締固め土のせん断時における間げき水圧の挙動について*

赤井 浩一** 矢部 正宏***

On the Behavior of Pore Pressure during Shear of Compacted Soils

by

Koichi AKAI and Masahiro YABE
(Kyoto University) (Ministry of Construction)

Of great importance in the design of earth structures, such as earth dams, river levees and subgrade or base course of roads, is to know the change of density and strength of compacted soils with their moisture contents. The paper concerns this problem on the basis of pore pressure exerted during shear of soils, through a series of triaxial compression test accompanied by the pore pressure measurement.

Respecting the behavior of pore pressure during shear of compacted unsaturated soils, a lot of experimental data have been obtained which are clearly proved to be quite different from those of undisturbed saturated soils.
(Received May 20, 1961)

1. 緒 言

土を締固めるときに、含水量に応じて密度および強度がどのように変化するかを知ることは、アースダムや河川堤防または道路の路床・路盤など、いわゆる土構造物の設計においてきわめて重要であり、従来からしばしば取り扱われてきたことがらである。しかしこの問題を締固め土の間げき(隙)水圧の面から検討した試みはいまだ数少なく、ことにわが国では皆無の状態である。よって、ここでは締固めた不飽和の土をせん(剪)断するときには発生する間げき水圧の挙動を実験的に考究し、土の締固め機構の解明を試みる。

2. 試料の物理的性質

試料として用いたのは大阪ちゅう(沖)積層に属する土であって、次のような物性を有している。

比重: 2.73, 粒度組成: 砂分 (0.05 mm 以上) 43%, シルト分 (0.05~0.005 mm) 55%, 粘土分 (0.005 mm 以下) 2%, 均等係数 $U_c=3.58$, $w_L=44.9\%$, $I_P=16.6\%$, 土質分類: OL-ML 群シルト質ローム。

Fig. 1 には 3. の試験方法によった場合の締固め曲線が描かれており、これより最適含水比は 21.2%, 最大乾燥密度は 1.65 t/m^3 として求められる。

3. 試験装置と方法

締固め用モールドは路床土支持力比 (CBR) 試験に用いられる内径 15 cm, 高さ 17.5 cm の真ちゅう製円筒であって、スペーサー・ディスクは取りはずしておいた。ランマーも CBR 試験用のもので、端面の直径

Fig. 1 Compaction curve of the sample tested

Photo. 1 Pore pressure apparatus

* 原稿受付 昭和36年5月20日, 当協会第10期総会講演会(創立10周年記念)にて講演(昭36.5)

** 正員 京都大学工学部

*** 建設省土木研究所

5 cm, 重さ 4.5 kg であり, 落下高を 45 cm として各層 25 回, 5 層に分けて突き固め, これより直径 3.5 cm, 高さ 8 cm の寸法をもつ一連の供試体を切り出した (Fig. 1 の黒点の試料について)。

締固め土のせん断には, ひずみ制御型の三軸圧縮試験機を用い, ひずみ速度を毎分供試体初期高さ (8 cm) の 0.5 % に制御して非排水せん断を行ない, この間の供試体内部の間げき水圧を測定した。間げき水圧測定装置は Photo. 1 に示す BIC 型のもので, その測定原理はいわゆる no-flow 方式といわれているものである。¹⁾ 三軸圧縮室下部のポーラス・ストーンにつながれたパイプの一端は, この装置中央の毛細管上部に連なり, 毛細管中には水銀を封入している。間げき水圧が上昇すると毛細管中の水銀の頭部に高い圧力がかかることになるので, いままで平衡の位置にあった水銀柱

が降下するが, このとき右下にあるハンドルを回してピストンを押し, 毛細管下部に圧力を加えて水銀を押し上げる。そうして水銀の位置が前と同じ高さ (零点) になったとき, 間げき水圧とピストンによって加えられた圧力が等しいはずであるから, これを水銀マンローターまたはブルドンゲージで読み取ることににより, 供試体内部の間げき水圧を知ることができる。間げき水圧が減少してきた場合にも同様の操作を行なえばよい。すなわち, 毛細管中の水銀柱先端の位置を絶えず一定に保ち, 供試体からの排水を許さない状態で平衡時の圧力を読むのである。

せん断試験において採用した側圧は, $\sigma_3 = 1.0, 1.4, 1.8, 2.2 \text{ kg/cm}^2$ の 4 種類であって, これを一度に与えるのではなく, 0.2 kg/cm^2 ずつ段階的に増加させ, 各段階ごとに間げき水圧を測定した。この各段階には

Table 1 Result of ordinary undrained tests

Series number	Test number (No.)	Dry density (t/m ³)	Water content at compaction (%)	Degree of saturation (%)	Ambient pressure (kg/cm ²)	Max. deviator stress (kg/cm ²)	Pore pressure at compaction (kg/cm ²)	Pore pressure at failure (kg/cm ²)	Water content at failure (%)
I	1				1.0	2.05	0.13	0.87	30.8
	2	1.446	29.7	91.2	1.4	1.67	0.08	1.20	29.8
	3				1.8	2.60	0.15	1.39	30.4
II	4				1.0	2.43	0.13	0.40	27.4
	5				1.4	2.06	0.13	1.11	27.8
	6	1.511	26.1	88.3	1.8	1.72	0.13	1.66	28.8
	7				2.2	1.96	0.20	1.80	28.3
	8				0.6	2.15	0.19	0.37	17.5
III	9				1.0	2.75	0.14	0.77	25.0
	10	1.557	22.8	82.7	1.4	3.65	0.12	0.95	25.0
	11				1.8	4.75	0.17	0.86	24.1
IV	12				1.0	2.85	0.14	0.80	22.8
	13				1.4	4.44	0.12	1.09	21.7
	14	1.654	21.2	88.9	1.8	2.85	0.15	1.67	23.1
	15				2.2	4.11	0.16	1.51	22.4
V	16				1.0	5.64	0.14	0.51	19.1
	17				1.4	7.71	0.15	0.56	19.7
	18	1.570	17.3	64.0	1.8	5.86	0.15	0.75	19.4
	19				2.2	8.16	0.18	0.78	18.9
VI	20				1.0	5.77	0.14	0.38	17.4
	21				1.4	6.12	0.16	0.68	19.0
	22	1.561	16.4	50.6	1.8	8.06	0.14	0.55	18.2
	23				2.2	8.37	0.13	0.47	18.5
VII	24				1.0	8.38	0.17	0.40	14.3
	25	1.521	12.0	41.3	1.4	6.45	0.16	0.54	17.0
	26				1.8	8.42	0.15	0.42	15.2

Fig. 2 Correlations between ambient pressure and pore pressure

ほぼ2分間程度の時間間隔をおいたが、これは側圧増加によって発生する間げき水圧が定常になるのを待つためであって、この程度の時間をかけるとはほぼその目的は達成されたようである。

さきに述べた毎分0.5%のひずみ速度は JIS A 1216 (一軸圧縮試験法) に規定されている値の半分であるが、軸差応力の増加に応じて間げき水圧が充分追従するように考慮したものである。せん断中は30秒ごとに、すなわちひずみ増加0.25%ごとに、軸差応力を測るプルベイングリングと間げき水圧計の読みをとって記録した。

試験終了後は供試体の重量変化を測定し、同時に破壊時含水比を求めた。また一部のシリーズの試験では、せん断に先だてて供試体に吸水を許す方式を採用した。これは現実の問題として、締固められた土が吸水して含水比を増すことは充分起こりうることであり、そのさいに強度がどのように変化するかを知るために行なわれたものである。この種の試験では最初側圧を与えると同時に、間げき水圧測定装置を用いて供試体の下端から適当な大きさの back pressure を加えて吸水させ、以後は通常の非排水せん断方式をとった。

4. 試験結果とその考察

Table 1 に通常の非排水試験 (シリーズ I ~ VII) の結果を総括した。

(I) 側圧の増加による間げき水圧の変化

三軸圧縮試験機による供試体のせん断に先だち、先述のように非排水状態で側圧を 0.2 kg/cm^2 ずつ増加させて、各段階ごとに間げき水圧を測定した。そのさいの間げき水圧の変化の様子は Fig. 2 に示すようであって、飽和度 S が高い場合ほど間げき水圧が大きいことがわかる。すなわち、試料が飽和に近づくほど

Skempton の定義した間げき水圧係数 $B = \Delta u / \Delta \sigma_3$ は 1 に近づく。図中、両座標軸と 45° の角度をなす破線は $B=1$ の場合を示す。

(II) 応力-ひずみ曲線

三軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線の二, 三の例を Fig. 3 (a)~(c) の上段に示す。破壊規準としては軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) が最大の場合をとったが、図中の矢印が破壊点に相当する。

湿潤側の土は乾燥側のそれに比べて応力-ひずみ曲

Fig. 3 Stress-strain curves and pore pressure-strain curves in ordinary undrained tests

線がゆるやかで、破壊点が明確に現れないが、一応破壊とみなされる点はかなり大きいひずみで生ずる。これに反して、乾燥側の土の曲線ははるかに急になり、比較的小さいひずみ量で明確な極値をもつ。一つのシリーズについていえば、側圧の低い場合に小さいひずみで破壊が生ずる傾向にある。なお乾燥側の試料で応力-ひずみ曲線が極大値を明確に示す場合には、供試体にせん断面が認められ、その面が最大主応力面となす角は $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ であった。

(III) せん断時の発生間げき水圧-ひずみ曲線

軸差応力の増加に伴って起こる間げき水圧の変化の様子を、上記の応力-ひずみ曲線に対応させて Fig. 3 の各下段に示す。縦軸には、あるひずみのときに測定された間げき水圧から、試験前に側圧だけによって生ずる間げき水圧を差し引いた、いわゆる発生間げき水圧をとった。その一般的な挙動としては、せん断に伴って間げき水圧が増加し、ほどなく一定値に達してその状態をしばらく持続したのち、やがて減少しはじめる。(II)で述べた規準による破壊時の発生間げき水圧を矢印で示した。(I)の場合と同様に、含水比したがって飽和度が大きいほど発生間げき水圧が大きい、その最大値は $\sigma_3 = 2.2 \text{ kg/cm}^2$ の側圧に対して高々 0.3 kg/cm^2 にすぎない。同一含水比の土については、側圧が高くなるほど発生間げき水圧が大きくなる。

せん断が進むにつれて、一時一定であった間げき水圧が減少しはじめるという現象の共通してみられる点が飽和土の非排水試験の場合と異なっている。これは飽和土のせん断と違って不飽和土では、軸差応力を受けて形状変化をする間に、含水比の変化を伴わないでも容積変化が生ずるというダイレイタンス特性があるためである。⁴⁾

Fig. 4 Maximum deviator stress vs. water content at compaction

(IV) 締固め含水比とせん断強度の関係

縦軸に破壊時の軸差応力をとり、横軸に締固め時の含水比をとって、各側圧に応じて両者の関係を図示したのが Fig. 4 である。測定値にやや散らばりが認められるが、 $\sigma_3 = 1.0, 1.4, 1.8 \text{ kg/cm}^2$ の各側圧に対してほぼ図の曲線のような関係が見られる。この結果から締固め含水比がかなり大きいところでは、強度は側圧にあまり関係しなくなること、および最大強度は最適含水比よりもなお乾燥側において生ずることが知られる。

これらは実際の施工管理において含水量を制御する場合の一つの指針を与えるが、あまりに乾燥側の土は吸水する性質があり、それによって含水比が増加して思わぬ強度の減少を生ずることが考えられるので、この点については(VII)の吸水試験のところで考察を行なうことにする。

(V) 破壊時含水比とせん断強度の関係

縦軸に破壊時の軸差応力、横軸に破壊時の含水比をとって、両者の関係をプロットしたのが Fig. 5 である。締固め含水比と破壊時含水比の相違については Table 1 に示されているが、いずれのシリーズでも後者のほうが大きく出ている。これは実験が終始非排水の状態で行なわれたにもかかわらず、供試体の底部が間げき水圧測定用のポーラス・ストーン内の水と接触するため、試験中若干の含水量変化が不可避であったことによるものである。⁵⁾

Fig. 5 の各曲線は Fig. 4 のものをいくらか右側(含水量の大きい側)へ平行移動させたような形になっている。なお、強度と破壊時含水比との間に、飽和粘土では一義的な関係があることを以前に報告しておいたが、締固め土については次のように考えられている。⁶⁾

せん断強度の変化は破壊時の間げき比の変化に伴っ

Fig. 5 Maximum deviator stress vs. water content at failure

て生ずるものであり、その関係は間げき比を変化させる方法いかんによらない独立のものである。ゆえに飽和土においては、強度の変化は破壊時含水比の変化に伴ったものでなければならず、含水比と強度の関係は含水比変化の過程には無関係となる。ところが締固めた土のような不飽和土では、軸差応力を受けるさいの

間げき比の変化はかなり大きくなることもある上に、これはまた締固め度と側圧に関係するが、含水比の変化とは無関係に起こる。以上のことから Leonards は不飽和土の強度変動の型が破壊時の間げき比のみに関係し、他の因子との間には相関関係がないという結論を出している。

(VI) Mohr の破壊応力円

Table 1 のシリーズ II, V, VI の各試験結果を有効応力で整理して描いた Mohr の破壊応力円を Fig. 6 (a), (b), (c) に示す。これらの破壊包絡線を直線とみなして Coulomb の式

$$s = c' + \sigma' \tan \phi'$$

を適用し、見掛けの粘着力 c' と内部摩擦角 ϕ' を求めてみると、各シリーズについて次の値が得られる。

シリーズ	締固め含水比 (%)	c' (kg/cm ²)	ϕ' (度)
II	26.1	1.03	0
V	17.3	1.10	31.7
VI	16.4	1.05	32.0

この結果によると、この試料は最適含水比より乾燥側において内部摩擦角 $\phi' \approx 32^\circ$ 、粘着力 $c' \approx 1.0 \text{ kg/cm}^2$ の強度定数をもつ。すでに述べたように、含水比が大きくなると側圧の相違による強度差がなくなるので、含水比の増加とともに内部摩擦角が減少するといことが予想される。

(VII) 吸水せん断試験

締固めた試料に吸水させ、含水比を増加させた後に行なった非排水せん断試験の結果を総括して Table 2 に示す。また Fig. 7 はこの試験のさいの強度の変動を調べた結果を図示したものであって、これより次のことが推論される。

Fig. 6 Mohr's stress circles

Table 2 Result of undrained tests after soaking

Series number	Test number (No.)	Dry density (t/m ³)	Water content at compaction (%)	Degree of saturation (%)	Back pressure (kg/cm ²)	Max. deviator stress (kg/cm ²)	Pore pressure at compaction (kg/cm ²)	Pore pressure at failure (kg/cm ²)	Water content at failure (%)
VIII	27	1.580	14.4	53.9	0	4.84	0.14	0.38	18.9
	28				0.5	2.27	0.12	0.35	24.2
	29				0.5	1.69	0.14	0.41	25.0
	30				0.5	2.68	0.18	0.32	23.2
IX	31	1.587	23.4	88.5	0	3.70	0.14	0.21	22.8
	32				0.7	3.74	0.12	0.66	22.6
	33				0.7	2.24	0.17	0.85	24.3
X	34	1.664	19.2	81.8	0	3.27	0.16	0.79	22.0
	35				1.0	4.37	0.19	0.33	21.5
	36				1.0	2.64	0.16	0.79	22.7

($\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$)

すなわち低い含水比で締固めた土は back pressure を与えると含水比が大きく増加し、強度は著しく減少するが、最適含水比より高い含水比で締固めた土では、高い back pressure を与えても含水比の増加は少なく、強度の減少もあまり大きくない。(IV)で述べたように、低い含水比で締固めた試料は吸水を許さないときにはかなり高い強度をもつが、実際の施工において所要の強度を得るために乾燥側で締固めた場合には、吸水能力が大きいためいったん吸水すると非常に強度を減ずる危険性がある。これに対して湿潤側で締固めたものは、締固め時の強度自体があまり大きいものではないので、吸水による強度減少の割合も小さいのである。

しかし Lambe によると、乾燥側の土と乱さない土、湿潤側の土とねり返した土との間に構造上の相似性が

Fig. 7 Strength change of compacted soils due to soaking

ある。このため同一密度で一方は乾燥側、一方は湿潤側で締固められた試料が容積一定のまま水で飽和するとき、前者は後者より強度が大きく、しかもその強度差が土の飽和度の増加につれて減少してくると説明されている。⁸⁾

5. 結 語

最適含水比より湿潤側または乾燥側のいずれの含水量で土を締固めるのが強度の面から適当であるかということは、盛土をはじめとするあらゆる土構造物の設計において重要な事項である。本文ではこの問題を土のせん断時における発生間げき水圧の面から検討するために、三軸圧縮試験機を用いて一連の実験的考察を試みた結果を述べた。

ここに記した実験結果からは、一応最適含水比より湿潤側にある土のほうが吸水後のせん断に対する安定性がよいという結論が得られたが、一定容積におけるせん断に対しては今後の研究にまたねばならないものが少なくない。締固め土のせん断時における間げき水圧の挙動については詳細な資料が得られ、それが飽和土とは異なった特性を示すことを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) A.W. Bishop and D.J. Henkel, The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, 52 (1957) Edward Arnold Ltd.
- 2) J. Lowe, III and T.C. Johnson, ASCE, Proc. of Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, 819 (1960)
- 3) A.W. Skempton, Geotechnique, 4, 143 (1954)
- 4) 赤井, 土木学会論文集, 58, 76 (1958)
- 5) 赤井, 材料試験, 9, 87, 772 (1960)
- 6) 赤井, 柴田, 土木学会誌, 40, 545 (1955)
- 7) G.A. Leonards, ASCE, Trans., 120, 1420 (1955)
- 8) T.W. Lambe, ASCE, Proc., 84, SM-2, 1655 (1958)