

締固めた凝灰岩の圧密特性について

鳥 山 暁 司*

Consolidation Properties of Compacted Tuff Koushi TORIYAMA

Synopsis The increment of pore pressure Δu and axial deformation Δd of compacted tuff at different compaction works was experimented in triaxial cells applied with isotropic compression pressure σ_c at undrained condition. After this process, Δu and Δd were measured at drained condition. From these experiments, the following results are obtained. (1) The increment of pore pressure Δu are less than 10 to 30% of σ_c at moisture content from dry side to 1% wet side of optimum moisture content w_{opt} . (2) Seepage of water through specimen in two days has scarcely effect on Δu , but Δu is increased to 50% of σ_c under the condition of seepage in two weeks. (3) Pore pressure of unsoaked specimen which water content is dry side of w_{opt} dissipates in one minute, but axial deformation is gradually increased and secondary compression is separated apparently from primary compression.

1. ま え が き

大山周辺には各地に凝灰岩系の軟岩が分布している。ここに道路やフィルダム等を建設する場合、凝灰岩を盛土材料として利用することが多い。これらの凝灰岩は乾燥した状態では普通のブルドーザで容易に施工できるが、梅雨や冬期の多雨期には超湿地ブルドーザでないと施工困難になるほど軟弱化する。このことから凝灰岩を盛土材料とする場合、間隙圧の発生とその消散が盛土の安定性から問題となる場合がある。

ここでは農林水産省中国四国農政局管内で建設中のNダムのランダムゾーンに用いた角礫凝灰岩を用いて、その圧密特性を求めた。Nダムではランダムゾーンに間隙圧の発生の可能性があることから間隙水圧計を盛立て時に埋設して、施工中の間隙圧を測定したが間隙圧は発生しなかった。このことが本実験より妥当であるとともに、圧密でも間隙圧と沈下量で全く別の経時変化を生じることを報告する。

2. 実 験 方 法

締固めた凝灰岩は不飽和状態にある。不飽和土の圧密を行う場合、載荷と同時に排水、排気を行うと、間隙圧

の発生の遅れのため、間隙圧の発生量は非常に小さくなり、沈下も即時沈下と間隙圧の消散による沈下が同時に生じるため、実験結果の意味が全く不明になる。これを避けるためには、排水、排気を完全に制御する必要がある。このためには排水コックによって、制御できる構造の圧密装置が必要となる。このため三軸セルを用い、等方圧で圧密試験を行うこととした。

実験に用いた試料土はNダムのランダムゾーンの角礫凝灰岩の5mmふるい通過分である。圧密が問題になるのは搬入された自然含水比14~15%以上の含水比であるので、ふるい分け後、加水して含水比を調整し、ビニール袋に入れて、1週間以上置いたのち実験に用いた。試料土の物理的性質は表-1に示す。

圧密実験は直径10cm、高さ約10cmの供試体で行った。試料土を3層12、25、50回で締固めた後、そのまま圧密する非水浸、降雨の浸透を想定して三軸セルにセットして、 $\sigma_c = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ を加えて2日間透水後、圧密する2日透水および地下水が流入した状態を想定して2週間透水後、圧密する2週透水の3条件で実験を行った。供試体諸元を表-2に示す。

実験は非水浸では供試体を三軸セルにセットし、約1日置いた後、2日透水と2週透水の供試体は所定の時間透水後、非排水状態にして、拘束圧 σ_c を1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 kgf/cm^2 と20分間隔で増加し、各 σ_c ごとの間

*農村工学講座

隙圧と鉛直変位を測定した。増圧間隔を 20 分としたのは、隙圧の発生は 10~20 分で最大となり、これ以上おくと徐々に減少するためである。 $\sigma_c = 5.0 \text{ kgf/cm}^2$ にして 20 分経過後、排水、排気させて圧密を行い、隙圧と鉛直変位を測定した。隙圧の消散は早い供試体では 1 分以下で、遅い供試体でも 1 日以内に生じたが、二次圧密の傾向をみるため、2 日以上圧密を行った。

3. 非排水状態での隙圧と圧縮性について

非排水状態での拘束圧 σ_c と隙圧の関係を 図-1 に示す。図-1 (a) は透水条件による差を示す。非水浸と 2 日透水では隙圧に大きな差は生じないが、2 週透水では大きな隙圧が生じている。なお、2 日透水と 2 週

透水の σ_c が 0.5 kgf/cm^2 から始まっているが、透水中に供試体へのゴムスリーブの圧着を確保するため、 $\sigma_c = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ を加えて、圧密が終了しているためである。締固め含水比の $\sigma_c \sim u$ 関係への影響を図-1 (b) に示す。 $w_{opt} = 17.4\%$ であるから、 w_{opt} の乾燥側から w_{opt} の 1% 湿潤側までである。この範囲では 2 日透水の供試体でも隙圧の発生量は小さく、また締固め含水比の影響も認められない。フィルダム遮水材料では締固め含水比の増加とともに非排水状態で生じる隙圧は増加するが^{1),2)} この凝灰岩では一般的傾向と異なっている。締固め仕事量の影響を図-1 (c) に示す。 w_{opt} の約 1% 湿潤側の例であるが、締固め仕事量の影響も認められない。

拘束圧の増加ごとに隙圧係数 $B = \Delta u / \Delta \sigma_c$ を求めた

表-1 試料土の物理的性質

液性限界	N P
塑性限界	N P
土粒子の比重	2.666
礫分	1.4%
砂分	6.6%
シルト分	1.2%
粘土分	8%
最適含水比	17.4%
最大乾燥密度	1.740 g/cm ³

表-2 供試体の諸元と圧密に関する係数

回数	条件	No	w %	$\rho_d \text{ g/cm}^3$	w' %	B_{ave}	$C_{vu50} \text{ cm}^2/\text{s}$	$C_{vd50} \text{ cm}^2/\text{s}$
12	非水浸	TTB-6	18.61	1.614	18.72	0.11	0.114	0.0274
		TTC-5	19.44	1.609	18.50	0.054	0.146	0.0203
	透水 2日	TTA-5	15.43	1.563	21.37	0.18	0.316	0.0460
		TTB-5	17.99	1.563	21.67	0.10	0.208	0.0260
		TTC-6	18.74	1.613	17.91	0.13	0.144	0.0372
		TTC-1	15.57	1.641	18.73	0.070	-	0.00483
25	非水浸	TTB-1	16.81	1.653	17.60	0.044	-	0.123
		TTC-1	19.37	1.664	17.28	0.27	0.234	0.0834
		TTC-2	18.32	1.668	18.52	0.10	0.0994	0.0369
	透水 2日	TTA-2	15.51	1.599	23.63	0.14	0.238	0.0410
		TTB-2	16.85	1.628	17.88	0.13	0.196	0.0175
		TTC-2	18.32	1.668	18.52	0.10	0.0994	0.0369
50	非水浸	TTA-3	15.34	1.686	16.80	0.033	-	0.00421
		TTB-3	17.06	1.707	15.81	0.076	0.0416	0.00825
		TTC-4	18.75	1.698	15.88	0.17	0.0615	0.0199
	透水 2日	TTA-4	15.23	1.693	15.88	0.084	0.505	0.00838
		TTB-4	16.44	1.712	16.24	0.10	0.0629	0.0250
		TTC-3	18.76	1.686	16.63	0.15	0.0867	0.0283
25	透水	TTD-1	15.54	1.664	22.72	0.55	2.14	0.915
12	2週	TTD-2	15.45	1.565	22.07	0.49	1.15	0.428
25	間	TTD-3	18.80	1.665	18.80	0.60	0.501	0.415

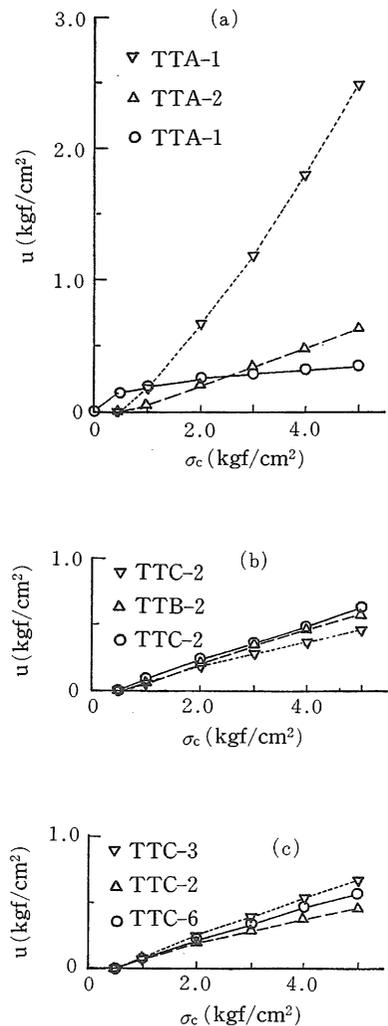


図-1 非排水状態での拘束圧と隙圧の関係

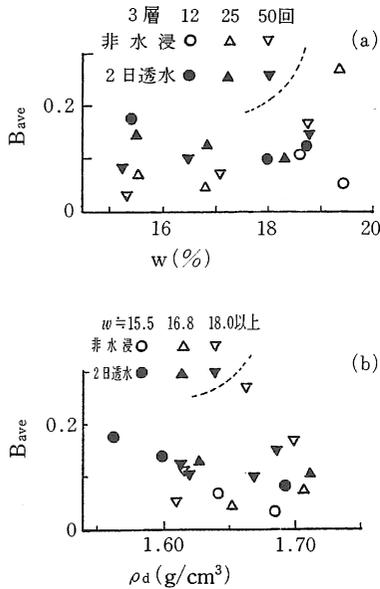


図-2 間隙圧係数 B への締固め含水比 締固めの密度の影響

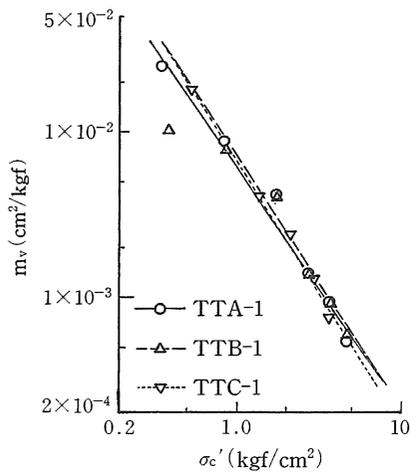


図-3 非排水状態での有効応力と体積圧縮係数の関係

が、 σ_c によって大差はない。そこで $\sigma_c = 1 \sim 5$ kgf/cm² の各段階の B の平均値 B_{ave} を求めた。これを表-2 に示す。 B_{ave} と締固め含水比 w 、乾燥密度 ρ_d との関係を図-2 に示す。 w が 18.5% 以下では、 B_{ave} への w の影響はなく、また、非水浸と 2 日透水の供試体とも $B_{ave} \approx 0.1$ 程度と小さい。普通の締固め土では水浸によって飽和度が増すため、間隙圧係数 B も大きくなるが、ここでははっきりした傾向は認められない。

実験に用いた凝灰岩の締固め実験では $w = 13 \sim 14\%$ で

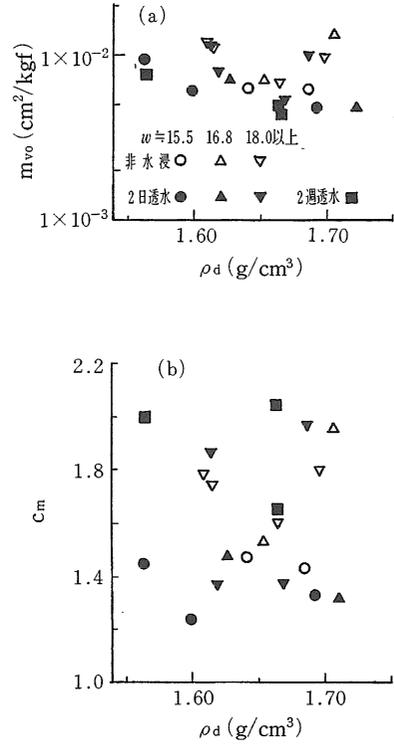


図-4 $m_v = m_{vo} \sigma'_c^{-C_m}$ の係数と乾燥密度の関係

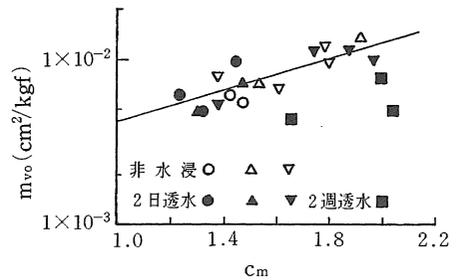


図-5 係数 m_{vo} と C_m の関係

最適含水比のように感じられる。実際の最適含水比付近では突き固めにより、試料土は完全に過転圧状態になっている。このことから、 w が 15% 以上では間隙空気は大部分が気泡状態で存在し、このため 2 日透水程度では排出されずに残り、 B が小さいままと考えられる。この供試体を 2 週間透水した場合、表-2 の TTD-1 ~ TTD-3 のように B_{ave} は 0.5 程度に増加している。気泡状の間隙空気が徐々に間隙水中に溶解した結果、 B_{ave} も増加したのと思われる。

供試体の半径方向変位は測定できず、鉛直変位のみを

測定した。供試体は等方的と仮定して、体積ひずみ ϵ_v は軸ひずみ ϵ_a に対して $\epsilon_v = 3\epsilon_a$ とみなして体積圧縮係数 m_v を次式で求めた。

$$m_v = \frac{\Delta V}{V} \frac{1}{\Delta \sigma'} = \frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta \sigma'}$$

各拘束圧段階ごとに有効応力 $\sigma'_c = \sigma_c - u$ を求め、前圧力からの増分 $\Delta \sigma'_c$ を求めた。 m_v と σ'_c の関係は $\log m_v \sim \log \sigma'_c$ と $\log m_v \sim \sigma'_c$ プロットとも直線近似可能のようであるが、 $\log m_v \sim \log \sigma'_c$ の方が相関性が大きい。 $\log m_v \sim \log \sigma'_c$ の関係を図-3に示す。低圧段階で直線から離れる点もあるが、ほぼ直線関係が成り立つ。これより

$$\log m_v = \log m_{v0} - C_m \log \sigma'_c$$

or $m_v = m_{v0} \sigma'^{-C_m}$

が成り立つ。 m_{v0} 、 C_m と乾燥密度 ρ_d の関係は図-4に示すが、ばらつきが大きい。 $\log m_{v0}$ と C_m の関係は図-5に示す。この図より

$$\log m_{v0} = -2.85 + 0.478 C_m \quad (r = 0.824)$$

となる。

体積圧縮係数は $2 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{kgf}$ にあり、 σ'_c の増加による m_v の減少割合が大きい。これは非排水状態で20分間載荷のため二次圧密が生ぜず、 σ'_c の増加とともに、圧縮の遅れが生じるためである。

4. 圧密過程について

圧密過程の例を図-6に示す。図-6(a)は非水浸のTTA-1である。締固め含水比が17%以下の供試体は排水コックを開くと排気音とともに間隙圧は0となり、1分以内に間隙圧はほぼ0になる。軸変位 d は載荷後、徐々に生じる。このため、図のように見掛け上、 $d \sim \log t$ 関係は一次圧密部分と二次圧密部分から成り立っている。2日透水の供試体では非排水状態で生じる間隙圧は非水浸供試体とほぼ等しいが、図-6(b)のように間隙圧は時間とともに消散する一般的な傾向を示し、軸変位は見掛け上、一次圧密部分と二次圧密部分に分けられる。2週透水の供試体では間隙圧、軸変位とも飽和土の圧密曲線に近い形状をしている。

不飽和土の圧密方程式としては Barden³⁾、鳥山・沢田⁴⁾、その他の式があるが複雑な非線形式で、仮定も多く実用的でなく、設計には Terzaghi の圧密方程式が利用されている。そこで間隙圧については排水開始直前の間隙圧 u_0 の30, 50, 80%が消散した時間 t_{u30} , t_{u50} , t_{u80} を、軸変位については見掛け上の一次圧密沈下量の30, 50, 80%が生じた時間 t_{a30} , t_{a50} , t_{a80} を求め、圧密係数 c_v を

$$c_v = \frac{T_{vi} \cdot H^2}{t_i}$$

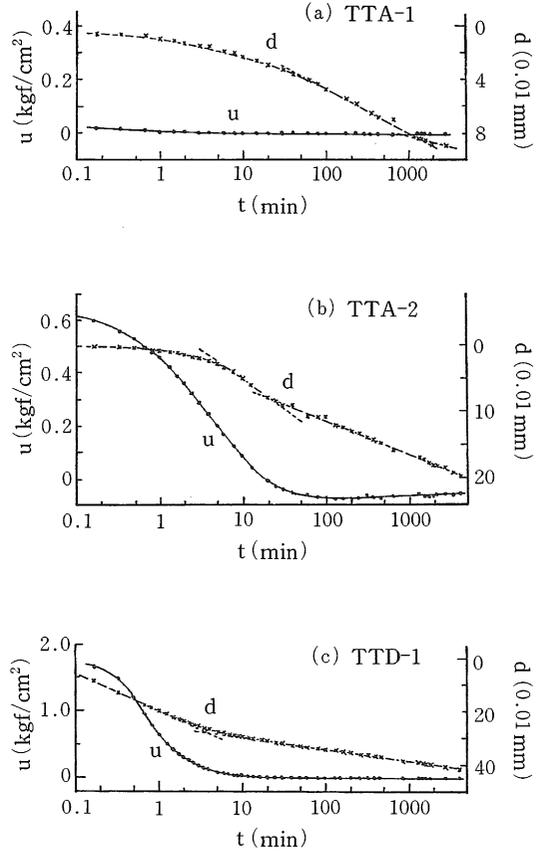


図-6 圧密過程での間隙圧・軸変位の経時変化

で求めた。ここに t_i , T_{vi} は間隙圧、変位の各圧密度に対して求めた時間と Terzaghi の圧密理論での各圧密度の時間係数である。圧密係数と締固め含水比の関係を図-7に示す。非水浸の $w < 17\%$ の供試体の間隙圧は排水開始1分後には0になるため、間隙圧の圧密係数 c_{vu} は非常に大きく、求まっていない。図-7(a)の間隙圧の圧密係数 c_{vu} では $c_{vu30} > c_{vu50} > c_{vu80}$ となつて、圧密の進行とともに間隙圧の消散は Terzaghi 圧密理論より遅くなっている。これに対して、軸変位の圧密係数 c_{vd} では圧密度による大小は実験の含水比の範囲で一定の傾向はなく、 $w > 17\%$ になると $c_{vd30} \approx c_{vd50} \approx c_{vd80}$ となつて、Terzaghi 曲線にはほぼ等しい時間-軸変位曲線となる。 c_{vu50} と c_{vd50} を表-2に示すが、 $c_{vu50} > c_{vd50}$ となっている。締固め含水比 w と c_{vu50}/c_{vd50} の関係を図-8に示す。図中、 $c_{vu50}/c_{vd50} = 80$ の線にある3点は c_{vu50} が大きすぎて求まらない点で $c_{vu50}/c_{vd50} > 80$ であることを示している。非水浸と2日透水の供試体の c_{vu50}/c_{vd50} はほぼ2-10の間にあり、 $c_{vu50}/c_{vd50} = 60.3$

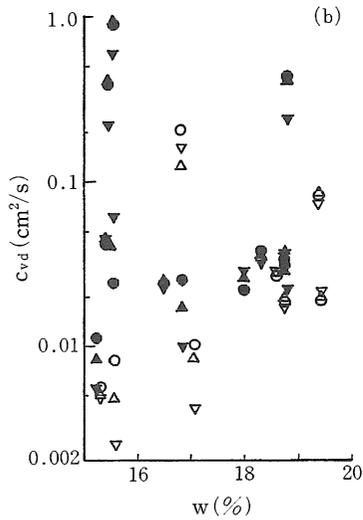
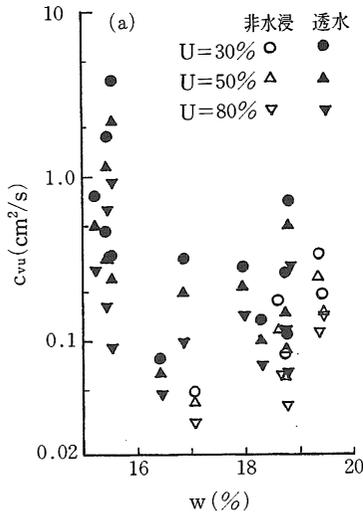


図-7 圧密係数と締固め含水比の関係

を除くと、平均して5.10であり、間隙圧の消散は変位または沈下の5倍の速さで生じたことになる。これに対して2週透水のTTD-1~TTD-3では C_{vu50}/C_{vd50} の平均値は2.08でその差は小さくなっているが、間隙圧の消散は変位の2倍の速さとなっている。

圧密過程での体積圧縮係数 m_v と締固め含水比の関係を図-9に示す。 m_v は $3 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kgf}$ の範囲にある。圧密過程の σ_c' は非排水過程の σ_c' より大きいから、 m_v は図-3より 1×10^{-3} 以下と考えられるが、実際にはその10倍以上になっている。これは図-6の $d \sim \log t$ 関係に示したように、軸変位の遅れにより、初期の

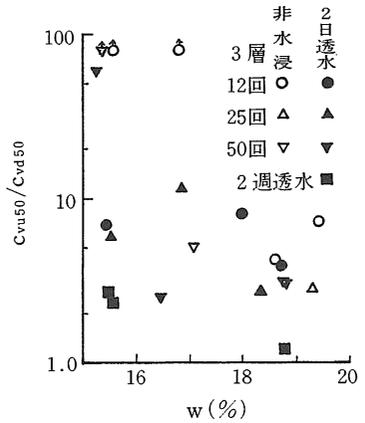


図-8 間隙圧と軸変位からの圧密係数の比と締固め含水比の関係

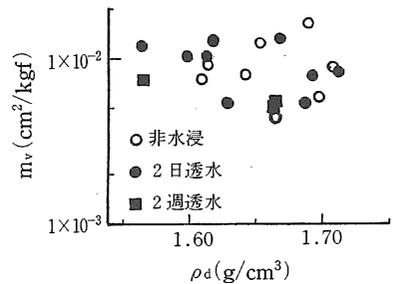


図-9 圧密過程の体積圧縮係数と乾燥密度の関係

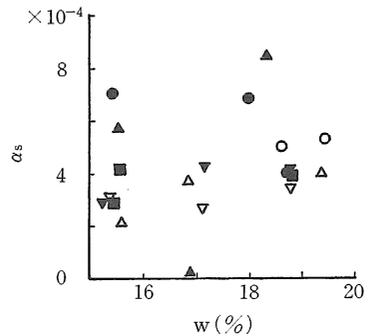


図-10 二次圧密速さと締固め含水比の関係 (記号は図-8と同じ)

20分間に生じる軸変位は小さいため、非排水状態に比べて圧密過程では $\Delta \sigma_c'$ に対する軸変位が大きくなり、 m_v も大きくなっている。

二次圧密速さ $\alpha_s = \Delta d_s / (H \cdot \Delta \log t)$ と締固め含水比の関係を図-10に示す。1供試体を除いて α_s は $2 \times 10^{-4} \sim 9 \times 10^{-4}$ の範囲にあり、軟弱な飽和粘土の α_s の 1×10^{-2} のオーダーに比べて小さい値となっている。 α_s の平均値は 4.4×10^{-4} であるから、50mのフィルダムを仮定すると、 $(t_0 + \Delta t) / t_0 = 10$ の間に生じる二次圧密沈下量

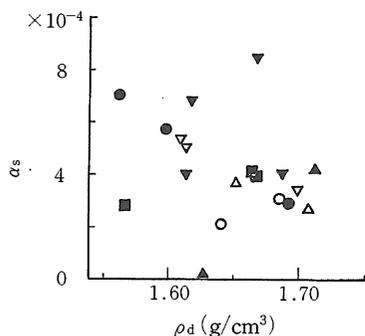


図-11 二次圧密速さと乾燥密度の関係（記号は図-4と同じ）

ΔS_s は

$$\Delta S_s = 4.4 \times 10^{-4} \times 5000 = 2.2 \text{ cm}$$

となり、小さな値であり、問題はない。

二次圧密速さと締固め密度の関係を図-11に示す。2点を除くと

$$\alpha_s = (4.27 - 2.33 \rho_d) \times 10^{-3} \quad (r = -0.735)$$

となり、締固めによって二次圧密沈下量の減少ができる。

5. あとがき

締固めた凝灰岩の非排水状態で生じる間隙圧と圧密過程についての実験結果を示した。これより

- (1) 最適含水比 w_{opt} の2%程度湿潤側まで非水浸で生じる間隙圧は小さい。また降雨のような短期間の浸透水も間隙圧の発生に大きく影響しない。
- (2) 長期間透水を続けると、間隙中の気泡状空気が水中に溶解して、非排水状態での間隙圧の発生量が増加する。したがって、地下水の浸透する盛土部分では載荷重によって大きな間隙圧が生じる可能性がある。
- (3) 圧密過程では間隙圧の消散は沈下より早く生じ、平均して c_v が5倍の大きさとなっている。したがって現場の圧密を考える場合、間隙圧が主として問題となる場合

には間隙圧の測定結果から c_v を求める必要がある。

(4) 圧密沈下は間隙圧の消散より遅れる。この原因は土の変形への粘性抵抗によると考えられる。室内と現場ではスケールが異なり、現場ではこの差は生じないものと考えられる。この場合には間隙圧の測定から求めた c_v を用いた方が合理的と考えられる。

(5) 二次圧密速さ α_s は飽和粘土の1/10以下であり、大部分の盛土では二次圧密沈下量は問題にならないと考えられる。

ここでの実験は非排水状態と排水状態を分けて実験した。飽和土の圧密試験と同じように、載荷と同時に排水・排気すると間隙圧の発生の時間的遅れ、すなわち、沈下の粘性抵抗のため、間隙圧も沈下量もその意味が不明となるため、十分の注意が必要である。

実験に用いた凝灰岩は最適含水比では過転圧状態になり、現場での施工が困難な状態になる。したがって現場では大部分の場合、最適含水比以下で施工することとなり、間隙圧の発生を考慮する必要はないと考えられる。ただし、地下水が流入する盛土下部では間隙圧の発生が考えられ、施工速度からその消散を検討する必要が生じる場合もあろう。

なお、本実験にあたりましては平成2年度の島根大学農学部農業施設工学研究室の専攻生の森尾昭彦君、山田吉輝君、土居修君に多大のご助力を賜りました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鳥山暁司：農土集, 57 (4): 23-28, 1989.
- 2) 鳥山暁司：農土論集, 147: 45-52, 1990.
- 3) Barden, L.: Geotechnique, 24 (4): 605-625, 1974.
- 4) Toriyama, K. and T. Sawada: Soils and Foundations, 8 (3): 63-86, 1968.