堆積性泥質軟岩の物理・力学的特性評価手法に係る若干の考察

田中莊一

深田地質研究所

On the unique experiences for the characterization of rock basement in argillaceous soft or weak rock

TANAKA Soichi

Fukada Geological Institute

要旨:岩盤内もしくは岩盤上に重要構造物を構築するにあたってはその基盤岩の地質学的・工学 的特徴を十分に把握する必要があるが、構造物規模や工費によっては相応の調査・試験が常に行 われるとは言い難い。その結果、建設中あるいは供用後に基盤岩に起因するトラブルが生じる例 がしばしば見聞きされる。とりわけ軟岩基盤、特に堆積性泥質軟岩域では施工対応の容易さも相 俟って等閑にされがちである.そこで,今後の参考に供すべくこれまでの経験をもとに岩盤構造 物の特徴的で重要な岩の特性をまとめ、特に不均質性や時間依存性など泥質軟岩の物理・力学的 性質について紹介した、野外調査、原位置もしくは室内試験を通して得られる岩の物性値は、対 象岩盤に作用する外力とその履歴、地下水浸透と含水状況変化などに対する取り扱い方により異 なる. それら差異は岩に作用する外力と発生ひずみ量の大きさと時間効果に影響され、作用速度 と継続時間, 岩内部の水の流動性, さらには岩盤構造物の形状と境界条件などにより説明できる. 具体的には、ひずみ依存性と長期変形特性に関する大規模検討実験をもとに考察した.しかし、 種々の調査・試験手法による差異を統一的に解釈し岩の特性を評価する方法について言及できる 段階には至っていない。また、これらの物性値は点の情報(ミクロモデル)であって広域の領域 を表現(マクロモデル化)できるものではない、広域へのアップスケーリングの考え方と具体的 手順の確立が望まれる. そのためには物理探査法の活用が不可欠であり, ロックフィジックスの 研究を核にしたミクロからマクロモデルへのアップスケーリングの考え方について述べた. キーワード: 泥質軟岩, 岩相, 物理・力学的性質, 破壊規準, ひずみ依存性, 長期変形特性

Abstract: The characterization of properties of rock basement in argillaceous soft/weak rock presents effective information to construct various structures in/on rock. However it is rather difficult to select adequate method out of means by several investigations and experiments. According to my experiences in the evaluation of physical and mechanical properties of argillaceous rock , several essential points are revealed as follows : (1) mechanical properties as strength and deformation moduli are depending on the strain level and on loading-velocity to surface of rock basement at in-situ experiment or to test pieces in the laboratory. (2)The different aspects of rocks as intact/crushed/sheared/weathered/crushed with clay/fault gouge indicate clearly differences in the criteria by power functional equation with strength parameter $\alpha,\beta,(3)$ Creep parameters α (on deformation) and β (on lapse time) indicate contracting tendency between in-situ creep test and creep test in laboratory. The reason of these differences is considered on the effects of the drainage of pore water and the different boundary condition of in-situ and specimen form. Anyway we can gain readily each micro models of rock basement by experiences, but we don't know how to develop to macro models for wide area. So I emphasize it is very important to develop the upscaling technique.

Keywords: argillaceous rock, rock property, failure criterion, strain dependency, creep parameter

1. はじめに

岩の調査・試験に基づく物性評価の方法について,これまでの経験を顧みつつ「故きを温ねて新しきを知る」との思いを込め若干の考察を加える.

これまでトンネル・地下空洞やダム,長大橋梁・石油備蓄タンク・原子力発電所等の岩盤内や岩盤上の重要構造物の安全性及び岩盤斜面の安定性評価など,基盤岩の性質に係る調査・試験とその基盤~構造物挙動の予測に関わってきた.対象の岩盤構造物の比較的多くは、断層・破砕帯、風化・変質した岩盤、泥質軟岩などの軟質岩盤特性とその工学的評価に係るものである.

対象とする岩の性質はどうすれば的確に求められるのか. 調査・試験結果は本来的な岩の物性を正しく表現できているのか, 得られた値を工学的に評価するにはどうすればよいのか.

そもそも物理・力学的観点に基づく計測値から 物性値を知る方法が一般的という中で、岩の特性 を表す諸量にそれぞれ本質的な固有値というもの が存在するだろうか.調査・試験で定められた手 順から得られる値は必ずしも確定的なものではな く、岩の不均質性や計測上の誤差などを含む確率 的なバラツキを含むものである.何よりも難しい のは、物性値を得るため工夫された幾多の手法の 中から適切な調査・試験手法を選択し、合目的的 な試験条件を設定し、合理的な物性誘導式を確認 することである.その選択と対応によって求まる 値が異なる.したがって、我々が最終的に手にす るのは岩固有の値ではなく、岩相や調査・試験手 法と設定条件などに支配された計測値であり、不 確定性を有する「物性値」である.

従来からこの一意的には定まらない岩の物性 評価法に対して、多くの先達が苦労を重ねて研究 を進めてきた. 特に 1960 年代から 80 年代にかけ て顕著であり、例えば、花崗岩の風化に係わる物性評価については本州四国連絡橋建設に係る膨大な研究の積み重ねがある。堆積性軟岩に対しては仲野(1975)の先駆的研究、泥岩に関する赤井ほか(1978)の研究、電力中央研究所での一連の泥岩研究(例えば、岡本ほか、1982)等が挙げられる。それらに続く多くの成果はその後の岩の物性評価に対し大いに貢献し、岩盤工学の発展に寄与し現在に至っている。筆者もこの流れの中で試行錯誤してきた一人である(田中、1993、2007)。

しかし、最近の趨勢を見るに、岩盤構造物材料としての岩の多様な性質に十分意が払われることなく、得てして安直に得た物性値をもとに数値解析に総力を注ぐ傾向が強いと感じられる。その岩の置かれている環境条件を考慮した調査・試験手法が適切に選択されたか、供用期間での物性変化がどこまで考慮されているかなど、より効果的に岩の特性が評価されているのか疑問に思うことがある。堆積性軟岩の場合、施工対応の容易さから適切な岩の性質の把握が蔑ろにされることがある。しかし、結果としてすべりや不同沈下、岩盤構造物の損傷などの事故が生じる事例も多い。

ここでは、堆積性泥質軟岩を取り上げ、岩相判断の重要性、ひずみ依存性、長期変形特性に係る原位置試験と室内試験法の関係などのこれまでの調査・研究成果を振り返り、岩の特性はどのようにして決まるのか、条件によって物性値はどのように変化するのか、そして最終的にどのように岩の特性を定めるべきかを考える.

2. 軟岩物性に係る要素を考える

軟岩の性質はどのような要素よって定まるか. まずは、その岩がどのようにして出来たのか(成因)、どういう物質で成り立っているのか(構成材

料)を知り、地質学的な知見を明確にすることは 当然である。十木学会岩盤力学委員会第4分科会 は、軟岩を成因により、火山活動に伴って生成さ れる低固結の溶結凝灰岩に代表される第四紀の火 山砕屑物や溶岩の急冷破砕部など(火山性軟岩), 環境変化に伴う機械的作用や化学的作用の影響を 繰り返し受けることで風化・変質による劣化が進 行している岩(風化軟岩), 岩盤が粒状化した土が 押し固められ固結し硬化しつつあるもの(堆積性 軟岩) の3つに大別している(土木学会, 1984). これらは時間(地質学時間)の経過に伴い、外部 から作用する力の変化(地質構造や地形形状変 化)・地下水の流動による含水状態や固結程度が変 化し、その岩の特性を変化させていくことを常に 想定しておかなければならない. 図1に考慮すべ き要素を示す.

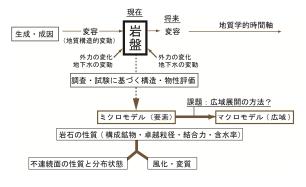


図1 岩の特性を評価するに際して考慮すべき要素

岩盤内もしくは岩盤上に構造物を構築する場合は、それぞれの岩の特徴的な性質について工学的に把握しておく必要がある。そのためには、5章で述べるように、岩盤を工学的に区分しその基本特性を理解したうえで、岩盤構造物に作用する外力と水の影響を考慮した調査・試験手法を用いて岩の特性を把握する。特に岩盤構造物の現状の

みならず供用期間を念頭に置いた将来の岩盤状態 を想定した物性把握も安全性評価上重要である.

この地質学的観点と工学的観点を合わせたものの見方については、地盤工学会編(2004)「岩盤の工学的分類方法」に詳しい、建設工学上の実際的な視点からの岩盤の取り扱いの方法について事例を含めて詳しく述べられている。

しかし、精緻な取り扱いであっても岩盤構造物の物性値としては限られた点もしくは線状の値しか得られないのが普通である。それらは対象とする広域岩盤に対しては部分的なミクロの情報でしかない。ミクロな岩のモデルの集合体からは全体の岩盤特性を十分に説明することはできない。地質調査や物理探査を用いるとしても、広域岩盤領域に対するマクロなモデルを如何に構築するか容易なことではない。重要岩盤構造物を対象とするにつけミクロモデルからマクロモデルへとアップスケーリングする適切な方法の必要性が痛感される。これからの重要な開発課題である。

3. 堆積性軟岩の物性値評価方法について考える

3.1 地質構造を考慮して調査・試験位置を選定

一般に堆積性軟岩の特性を議論する場合,まず その成因,堆積過程・履歴,現在の堆積構造と構 成材料についての詳細を知っておかなければなら ないのは言うまでもない.多くの場合,堆積環境 の変化によって多様な不均質性を示すことが多く, また明瞭な異方性を示すことがある.図2は岩盤 上の重要構造物を建設するに際し基礎岩盤となる 泥質軟岩(鮮新世泥岩)の広域地質構造の概要を 部分的に示したものである.堆積層は左方向(南) に下降しているが,右(北)に延びる大きな背斜 構造の翼部を構成している.

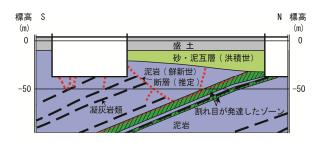


図2 構造物基盤の多様な層からなる概念的断面

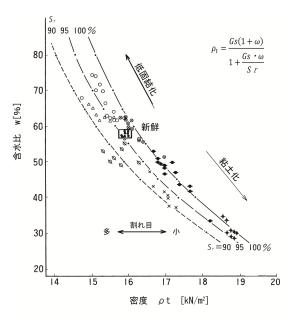
この範囲では数条の薄い凝灰岩層を挟み、一部には密着した割れ目の発達した泥岩層及びやや密着度の低い開口性割れ目の発達した泥岩層が分布する.上部の砂泥互層との境界部付近には、変位が極めて小さい断層が確認された.構造物の基盤岩の性状を詳細に把握するため予め長い調査横坑が掘られている.明らかに新鮮な塊状泥岩とともに幾つかに分別できる様相の異なる割れ目の発達した層、風化や粘土化の進んだ層や小断層などが観察された.岩相の異なるサンプルを数多く採取し、室内試験に供しそれぞれの物性の違いが調べられた(Tanaka, 1986).

図 3 に各種岩相の密度と含水比の関係を示す. 本来の新鮮な泥岩の密度は 1.62g/cm³ (平均値), 含水比は 57.8%(平均値) である. 凡例に示すよう に岩相を 8 つに区分した. 供試体単位 (120 mm, 50 mm φ) では, 割れ目の発達程度により密度が低 下する一方含水比が上昇している. 粘土化が進む に従い高密度・低含水比へと遷移する傾向がみら れる.

これら各種岩相の物理・力学的な諸性質は明瞭な差異を示す。ここでは、強度特性に関する試験 (CU 条件、間隙水圧測定) から得られた $\tau - \sigma$ 関係を図 4 に示す。破壊規準を次のべき関数

$\tau/\tau_0 = \alpha (\sigma m'/\sigma m_0')^{\beta}$

で表わす. ここに、 α 、 β は強度に係る材料定数、 τ m及び σ m' は破壊時のせん断応力ならびに平均



- 新鮮な岩
- ◆ 弱い風化を受けた岩
- × 風化・変質に伴い割れ目が発達し粘土を挟む岩
- ◆ 風化・変質が進み粘土化が著しい岩
- ▲ 割れ目が発達した岩(開口性)
- 割れ目が発達した岩(密着性)
- 割れ目を含む弱風化岩
- № 微細な割れ目を含む岩

図3 泥質軟岩の岩相と密度・含水比の関係 (出典: Tanaka, 1986)

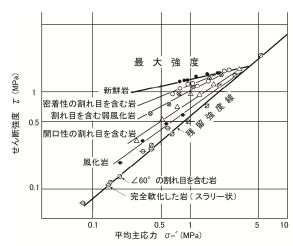


図 4 岩相変化に伴って変化する破壊規準 (出典: Tanaka, 1986)

有効応力である.最大強度(ピーク強度)は新鮮岩を最大とし、密着割れ目の発達した岩 ⇒ 割れ目

を含む弱風化岩 ⇒ 開口性の割れ目を含む岩へと順次強度が低下する. 風化が進み粘土化した岩は残留強度(破壊後も強度が残留する場合の最終値)に近づく. また、明瞭な割れ目が存在する場合、水平軸に対し 60 度の割れ目角度に鉛直力が作用すると残留強度とほぼ同等の最低強度を示している. なお、実用的に残留強度相当の最低強度を求める方法として、泥岩をスラリー状にした試料を正規圧密後に排水せん断した際の最大強度(Skempton の完全軟化強度相当)から求めることができる(土木学会、1991). 図中で残留強度線上にほぼ乗っている完全軟化(スラリー状)と表示した強度が完全軟化強度に相当する.

強度に係る破壊規準を取上げて岩相の違いが 物性値に反映されることを述べたが、変形係数や ポアソン比にあっても同様である。当然のことな がら基本的な物理諸量にも顕著に表れる。軟質岩 の特性の評価では地質構造や岩相の変化に十分に 留意すべきであると強調したい。

3.2 岩の挙動を知るための調査・試験法を選定

岩の強度や変形性に関する調査・試験手法について眺めてみると、岩盤構造物に対し大規模掘削面や試験横坑内で直接的に行うさまざまな規模での原位置岩盤試験もあれば、ボーリング孔の孔壁を利用した孔内試験も用いられる.一方、比較的安価で条件設定が容易ということから、横坑掘削やボーリング穿孔で得られた岩石試料を用いて室内岩石試験が行われる.最近では経費削減が優先され、調査・試験が蔑ろにされる傾向にあることを危惧するが、とりわけ直接的に原位置での挙動を知ることのできる岩盤試験がほとんど行われることがなくなっているのは寂しい限りである.

多様な試験手法によって得られた結果とそれ ぞれの誘導式から算出される物性値が一致すると は必ずしも言えないことは前述した. 泥質軟岩(鮮 新世シルト質泥岩)域で弾性波速度測定や岩盤試 験・孔内試験・室内岩石試験が多数実施された. 得られた変形係数は 100~400 MN/m2の範囲で大 きな差異を示した. 試験手法によって値が大幅に 異なるのである。これらの変形係数(ヤング率) をピーク時のひずみ(想定ひずみを含む)を軸に 整理したところ、動的三軸試験における $G\sim \gamma$ 曲 線と同様にひずみ量が大きくなるに従い値が低下 することが分かった(桑原ら,1979).このひずみ 量と変形係数との関係について越智や龍岡らの一 連の研究では、載荷方法・載荷重・計測方法・試 験精度・変形係数の算出誘導式などが異なるもの の、外力の変化に伴い変形係数は概ねひずみの大 きさに依存(ひずみ依存性)していることが確認 され図5の関係が示されている(越智ら,1993).

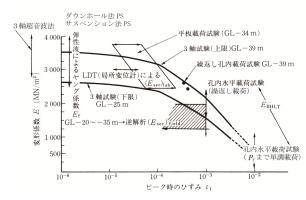


図5 試験手法による異なる変形係数のひずみ依存性 (出典:越智ほか,1993 一部簡略化)

この変形係数のひずみ依存性は、岩盤構造物に作用する外力(拘束力と最大荷重)の大きさによって発生ひずみ量が異なることから、予め相応の試験手法を選定することが重要であることを示唆している。さらに、均質な岩盤域であっても作用する外力の大きさに伴い適切な変形係数を設定しなければならないことを意味する。そこで、広範囲の変形係数を検討すべき場合には、室内試験を

軸にいくつかの試験手法の組み合わせからひずみ 依存性を考慮して決定すべきであると強調したい.

3.3 調査・試験法の選定と実施上の留意点

岩の調査・試験法の選定にあたり、まず地質学的調査観察に基づき岩盤を工学的に分類すること、岩の状態・岩相の変化を知ることが必要であるが、さらに次の点を考慮しておかねばならない。

- 1) 広域にわたって実施することは費用と時間 の上から容易ではない. ミクロな情報を広域 マクロ情報に展開する方法は今後の課題で ある. 慎重な事前検討が求められる.
- 2) 原位置試験のための岩盤掘削ならびに岩盤 整形には多大の費用と時間を要する. 質の高 い的確なボーリング穿孔から乱れのない軟 質の岩石試料を得るには高い技量を必要と する. 要求レベルと現実が合致しないことは ありがちである.
- 3) 妥当な試験条件を選択しても、その条件に十 分適う試験設備と試験技術が必要であるが、 現実にその要求が満たされることは少ない.
- 4) ポアソン比が重要な要素であるにもかかわらず、実際に試験されることは少ない. ポアソン比は岩に対する排水状態によってその値が大きく変化することに十分留意すべき.
- 5) 岩の物理諸量は地質構造に依存し、力学量は 現在の被り圧に左右されることを前提に考 える必要がある.
- 6) 動的物性は明瞭なひずみ依存性を示すが、大 ひずみ領域の調査・試験法が未だ確立されて おらず研究途上である.
- 4. 原位置試験と室内試験の関係について考える
- 4.1 長期変形特性の調査・試験を例として

既に3.2節で岩の特性値を求める岩の調査・試験手法の多くは弾性論を基礎にしながらも得られる物性値に差異が生じることを述べた. 粘性や塑性をも考慮した特性を議論する場合には, さらに工夫が加えられた方法が必要となる. ここでは, 粘弾性的な取り扱いを必要する長期変形特性(クリープ特性)を把握するための方法について事例を挙げて述べる.

岩の長期の変形挙動を把握するには,通常,岩 盤構造物が直接的に接する岩盤面に安定した長期 荷重を載荷し、時間経過に伴う変位量を計測する. 筆者は 1970 年代前半に本州四国連絡橋児島-坂 出ルートで風化花崗岩の長期岩盤クリープ試験と 構造物の挙動確認にかかわり、長期変形特性を把 握することの難しさを経験した. 1970 年代末には 泥質軟岩域 (シルト質泥岩) で半年以上に及ぶ長 期の岩盤クリープ試験に専従的に係った.しかし、 載荷重 (0.6 MN/m²) が低いことから安定した計測 値を得ることは容易ではなかった. そこで、大規 模な検討実験を重ねて試験手法の改良を進め、横 坑内での原位置における長期岩盤クリープ試験の 実施要領を纏めた、その要領の要点は以下のとお りであり、以後各所で実施される原位置岩盤クリ ープ試験に生かされている.

- 1) 試験装置の高剛性化:等分布荷重の安定的長期持続のため撓みの生じない高剛性構造体の 載荷盤及び支圧板.剛体載荷盤縁辺部でパン チング現象が生じない工夫.
- 2) 不動基準梁・基準点の確保:温度・湿度等の環境変化による基準梁の伸縮及び自重による 撓みの防止.確実な不動点の確保と観測による確認.
- 3) 持続荷重の安定的保持: 厳密に安定した定荷 重を得るため定荷重保持装置の微少変動に対 する圧力補償機能と予備装置の併設.

- 4) 微小変位の確実な計測:遠隔計測を旨とし複数高精度システムの併用により計測値の妥当性を常時確認.
- 5) 定温度・高湿度環境: 観測場所から試験区域 を隔離し温度・湿度変化による装置や変位・ 圧力計測器の変動防止.
- 6) 振動・発熱体の遮断:周辺作業による微振動 の影響を回避.環境変化が生じないよう電灯 や測定機器及び人体からの熱を遮断.

こうした経験を経て泥質軟岩(鮮新世シルト質 泥岩)を対象にした長期間の原位置岩盤クリープ 試験(2地点)の結果を図6に示す(地盤工学会, 1987).この地点の基本的な物性値は、物理試験及 び一軸圧縮試験から平均値として密度1.61 g/cm³, 一軸圧縮強さ2.79 MPa,変形係数489 MPa が得ら れている.

いずれの場合もほぼ半年から1年で変位量は収束しており、収束後のクリープ変位量は弾性変位量の49~73%とかなり大きい、岩盤構造物の挙動予測にあっては長期の変形を考慮することが極めて重要であることが分かる.

このクリープ曲線は簡便に弾性バネとダッシュポットを組み合わせた3要素モデルで表現される.クリープ試験結果の全変位量 δ は弾性変位量

 δe とクリープ変位量 δc の和,この純粋にクリープした量 δc は $\alpha \cdot \delta e$ $(1-e^{-\beta \cdot t})$ で表される. すなわち,計測変位量 δ は,

 $\delta = \delta e + \delta c = \delta e + \alpha \cdot \delta e \ (1 - e^{-\beta \cdot t})$

であり、ここに、 α 及び β はそれぞれクリープ係数 α (クリープ変位量/弾性変位量)、クリープ係数 β (遅延係数) である。通常、最小二乗法によるカーブフィッティングによって求めることができる。ここでは具体的には触れないが、クリープ

係数を求めるには2つの粘性項を有する5要素モデルが適しており、挙動解析にはその値を用いて

いることが多い (田中, 2007).

しかし、こうした原位置岩盤クリープ試験には 多大な経費と労力と時間を要するため、試験実施 にまで至るのは容易ではない. しかも、得られる 試験点数は多くても1~2に過ぎない. その結果 をもとにこの地域の長期変形特性として代表させ ることができるであろうか. 地質調査の結果から 選ばれた代表地点であり、岩盤構造物の表層周辺 の長期変形に係る係数ではあるが、水平的な分布 や垂直的な分布に対してはどのように対応すれば よいのであろうか. そこで、次節以降で大規模に 実施された原位置実験に基づいた検討結果を用い て考えてみる.

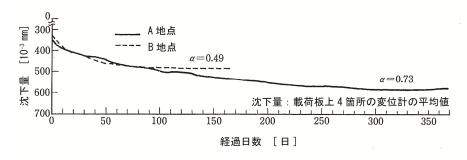


図6 1年に及ぶ長期原位置岩盤クリープ試験の結果 泥質軟岩 (シルト質泥岩) (出典:地盤工学会編, 1987)

4.2 原位置試験と室内試験の対比

泥質軟岩地域(鮮新世泥岩)で横坑内の原位置岩盤クリープ試験が実施された. さらに横坑内から同質の岩塊を採取後,室内で高圧三軸クリープ試験が実施された. これは費用と時間を要する原位置試験に比して安価で比較的迅速に結果が得られる室内試験の妥当性を検討すること,および面的な広がりを念頭に置いた検討を行うためである. 図7に原位置岩盤クリープ試験の結果を示す.

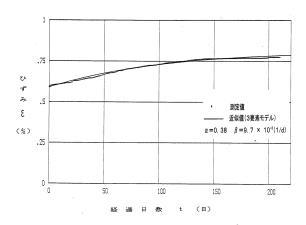


図7 泥岩域で実施した原位置岩盤クリープ試験結果 (ひずみ~時間関係と3要素モデルクリープ係数)

一方,恒温恒湿室の内部に特別に設備された高 圧三軸クリープ試験装置を用いて拘束圧条件を考 慮したクリープ試験が行われ,図8のクリープ曲 線を得た.

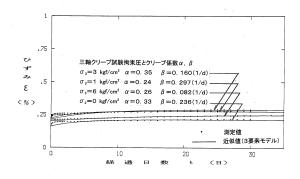


図8 泥岩域で実施した室内三軸クリープ試験結果 (ひずみ~時間関係と3要素モデルクリープ係数)

室内試験によるクリープ係数 α は $0.24 \sim 0.35$, クリープ係数 β は $0.082 \sim 0.297$ (1/d) の値を示す.しかし, 拘束圧の違いによるクリープ係数 α , β に規則性のある特徴的な差異がみられない. したがって, 長期変形挙動に影響すると思われる限定された域内では基本的に深度による拘束圧と関係なく平均的係数を用いればよいと考えている.

原位置と室内での試験によるクリープ曲線を比べてみると、曲線形状に顕著な相違が認められる。室内試験結果では載荷初期にクリープ変形が進行するも、クリープ変位は速やかに収束に至ることが分かる。原位置試験では、クリープ変形は収束に向かいつつ長期間継続しており、その変位量も大きい。その結果、表1に示すように両者のクリープ係数 α に大きな差はないものの、 β は室内試験の値が極めて大きく短期間で変位が収束する特徴を表している。

表1 原位置と室内試験によるクリープ係数の比較

	原位置クリープ	室内クリープ
クリープ係数 α	0.38 >	0.30(平均值)
クリープ係数 β	0.0097 <	0.194(平均値)

4.3 原位置試験と室内試験の差異の検討

載荷重を 0.6 MN/m² とする原位置クリープ試験結果と室内三軸クリープ試験結果では、クリープ係数 α 、 β になぜ異なる傾向を示すのか. その検討を始めるにあたり、泥質軟岩域(シルト質泥岩)で均質な岩盤内に横坑を掘削し岩盤クリープ試験(図 6 の地点を合わせ 3 地点)を実施され、とともに同地点の横坑内から採取した岩塊を用いてそれぞれ室内高圧三軸クリープ試験(非圧密非排水)が行われた. 試験結果をまとめて表 2 に示す.

10, 2	3	地点で天心した原位直	こ主内記録の作木
		原位置クリープ試験	室内クリープ試験

2 地方で宝体した頂位器と安内試験の結果

試 験 方 法		原位置クリープ試験			室内クリー	プ試験	
		d = 600mm φ			σ ₁		
		載荷盤上に4ヶの変位計設置		$\sigma_1 - \sigma_3 = 0.6 \text{ MN/m}^2$ $\sigma_3 = 0.1, 0.3, 0.6 \text{ MN/m}^2$			
	クリープ係数	α	β (1 / day)	σ	α	β (1/day)	
		0.561	0.022	.0	0.171	0.403	
	地点 1			.1	0.176	0.184	
試	70/11 1			.3	0.095	0.789	
				.6	0.049	0.400	
験		0.725	0.0101	.0	0.231	0.555	
結	地点 2			.1	0.118	1.208	
果				.3	0.111	0.566	
	掛占 3			-			
	>EW 3	0.485	0.037				
			I				
試	境界条件	半無限地盤上の剛体載荷 (試掘坑内)			有限形		
験	排水条件	排水自由			非圧密非排水, 圧密排水		
条件	寸 法	直 径 600mm 載荷盤厚さ 150mm			直径 50mm 高さ 120mm		
1	載荷条件	段階載荷 0.1 MN/m²/min			急速載荷		
試験	排水条件	半無限地盤 (試據 排才 直 径 載荷盤厚	上の剛体載荷 R坑内) く自由 600mm さ 150mm	.6 .0 .1 .3 .6	非圧密非排水 直径 〔 高さ 1〕	, 圧密排水 50mm 20mm	

表中には試験方法条件の違いを示している.

この地域においても、やはり原位置と室内の試 験結果のクリープ係数に明らかに違いが生じてい ることが分かる. 表 3 に 6 α , β を 平均値で対比 して示す.

表 3 原位置と室内でのクリープ試験から得られた α . β

(載荷重・載荷圧: $0.6\,\mathrm{MN/m^2}$ α . β : 平均値)

	原位置クリープ	室内クリープ
クリープ係数 α	0.590	> 0.169
クリープ係数 β	0.023 <	< 0.448

この違いは何に起因するのか関係者の間では 大きな議論になったが、結局は現場実験するしか ないとの結論で大規模実験計画が企画推進された. その際、試験結果に影響を及ぼすと考えられる以 下の影響要因を取り上げ、どの影響要因が強く表 れるか比較検討した.

- ① 境界条件:半無限地盤上の剛体載荷 円柱状供試体として有限形状
- ② 排水条件:載荷面からの自由排水 供試体端面・側面からの圧密排水
- ③ 試験寸法: φ600 mm剛体載荷版 (平板) φ 50 mm×h120 mm (円柱状)
- ④ 寸法効果:載荷版 φ 600mm ⇒ φ 50 mm ~ 供試体 φ 50 mm → φ 200 mm
- ⑤ 載荷方法: 段階載荷 (0.1 MN/m²/min) 瞬間載荷
- ⑥ 載荷荷重: 常時 (0.6 MN/m²) · 地震時 (1.2 MN/m^2) $\sim \sigma_1 - \sigma_3 = 0.6 MN/m^2$
- (7) 形状効果: 平板載荷と円柱状載荷の繋ぎ形 として, 原位置での大型一軸クリープ試験 を実施(縦横比を $1:1 \Rightarrow 1.5:1 \Rightarrow 2:1$ と変えた試験を実施. 図 9 参照), (桑原ほ カ, 1979)

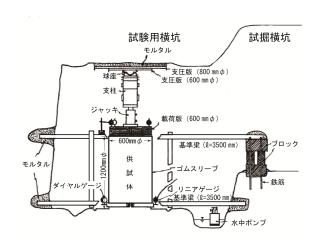


図9 大型原位置一軸クリープ試験装置の概要 (中央の供試体の縦横比を3種類のものを作成) (出典:桑原ほか, 1979)

そのクリープ試験結果からそれぞれクリープ係数 α , β を算出し、検討条件を明確にして表 4 にま とめた.

				小 ←	寸 法	効 果	→大		
		験条件 東圧σ3	α β	50mm ϕ	100m ϕ	200m φ	600 mm φ		
	U	0	α (β)	0.16 (0.131)	0.167 (0.110)	0.173 (0.077)		Ū	
室内三軸	U	0.6	α (β)	0.193 (0.116)	0.196 (0.203)	0.312 (0.318)		(非排水)	有限
クリープ試験	С	0	α (β)	0.250 (0.210)	0.103 (0.169)	0.301 (0.178)			PJÆ ↑
	D	0.6	α (β)	0.381 (0.217)	0.270 (0.145)	0.394 (0.250)		LIF.	
		(MN/m ²)						排 水	境 界
	縦	2:1	α (β)			0.301 (0.040)	0.168 (0.033)	条 件	条 件
原位置一軸 クリープ試験	横	1.5:1	α (β)			0.580 (0.035)	0.228 (0.030)	117	1111
	比	1:1	α (β)			0.550 (0.035)	0.272 (0.028)	↓ D	→
			ı				*3 地点平均值	_	無
原位置 クリープ試験(3	∞板載	荷)	α (β)	0.440 (0.122)			* 0.590 (0.023)	(排水)	限

表 4 影響要因を考慮した原位置・室内クリープ試験による α ・ β の違い

この試験結果からも、原位置試験のクリープ量は室内試験に比して大きく、変位の収束性は室内試験で顕著であることが分かる。原位置試験と室内試験によるクリープ変位挙動の違いをクリープ係数α、βをもとに考えるならば、この相違に係ると考えられる影響要因に関して概ね次のことが言えよう。

- 1) 排水条件の影響:クリープ量の程度を示す係数αは、自由面が広く排水条件が明瞭な原位置試験(平板載荷及び原位置一軸)で大きく、室内試験の値を上回っている。また、室内試験ではUU条件よりも排水を許すCD条件での結果のαが大きくβは小さくなっている。拘束圧の影響は、前節で述べたようにそれほど明瞭ではないと考えられる。これらのことから、クリープ試験における排水条件の影響は極めて重要な要因であることが分かる。
- 2) 形状効果の影響(境界条件の影響):原位置一軸と平板載荷試験結果から、縦横比が2:1 に対し1:1から平板載荷試験形状になるほ

3) 寸法効果の影響:室内試験では供試体を大きくしても違いはそれほど明瞭ではない.これは相似形の供試体であるためと考えられる.また,原位置試験では,原位置一軸と平板載荷では寸法によるα,βに若干の変化がみられるが,この程度の大きさの相違では寸法効果は明瞭には表れないものと考えられる.

以上の検討から、泥質軟岩域での長期変形挙動を考える場合、長期持続荷重に対しては岩盤構造物の形状・境界条件を加味した排水状態を考慮することが大切であることから、原位置岩盤クリープ試験の結果を重用するのが適切との結論に至った. 岩石クリープ試験は補完的情報として扱い、場所的な特性の違いを考慮する際の判断材料として扱うことが適当であろう.

5. 岩の物理・力学的特性の評価に関する提案

これまで、岩盤構造物を対象にその基礎岩盤の 特性を適切に把握するために留意すべき事項につ いて、いくつかの事例をもとに考察を進めてきた.

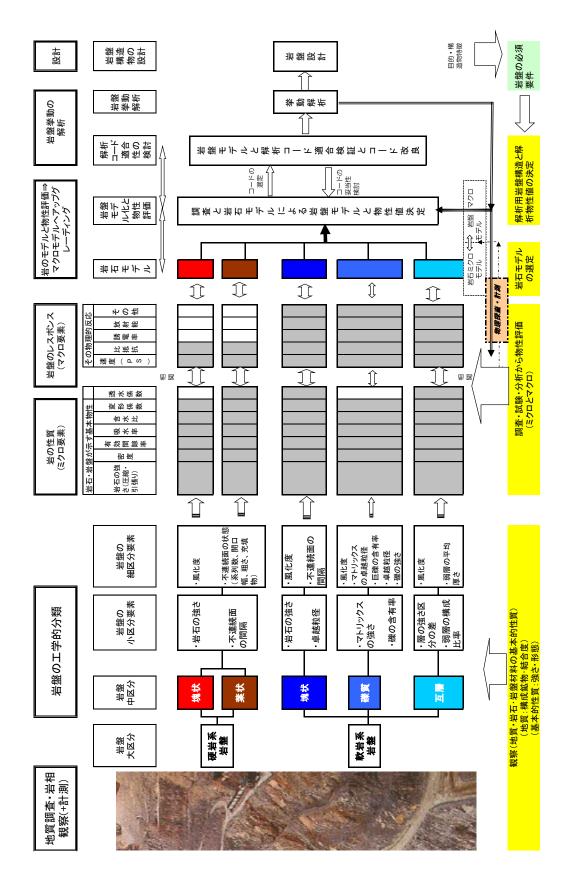
まずは土台となる地質学的検討と岩相の詳細な観察が重要であることは当然である.次いで岩の物理・力学的特性の把握に不可欠な基本的なものの見方として、岩盤の工学的分類に則って大まかな特性を知っておくことが肝要である. ISO14689-1(2003)を考慮した「岩盤の工学的分類方法 (JGS 3811-2004)」では、岩盤を大きく硬岩系岩盤と軟岩系岩盤に大別し、硬岩系では塊状と葉状に、軟岩系では塊状と礫質及び互層に分け、小分類・細分類で岩石やマトリックス・互層の強さ、不連続面の間隔や開口幅・充填物など、卓越粒径、礫の含有率、弱層の構成比率さらにそれぞれの風化度などを取り上げ、対象岩盤の特徴を抽出できるように区分されている(地盤工学会、2004).

この区分を基本に既往資料等を参照し、対象岩盤構造物に要求される機能と特性を考慮して設計・解析上必要な物性とその把握手法について検討する.この段階で考慮すべきことは、最適調査・試験手法の選定と調査・試験条件の設定ならびに所要精度、検討に値する数量の設定とデータ処理の方法などである.本稿ではそれらの詳細について述べないが、最近は得てして適用数値解析法で必要とされる物性に限った岩の特性評価に留まっていたり、経費節減や工期などの施工上の制約に大きく左右されて扱われるきらいがあるのは問題であろう.何よりも本来の岩の特性を適切に評価するための選択と岩盤構造物の挙動予測に必要な特性取得の積極的提案が必要と考えている.

しかし、現在最も深刻で喫緊の問題は、調査・

試験によって取得できる物性値の多くは点のデー タあるいは線のデータであり同等のデータを広域 に適用する方法が確立されていないことである. 換言すれば、散発的なミクロの情報を如何にすれ ばマクロな情報として拡張し広域展開していくこ とができるか、すなわちアップスケーリングの方 法の確立が待たれる. その解決法の一つとして, 筆者は以前から地質学的検討に併せて物理探査手 法の積極的活用を提案している. その中核的役割 を果たすのが高橋ら (例えば、2007) が継続的に 研究を進めているロックフィジックスの概念であ り、最近の研究の進展には大いに期待しているも のである (田中, 2007). この考え方を入れた岩盤 構造物に係る調査・試験, 数値解析法, 物性評価, 岩盤構造物設計の相互の関係は図 10 のようであ るべきと提案したい、その要点は次の通りである.

- ・岩盤構造物基盤岩の地質的調査
- ・基盤岩の岩相の詳細観察と特性予測
- ・基盤岩の工学的分類に基づく基本特性把握
- ・岩盤構造物挙動想定と把握すべき物性の抽出
- ・調査・試験手法選定のための環境分析
- ・調査・試験手法の選定と位置・数量決定
- ・調査・試験の実施と物性評価
- ・アップスケーリングのための地質調査,物理 探査等の実施
- ・物性試験と物理探査結果の対比検討
- ・ロックフィジックスに基づくマクロモデル化 の検討(アップグレーディング対応)
- ・広域モデルから挙動解析に用いる数値解析法 の入力値の設定
- ・解析結果の吟味による物性の再検討ならびに 追加補足調査・試験
- ・岩盤構造物の挙動予測
- ・岩盤構造物設計から建設へ. 必ず併用すべき は物性再評価によるフィードバック支援



岩盤構造物構築にあたって岩の特性評価とマクロモデルへのアップグレーディングと挙動解析の相互関係 9 ×

6. あとがき

本稿は筆者が以前から手元に置いていた資料 を軸に考えを整理したものである. これまで発表 した泥質軟岩の物性に関するいくつかの成果の一 部に併せ、機会がないまま発表できずにいた若干 の情報をも付け加えて書き綴った、岩の物性を評 価するうえで幾らかでも参考になれば幸いである. これらの成果は多くの人たちの協力と努力によっ ている. とりわけ、(一財) 電力中央研究所ならび に東京電力(株)の関係者の方々には強力なご指 導とご支援を賜った. ここに深く感謝の意を表す る次第である. また、調査・試験の実施に当たっ ては, 応用地質(株)浦和研究所, 東京事業本部 軟岩物性研究所、コアラボ(総合地盤物性試験・ 研究センター) の関係諸氏の長い間の努力に負う ところ大である. あらためて厚くお礼を申し述べ たい.

参考文献

- 赤井浩一・足立紀尚・西 好一(1978): 堆積軟岩 (多孔質凝灰岩)の弾・塑性挙動, 土木学会論 文報告集, 第 271 号, 83-95.
- 土木学会岩盤力学委員会第4分科会編(1984): 軟岩-調査・設計・施工の基本と事例-,(公社) 土木学会.
- 土木学会岩盤力学委員会軟岩小委員会編 (1991): 軟岩の調査・試験の指針案 (1991 年版), (公社) 土木学会.
- ISO (2003): ISO14689-1 Geotechnical investigation and testing Identification and description of rock
- 地盤工学会編(1987):土質基礎工学ライブラリー, 30, 堆積軟岩の工学的性質とその応用,(公社) 地盤工学会,317.

地盤工学会編(2004):新規制定地盤工学会基準・

- 同解説 岩盤の工学的分類法 (JGS3811-2004), (公社) 地盤工学会.
- 桑原 洋・片平冬樹・武内俊昭・田中莊一 (1979): 各種試験法から見た泥質岩の変形性に関する 考察,岩盤計測に関するシンポジウム及び昭和 54 年度研究発表会講演論文集,(一社)日本応 用地質学会,2-12.
- 仲野良紀 (1975): 水路トンネルの地圧と設計-特に押し出し性~膨張性地圧の場合について,農業土木試験場報告, no.12, 89-133.
- 越智健三・金 有性・龍岡文雄 (1993): ひずみ依 存性と測定誤差を考慮した堆積軟岩の変形特性の検討, 土木学会論文集, No.463/Ⅲ-22, 133-142.
- 岡本敏郎・西 好一・松井家孝(1982): 泥岩の力学的特性に関する研究 その1 せん断特性, 電力中央研究所研究報告, No.382011, (一財) 電力中央研究所.
- 高橋 亨・田中莊一(2007):地盤工学における物理探査データのロックフィジックスをベースとした解釈技術に関する研究―岩石物性データの収集と予備的解析―,深田地質研究所年報,8,109-129.
- 田中莊一 (1993):岩の力学-基礎から応用まで 第12章 軟岩, 丸善㈱, 491-528.
- 田中莊一(2007): 重要構造物基盤としての泥質軟 岩の工学的特性に関する実験的研究.
- Tanaka, S. and Itabashi, T. (1986): A study of characteristics of strength and deformation in heterogeneous sedimentary soft rock, Proc. Int. Symposium on Engineering in Complex Rock Formation (Beijin), ISRM, 169-176.