

(45) 人工軟岩の三軸圧縮試験

鉄道技術研究所 ○ 桜井 孝
高橋昭敏

1. まえがき

破碎質軟岩地山の岩盤強度を評価する方法を検討するため、人工軟岩の力学特性に関する試験を行ってきている。人工軟岩とは、泥質軟岩を対象とし、これを乾燥粉碎した粉末試料に水を加え、練り混ぜた後、シリンダー内に詰め、ピストンで加圧し、力学試験用供試体となるよう押し固めたものである。

人工軟岩の作成方法及び一軸圧縮試験結果については、既に一部報告しており、作成された人工軟岩の密度等の物理的性質は、加える水の量、すなわち、供試体の含水比に大きく支配されることを明らかにしている。また、一軸圧縮試験を実施したところ、変形・破壊形態、及び一軸圧縮強さも含水比に支配されることを示している。^{1) 2)}

ここでは、泥質軟岩の一試料として、北越北線鍋立山トンネル（35k295m）で採取した第三紀椎谷層泥岩及びこれに標準砂を混合した試料について人工軟岩を作成し、三軸圧縮試験を実施した結果について報告する。

2. 供試体の作成方法

人工軟岩の作成フローを図1に示す。作成した円筒形供試体は、力学試験実施後、再度乾燥粉碎し、次の人工軟岩を作成することができる。

具体的な作成手順は既発表文献に譲るが、ピストンに加える荷重の大きさ、及び時間は、それぞれ10 kN（1 tf、供試体の直径が35mmのため、約10 MPa）以上、1時間以内では、作成される人工軟岩の力学特性にはあまり変化がないことが確かめられているため、今回の人工軟岩は、載荷荷重50kN、載荷時間5分で作成している。

人工軟岩の力学特性が、ピストンの載荷荷重、載荷時間に依存しない理由は、重量比25%以上の水を加えて作成した人工軟岩の飽和度は100%近くになっており、構成粒子が細粒なため、短い時間では排水が進行しないためと考えている。

図2に鍋立山泥岩の粉末試料を長期圧密したときの、ピストンの貫入状況を示す。載荷荷重は50kNである。先行荷重として50kNを5分かき、供試体の長さが約70mmとなったところを変位0mmとして圧密を開始している。粉末試料に加えた水の量（設定含水比 W_n ）は、いずれも25%である。

圧密終了後、一軸圧縮試験を実施している。一軸圧縮試験終了後に測定した供試体の含水比を W_n （試験後含水比）とし、図中に示している。24時間圧密した試料の密度は 2.02 g/cm^3 、360時間圧密した試料の密度は 2.19 g/cm^3 となっている。いずれの供試体も、飽和度は100%近くになっている。³⁾

これらの長期圧密して作成した人工軟岩の一軸圧縮試験結果を、図3に示す。図中の実線は、同じ鍋立山泥岩を用い、50kN、5分載荷して作成した人工軟岩の一軸圧縮強度と試験後含水比の関係で、強度を対数で表すと、直線で示すことができる。

図3から、長期圧密した試料では、含水比が低下したぶん強度が大きくなり、この直線に乗っていると判断できる。このことは、人工軟岩の力学特性は、圧密経路には関係せず、試験時の含水比に支配されることを示している。すなわち、希望する含水比の人工軟岩を作成するためには、長時間の圧

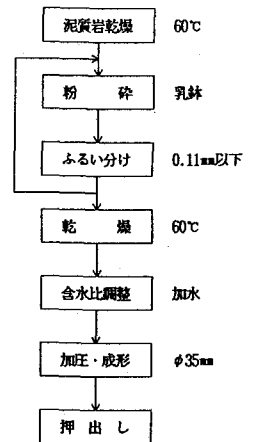


図1 人工軟岩の作成

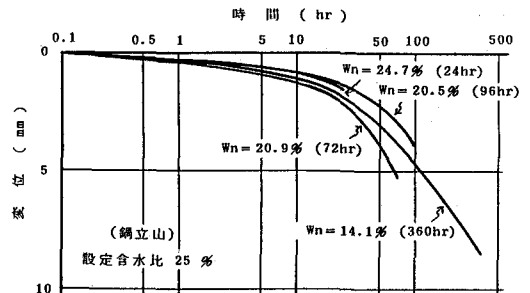


図2 長時間圧密による人工軟岩の作成

密排水によらず、当初から希望する含水比に相当する水を粉末試料に加えればよいことがわかる。

この場合、試験後含水比は、設定含水比より平均で2.3 %小さくなっている。¹⁾

3. 試験結果

3.1 一軸圧縮試験結果

三軸圧縮試験に先立ち一軸圧縮試験を実施した。試験に用いた試料は、A；鍋立山泥岩を粉砕したもののほか、B；鍋立山泥岩粉末試料1に対して豊浦標準砂（0.11～0.30 mm）2の重量比で混合したもの、及び、C；この混合試料を再度すりつぶし、全試料が0.11 mm以下の粒度としたものの3種類である。これらの粒度分布等を表1に示す。モンモリロナイト含有量は、X線回折法を利用して測定したものである。⁴⁾

このときの設定含水比 W_n は、各々15、20、25、30%としたが、標準砂を混合した試料では、設定含水比 W_n 30%ではピストンで載荷しても試料が固結せず、供試体が作成できなかった。

この3種の人工軟岩の一軸圧縮強さと試験後含水比の関係を図4に示す。試験数が少ないので直線近似すべきでないが、同じ含水比のもとではA、C、Bの順に強度が小さくなっており、標準砂を混合しただけの試料Bから作成した人工軟岩の強度が最も小さくなっている。

これらの破壊形態を見ると、概略1 MPa以上の強度を持つ供試体は、明瞭なせん断すべり面を持ち、ピーク強度と残留強度が得られるのに対し、それ以下ではビヤ樽状に変形し、ピークが不明瞭になり、ついにはピークを示さなくなる。

図5に、残留強度を示す。明瞭なピークを示さない供試体では、概略10～15%ひずみ時の応力値を示した。一軸圧縮試験では、破壊後供試体が不安定になるため、ばらつきが大きいが、図4の含水比に対するピーク強度の勾配に比べ、図5の勾配のほうが緩くなる傾向にあるといえる。

3.2 三軸圧縮試験の方法

三軸試験は、非圧密非排水条件で実施した。軸方向載荷は0.35 mm/min ひずみ制御とした。排水条件で試験しようとすると、図2の例に示すように、非常に長時間要すること、また、排水により含水比が低くなるが、長時間載荷すると、異なる設定含水比でも、最終的な含水比は変わらなくなってしまうと考えられ、種々の含水比

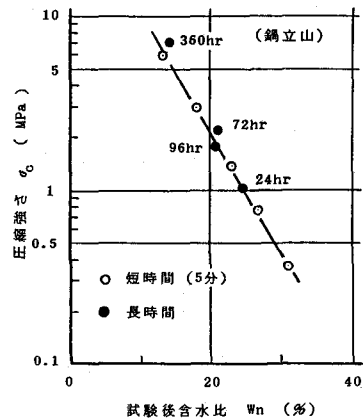


図3 長期圧密試料の一軸圧縮試験結果

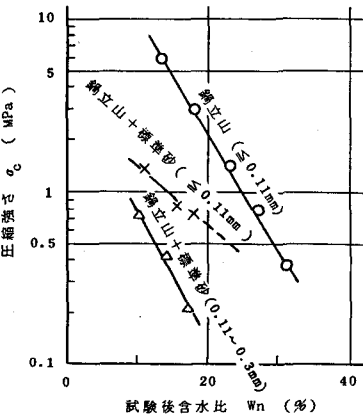


図4 一軸圧縮試験結果

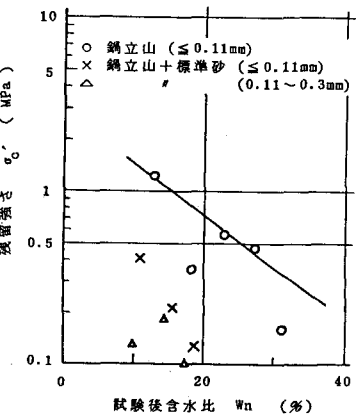


図5 試験後含水比と残留強度

表1 試料の物性

試料名	粒度分布 (%)			塑性指数 (%)	モンモリロナイト含有量 (%)
	砂	シルト	粘土		
鍋立山	50.5	35.5	14.0	65.2	20 ~ 25
鍋立山+標準砂	76.3	18.9	4.8	16.8	5 ~ 10
〃 (すりつぶし)	66.9	24.3	8.8	18.5	5 ~ 10

に対する試験ができなくなる。そのため、非排水条件で、設定含水比15、20、25%の人工軟岩の試験を実施した。

そもそも、人工軟岩のような大きな過圧密の粘土では、せん断破壊時には、ダイラタンシーに伴い、著しく吸水すると言われており、非排水条件下の試験は、外部から水の供給が無いことを意味している。破壊時には、供試体に含まれている水がせん断面へ移動し、強度は、せん断面への水の集まりやすさに支配されると考えることができる。明瞭なせん断面を持たないビヤ樽状破壊についても、ミクロ的なせん断面が無数に形成され、そこに水が移動するものと考えられる。

3.3 三軸圧縮試験結果

三軸圧縮試験は、試料AとCについて、設定含水比15、20、25%の供試体を作成し、封圧0.2、0.5、1.0 MPaで実施した。それぞれの軸差応力—ひずみ線図を図6に示す。

鍋立山泥岩粉末試料Aでは、含水比の低いものは、低い封圧下で明瞭なピークを示すが、封圧が大きくなるにつれてピークがなだらかになり、図示していないが2 MPaの封圧下ではピークを示さない。また、含水比が高くなるとピークを示さなくなる。一方、標準砂を混合してすりつぶした試料Cでは、ほとんどの試料でピークが認められない傾向にある。

これらのデータは、設定含水比が同じであっても、試験後に測定した含水比にある程度のばらつきあり、同じ含水比とならない場合もあるが、設定含水比が同じものでモールの円を作り、破壊包絡線を単純に求めると表2のようになる。試料Aの設定含水比25%の残留強度値は、20%のものに比べて若干大きくなっているが、残留強度はひずみ15%以上のところに生じるのかも知れない。

試料Aについて、試験後含水比と強度との関係を図7に示す。図7では、一軸圧縮強度と封圧1 MPaの三軸圧縮試験の結果を示している。試験数が少ないので、かなりの想定が入るが、点線で示したピーク強度も実線で示した残留強度も直線で近似できそうである。両者の勾配は異なり、一軸圧縮強度では試験後含水比が約30%、封圧1 MPaの三軸圧縮試験では約20%のところに交点を持つ。これより含水比の高い部分の試験は実施していないが、残留強度の直線が延長できるものと思われる。

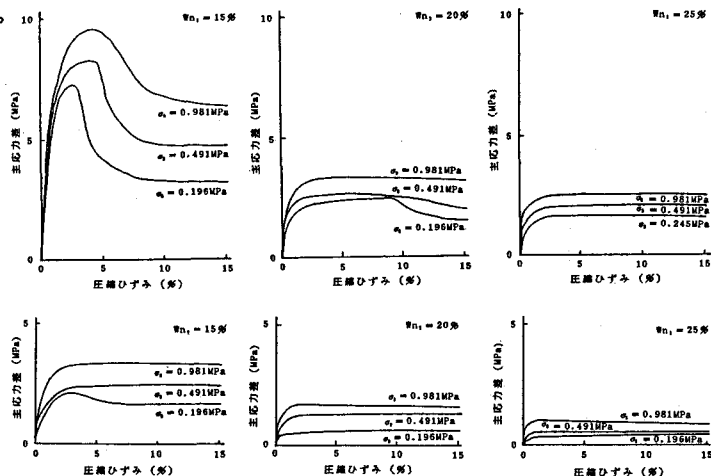


図6 三軸圧縮試験による主応力差 — ひずみ線図
(上段：試料A、下段：試料C)

4. 考察及びまとめ

今回、作成した人工軟岩の飽和度は90~100%の間にある。これを100%と仮定すると下式が与えられる。

$$W_n = e / G_s$$

$$\rho = (1 + W_n) G_s / (1 + e)$$

ここに、 e ；間隙比、 G_s ；真比重、 ρ ；密度である。 $G_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$ として、図7の軸を入れ換えたのが図8である。図8には、正規圧密における $e - \log p$ を示すことができる。今回

表2 三軸圧縮試験による強度定数

設定含水比 W_n		15 %		20 %		25 %	
		ピーク	残 留	ピーク	残 留	ピーク	残 留
試料名	強 度						
鍋立山泥岩試料	C (MPa)	1.87	0.658	0.758	0.291	—	0.468
	ϕ (度)	34.1	40.5	22.6	30.6	—	22.6
標準砂混合試料 (0.11mm以下)	C (MPa)	—	0.565	—	0.276	—	0.082
	ϕ (度)	—	26.4	—	19.3	—	16.7

の試料では圧密試験を実施していないが、1 MPaで $e = 1$ 、10 MPaで $e = 0.5$ として直線を引いてみた。

人工軟岩を作成する際の載荷荷重と含水比の関係を、設定含水比25%を例にして図中に示したが、50kNの載荷荷重（50 MPaに相当）では正規圧密の線を越えている。そのため、5分の載荷時で作成される人工軟岩は、試料内に発生する過剰間隙水圧により、正規圧密線との交点程度の有効応力しか作用していないものと想像される。長期圧密した試料では、排水により正規圧密線上を右下に移動して行くものであろう。

作成した人工軟岩について、一軸及び三軸圧縮試験を実施した。いずれにもピーク強度と残留強度が得られているが、封圧が大きくなると、また、含水比が大きくなると、ピーク強度は消滅し、残留強度（または、完全軟化状態強度）のみを示している。この残留強度は、正規圧密粘土の排水せん断試験における完全軟化状態強度に近いものと考えることができる。ただし、排水試験では試験中に含水比が低下することを考慮しなければならず、また試験に長時間要することを考えると、今回の人工軟岩による非排水試験は非常に簡単な試験である。

また、残留強度の対数が含水比に直線的な関係があることから、含水比を知るだけで人工軟岩の強度が推定できることになる。飽和しているとすれば、図8に示すように含水比は密度または間隙比と置き換えてもよい。この残留強度が破碎質泥岩地山の岩盤強度であると仮定すれば、地山の含水比や密度を調べることで、岩盤強度を得ることができる。

標準砂を混合した人工軟岩では、同じ含水比のもとでは、強度は著しく低下する。人工軟岩の強度は含水比の他に、構成粒子の種類、粒径に依存している。

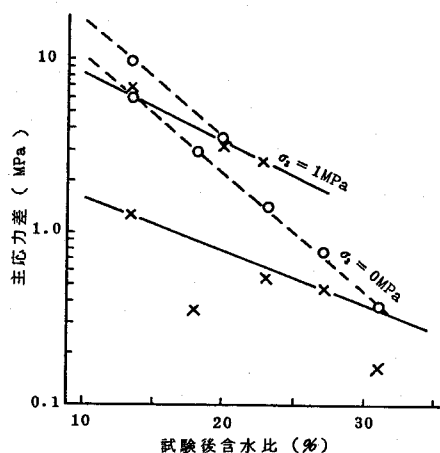


図7 鍋立山泥岩人工軟岩の強度特性

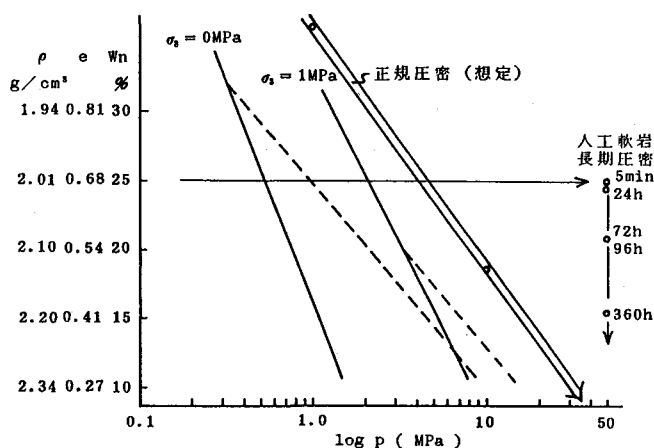


図8 試験結果のまとめ

〔引用文献〕

- 1) 桜井 孝、高橋昭教；人工泥岩の物理的・力学的性質、鉄道技術研究所速報 No.A-85-2、1985.1
- 2) 桜井 孝、高橋昭教；人工泥岩の一軸圧縮試験、第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp61-65、1985.2
- 3) 桜井 孝、高橋昭教；人工軟岩の力学特性—作成方法の検討と一軸圧縮試験、日本応用地質学会昭和60年度研究発表会予稿集、pp56-59、1985.10
- 4) 吉川恵也、桜井 孝、立松英信；軟岩の劣化特性に関する簡易試験法及びそのトンネルへの適用、応用地質、24巻2号、1983.6

(45) TRIAXIAL COMPRESSION TEST OF ARTIFITIAL MUDSTONE

Railway Tech.Res.Inst.,JNR

Takashi SAKURAI

Akinori TAKAHASHI

An artifitial mudstone is made from dried and crashed natural mudstone, which is mixed with some content of water, put into cylinder with inner diameter of 35 mm and pressed to consolidate under 50 kN in 5 minutes to the length of about 70mm. It is used to the test specimen of compression test. The density of artifitial mudstone can be controlled with water content added to crashed mudstone powder.

This report deals the testing results of Tertiary mudstone in Shiya formation sampled from Nabetachi-yama tunnel. The mode of deformation-failure is devided into two types. Namely, under lower confining pressure and lower water content, stress-strain curve shows distinct peak strength and then fall to residual strength. But under higher confining pressure and higher water content, it does not show peak strength. Both peak and residual strengths can be drawn by the linear lines as shown in fig.7, where the strength is graduated with log scale.

According to test results it is said that the strength of the artifitial mudstone can be determined with only water content in it.

Another artifitial mudstone , which is made from Toyoura standard sand and the Nabetachi-yama mudstone mixed with 2:1 weight percent, shows smaller strength than the former one under same water content.