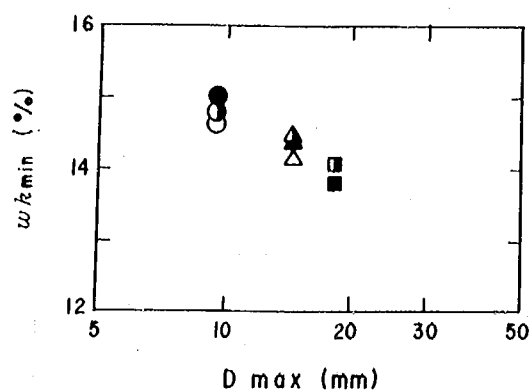
凡 例			
モールド径 試料	φ100 mm	φ150 mm	φ300 mm
D max 9.52 mm	○	●	◐
D max 19.1 mm	△	▲	▴
D max 25.4 mm	□	■	▣

図-4.22 最大粒径と最小透水係数の関係



凡 例			
モールド径 試料	φ100 mm	φ150 mm	φ300 mm
Dmax 9.52 mm	○	●	◐
Dmax 19.1 mm	△	▲	▴
Dmax 25.4 mm	□	■	▣

図-4.23 試料の最大粒径と最適含水比での透水係数の関係



凡 例			
モールド径 試料	φ100 mm	φ150 mm	φ300 mm
D max 9.52 mm	○	●	◐
D max 19.1 mm	△	▲	▴
D max 25.4 mm	□	■	▣

図-4.24 最大粒径と最小透水係数発生地点での含水比の関係

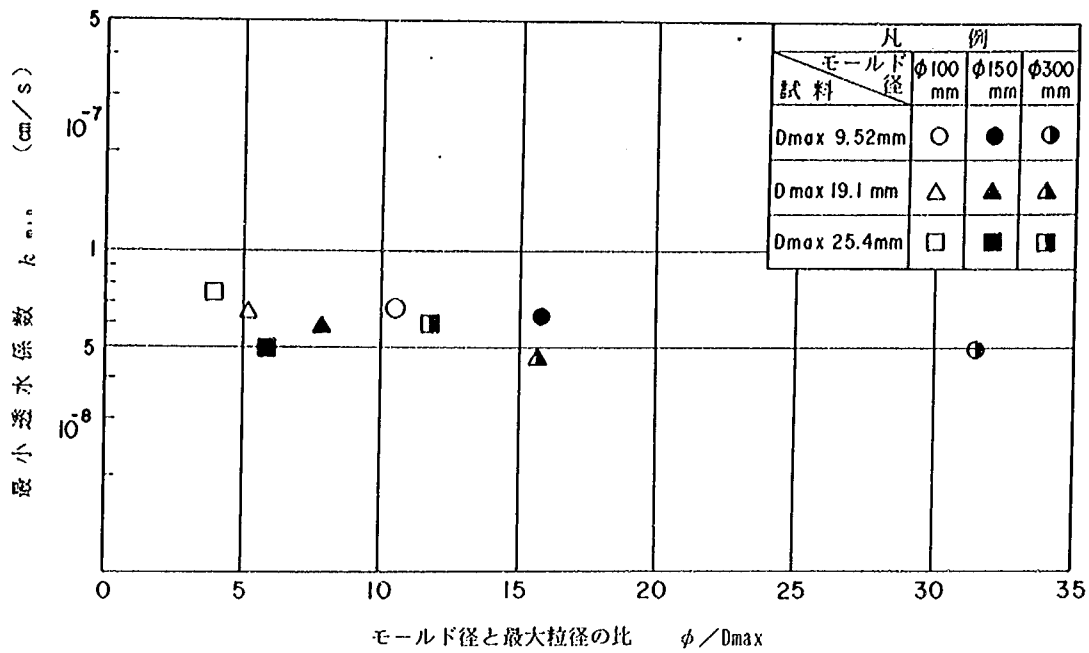


図-4.25 モールドの内径φの最大粒径Dmax に対する比と最小透水係数の関係

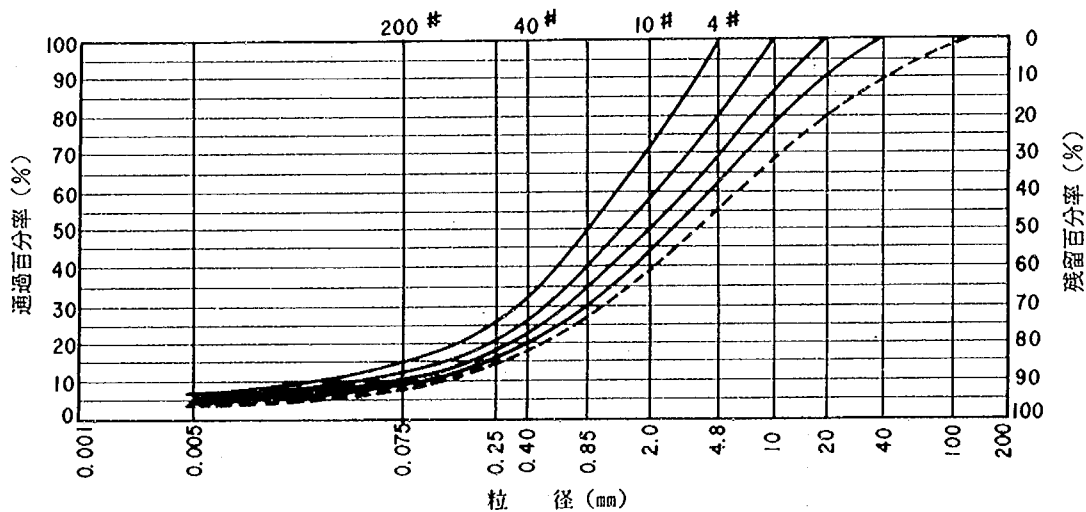


図-4.26 御母衣ダム土質材料の剪頭粒度材粒度曲線⁷⁾

φ/Dmax と最小透水係数発生点での含水比との関係を示す。これらの図表から以下のことが言える。

- ① 同じ試料であれば、モールド径によらずほぼ同様な透水係数－含水比曲線が得られた。
- ② 三国は⁷⁾ 今回の試験と同様に図-4.26に粒度分布を示す御母衣ダム土質材料の剪頭粒度材を用いて締固め透水試験を行い、図-4.27に示すよう試料の最大粒径が大きい程、最適含水比での透水係数 $k_{s, \phi}$ が大きくなることを示している。本試験でも図-4.23に示すようにほぼ同様な傾向を示した。
- ③ 最小透水係数は $6 \sim 8 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ の範囲にあり、試料の最大粒径およびモールド径に関

わらずほぼ同程度の値となった。

- ④ 試料の最大粒径が大きくなると、最小透水係数発生点での含水比が若干小さくなる傾向にある。しかし、締固め試験における最適含水比の変化ほど顕著ではない（4.1.1, (1), ②参照）。

以上の結果より、フィルダムの土質材料のように粒度分布範囲が広く、かつ細粒分をある程度含む試料であれば、突固めによる締固め試験で許容している最大粒径の範囲内（ ϕ/D_{max} が4～5程度まで）において透水試験を実施すれば十分な精度の試験結果が得られることが判明した。

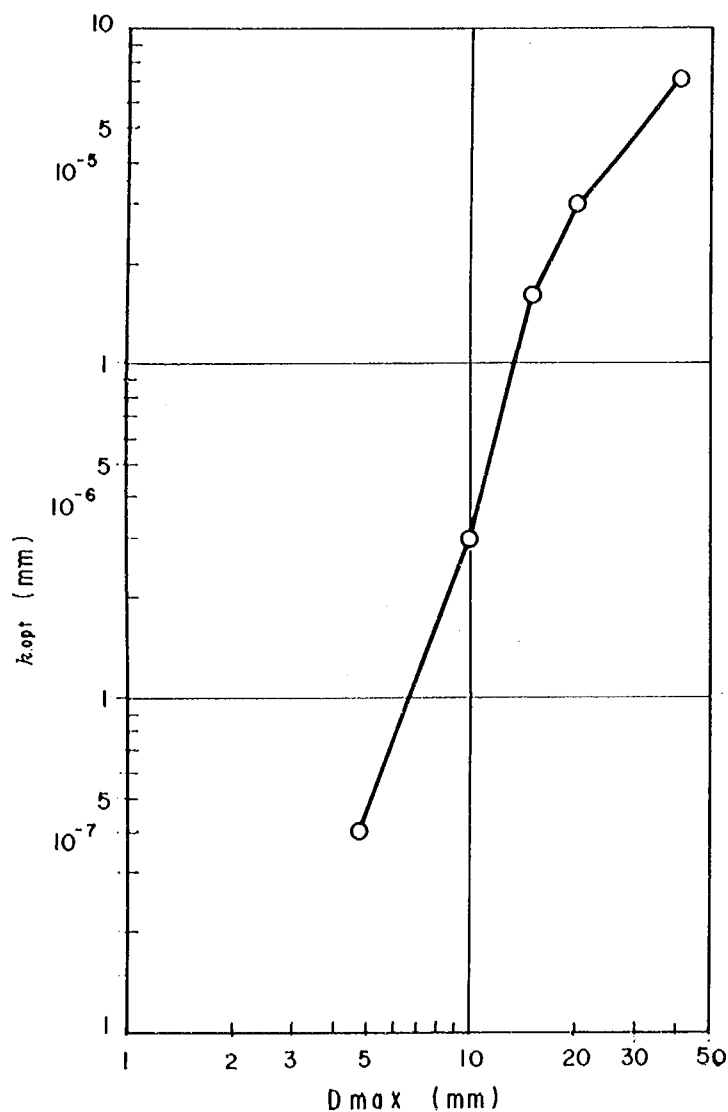
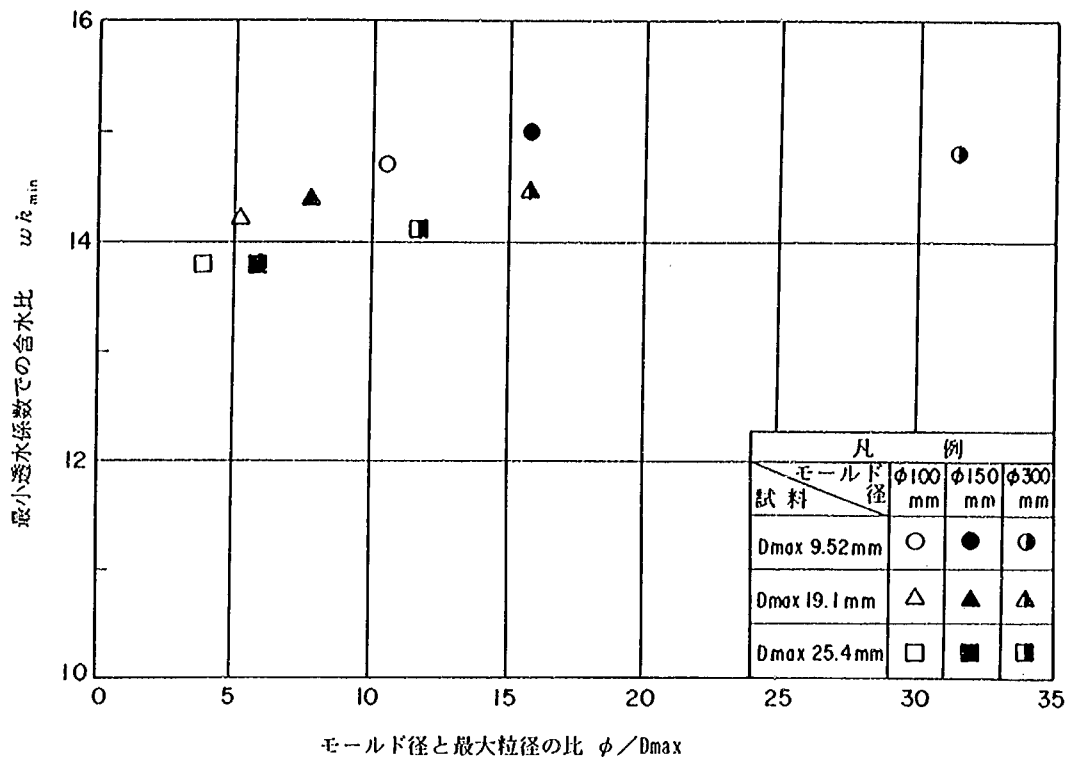


図-4.27 試料の最大粒径と最適含水比での透水係数の関係（御母衣ダム）



図－4.28 モールド内径φの最大粒径Dmax に対する比と最小透水係数発生地点での含水比の関係

(2) 礫率補正に関する考察

4.1.1の(2)の結果により、今回使用した試料については Walker, Holtz の方法による礫補正が十分に成り立つことが判明した。そこで以下の仮定のもとに透水係数についても礫率補正を行い、土部分のみの透水係数を算出してみる。具体的手順は以下に示す通りである。

透水性に対する礫の影響の補正は密度の場合と同様、礫間の空隙は全て土が満たし、礫中の空隙は全て水で満たされていると想定し、かつ4.76mm以上の礫は不透水と仮定する。4.76mm以上の礫の絶乾比重を G_s 、モールド中の礫の乾燥質量を m_{s2} とすると、モールド中の礫の体積および砂礫の占める平均的面積は次式で与えられる。

$$V_2 = m_{s2} / (G_s \cdot \rho_w) \quad (4.7)$$

$$A_2 = V_2 / \ell \quad (4.8)$$

ここに、 V_2 ：モールド中の礫の体積、

A_2 ：モールドの断面において礫の締める平均面積、

ℓ ：供試体の高さ。

次に、水は土部分のみを流れるとすると補正透水性係数を以下のように想定できる。

$$k_1 = k \frac{A_0}{A_0 - A_2} \quad (4.9)$$

ここに、 k_1 ：土部分の透水係数、

k : 土と礫の混合物の透水係数,

A_0 : モールド断面積。

また、土部分の含水比は式(4.6)による。

礫補正より求まった土部分の透水係数を、締固め試験結果に対する礫補正結果と同じく図-4.10~図-4.15に示す。これらの図よりいずれの試験ケースにおいても土部分についてはほぼ同様な透水係数-含水比曲線が得られ、最小透水係数は $5 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 程度、最小透水係数発生点での含水比は13%程度であることがわかる。

以上より、漢那ダムコア材のように粒度分布範囲が広く、細粒分をある程度含み、かつ密度に関する礫補正が十分に成り立つほど礫率が小さければ、透水係数についても我々の提案した礫補正が成り立つことがわかる。ただし、透水係数に関する礫補正が成り立つ最大粒径、礫率の範囲等については、今回の結果のみからは明確にできない。

4.1.4 まとめ

フィルダムの土質材料をオーバーサイズカットして調整した $D_{\max}$ が9.52mm~25.4mm程度の試料に対して、内径が $\phi 100 \sim \phi 300$ のモールドを用いて締固めおよび透水試験を行った場合、 $\phi / D_{\max}$ の組み合わせによって締固めおよび透水特性に違いが生じるかどうかの検証を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① JIS の基準によると、締固め試験においてモールド内径 ϕ の $1/5 \sim 1/4$ 程度の最大粒径 $D_{\max}$ を持つ試料を使用することを許容しているが、今回の試験結果でも許容限界点付近において十分な精度で締固め特性を把握することができた。
- ② 今回用いた試料であるフィルダムコア材のように粒度範囲が広く、細粒分をある程度含む土の場合には、透水試験についても締固め試験と同様に最大粒径とモールド内径の比が $1/4 \sim 1/5$ 程度までであれば、十分な精度の試験結果が得られることがわかった。この原因としては、粒度範囲が広いため供試体の全体積に締める礫分の割合が小さく、最大粒径付近の粒径を持つ粒子がモールド内壁面に接触したり、ある部分に集中して透水係数を実際よりも大きく評価するような大きな間隙ができにくいこと、0.074mm以下細粒分をある程度含んでいるため仮に大きな間隙が発生しても細粒分が間隙を塞ぐ役割を果たしたことが考えられる。

また、ある程度の粒径範囲を有するものの0.074mm以下の細粒分を含まない試料についても許容最大粒径確認試験を行った結果、最大粒径とモールドの比が $1/4 \sim 1/5$ 程度までであれば、十分な精度の透水試験結果が得られることがわかった。それについては参考試料-1で述べる。

- ③ Walker, Holtz の方法、高田らにより提案された剪頭粒度試料法により漢那ダムコア材の原粒度 ($D_{\max} 100\text{mm}$) 材を1 Ec のエネルギーで締固めた場合の乾燥密度を推定した。その

結果、それぞれ 2.076 g/cm^3 、 2.056 g/cm^3 とほぼ同程度の値を得た。

- ④ 密度で用いられている礫補正 (Walker, Holtz の方法) の考え方を透水性にまで拡張した。
- ⑤ 今回使用した試料については密度のみでなく、透水係数についても礫補正が成り立つことがわかった。

4.2 難透水薄膜の形成による影響確認試験

4.2.1 締固め試験結果

(1) 試験結果

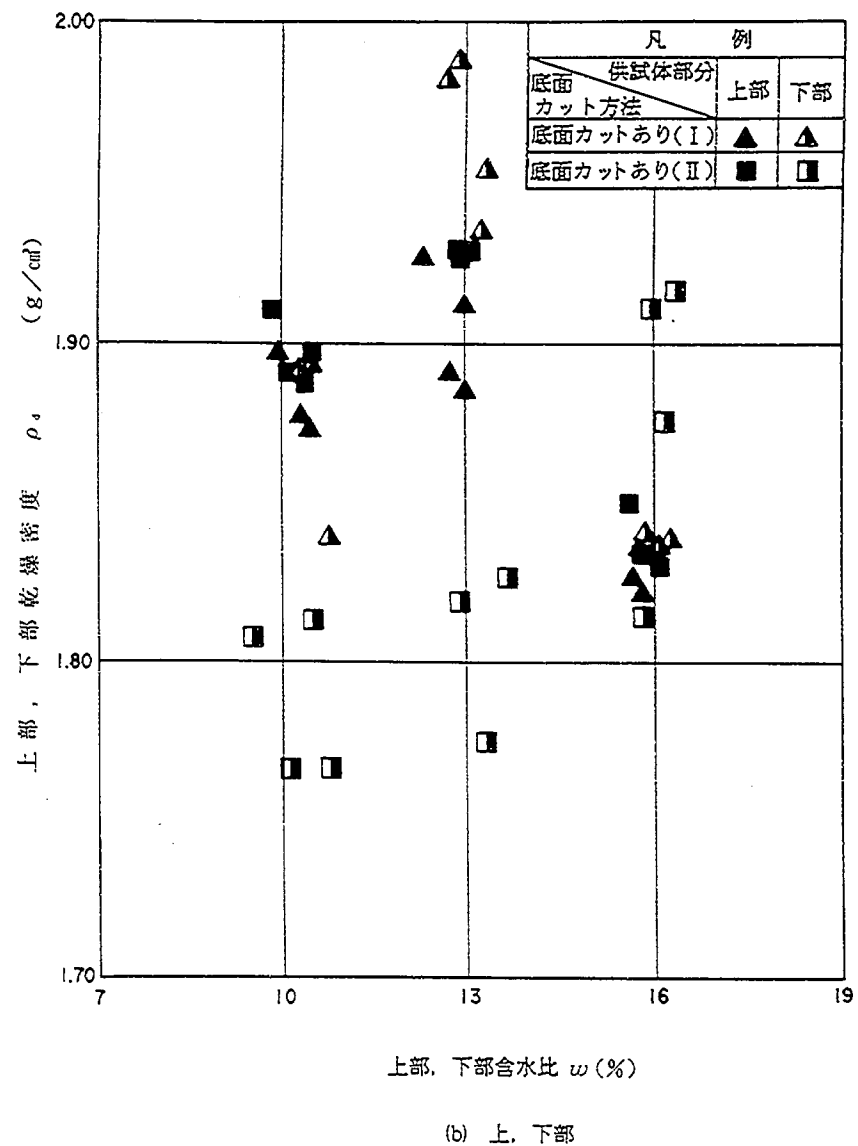
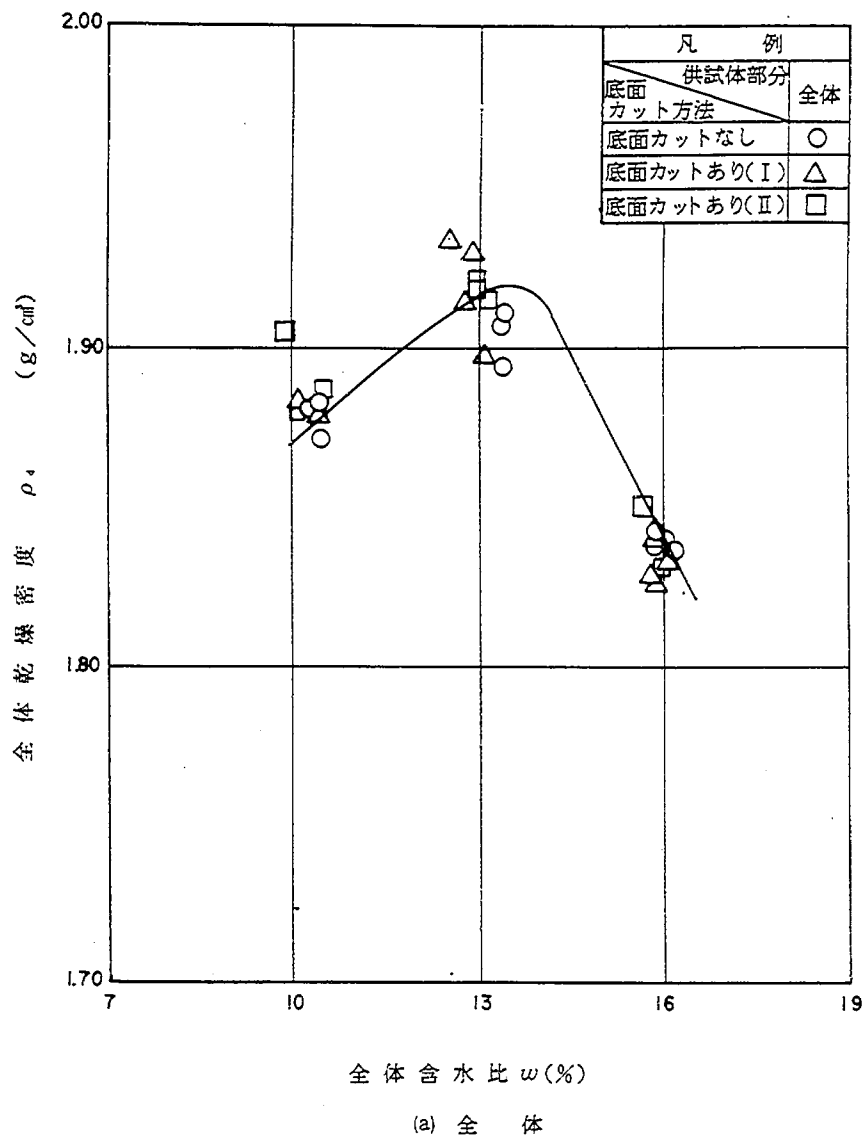
密度試験の結果を図-4.29に示す。図-4.29には全体乾燥密度と全体含水比の関係、上部、下部乾燥密度と上部、下部含水比の関係をならべて示している。ただし、底面カットあり (Ⅱ) の下部の乾燥密度、含水比についてはその層厚が1 cm程度と薄いためその測定精度は低い。また、図中の曲線は許容最大粒径確認試験の際に得られた $D_{\max} 9.52 \text{ mm}$ の試料を標準モールド中で締固めた場合の締固め曲線である。図-4.30は全体含水比と上部含水比の関係を示したものである。これらの図より以下のことがいえる。

- ① 図-4.29より本試験で得られたデータは、許容最大粒径確認試験で得られた締固め曲線によく一致しており、本試験の供試体は許容最大粒径確認試験時に作製した供試体と同等の仕上がりであることがわかる。
- ② 全体、上部乾燥密度と全体、上部含水比の関係は、底面カットなし、ありに関わらずほぼ同じ値を示し、ケースによる差は見られない。
- ③ 底面カットあり (Ⅰ) では、最適含水比付近 (含水比13%程度) での下部乾燥密度が全体、上部乾燥密度より大きい。
- ④ 底面カットあり (Ⅱ) では、含水比10、13%での下部乾燥密度が全体、上部乾燥密度より大きく、16%では小さい。この原因は、下部の密度を供試体の底部1 cm程度を攪乱除去して測定しているため試料が少なく、試験結果のばらつきが大きかったことによると考えられる。
- ⑤ 図-4.30より全含水比と上部含水比はほとんど同じ値を示し、含水比のばらつきは小さいことがわかる。

(2) 供試体内の密度分布に関する考察

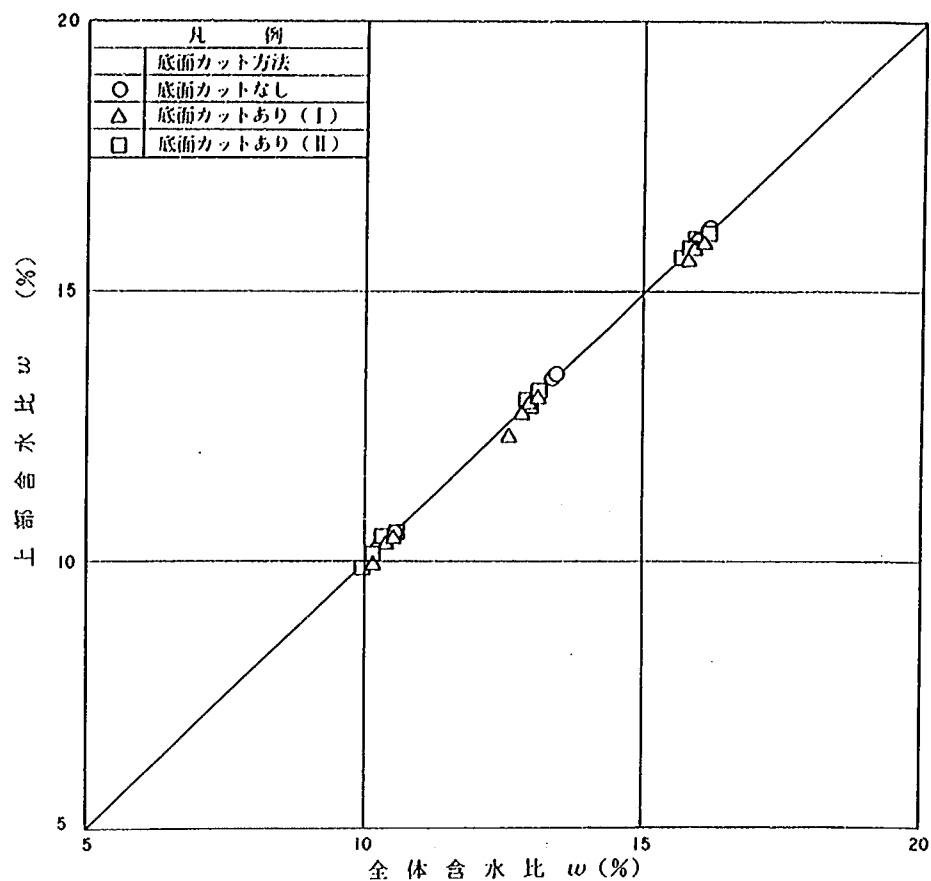
(1)の③のような現象が生ずる原因は、標準モールドで締固めを行う場合、3層に分けて突固めをおこなうため積層効果により下位の層により大きなエネルギーが加わり、密度の大きい (よく締まる) ゾーンが形成されるためではないかと考え、それを検証するために試験を行った。試験の手順は以下の通りである。

- 1) 図-4.31に示すように乾燥密度と含水比の分布を測定するために透水試験用モールドと



*) 注) 図中の曲線は許容最大粒径確認試験の際に得られた $D_{max} 9.52\text{mm}$ の試料を標準モールド中で 締めつけた場合の締めめ曲線である。

図-4.29 乾燥密度と含水比の関係



注) 底面カットなしについては上部含水比=全体含水比

図-4.30 全体含水比と上部含水比の関係

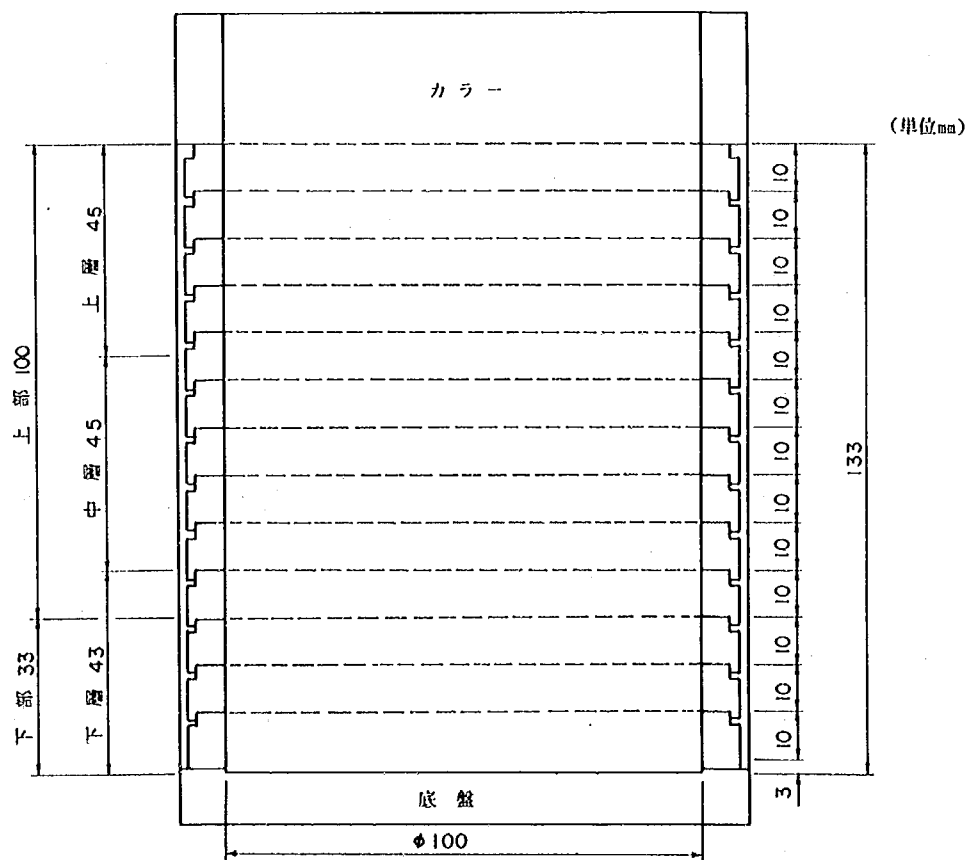


図-4.31 13層分割可能モールド側面図

底盤を固定する際に使用する高さ10mmの下部プラグを13個重ねて内径100mm、高さ133mmのモールドを作成する。

2) 試料の含水比を10%, 13% (最適含水比付近), 16%に調整し, それぞれ1Ecのエネルギーで締固めた後, 層ごとの乾燥密度および含水比を測定する。

得られた結果を図-4.32~図-4.39で示す。図-4.32, 34, 36には, それぞれ含水比が10%, 13%, 16%の供試体の乾燥密度分布を, 図-4.33, 35, 37にはそれぞれの含水比分布を示している。これらの図より以下のことがいえる。

- ① 1cm厚の層毎の乾燥密度は, かなりばらついている。これは, 試料の最大粒径が9.52mmと層厚にほぼ等しいのが大きな原因であると考ええる。
- ② 含水比は13%の底面カットあり (I) の下部層に相当する部分 (下部3.3cm分) の乾燥密度は, 図-4.34に示すように全体乾燥密度よりもやや大きく図-4.29と同様な傾向を示している。
- ③ 含水比16%の下部層相当部乾燥密度は図-4.36に示すように全体乾燥密度と同程度の値であり, 図-4.29と同様な傾向を示している。
- ④ 含水比10%の下部層相当部乾燥密度は図-4.32に示すように全体乾燥密度よりもやや大きく, 図-4.29と異なった傾向を示している。
- ⑤ 一方, まとめ方の観点を変え, 締固めが3層に分けて実施されていることを考慮して底面からそれぞれ下層 (4.3cm厚), 中層 (4.5cm厚), 上層 (4.5cm厚) の乾燥密度を算出した。その結果, 上記の②~④のように下部と全体という乾燥密度の比較では差があった $w=10\%$, 13%のケース上, 中, 下層の乾燥密度の差がみられなかったり, 下部と全体では乾燥密度の差がなかった $w=16\%$ のケースでは中層の乾燥密度は, 上下層のそれに比べるとやや大きくなっている。つまり, 密度分布を比較する対象層の厚さが1cm (1層) でも変わると得られる密度分布も大きく変化するということである。このことは, ①に示したように, 1cm層厚ごとの乾燥密度の分布が大きくばらついていることから容易に推測がつく。
- ⑥ 含水比の分布は, 供試体によらずほぼ一定である。

以上の結果を総合すると, 通常 JIS の基準に従って実施する締固め方法により作製された供試体内の乾燥密度分布は比較的ばらつきが大きく, 底面カットあり (I) の $w=13\%$ のケースのみ積層効果があり, 下部の乾燥密度が全体乾燥密度に比べて大きくなるということはなさそうである。

4.2.2 透水試験結果

図-4.38に透水試験の対象となった部分の乾燥密度および透水係数と含水比の関係を示す。この図より以下のことがいえる。

- ① 得られた透水係数には多少のばらつきがあるが底面カットなしのケースで供試体底面に難

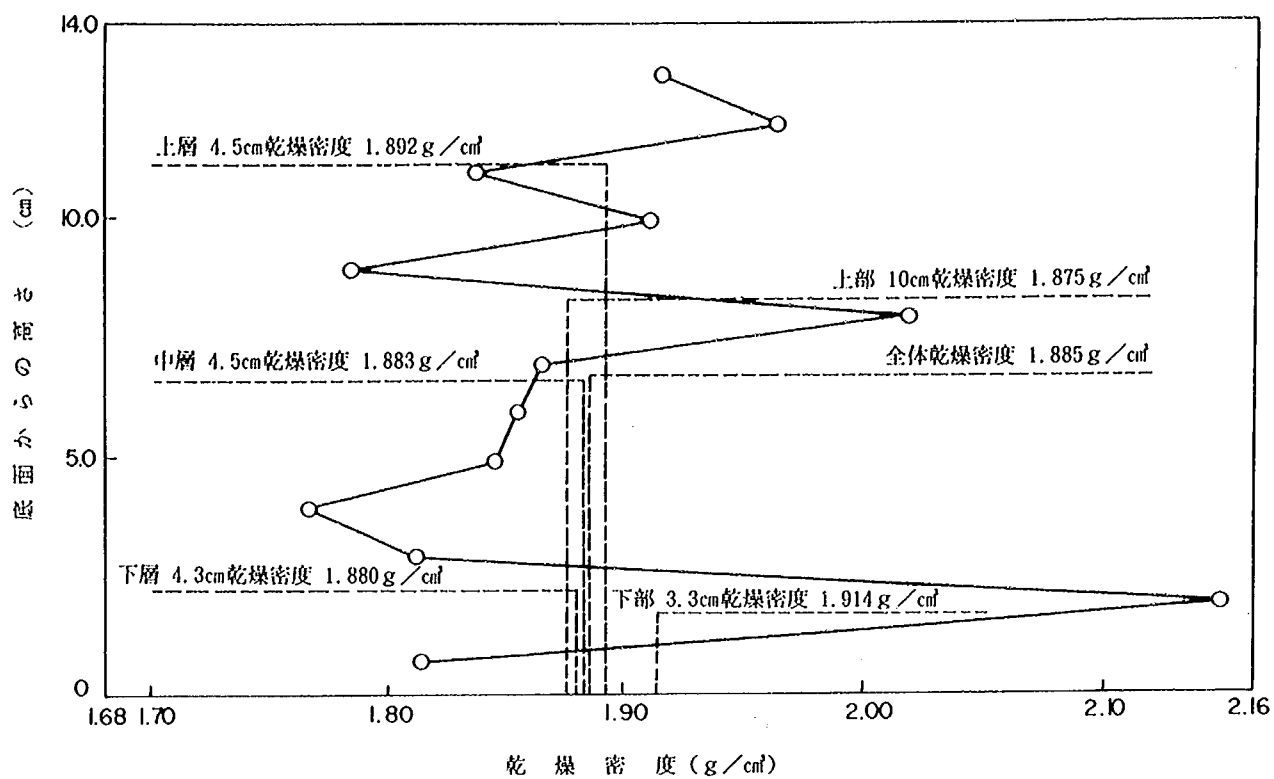


圖-4.32 乾燥密度分布 (含水比10%)

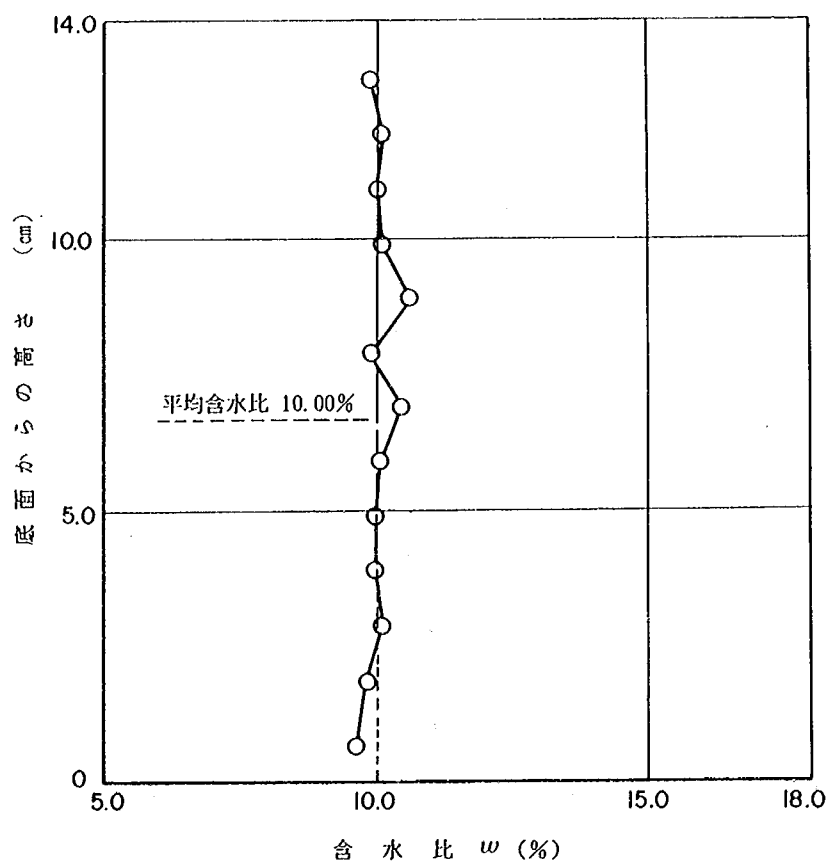


圖-4.33 含水比分布 (含水比10%)

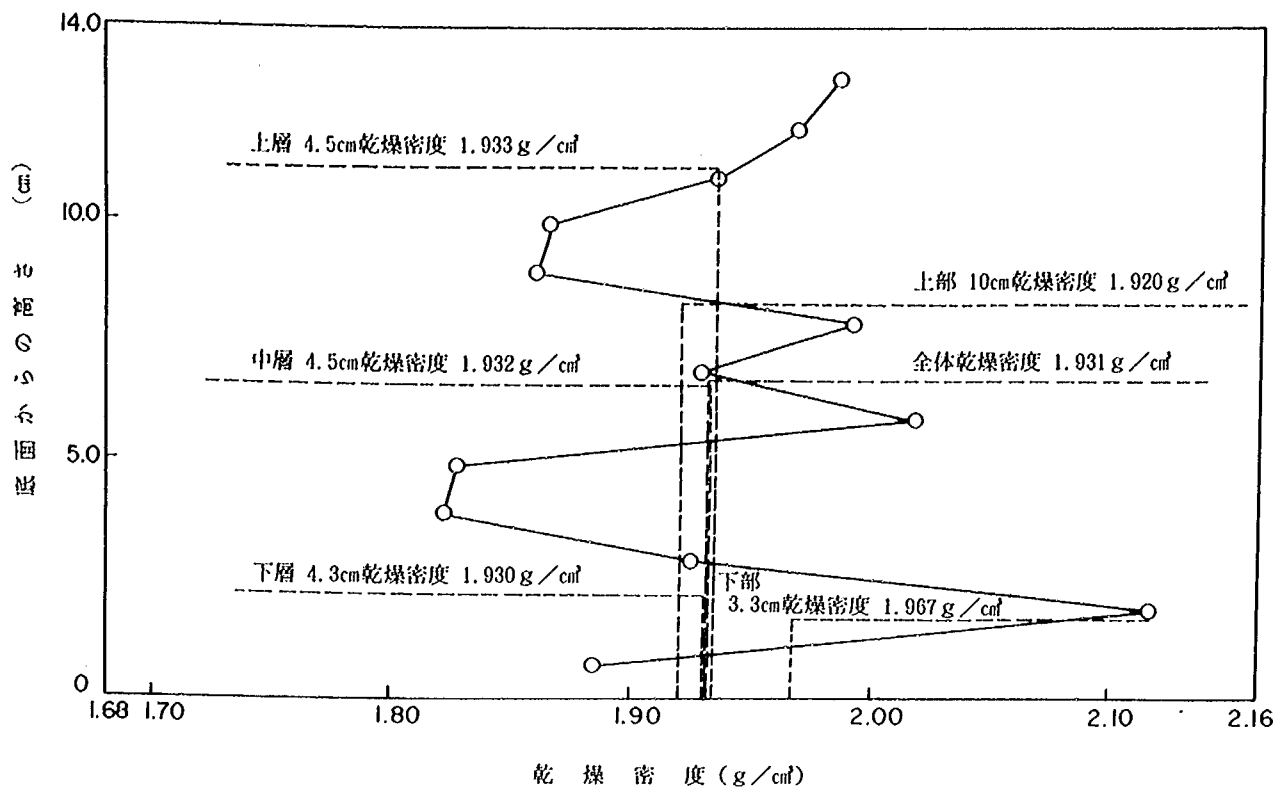


図-4.34 乾燥密度分布 (含水比13%)

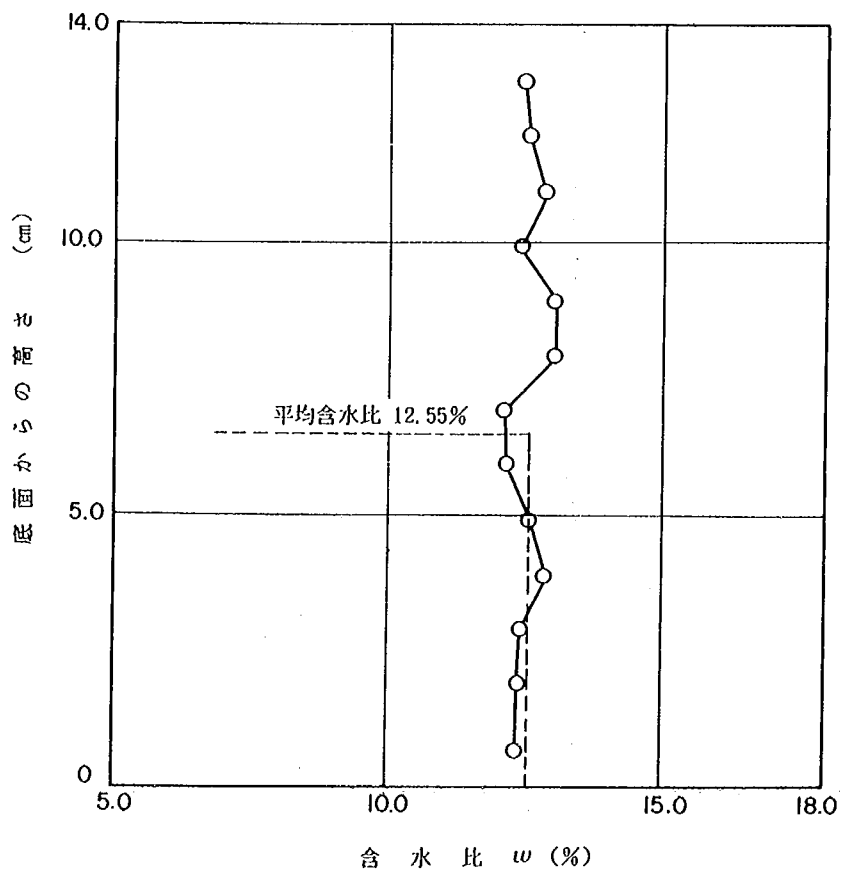


図-4.35 含水比分布 (含水比13%)

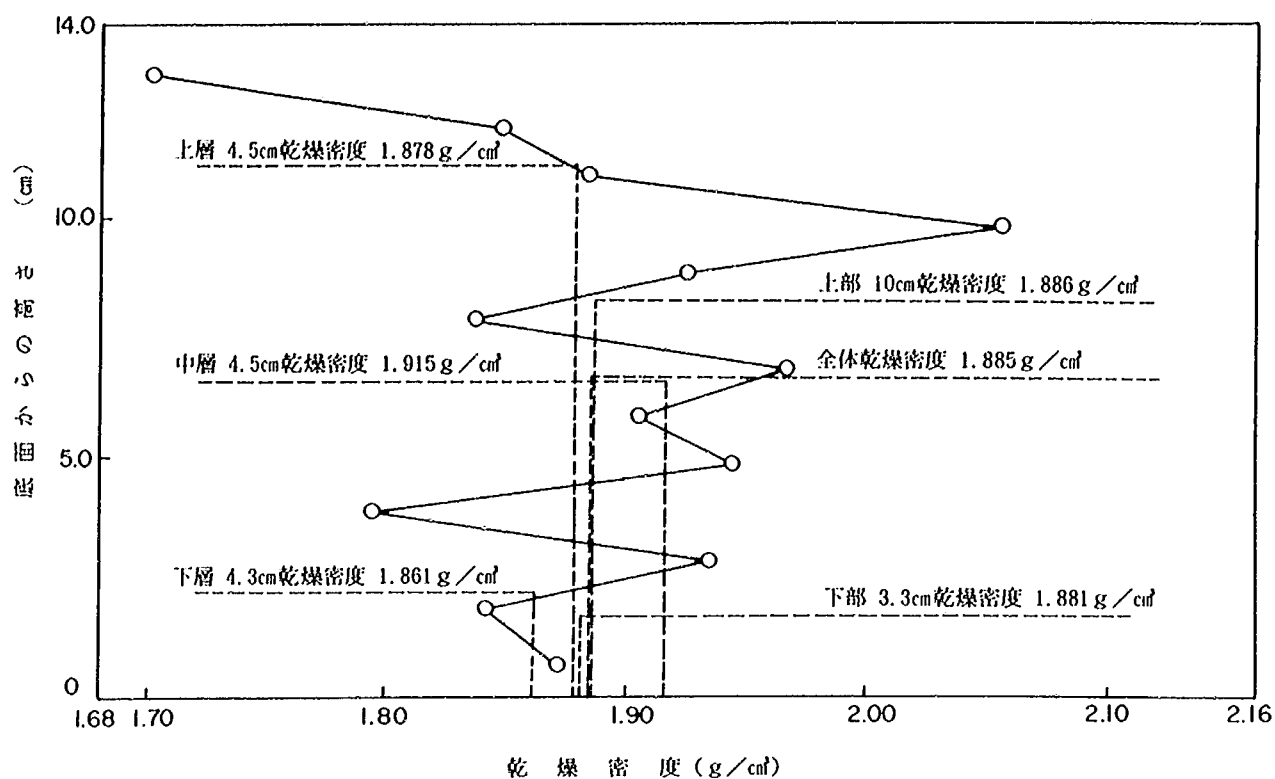


圖-4.36 乾燥密度分布 (含水比16%)

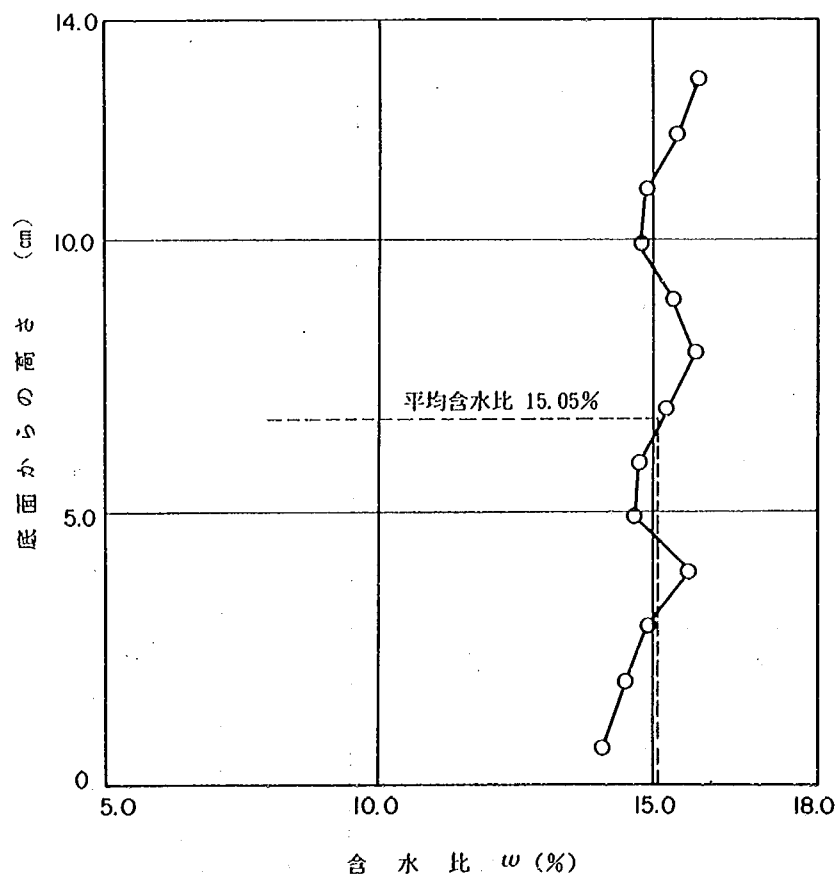


圖-4.37 含水比分布 (含水比16%)

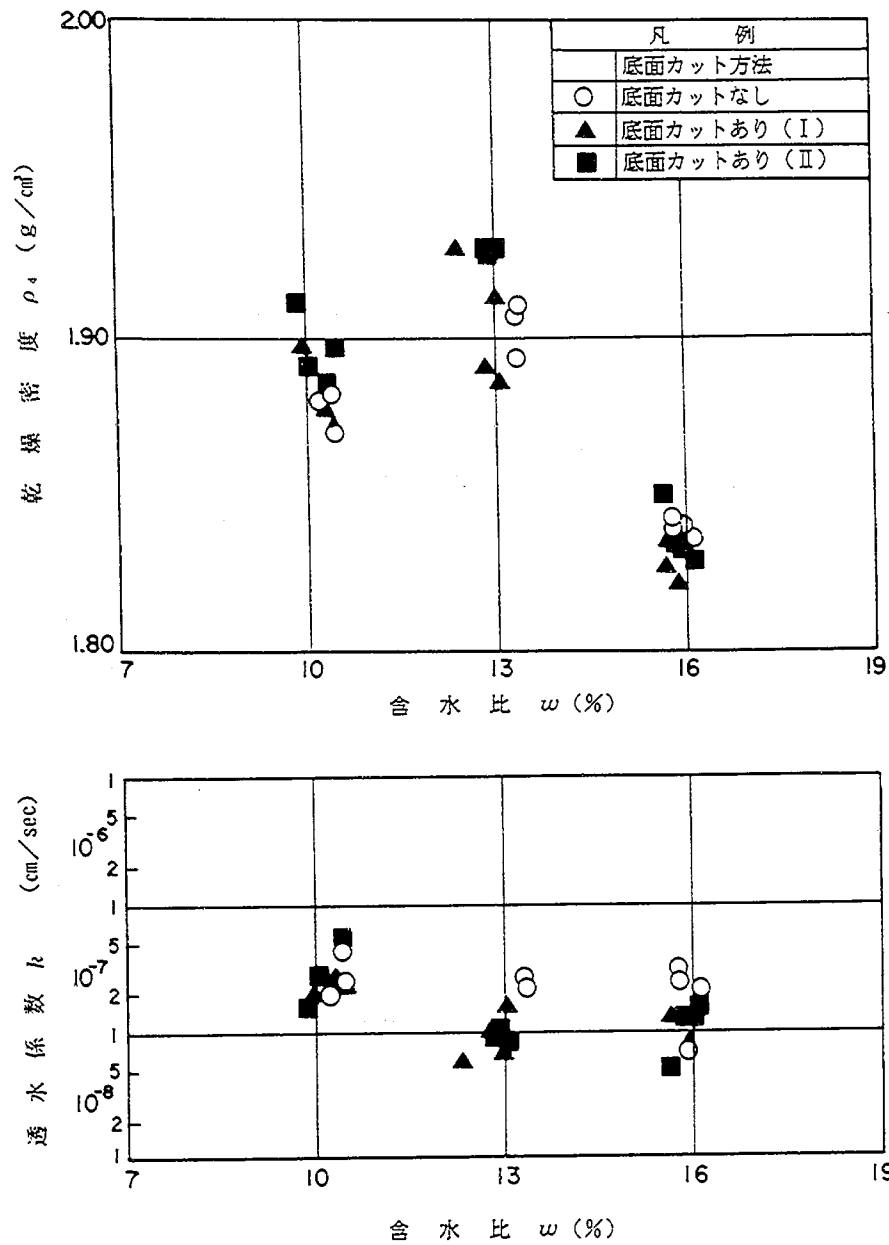


図-4.38 透水試験の対象となった部分の乾燥密度，透水係数と含水比の関係

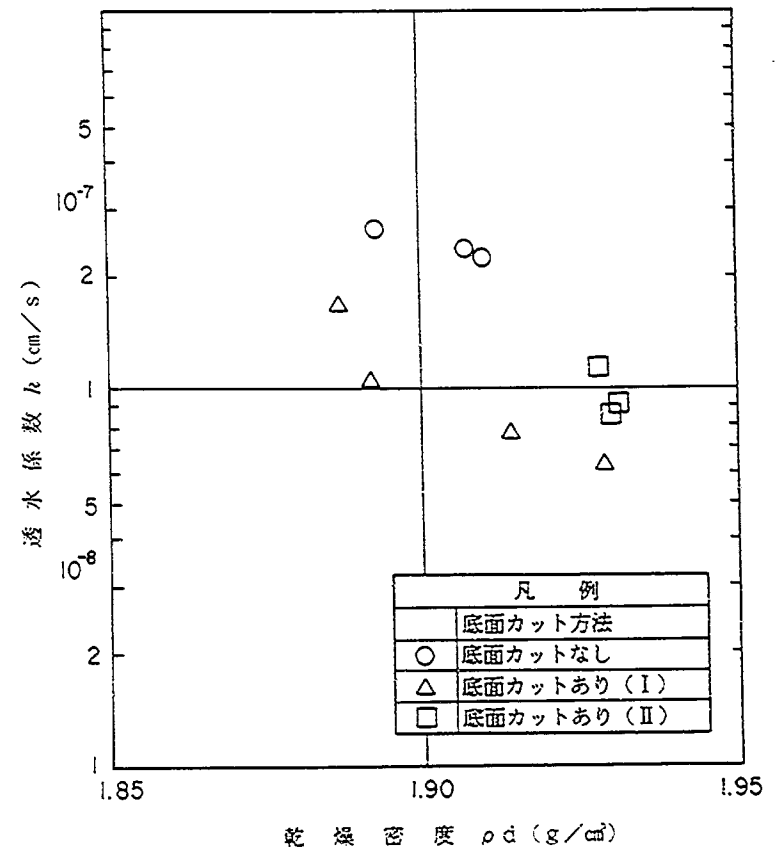


図-4.39 乾燥密度と透水係数の関係（最適含水比付近）

透水の薄膜が形成され底面をカットした場合に比較して得られる透水性が小さいという傾向はみられない。

- ② 最適含水比付近で底面カットなしの場合の透水係数が他のケースのそれに比較して若干大きい傾向にある。そこで、乾燥密度と透水係数の関係を調べたところ、図－4.39に示すように全体としては乾燥密度が大きい程透水係数が小さくなる傾向を示した。そのことから、底面カットなしの場合の供試体乾燥密度が他のケースのそれよりも小さいことが、透水係数が他のケースより大きく出た原因であると推察できる。

以上より、締固め試験により作製された供試体を透水試験に流用する際に、供試体底面に難透水の薄膜は形成されないか、あるいは形成されたとしても透水試験の結果に大きな影響を与えないことがわかった。

4.2.3 まとめ

締固め試験により作製された供試体を透水試験に流用する際に、締固め時に供試体底面に細粒分が集中することにより難透水の薄膜を形成し、透水係数を実際よりも小さく評価する恐れがある。こうした現象がフィルダムの土質材料の締固め透水試験において発生するのか、発生した際にどの程度の影響を透水試験結果に与えるのかの検証実験を行った。その結果締固め試験により作製された供試体を透水試験に流用する際に、供試体底面に難透水の薄膜は形成されないか、あるいは形成されたとしても透水試験の結果に大きな影響を与えないことが明らかになった。

5. ま と め

フィルダムの土質材料に対して透水試験を行う場合の供試体作製方法に関する以下の2つの問題点について検証実験を行った。

- ① 締固め試験により作製された供試体を透水試験に用いると、JISで規定されている試料の許容最大粒径の条件を締固め試験においては満足するが、透水試験においては満足しない場合がある。
- ② 締固めて作製された供試体はその底面に細粒分が集中して難透水の薄膜を形成し、結果として透水係数を実際よりも小さく評価してしまう恐れがある。

実験結果を上記の2つの問題点に即してまとめると以下の通りである。

- 1) JISの基準によると、締固め試験においてモールド内径 ϕ の $1/5 \sim 1/4$ 程度までの最大粒径 D_{max} を持つ試料を使用することを許容しているが、今回の試験結果でも許容限界付近において十分な精度で締固め特性を把握することができた。また、今回の試料であるフィダムコア材のように粒度範囲が広く、細粒分をある程度含む土の場合、透水試験についても締固め試験と同様に最大粒径とモールド内径の比が $1/5 \sim 1/4$ 程度までであれば、十分な精度の試験結果が得られることがわかった。この原因としては、試料の粒度範囲が広いため供試体全体積に占める礫分の割合が小さく、最大粒径付近の粒径を持つ粒子がモールド内壁面に接触したり、ある部分に集中して透水係数を実際よりも大きく評価するような大きな間隙ができにくいこと、 0.074mm 以下の細粒分をある程度含んでいるため仮に大きな間隙が発生しても細粒分が間隙を塞ぐ役割を果たしたことが考えられる。
- 2) フィルダムの土質材料を締固めて作製した供試体を透水試験に流用する際に、供試体底面に難透水の薄膜は形成されないか、あるいは形成されたとしても透水試験結果に大きい影響を与えないことがわかった。

今回の実験から得られたその他の知見についてもまとめておく。

- 1) 今回使用したフィルダムコア材の剪頭粒度試料については、Walker, Holtzの方法による密度の礫補正が成り立つことがわかった。
- 2) Walker, Holtzの方法、高田らにより提案された剪頭粒度試料法により、今回試料として用いた漢那ダムコア材の原粒度 ($D_{max} = 100\text{mm}$) 材を 1Ec のエネルギーで締固めた場合の乾燥密度を推定した。その結果、それぞれ 2.076 g/cm^3 , 2.056 g/cm^3 とほぼ同程度の値を得た。
- 3) 透水係数に関する礫補正の考え方を示した。
- 4) 今回使用した試料については、上記3)の透水係数に関する礫補正が成立することがわかった。

6. お わ り に

現在、土質試験に関する現行 JIS の改訂作業が精力的に進められている。その中で、突固めによる締固め試験用の試料の許容最大粒径がモールド内径 $\phi 100\text{mm}$ の場合は 19mm 、 150mm の場合は 37.5mm と改訂される予定で、我々の研究開始時の許容最大粒径条件とやや異なっている。しかし、その差が我々の研究に関して決して問題になるようなものではないことは本文の内容からも明らかである。

試験の遂行にあたり、沖縄総合事務局北部ダム事務所の関係各位には多大なる御協力を賜った。また、本文をまとめるに際し、土質試験法（第3回改訂版）編集委員会、第5編「圧密・透水試験」解説執筆委員会の高田直俊委員長（大阪市立大学工学部土木工学科教授）、西垣誠委員（岡山大学工学部土木工学科助教授）はじめ委員各位には貴重な御助言を賜った。末筆ながら記して謝意を表する次第である。

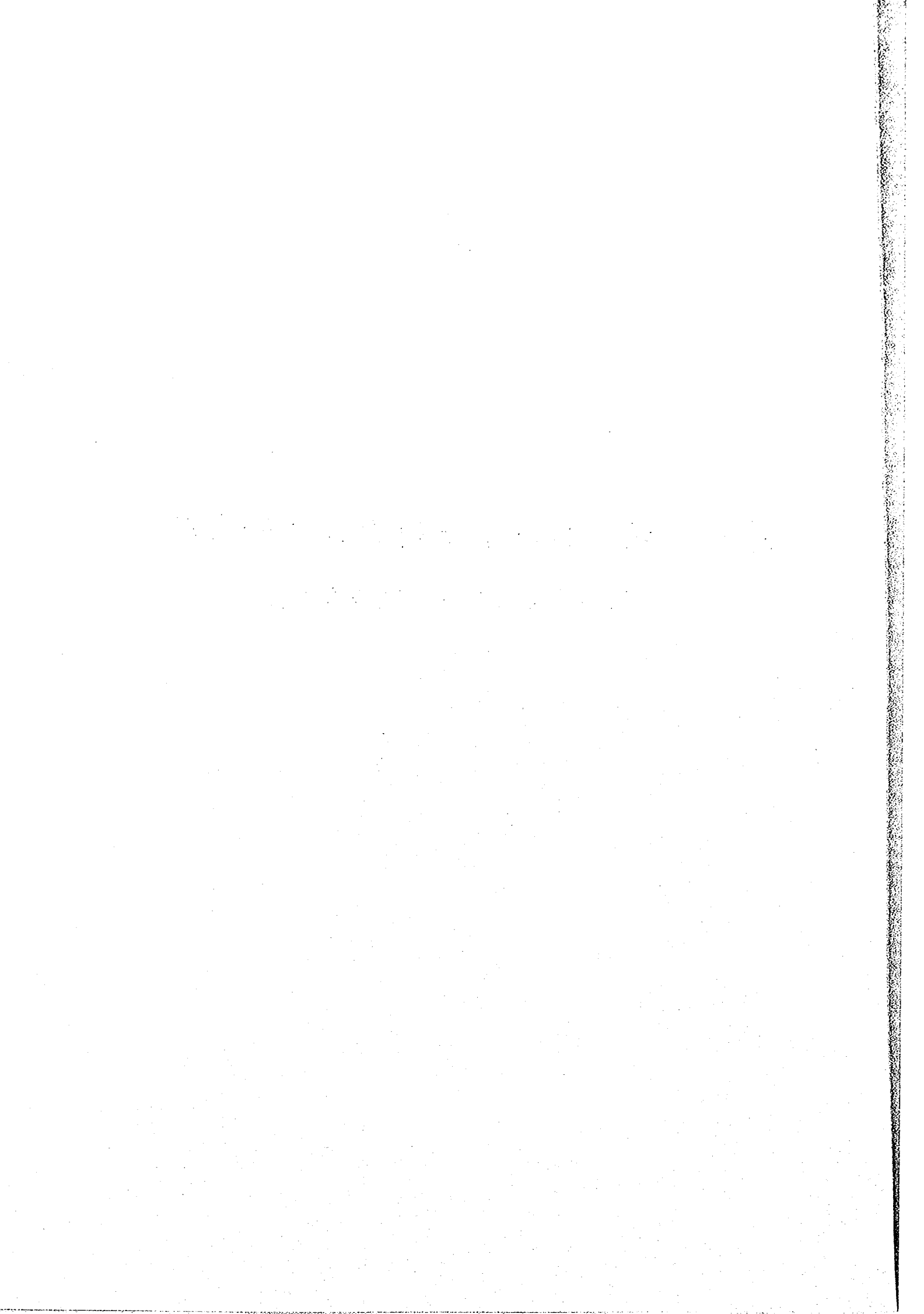
参 考 文 献

- 1) 土質工学会：土質試験法--第2回改訂版--，第1刷，1979年12月。
- 2) 建設省河川局監修：多目的ダムの建設(昭和52年版)，第3巻，第1刷，p.289，1977年2月。
- 3) 建設省河川局監修：多目的ダムの建設(昭和62年版)，第3巻，第1刷，p.366，1987年9月。
- 4) 高田直俊・坂田龍也・木下哲生：大型試験機による粗粒礫材の締固め試験，第21回土質工学研究発表会講演論文集，pp.1751～1752，1986年6月。
- 5) Walker, F.C. and Holtz, W.G.: Control of Embankment Material by Laboratory Testing, Proc. ASCE, No.180, Dec., 1951.
- 6) Marsal, R. J. : Machanical Properties of Rockfill, Casagrande Volume, John Wiley and Sons, pp.109～200, 1972.
- 7) 三国英四郎：土質調査試験結果の解釈と適用例，第8章 透水試験，土質工学会，pp.277～306，1968年3月。

参 考 資 料－ 1

透水試験における試料の許容最大粒径

－細粒分を含まない試料の場合－



1. は じ め に

本文中では、フィルダムの土質材料のように粒度分布範囲が非常に広い材料に対して透水試験を実施する場合、締固め試験と同様に使用するモールド内径 ϕ の $1/4 \sim 1/5$ 程度の最大粒径 D_{max} を有する試料を対象にしても十分な精度の試験結果が得られることを示した。その大きな原因としては、フィルダムの土質材料のように粒度範囲が広く最大粒径付近の粒径を持つ粒子がある部分、特にモールド内壁面付近に集中する可能性が少ないうえ、 0.074 mm 以下の細粒分をある程度含んでいるため大きな間隙を塞ぐ効果が大きかったことなどが挙げられる。そこでここでは、ある程度の粒径範囲を有するものの 0.074 mm 以下の細粒分を含まない試料を使用して、透水試験に用いる試料の許容最大粒径に関する試験を実施した。

2. 試 料

試験に用いた試料は、天日乾燥済みの茨城県石岡産の硬質砂岩である。また、試料の試験粒度は図-1に示す3本の粒径加積曲線(25.4mm~0.074mm, 19.1mm~0.074mm, 9.52mm~0.074mm)に拠った。この粒度は、以下の考え方に従って決定した。まず、本文図-2.3に示した我が国のフィルダムの土質材料の代表的粒度のうち25.4mm以上および0.074mm以下の部分をカットした粒度を参考に最大粒径が25.4mmの試料の粒度を決定した。最大粒径が19.1mmと9.52mmの試料は、最大粒径25.4mmの試料をそれぞれ19.1mm, 9.52mmでオーバーサイズカットした粒度分布を有する。各ふるい目に留まる材料の真比重と材料搬入時の含水量を表-1に、4.76mm以上の粗粒分の比重・吸水量試験結果を表-2に示す。真比重は、全粒度に渡って約2.68と一定値を示しているが、これらは試料を構成する岩が一種類であることによる。また、粗粒分の吸水量は0.5%程度と小さく、本試料が非常に堅硬な岩により構成されていることがわかる。

表-1 真比重および含水量

物理試験項目 粒径範囲	真比重 G_s	搬入時含水量 w (%)
25.4 ~ 19.1 mm	2.68	0.24
19.1 ~ 9.52 mm	2.69	0.07
9.52 ~ 4.76 mm	2.68	0.08
4.76 ~ 2.00 mm	2.682	0.05
2.00 ~ 0.84 mm	2.674	0.11
0.84 ~ 0.42 mm	2.676	0.13
0.42 ~ 0.25 mm	2.687	0.13
0.25 ~ 0.105mm	2.677	0.12
0.105 ~ 0.074mm	2.681	0.12

表-2 粗粒分に対する比重・吸水量試験結果

物理試験項目 粒径範囲	表乾比重 G_d	絶乾比重 G_s	真比重 G_s	吸水量 Q (%)
25.4~19.1mm	2.66	2.64	2.68	0.680
19.1~9.52mm	2.67	2.65	2.69	0.514
9.52~4.76mm	2.65	2.64	2.68	0.496

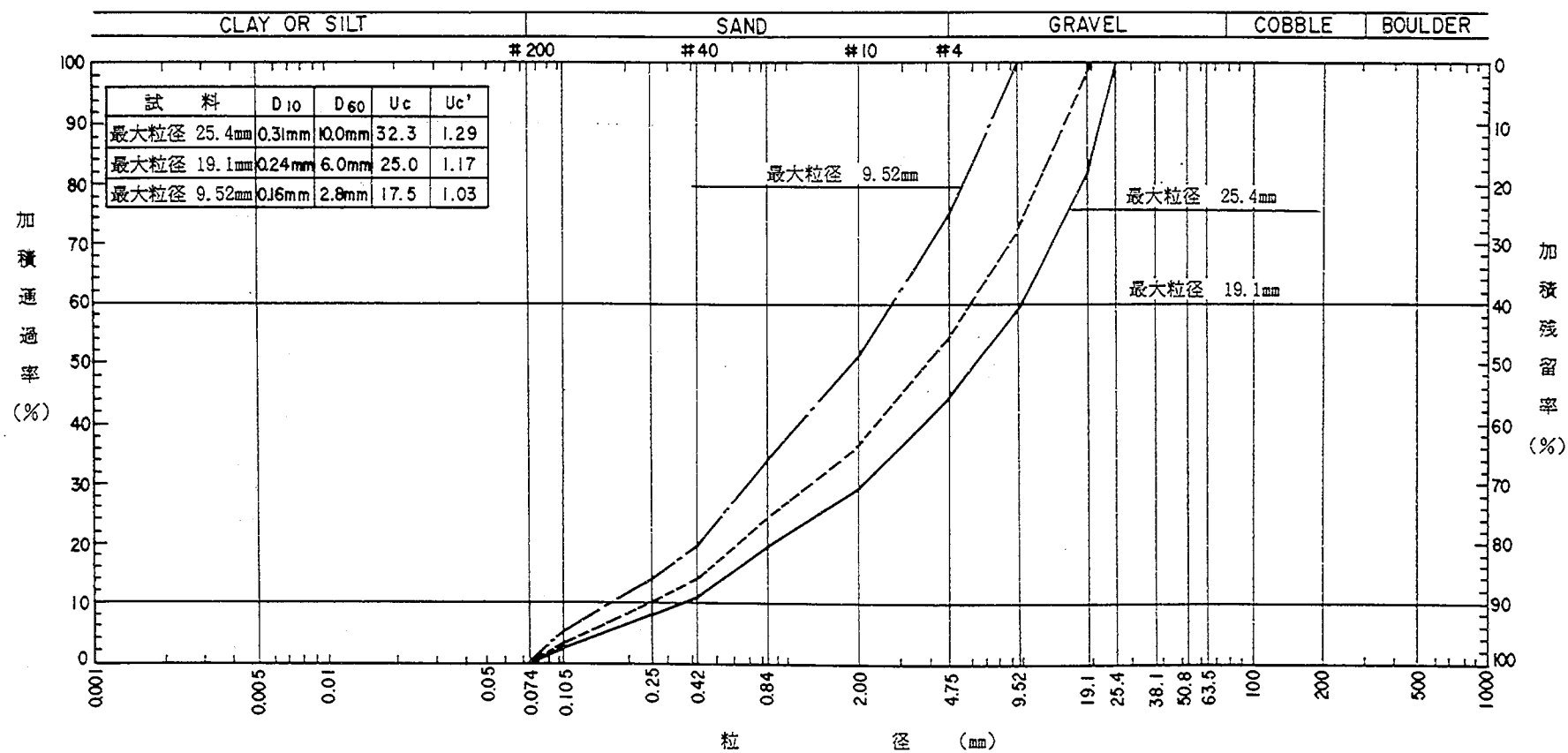


図-1 試料の粒度分布

なお、粒度範囲の極端に狭い材料(例えば、均等係数1～2程度)について試験を実施しなかった理由は、以下の通りである。松尾ら¹⁾が、図-2に示す粒度分布をもつ均一な粒径の碎石試料に対して実施した定水位透水試験の結果、図-3に示す試料中の水の流れが層流から乱流に移行する限界時の動水勾配 i_c と各試料の10%粒径 D_{10} の関係を示している。図-3を見ると、試料の間隙比が若干大きいことも影響していると思われるが、限界動水勾配が全てのケースで1以下と非常に小さく、JISで規定されている透水試験器²⁾では層流状態における試験結果を得る動水勾配の制御が不可能であると判断したことによる。

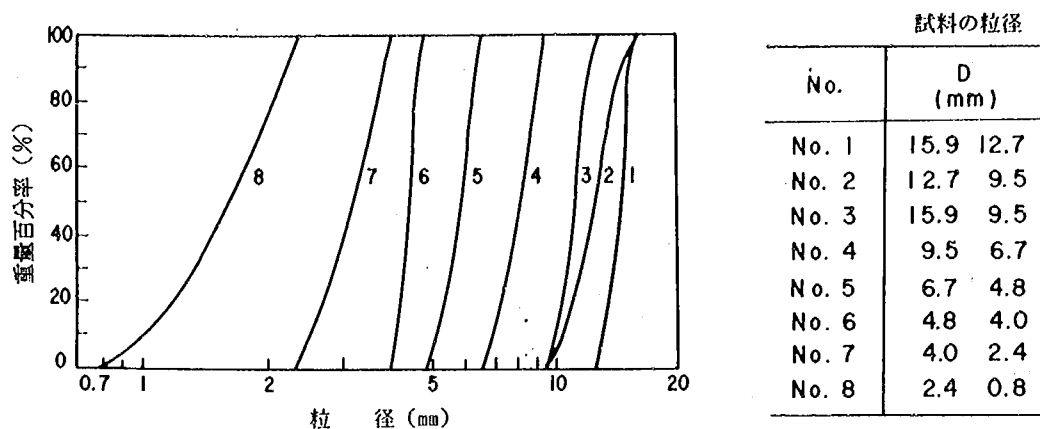


図-2 試料の粒度分布¹⁾

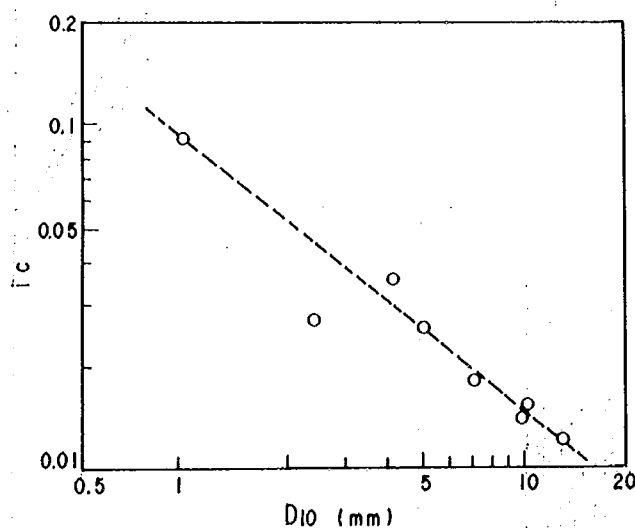


図-3 限界動水勾配 i_c と10%粒径 D_{10} との関係

3. 試験方法

3.1 供試体作製方法

3.1.1 締固め試験

本試験は、3種類の試料の「試料の粒子破碎を生じさせない」という条件下での締固め特性、つまり最大・最小間隙比（密度）を求めるために実施するもので、各試料に対して3回ずつ行った。粒子破碎をさせないというのは、最大粒径を変化させないというのを第一に考えてのことである。具体的な試験方法を以下に示す。

a) 最小密度（最大間隙比）試験

各試料をハンドスコップによりゆっくりと標準モールド（内径100mm×高さ127mm）内に投入することによって得られる密度（間隙比）をもって最小密度（最大間隙比）とした。なお、試料投入時には投入落差を与えないように細心の注意を払った。

b) 最大密度（最小間隙比）試験

試料投入に際しては、最小密度（最大間隙比）試験と同様の注意を払い、木づちによるモールド側壁打撃により締固めを行う。次層の試料投入前には境界層面をエッジ等でかき乱し、次層とのなじみを良くした。締固め仕様は以下に示す通りである。

- ① モールド寸法 : 内径100mm×高さ127mm
- ② 締固め層数 : 3層、1層約42mm
- ③ 締固め器具 : 打撃面の直径が3cm程度の木づち
- ④ 締固め仕様 : 木づちの打撃振幅約5cm、350/層

密度および間隙比は、投入重量、比重のほか試料高さを5点測定することにより求めた。また、今回用いた試料は非常に堅硬であるためにこの程度の締固めにより破碎するとは考えられないが、念のために締固め後の試料に対して粒度試験を実施した。

3.1.2 供試体作製

締固め試験結果から得られる相対密度 D_r が70%となる間隙比を試料ごとに決定し、これを定水位透水試験用供試体の目標間隙比 e_0 とした。設定した目標間隙比になるように試料の投入重量を算出し供試体の作製を行った。試料の締固めは、密度試験と同様に木づちでモールド側壁を打撃することにより行った。供試体は3層で仕上げたが、当該層締固め後の次層試料投入前には境界層面をエッジ等でかき乱し、次層とのなじみを良くした。供試体の底部には、透水試験結果に影響のない範囲でかつ試料細粒分の流出防止に効果のあるふるい目の開き420 μ m程度の金属網を置いた。

密度および間隙比は、締固め試験と同様の方法で算定した。なお、供試体は3種類の試料を以下の3種類のモールド内に締固めて作製するため全9種類である。

- ### 3.2 定水位透水試驗

水道水

測定流量 Q

越流水槽

ビーカー

試料

L

金網

有孔板

H

オーバーフロー水

動水勾配 $i = \frac{H}{L}$

$$\text{透水系数 } k_{15} = \frac{Q/A(t_2 - t_1)}{i} \cdot \frac{\eta_T}{\eta_{15}}$$

Q 流量

A モールド断面積

 $t_2 - t_1$ 測定時間
$$\frac{\eta_I}{\eta_{15}}$$
 水温による粘性の補正係数

— 62 —

4. 試験結果

4.1 締固め試験結果

標準モールドを使用して行った締固め試験結果を表-3に示す。表-3中の ρ_{dmax} (or e_{min}), ρ_{dmin} (or e_{max}) の値は3回の結果でばらつきはほとんどなかった。

なお、透水試験用の供試体の目標乾燥密度 ρ_{d0} あるいは間隙比 e_0 は各試料とも上記の結果から相対密度が70%になるように決定した。その値は、以下に示す通りである。

- a) 最大粒径25.4mmの試料 : $\rho_{d0} = 1.945 \text{ g/cm}^3$, $e_0 = 0.379$
- b) 最大粒径19.1mmの試料 : $\rho_{d0} = 1.912 \text{ g/cm}^3$, $e_0 = 0.403$
- c) 最大粒径9.52mmの試料 : $\rho_{d0} = 1.859 \text{ g/cm}^3$, $e_0 = 0.441$

表-3 最大・最小密度試験結果

		乾燥密度 $\rho_d (\text{t/m}^3)$	間隙比 e	平均比值 G _s
Dmax 25.4mm	最大乾燥密度 最小間隙比	2.067	0.298	2.682
	最小乾燥密度 最大間隙比	1.711	0.568	2.682
Dmax 19.1mm	最大乾燥密度 最小間隙比	2.014	0.331	2.682
	最小乾燥密度 最大間隙比	1.706	0.572	2.682
Dmax 9.52mm	最大乾燥密度 最小間隙比	1.946	0.377	2.679
	最小乾燥密度 最大間隙比	1.686	0.589	2.679

$$\text{平均値 } G_s = \frac{\sum P_i \cdot G_{si}}{100}$$

ここに、P：各ふるい目にとどまる試料質量百分率、
G：各ふるい目にとどまる試料の比重。

4.2 定水位透水試験結果

各供試体の仕上り諸元を表-4～6に示す。これらの表から透水試験の供試体は、ほぼ目標通りの密度・間隙比に仕上がっていることがわかる。供試体作製時における細粒分の抜け落ちもなく、透水円筒内壁部分付近の大きな間隙も目につかなかった。

表-4 透水試験用供試体諸元

(最大粒径 9.52mm)

諸元 各モー ルドの試験		供試体高さ H (cm)	断 面 積 A (cm)	供試体体積 V (cm)	乾 燥 密 度 $\rho_d (g/cm^3)$	間 隙 比 e	相 対 密 度 D _r (%)
$\phi 100mm$	1 回目	12.69	78.5	996.2	1.866	0.436	72.2
	2 回目	12.68	78.5	995.4	1.886	0.434	73.1
	3 回目	12.68	78.5	995.4	1.866	0.434	73.1
$\phi 150mm$	1 回目	17.50	176.7	3092.3	1.859	0.441	69.8
	2 回目	17.52	176.7	3095.8	1.857	0.443	68.9
	3 回目	17.47	176.7	3086.9	1.862	0.439	70.8
$\phi 300mm$	1 回目	35.37	706.9	25003.1	1.884	0.422	78.8
	2 回目	35.80	706.9	25307.0	1.862	0.439	70.8
	3 回目	35.84	706.9	25335.3	1.860	0.440	70.3

表-5 透水試験用供試体諸元

(最大粒径 19.1mm)

諸元 各モー ルドの試験		供試体高さ H (cm)	断 面 積 A (cm)	供試体体積 V (cm)	乾 燥 密 度 $\rho_d (g/cm^3)$	間 隙 比 e	相 対 密 度 D _r (%)
$\phi 100mm$	1 回目	12.70	78.5	997.0	1.918	0.398	72.2
	2 回目	12.73	78.5	999.3	1.913	0.402	70.5
	3 回目	12.74	78.5	1000.1	1.912	0.403	70.1
$\phi 150mm$	1 回目	17.46	176.7	3085.2	1.918	0.398	72.2
	2 回目	17.47	176.7	3086.9	1.917	0.399	71.8
	3 回目	17.39	176.7	3072.8	1.926	0.393	74.3
$\phi 300mm$	1 回目	35.85	706.9	25340.9	1.912	0.403	70.1
	2 回目	35.50	706.9	25095.0	1.932	0.388	76.3
	3 回目	35.48	706.9	25080.8	1.933	0.387	76.8

表-6 透水試験用供試体諸元

(最大粒径 25.4mm)

諸元 各モー ルドの試験		供試体高さ H (cm)	断 面 積 A (cm)	供試体体積 V (cm)	乾 燥 密 度 $\rho_d (g/cm^3)$	間 隙 比 e	相 対 密 度 D _r (%)
$\phi 100mm$	1 回目	12.72	78.5	998.5	1.950	0.375	71.5
	2 回目	12.70	78.5	997.0	1.953	0.373	72.2
	3 回目	12.71	78.5	997.7	1.952	0.374	71.9
$\phi 150mm$	1 回目	17.56	176.7	3102.9	1.938	0.384	68.1
	2 回目	17.53	176.7	3097.6	1.942	0.381	69.3
	3 回目	17.52	176.7	3095.8	1.943	0.380	69.6
$\phi 300mm$	1 回目	35.66	706.9	25206.6	1.955	0.372	72.6
	2 回目	35.80	706.9	25305.5	1.948	0.377	70.7
	3 回目	35.81	706.9	25312.6	1.947	0.378	70.4

透水試験の全結果を表－7にまとめる。この表を見ると各供試体3本ずつ行って得られた透水係数のばらつきは少なく、動水勾配を3種類に変えて得られた透水係数もほぼ一定値を示しており今回実施した動水勾配の範囲内では乱流の影響がないことがわかる。そこで、表－7に示した各供試体の9個の透水係数の平均値とモールド内径 ϕ と試料の最大粒径 D_{max} の比 ϕ/D_{max} の関係を図－5に示す。この図から以下のことがいえる。

- ① 同一試料をほぼ同じ密度に大きさの異なる3種類のモールド内に締固めた場合、最大粒径が19.1mm以外の試料では、モールド径の違いより極端ではないにしても得られた透水係数にばらつきがみられる。
- ② JISにおいて透水試験を ϕ/D_{max} が10以上という条件下で行うように規定しているのはモールド内側壁周辺部での十分な締固めが困難となり大きな間隙が発生し、結果として透水性を過大に評価することを防ぐためである。しかし、今回の透水係数のばらつき状態を詳しくみると、最大粒径25.4mmの試料の場合では上記とは逆の傾向を示していたり、最大粒径9.52mmの試料の場合では全て $\phi/D_{max} \geq 10$ の試験条件を満たしているにもかかわらず発生したばらつきである。
- ③ 以上より、本試験結果のばらつきは極端ではないと考えるが、仮にそうでなくてもそのばらつきは $\phi/D_{max} < 10$ という試験条件によるものではなく、モールド径が異なることにより作製した供試体の断面内での均質性に差異があったためではないかと考えられる。

表－7 透水試験結果

最大粒径		$D_{max} \ 9.52\text{mm}$			$D_{max} \ 19.1\text{mm}$			$D_{max} \ 25.4\text{mm}$		
動水勾配		0.2	0.4	0.8	0.2	0.4	0.8	0.2	0.4	0.8
モールド $\phi 100\text{mm}$	1回目	2.96×10^{-2}	2.60×10^{-2}	2.35×10^{-2}	4.48×10^{-2}	4.07×10^{-2}	4.02×10^{-2}	5.29×10^{-2}	6.05×10^{-2}	6.00×10^{-2}
	2回目	2.64×10^{-2}	2.69×10^{-2}	2.36×10^{-2}	4.29×10^{-2}	3.81×10^{-2}	3.78×10^{-2}	4.18×10^{-2}	4.03×10^{-2}	4.11×10^{-2}
	3回目	2.96×10^{-2}	2.98×10^{-2}	2.74×10^{-2}	4.26×10^{-2}	4.21×10^{-2}	4.15×10^{-2}	4.42×10^{-2}	4.04×10^{-2}	4.09×10^{-2}
モールド $\phi 150\text{mm}$	1回目	1.24×10^{-2}	1.07×10^{-2}	1.10×10^{-2}	3.60×10^{-2}	4.64×10^{-2}	4.52×10^{-2}	3.59×10^{-2}	4.02×10^{-2}	3.85×10^{-2}
	2回目	1.39×10^{-2}	1.41×10^{-2}	1.33×10^{-2}	3.92×10^{-2}	4.70×10^{-2}	4.47×10^{-2}	3.80×10^{-2}	3.69×10^{-2}	3.10×10^{-2}
	3回目	8.14×10^{-3}	9.05×10^{-3}	9.30×10^{-3}	4.63×10^{-2}	4.51×10^{-2}	3.86×10^{-2}	4.32×10^{-2}	4.29×10^{-2}	4.01×10^{-2}
モールド $\phi 300\text{mm}$	1回目	1.41×10^{-2}	1.41×10^{-2}	1.37×10^{-2}	3.77×10^{-2}	3.91×10^{-2}	3.73×10^{-2}	9.49×10^{-2}	9.51×10^{-2}	8.73×10^{-2}
	2回目	1.72×10^{-2}	1.52×10^{-2}	1.49×10^{-2}	4.34×10^{-2}	3.94×10^{-2}	3.36×10^{-2}	1.03×10^{-1}	1.08×10^{-1}	9.73×10^{-2}
	3回目	1.76×10^{-2}	1.79×10^{-2}	1.71×10^{-2}	3.50×10^{-2}	3.42×10^{-2}	3.54×10^{-2}	9.34×10^{-2}	8.86×10^{-2}	9.37×10^{-2}

透水係数の単位は cm/s で、水温 15°C での値に補正してある。

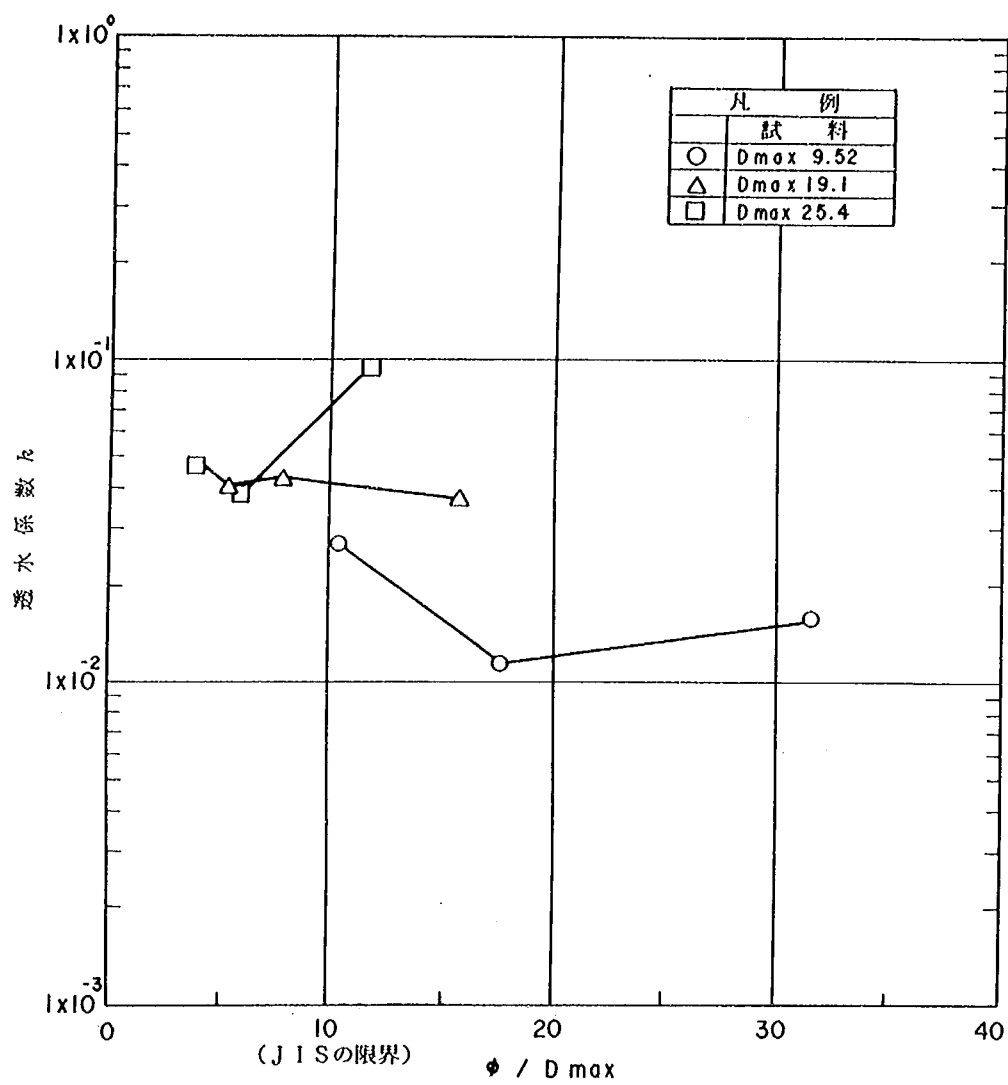


図-5 モールド内径 ϕ の最大粒径 D_{max} に対する比と透水係数の関係

5. ま と め

今回の試験結果をまとめると以下の通りである。

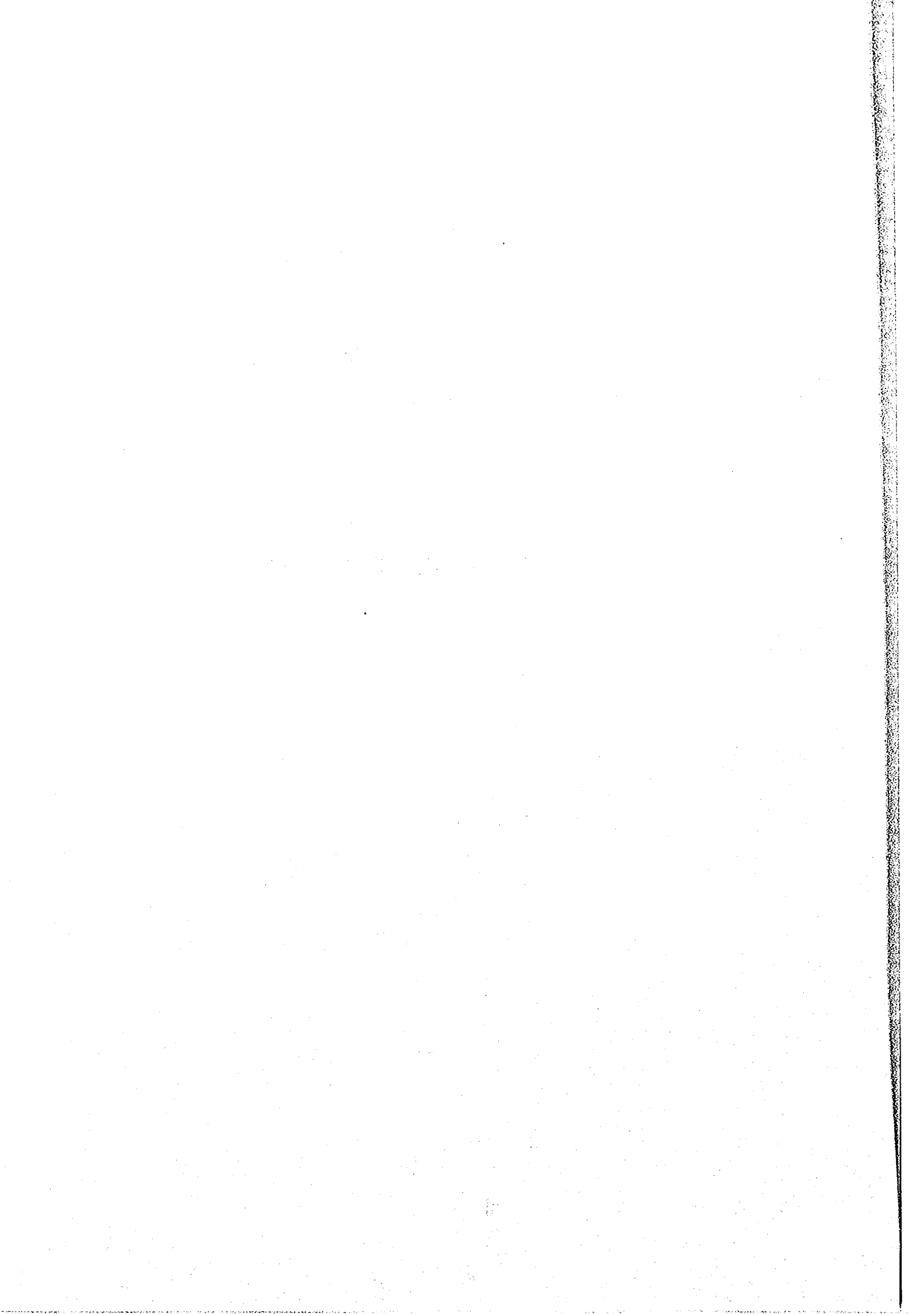
- ① 0.074mmの細粒分を含まないがある程度の粒度範囲を持つ試料に対して透水試験を行う際、使用するモールド内径 ϕ の $1/4 \sim 1/5$ 程度の最大粒径 D_{max} を持つ試料を用いてもモールド内側壁周辺に大きな間隙ができ透水性を過大に評価するという事はなかった。
- ② ただし、上記の材料をモールド側壁を木づちによる打撃で締固める方法では、供試体を均質に仕上げる事が難しい可能性がある。

参考文献

- 1) 松尾新一郎・木暮敬二 : 碎石の透水性に関する実験, 土と基礎, Vol.18, No.2, pp. 5~10, 1970年2月.
- 2) 土質工学会 : 土質試験法 -第2回改訂版-, 第1刷, 1979年12月.

参 考 資 料 - 2

礫率補正に関する考察



本文中では、Walker, Holtz の礫率補正が成立すると仮定すれば、剪頭粒度材を同じエネルギーで締固めた際の ρ_{dmax} の推定値と Dmax の関係は礫率が小さければ粒度分布曲線とほぼ相似な関係となることを示した。ここではそれを礫率補正式を用いて説明する。

Walker, Holtz の礫率補正法によれば、ある最大粒径を持つ剪頭粒度材の土と礫の混合物の乾燥密度 ρ_d は、本文中図 - 4.9 を参照して、

$$\rho_d = \frac{m_{s1} + m_{s2}}{V_1 + V_2} = \frac{\rho_{d1} \rho_{d2} (m_{s1} + m_{s2})}{\rho_{d1} m_{s2} + \rho_{d2} m_{s1}} \quad (1)$$

ここに、 ρ_{d1} : 土のみの乾燥密度、

ρ_{d2} : 礫のみの乾燥密度

V_1 : 土部分の体積、

V_2 : 礫部分の体積、

m_{s1} : 土の乾燥質量、

m_{s2} : 礫の乾燥質量、

次に、より大きい礫が混入した場合の乾燥密度をもとめる。(1) 式の ρ_d を土部分の乾燥密度と考えて ρ_{d1}' とし、新たに加わる礫の乾燥質量を m_{s2}' 、新たに加わった礫の乾燥密度は (1) 式中の礫の乾燥密度と同じであると仮定すると土と新たに加わった礫の混合物の乾燥密度 ρ_{d1}' は、

$$\rho_{d1}' = \frac{\rho_{d1}' \rho_{d2} (m_{s1} + m_{s2} + m_{s2}')}{m_{s2}' \rho_{d1}' + (m_{s1} + m_{s2}) \rho_{d2}} \quad (2)$$

また、 ρ_{dmax} と Dmax の関係を示す曲線と粒度曲線が相似であれば、次式が成り立つはずである (図 - 1 参照)。

$$\frac{\rho_d - \rho_{d1}}{\rho_{d1}' - \rho_{d1}} \Big/ \frac{m_{s2}}{m_{s2}' + m_{s2}} = 1 \quad (3)$$

いま、

$$\rho_d - \rho_{d1} = \frac{m_{s2} \rho_{d1} (\rho_{d2} - \rho_{d1})}{\rho_{d1} m_{s2} + \rho_{d2} m_{s1}}$$

$$\rho_{d1}' - \rho_{d1} = \frac{(m_{s2} + m_{s2}') \rho_{d1} (\rho_{d2} - \rho_{d1})}{\rho_{d1} (m_{s2}' + m_{s2}) + \rho_{d2} m_{s1}}$$

であるから、

$$\frac{\rho_d - \rho_{d1}}{\rho_{d'} - \rho_{d1}} = \frac{m_{s2}}{m_{s2}' + m_{s2}} \cdot \frac{\rho_{d1}(m_{s2}' + m_{s2}) + \rho_{d2}m_{s1}}{\rho_{d1}m_{s2} + \rho_{d2}m_{s1}}$$

よって,

$$\frac{\rho_d - \rho_{d1}}{\rho_{d'} - \rho_{d1}} \cdot \frac{m_{s2}}{m_{s2}' + m_{s2}} = \frac{\rho_{d1}m_{s2} + \rho_{d2}m_{s1} + \rho_{d1}m_{s2}'}{\rho_{d1}m_{s2} + \rho_{d2}m_{s1}} = 1 + \frac{\rho_{d1}m_{s2}'}{\rho_{d1}m_{s2} + \rho_{d2}m_{s1}} \quad (4)$$

が得られる

(3) 式と (7) 式の比較より $\frac{\rho_{d1}m_{s2}'}{\rho_{d1}m_{s2} + \rho_{d2}m_{s1}}$ が 1 に比較して微小であれば, ρ_{dmax} と Dmax の関係を示す曲線は粒度分布曲線とほぼ相似な関係となることがわかる。

通常, $\rho_{d1} < \rho_{d2}$ であることから次式が成り立つ。

$$\frac{\rho_{d1}m_{s2}'}{\rho_{d1}m_{s2} + \rho_{d2}m_{s1}} < \frac{m_{s2}'}{m_{s2} + m_{s1}} = \frac{P}{1 - P} \quad (5)$$

ここに,

$$P = \frac{m_{s2}'}{m_{s1} + m_{s2} + m_{s2}'} \quad (6)$$

以上より, ρ_{dmax} と Dmax の関係を示す曲線と粒度分布曲線が相似になるには礫率が小さいことが条件となることがわかる。

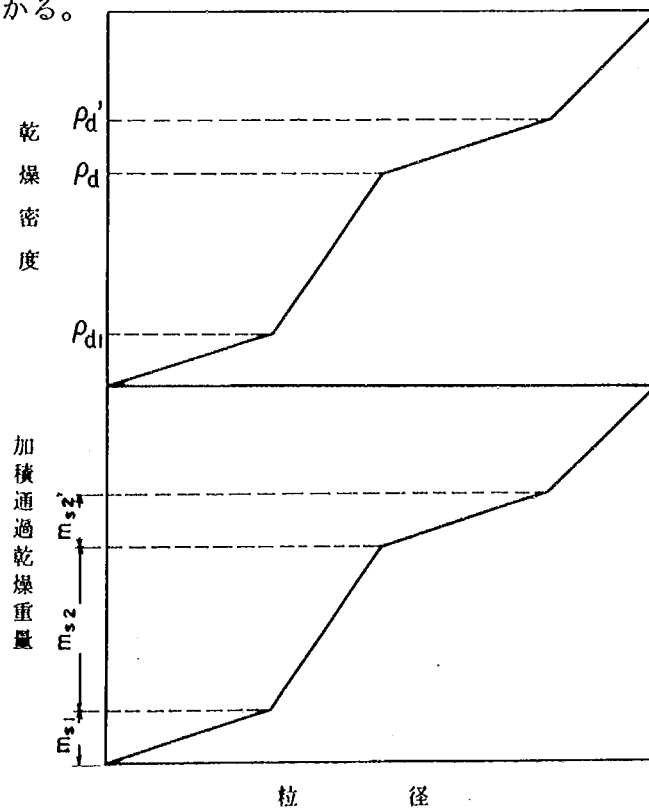


図-1 (3) 式の説明図

フィルダム土質材料の締固め、
透水試験に関する考察

フィルダム研究室 研究員 山口 嘉一
室 長 松本 徳久

ISSN 0386-5878
土研資料 第2820号
平成2年1月(1990)

要 旨 フィルダム土質材料の透水試験には、締固め試験により作製された供試体を流用するのが一般的である。その際、JISで規定されている試料の許容最大粒径の条件を締固め試験においては満足するが、透水試験においては満足しない場合がある。しかし、フィルダム土質材料は粒度範囲が広く、細粒分をある程度含むため、透水試験についても締固め試験と同様に試料の最大粒径とモールド内径の比が $1/5 \sim 1/4$ 程度までであれば、十分な精度の試験結果が得られた。
また、締固めにより作製された供試体はその底面に細粒分が集中して難透水の薄膜を形成し、結果として透水係数を実際よりも小さく評価してしまう恐れがある。しかし、そのような薄膜は形成されないか、あるいは形成されたとしても透水試験結果に大きな影響を与えないことを実証した。

キーワード：フィルダム，土質材料，締固め試験，透水試験

郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十一円切
手をはって
下さい。

建設省土木研究所

フィルダム研究室 行

茨城県つくば市旭一番地

No. 18

No. 18

配布先住所

配布先氏名

○

土木研究所資料 第 2 8 2 0 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印

○