

## 締固め土の水浸沈下について

鳥山 昶司

### Settlement due to Submergence of Compacted Clays

Koushi Toriyama

**Abstract** Using oedometers, the settlements due to submergence are tested with compacted Fujinomori clay and decomposed granite soil which D-value are from 75% to 100% .

The specimen are swelled at  $p=0$ . The swelling volume of Fujinomori clay is increased with D-value but that of decomposed granite soil is smaller than 0.07mm irrespective of D-value.

The settlement due to submergence  $\Delta S_s$  is increased with consolidation stress  $p$  and at some stress,  $\Delta S_s$  is attained its maximum and is decreased with more stress increment.

The effect of D-value on settlement  $\Delta S_s$  is conspicuous. The settlement  $\Delta S_s$  of compacted soil which D-value is greater than 85% has little problem, but that D-value smaller than 80% is increased with lowering of D-value.

The trend of settlement submerged at  $p=0$  is similar of the trend with settlement submerged at  $p>0$ , but volume of settlement is not equal to each other.

## 1. まえがき

不飽和土が吸水した場合、間隙水の負圧によって保たれていた土の構造が破壊して、体積圧縮が生じることがあり、これはコラプス (collapse) と呼ばれている。また、土中の粘土鉱物の吸水膨張によって、体積膨張が生じることもあり、これはスウェリング (swelling) と呼ばれている。

吸水による体積圧縮は不飽和土の有効応力の適応限界に関連して、Jennings and Burland (1964) によって指摘された。ここでは collapse は圧密応力の大きさに無関係に水浸によって、ほぼ同じ大きさの間隙比の減少が生じるとされている。しかし、swelling に関する実験結果からは水浸による体積膨張は圧密応力の大きさに関係し、圧密応力が小さい場合は体積膨張しても、圧密応力が大きくなると体積圧縮を生じる (Rengmark, F. and R. Eriksson; 1953), (齊藤孝夫, 箭内寛治; 1969)。これらの実験では不飽和土の密度の規定がはっきりせず、collapse と swelling がよく生じる状態で実験をしている。盛土等の施工では締固めを  $D$  値  $= \rho_d / \rho_{dmax}$  で規定しているが、締固め土の水浸時の沈下あるいは膨張の  $D$  値による変化については報告されていない。ここでは最適含水比での締固め土の

$D$  値を変えた場合についての水浸の圧密沈下量への影響、圧密応力の大きさによる水浸沈下量の変化について 2 種の土で実験し、Barden 等 (Barden, L., A. et. Ai; 1969) による水浸による沈下は応力経路に拠らないという結果についても検討する。

## 2. 試料土と実験方法

実験に用いた試料土は藤の森粘土とまさ土である。藤の森粘土はセメント混和材として京都市伏見区で採取、袋詰めされたものを購入した。まさ土は中国地方に広く分布し、ここでは松江市内で採取されたものを購入した。両試料土の物理的性質を表 - 1 に示す。まさ土の液性限界と塑性限界は無理をすれば求めうるが、ここでは NP とした。

締固め土の水浸沈下は締固め土の乾燥密度と締固め含水比に大きく依存するとされている。締固め含水比は最適含水比を基準とするため、今回は最適含水比付近の含水比となるよう試料土に加水し、密封して 1 週間以上置いた後、実験に用いた。乾燥密度の管理は  $D$  値を用いることから、 $D$  値  $= (\rho_d / \rho_{dmax}) \times 100\%$  で整理し、締固めたままの非水浸 ( $D$ ) と  $p=0$  で水浸し、圧密全体を水浸 ( $S$ ) 条件とするものは藤の森粘土では  $D$  値 = 100, 95, 90,

表 - 1 試料土の物理的性質

	藤の森粘土	まさ土
土粒子の密度 $g/cm^3$	2.694	2.66
液性限界 %	39.9	NP
塑性限界 %	22.4	NP
塑性指数	17.5	NP
砂分 %	24~29	79~81
シルト分 %	55~65	9~11
粘土分 %	10~12	10~12
最適含水比 %	24.2	14.3
最大乾燥密度 $g/cm^3$	1.562	1.807

85, 80, 75%, まさ土ではさらに 70% についても実験した。圧密の各荷重段階での水浸実験は 1 つの D 値で 8 個の実験を要するため、藤の森粘土は D 値 = 95, 90, 85, 80% で、まさ土は D 値 = 90, 85, 80, 75% での実験を行った。供試体の総数は 90 個になる。

締固め不飽和土の水浸沈下は圧密応力によって変化するため、標準圧密試験機を用いて、圧密応力  $p$  を 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280kPa に载荷し、所定の圧密応力で圧密後に水浸して、水浸による沈下 - 時間関係を測定した。不飽和土の圧密過程の時間 - 沈下量の測定はしていない。これは不飽和土では载荷と同時に沈下の大部分が生じ、その後の沈下も飽和土の圧密のように一次圧密と二次圧密の区別がつかないためである。

圧密試験の供試体の質量は各 D 値ごとに 0.3g 以下の誤差になるように作成したが、含水比のばらつきもあり、D 値で 0.5% 程度のばらつきが生じた。表 - 2 に藤の森粘土の、表 - 3 にまさ土の初期の平均供試体諸元と水浸供試

体の実験後の含水比を示す。水浸供試体の実験後の飽和度は 100% にはなっていない。

### 3. 実験結果と考察

非水浸と初期からの水浸での  $e \sim \log p$  関係を藤の森粘土について図 - 1 に、まさ土について図 - 2 に示す。非水浸藤の森粘土では D 値が 100 と 95% を除いて  $p = 1280kPa$  では同じ間隙比になっているが、まさ土では D 値が 70 と 75% 以外は  $p = 1280kPa$  でも間隙比は D 値の増加とともに小さくなっている。水浸では藤の森粘土、まさ土ともに D 値が 100% を除いて  $p = 1280kPa$  ではほぼ等しい間隙比になっている。D 値が 75% 以上の藤の森粘土とまさ土の水浸では D 値の増加とともに間隙比は小さく、初期の締固めの効果が少しは残っている。しかし D 値 = 70% のまさ土は水浸後の沈下量は 2 供試体で異なっており、M70S では  $p = 0$  での水浸時の沈下量は 0.03mm と小さいが、 $p = 10, 20kPa$  での沈下量が非常に大きい。M70SR では  $p = 0$  での水浸沈下量が 1.00mm と大きい、 $p = 10, 20kPa$  での沈下量は M70S より小さく、 $p > 40kPa$  での M70S の間隙比が M70SR より小さくなり、M70S の間隙比が M75~M85 より小さくなっている。D 値 = 70% のまさ土が水浸した場合には非常に大きな水浸沈下 = collapse が生じる。ただし、D 値 = 70% の供試体は圧密リングに試料土を手のひらで静かに押さえた程度であり、実際の盛土ではスコップ等でまさ土を盛り立て、そのままにした状態

表 - 2 藤の森粘土の供試体諸元

No.	実 験 前						実験後
	w %	$\rho_t$ $g/cm^3$	$\rho_d$ $g/cm^3$	e	$S_r$ %	D 値 %	w %
D100	23.72	1.939	1.567	0.719	88.9	100.2	26.58
D95	24.05	1.844	1.487	0.811	79.8	95.1	27.27
D90	23.85	1.748	1.411	0.908	70.7	90.2	27.69
D85	23.68	1.648	1.333	1.021	62.4	85.2	27.04
D80	23.98	1.553	1.252	1.149	56.3	80.1	27.45
D75	23.98	1.455	1.174	1.294	49.88	75.1	28.77

表 - 3 まさ土の供試体諸元

No.	実 験 前						実験後
	w %	$\rho_t$ $g/cm^3$	$\rho_d$ $g/cm^3$	e	$S_r$ %	D 値 %	w %
M100	13.37	2.051	1.809	0.47	75.6	100.1	14.98
M95	13.49	1.949	1.718	0.548	65.4	95.1	16.01
M90	13.43	1.848	1.629	0.635	56.4	90.2	16.75
M85	13.39	1.745	1.541	0.727	48.9	85.2	17.84
M80	13.24	1.643	1.451	0.834	42.2	80.3	17.73
M75	13.44	1.539	1.356	0.961	37.2	75.1	17.75
M70	13.28	1.436	1.269	1.098	32.1	70.2	16.34

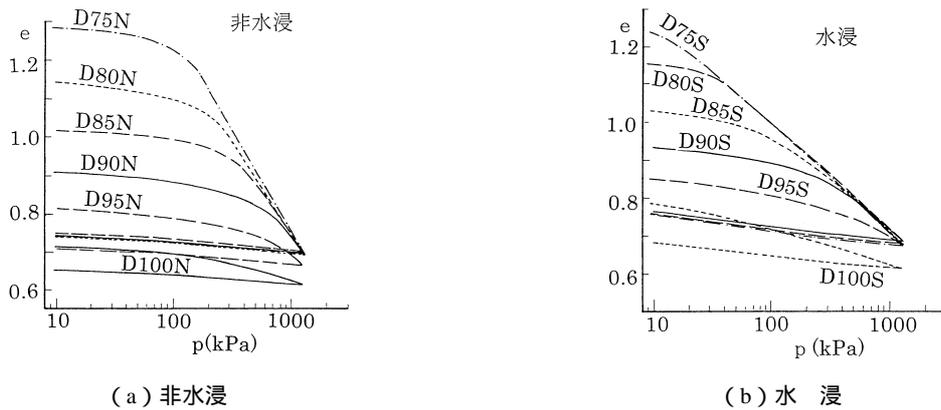


図 - 1 非水浸と  $p=0$  で水浸した藤の森粘土の  $e \sim \log p$  関係

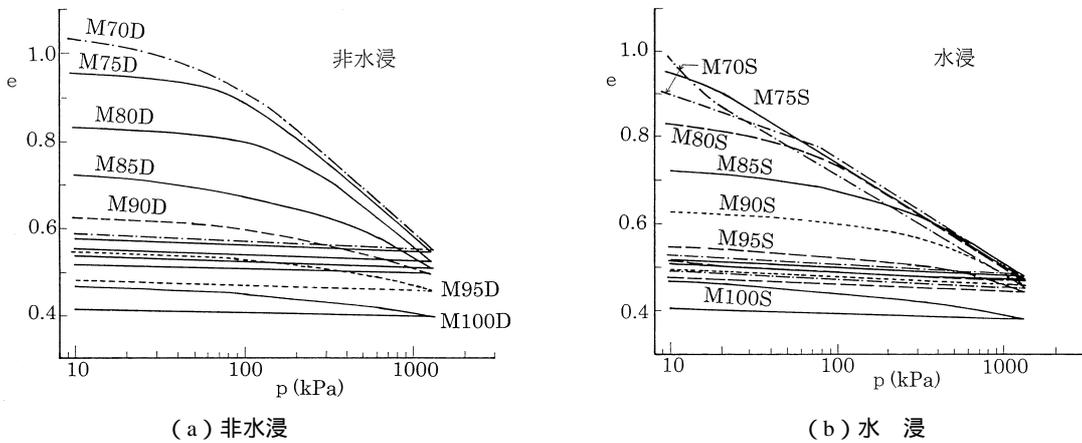


図 - 2 非水浸と  $p=0$  で水浸したまさ土の  $e \sim \log p$  関係

の場合に生じる程度の密度である。

$p=0$  で水浸すると藤の森粘土，まさ土とも D 値が 75% 以上では膨張が生じた。藤の森粘土では D 値 = 100% での膨張量は 1.02mm，D 値 95% で 0.49mm であるが，D 値の減少とともに膨張量も小さくなり，D 値 75% ではほぼ 0 になる。まさ土では D 値が 100~75% で水浸膨張量は 0.07~0.01mm と小さく，水浸による膨張は問題にならない。この水浸前後での D 値の比較を図 - 3 に示す。藤の森粘土では D 値 100% では D 値が約 5% 低下するが，D 値 95% では 2.5% の低下であり，D 値が 90% 以下での D 値の低下は 1% 以下である。まさ土の水浸による D 値の低下は 0.5% 以下である。締固め土が降雨によって水浸状態になると非常に軟弱になり，乾燥密度が大きく低下したように感じられるが，これは水浸によって間隙水の負圧が 0 すなわち有効応力が 0 になり，剪断強度が粘着力のみになったためである。ただし，有効応力が 0 での剪断強度を正確に測定することはできないため，真の粘着力がどの程度かは不明である。

$p=0$  での水浸後の供試体の沈下量と非水浸供試体の沈

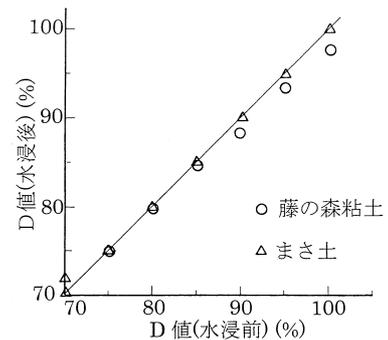


図 - 3 水浸前後での D 値の変化

下量の差を  $\Delta S_s$  とし， $\Delta S_s \sim \log p$  の関係を図 - 4 に示す。藤の森粘土の D 値 100% は 95% の供試体に比べて過大な  $\Delta S_s$  であるが，その他は D 値の低下とともに  $\Delta S_s$  が大きくなり，最大の  $\Delta S_s$  の生じる  $p$  が減少している。まさ土では D 値が 85% 以上での  $\Delta S_s$  は 0.3mm 以下と小さいが，D 値が 80% 以下では  $\Delta S_s$  が急増している。

非水浸で所定の圧密応力  $p$  まで圧密後，水浸した場合，D 値が 85% 以上では水浸による沈下量  $\Delta S_p$  は小さい。 $\Delta S_p$

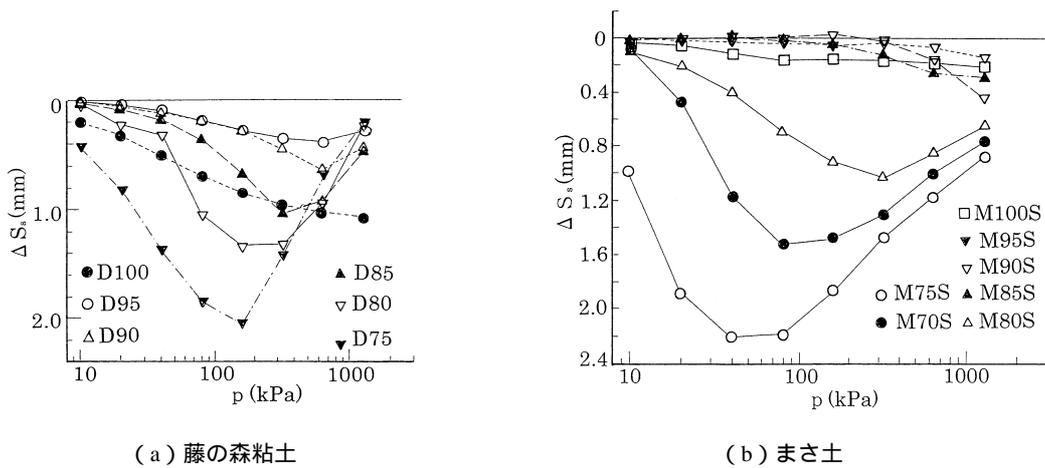


図-4 p=0での水浸後の沈下量 - 非水浸沈下量と圧密応力の関係

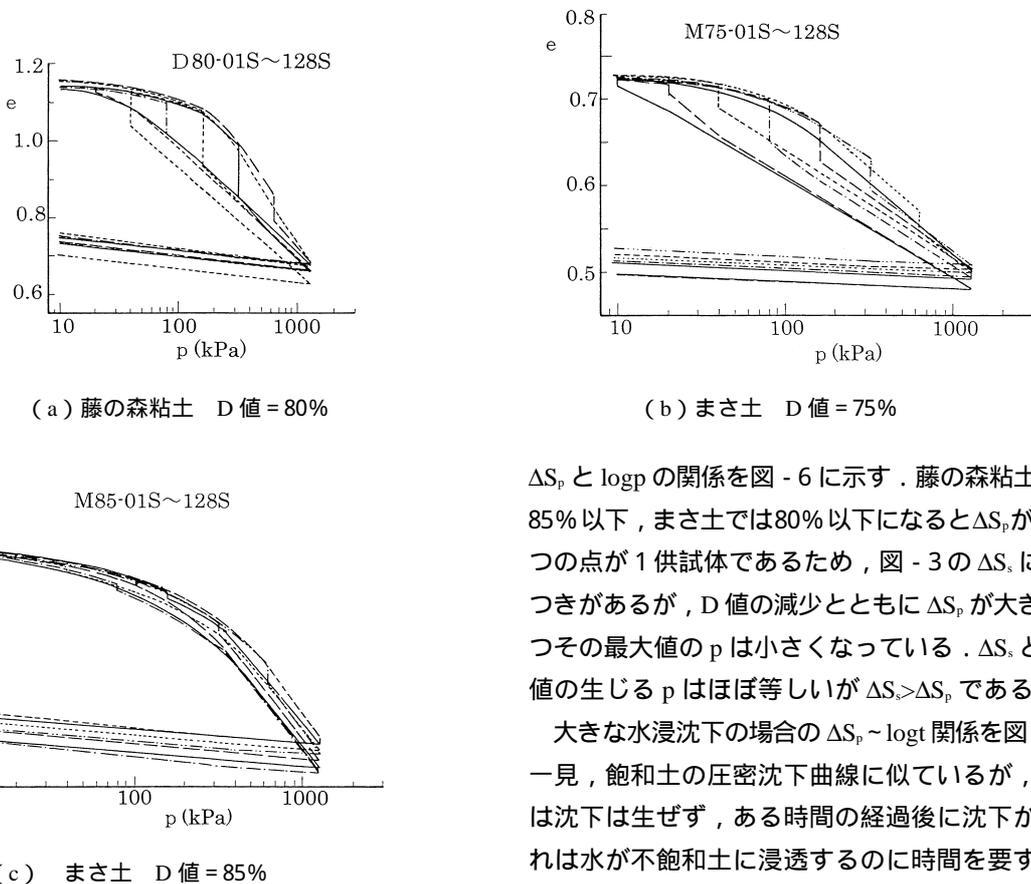


図-5 圧密応力 p での水浸した e ~ log p 関係

が大きな D 値が 80% の藤の森粘土と 75% のまさ土の e ~ log p 関係を図 - 5 に示す。藤の森粘土では水浸の e ~ log p と非水浸の e ~ log p に分かれているが、まさ土では e ~ log p のばらつきが大きいので、非水浸と水浸の e ~ log p がはっきりしない。ΔSp が小さいまさ土の D 値 85% (M85) の e ~ log p 関係も図 - 5 (c) に示す。水浸の影響は小さい。図 - 5 から水浸する圧密応力の大きさによって水浸沈下量に大きな差が生じている。圧密応力 p での水浸沈下量

ΔSp と log p の関係を図 - 6 に示す。藤の森粘土では D 値が 85% 以下、まさ土では 80% 以下になると ΔSp が急増する。1 つの点が 1 供試体であるため、図 - 3 の ΔSs に比べてばらつきがあるが、D 値の減少とともに ΔSp が大きくなり、かつその最大値の p は小さくなっている。ΔSs と ΔSp の最大値の生じる p はほぼ等しいが ΔSs > ΔSp である。

大きな水浸沈下の場合の ΔSp ~ log t 関係を図 - 7 に示す。一見、飽和土の圧密沈下曲線に似ているが、水浸直後には沈下は生ぜず、ある時間の経過後に沈下が始まる。これは水が不飽和土に浸透するのに時間を要するためである。藤の森粘土では約 60 分程度、まさ土では約 10 分で水浸沈下の大部分は生じ、その後は二次圧密に似た沈下になる。したがって、現場での水浸による沈下は不飽和土への水の浸透の速さに支配されるものと考えられる。現場での数十分、数時間は即時と同じであり、現場では水浸と同時に沈下または collapse が生じると考えられる。

締固め含水比の水浸沈下量への影響をまさ土の D 値 = 75% での最適含水比の M75 と含水比が 8.1% の乾燥側の K75 の e ~ log p 関係を図 - 8 に示す。D 値が 75% であるが、ばらつきがあるため、初期の間隙比は僅かに異なる。非

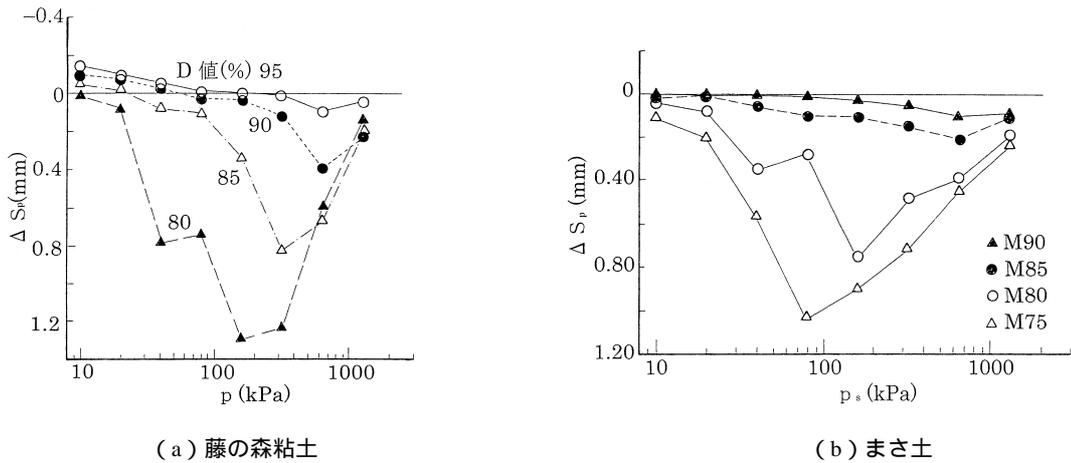


図-6 圧密応力  $p$  での水浸沈下量  $\Delta S_p$  と圧密応力  $p$  の関係

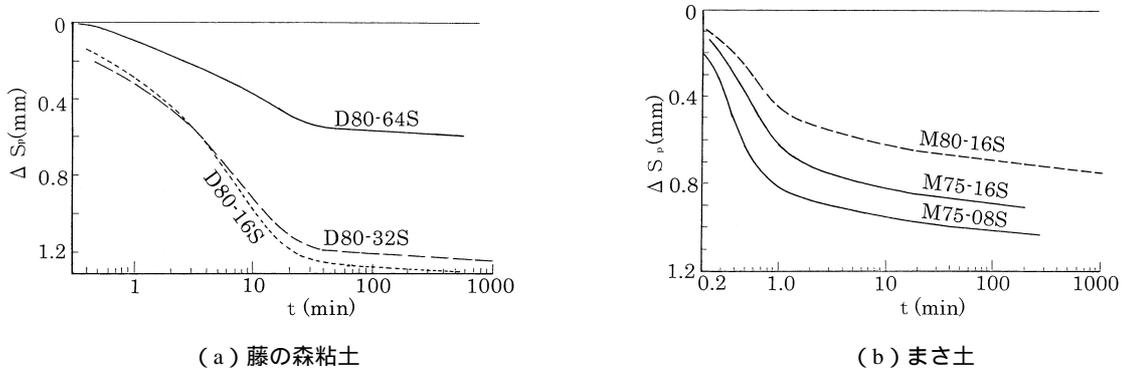


図-7 圧密応力  $p$  での水浸沈下量と水浸後の時間の関係

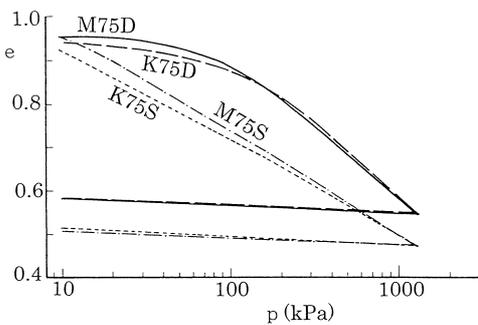


図-8 D値=75%のまさ土の最適含水比(M75)と $w=8.1\%$ (K75)での非水浸と水浸の $e \sim \log p$ 関係の比較

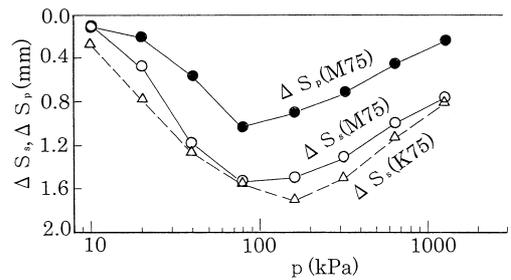


図-9 D値=75%,  $p=0$ での $\Delta S_0$ と圧密応力  $p$  での水浸沈下量  $\Delta S_p$  の比較

水浸では乾燥側の K75D の方が僅かに圧縮性が小さいため、 $p > 100\text{kPa}$  で  $e$  が大きい。  $p=0$  での水浸後の  $e$  は乾燥側の K75S が最適含水比の M75S より小さい。 初期間隙比は M75S が 0.959, K75S が 0.956 とほぼ等しいが、 $p=10\text{kPa}$  での沈下量が M75S で 0.126mm, K75S で 0.407mm と乾燥側の方が  $p=10\text{kPa}$  で大きな沈下を生じていることが原因である。  $p=0$  での水浸と非水浸の沈下量の差  $\Delta S_0$  と  $p$  まで圧密後に水浸した場合の沈下量  $\Delta S_p$  と  $\log p$  の関係を図-9に示す。 M75とK75の差は小さいが、 $\Delta S_0$ と $\Delta S_p$

の差は大きく、圧密応力が作用した状態での水浸沈下量を  $\Delta S_p$  で求めるという Barden 等 (Barden, L., et al. 1969) の方法は過大な沈下量を与える可能性がある。

#### 4. 結 論

最適含水比で締固めた藤の森粘土とまさ土での圧密と水浸試験より、次の結果が得られた。

1. 水浸による沈下量は圧密応力に大きく影響される。

水浸による沈下量は締固め土のD値が85%以下になると急増する。

2. 水浸沈下量が最大になる圧密応力はD値の減少とともに小さくなる。
3. 藤の森粘土とまさ土ではD値が75%以上で $p=0$ では膨張し、藤の森粘土ではD値が大きいほど膨張量が大きくなるが、D値=100%でD値が5%程度低下し、D値が95%以下ではD値の低下は3%以下であり、締固め密度への影響は小さい。まさ土では水浸による膨張は小さく、D値への影響は0.5%以下である。
4. 非水浸と $p=0$ での水浸供試体の沈下量の差 $\Delta S_v$ と $\log p$ の関係は圧密応力のもとで水浸した $\Delta S_p \sim \log p$ の係に類似しているが、沈下量の大きさは異なる。
5. 非常に緩いD値=70%のまさ土では $p=0$ でも大きな水浸沈下を生じる。このため、 $\Delta S_v$ の計算で初期の水浸沈下量を考慮の有無で大きな水浸沈下量の差が生じる。

本実験から盛土をD値85%以上で締固めれば、施工後の降雨や地下水の浸透による大きな水浸沈下は生じないものと考えられる。しかし、現場でのD値の決め方は室内実験とは異なっているため、この結果がそのまま現場に適用できるとはいえない。Mochizuki等(Mochizuki, A. et al.; 1997)は硬い洪積粘土の盛土のcollapse沈下を防ぐためにはD値>98%を施工条件としたと報告している。これは締固め方法の差がcollapseに大きく影響するこ

とを示唆している。水浸沈下を防ぐにはD値や飽和度の規定のみでなく、施工方法も加味する必要がある。

かつては締固めとして水締め工法があったが、最近では全く用いられない。広い面積を大型の振動ローラーで締固める場合には十分な転圧ができるが、溝の埋め戻しでは転圧が不十分になり、その後の降雨等の流入によって大きな沈下を生じている場合が多く見られる。このような場合には小型機械による締固めより水締めの方がより有効と考えられる。

### 参考文献

1. Volume change characteristics of unsaturated clay, Barden, L., et al., Proc. ASCE, **95**-SM1, 33-51, 1969.
2. Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils, Jennings, J. E. and J. B. Burland, Geotechnique, **12**-2, 125-144, 1964.
3. Controlling collapse settlement of stiff clay compacted fill based on in-situ compression tests, Mochizuki, A., et al., 地盤工学会論文集, **37**-4, 1-12, 1997.
4. Apparatus for investigation of swelling, compression and elastic properties of soils, Rengmark, F. and R. Eriksson, Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. 1, 180-183, 1953.
5. 締固めた土の二、三の膨潤特性について、斉藤孝夫、箭内寛治、土木学会論文集, **172**, 11-18, 1969.