

原位置ロックせん断試験の数値解析における 地盤物性パラメータの検討

太田 征志^{1*}・西山 理沙¹・小室 和之²・中根 哲²・宇野 晴彦¹・金谷 賢生¹

¹日本原燃株式会社 再処理事業部 土木建築部（〒039-3212青森県上北郡六ヶ所村大字尾駱字沖付4-108）

²東電設計株式会社 土木本部 耐震技術部 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12)

*E-mail: masashi.oota@jnfl.co.jp

実岩盤の破壊現象であるロックせん断試験を数値解析により模擬することは、構造物の地震時の安定性評価における地盤物性パラメータの妥当性を確認する上で極めて重要である。本検討では、原位置でのロックせん断試験を再現することを目的として、室内試験結果に基づく地盤物性パラメータの設定方法の検討を行った。ここでは、2種類の岩盤を対象とし、各岩種の室内三軸圧縮試験から得られた強度・変形特性と圧裂試験による引張り強さを用いて、ロックせん断試験のシミュレーションを実施した。その結果、室内三軸圧縮試験の強度・変形特性と合わせ、引張り強さの設定値が破壊現象の再現に大きく寄与し、建屋基礎地盤の安定性評価において重要な地盤物性パラメータであることを報告する。

Key Words : *in-situ, rock shear test, numerical analysis, triaxial compression test, tensile strength*

1. はじめに

構造物の耐震性を評価する上で、支持する基礎地盤の安定性を評価することは重要である。基礎地盤安定性は、基礎地盤を構成する岩盤の動的変形特性を考慮し、動的 FEM 解析による地盤応力を適切に評価した上で、基礎地盤を構成する岩盤の有する強度特性により照査を実施している。

基礎地盤のせん断すべりを評価する場合、実岩盤での破壊現象に近いロックせん断試験の強度特性が、地盤の強度特性を表すものと考えられる。したがって、原位置でのロックせん断試験を模擬できる物性値と解析手法を用いることにより、信頼性のある基礎地盤の安定性評価ができると考えられる。また、ロックせん断試験の破壊現象は、引張り破壊とせん断破壊による進行性破壊によるせん断面の形成が強度特性に支配的となることが既往の文献^{1),2),3)}から示されている。

そこで、本検討では、原位置でのロックせん断試験の破壊現象を再現することを目的として、原位置ロックせん断試験のシミュレーションを実施する。シミュレーションにおいては、室内三軸圧縮試験から得られた岩石の強度・変形特性と圧裂試験による引張り強さを用いて、設定する岩石物性値が与えるロックせん断試験の強度特性への影響を検討した。

2. 原位置ロックせん断試験と室内岩石試験

(1) 原位置ロックせん断試験の方法と結果

岩盤の強度・変形特性を把握するため、試掘坑内において、JGS 3511「岩盤のせん断試験方法」に従い、基礎地盤を構成している軽石凝灰岩および細粒砂岩の2岩種を対象に現位置ロックせん断試験を実施した。

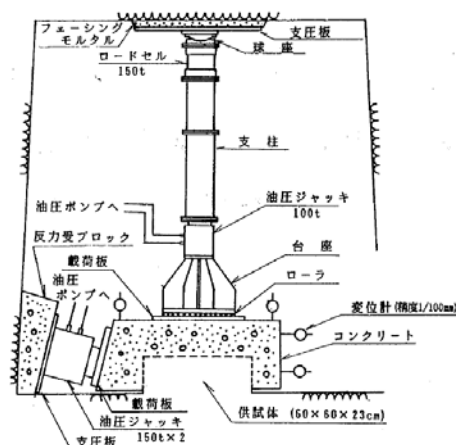


図-1 原位置ロックせん断試験概要

図-1に原位置ロックせん断試験の概要図を示す。試験条件としては、試掘坑内の同一の試験坑から60×60×23cmの岩盤ブロックを試験体として4個切り出し、コ

ンクリートブロックによりキャッピングを行い，載荷面の傾斜角度 15° に設定して，ロックせん断試験を実施した．初期垂直応力は， $\sigma_n=50, 100, 300, 500\text{kN/m}^2$ とし，各々の垂直荷重を加えた後，せん断荷重を載荷し，せん断応力に対応する水平変位および垂直変位を測定した．

原位置ロックせん断試験の結果は，下記のとおりである．

軽石凝灰岩

$$\tau = 550 + \sigma \tan 39.0^\circ \quad (\text{kN/m}^2)$$

細粒砂岩

$$\tau = 530 + \sigma \tan 47.3^\circ \quad (\text{kN/m}^2)$$

粘着力 c に関しては，両者に大きな違いは見られないが，細粒砂岩のせん断抵抗角 ϕ は，軽石凝灰岩と比較して大きくなっており，岩盤せん断強度が相対的に高い値となっている．

(2) 室内岩石試験の方法と物性値

ロックせん断試験位置における岩石の強度変形特性については，JGS2531 に準拠した圧密非排水条件の三軸圧縮試験結果から設定した．また，引張り強さは JISM 0303 に準拠した圧裂試験結果(供試体直径 50mm，長さ 50mm)から設定した．

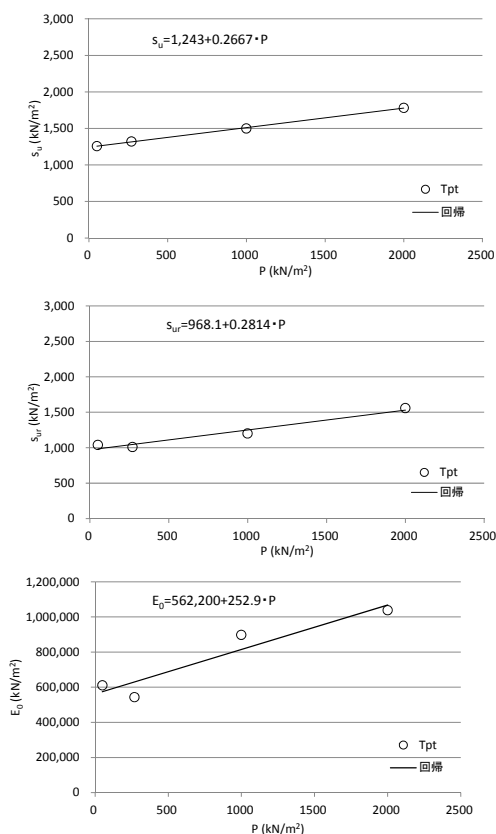


図-2(1) 軽石凝灰岩の岩石試験結果

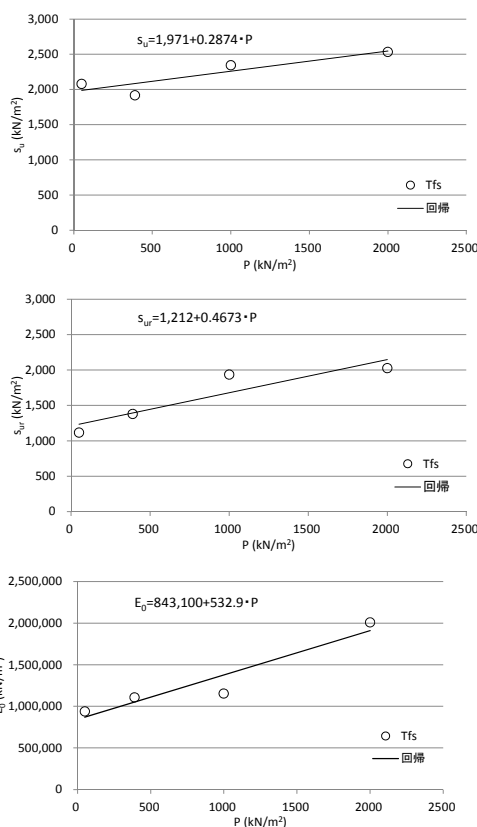


図-2(2) 細粒砂岩の岩石試験結果

図-2(1)および図-2(2)に軽石凝灰岩および細粒砂岩の岩石試験結果を示す．それぞれ上段：ピーク強度，中段：残留強度，下段：初期弾性係数を示した．

3. ロックせん断試験のシミュレーション

(1) 解析条件

a) 解析手法

本検討で用いた解析手法は静的非線形解析であり，荷重増分法と修正 Newton-Raphson 法による収束計算を組合せ，せん断ブロックが抵抗できなくなる（収束しない）直前に作用させたせん断荷重を破壊時荷重とした．また，応力-ひずみ関係は，図-3 に示す破壊余裕度に応じて変形特性を低下させるモデル($E/E_0 - R$)とした．

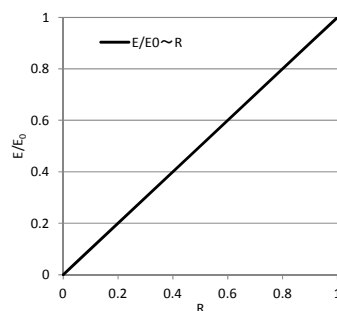


図-3 破壊余裕度に応じた変形特性 ($E/E_0 - R$)

b) 解析モデル

ロックせん断試験は3次元効果が考えられるが、ブロックがコンクリートキャップに拘束されていることや面外応力の影響が小さいと考えられることから、解析は2次元平面ひずみ条件とした。せん断試験時の境界条件は、底面、側方ともに固定条件とした。図-4にロックせん断試験の解析モデルを示す。

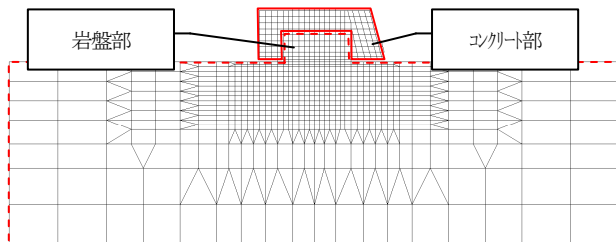


図-4 せん断応力載荷時の解析モデル

c) 初期応力の設定

シミュレーションの再現性を高めるために、せん断開始時の初期応力を次のとおりとする。第1ステップとして、原位置試験位置の標高より土被り相当（軽石凝灰岩：21.2m、細粒砂岩：17m）の初期応力を考慮した自重解析を実施した。その後、第2ステップとして、図-5に示すように試験坑掘削による応力解放を実施し、この時の応力状態をシミュレーション時の初期応力に設定した。

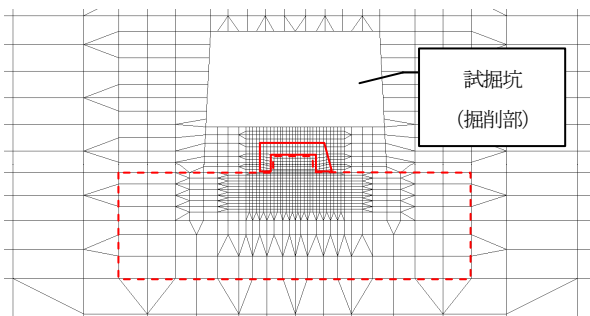


図-5 初期応力算定用の自重解析モデル(ステップ2)

d) 解析用物性値

ロックせん断試験のシミュレーションに用いた入力物性値を表-1に示す。入力物性値は、先に示した岩石試験結果に基づき、岩種ごとにそれぞれの垂直応力に対する圧密圧力下での非排水せん断強度（ピーク強度、残留強度）および変形係数を強度・変形特性として設定した。

表-1(1) 入力物性値：軽石凝灰岩

σ_n : 垂直応力 (kN/m ²)	50	100	300	500
E_0 : 変形係数 (kN/m ²)	575,000	587,000	638,000	689,000
s_u : ピーク強度 (kN/m ²)	1,260	1,270	1,320	1,380
s_{ur} : 残留強度 (kN/m ²)	980	1,000	1,050	1,110
γ_t : 単位体積重量 (kN/m ³)	15.6			
ポアソン比	0.48			
σ_t : 引張強さ (kN/m ²)	280			

表-1(2) 入力物性値：細粒砂岩

σ_n : 垂直応力 (kN/m ²)	50	100	300	500
E_0 : 変形係数 (kN/m ²)	870,000	896,000	1,003,000	1,110,000
s_u : ピーク強度 (kN/m ²)	1,990	2,000	2,060	2,120
s_{ur} : 残留強度 (kN/m ²)	1,240	1,260	1,350	1,450
γ_t : 単位体積重量 (kN/m ³)	18.5			
ポアソン比	0.48			
σ_t : 引張強さ (kN/m ²)	430			

(2) 岩石試験結果によるシミュレーション結果

ロックせん断試験のシミュレーション解析結果について以下に述べる。ここでは、解析により得られる見掛けのせん断強度を「解析せん断強度」、原位置ロックせん断試験により得られるせん断強度を「原位置せん断強度」と呼ぶ。また、軽石凝灰岩および細粒砂岩ともに解析結果の傾向が類似していることから、定性的な評価については区別せずに述べることとする。

はじめに、図-6(1)および(2)に、ロックせん断試験結果から設定したせん断強度とシミュレーションによるせん断強度の比較を示す。

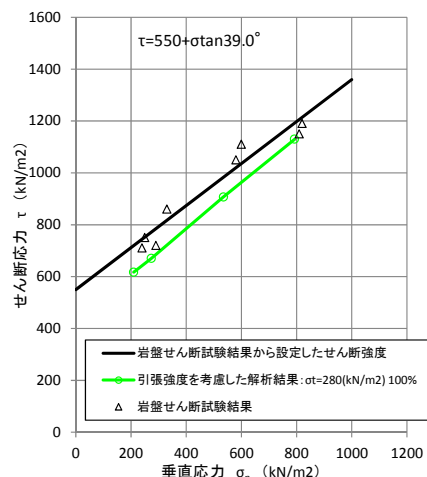


図-6(1) ロックせん断試験結果の比較(軽石凝灰岩)

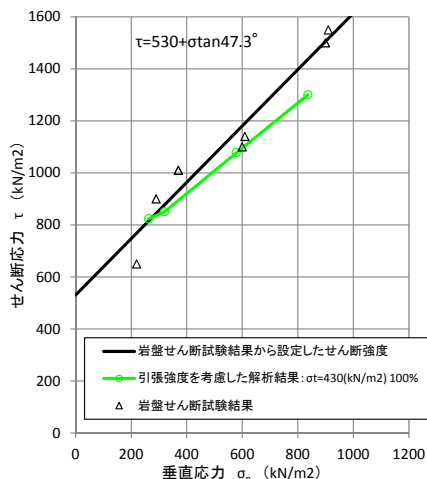
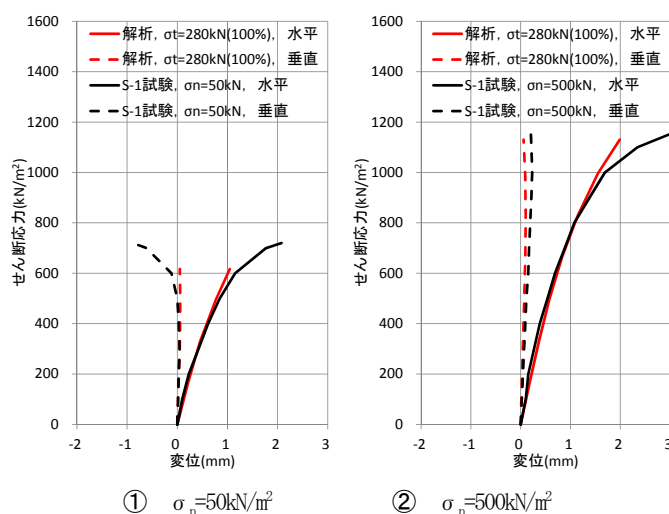


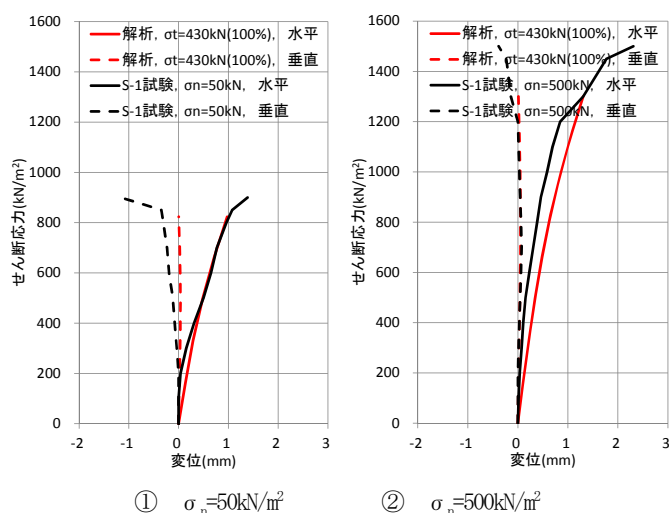
図-6(2) ロックせん断試験結果の比較(細粒砂岩)

図-6によれば、いずれの岩盤においても、解析せん断強度は、原位置せん断強度に近い結果が得られている。

次に、図-7にロックせん断試験結果とシミュレーション結果の水平、鉛直変位量の比較を示す。



(1) 軽石凝灰岩の変形挙動



(2) 細粒砂岩の変形挙動

図-7 ロックせん断試験とシミュレーションの比較

図-7より、ロックせん断試験結果とシミュレーション結果は、ほぼ同様の变形挙動を示しており、設定した入力物性値によって变形特性についても再現可能であることが判った。

以上のことから、シミュレーションにて設定している物性値にて、原位置せん断試験を再現できているものとする。

ここで、破壊時のせん断面要素に着目し、図-8に軽石凝灰岩シミュレーション破壊時の局所安全係数分布図、図-9に岩盤の初期時および破壊時のモールの応力円を図示する。

図-8より、 $\sigma_n = 50 \text{ kN/m}^2$ のせん断面では、引張破壊が卓越しており、 $\sigma_n = 500 \text{ kN/m}^2$ のせん断面では、せん断破壊の影響が比較的大きい結果となっている。

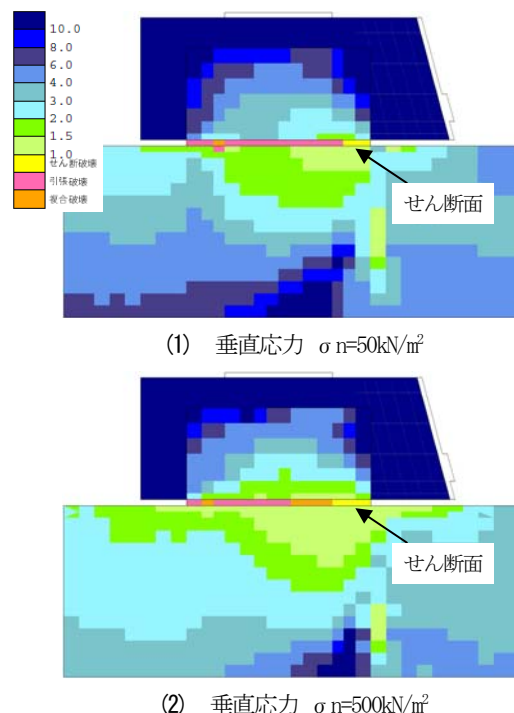
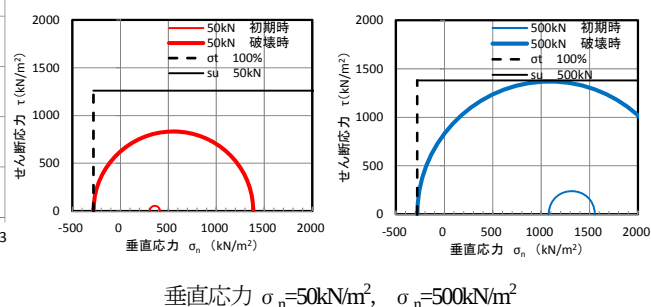


図-8 局所安全係数分布図(軽石凝灰岩)

図-9より、 $\sigma_n = 50 \text{ kN/m}^2$ の垂直応力状態では、応力円全体が低応力側にシフトし、引張り強さに抵触しているが、 $\sigma_n = 500 \text{ kN/m}^2$ では、せん断破壊と引張破壊に同時に抵触する状態となっている。



垂直応力 $\sigma_n = 50 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_n = 500 \text{ kN/m}^2$

図-9 モールの応力円 (軽石凝灰岩)

これらのせん断面要素に着目した分析から、引張り強さの設定が、シミュレーション結果に寄与していることが推測される。

(3) 引張り強さの影響検討

前述したように、原位置せん断強度については、設定したせん断強度はもとより、引張り強さが影響することが判った。そこで、引張り強さをパラメータとして解析結果に与える影響について検討を行った。

表-1に示した軽石凝灰岩および細粒砂岩の引張り強さのバラツキ(平均値 μ ±標準偏差 σ)は、軽石凝灰岩において $280 \pm 125 \text{ kN/m}^2$ 、細粒砂岩において $430 \pm 222 \text{ kN/m}^2$ である。引張り強さの設定方法を検討するにあたり、軽石凝灰岩および細粒砂岩の1 σ は、ともに平均値のおよそ50%程度であることから、それぞれの引張り

強さを 50%低減させた値（以下、「50%引張り強さ」という）を用いて、ロックせん断試験のシミュレーションを実施し、平均値の引張り強さ（以下、「100%引張り強さ」という）でのシミュレーション結果と比較検討を行った。

図-10 に、各岩種ごとに区別して、50%引張り強さ設定時と 100%引張り強さ設定時の解析せん断強度の比較を示す。50%引張り強さ設定時の解析せん断強度は、垂直応力の低い範囲において、100%引張り強さ設定時の解析せん断強度よりも小さくなる結果を示している。一方、垂直応力の高い範囲においては、引張り強さが変化しても、僅かな変化しか生じておらずせん断特性への影響は小さいことが窺える。

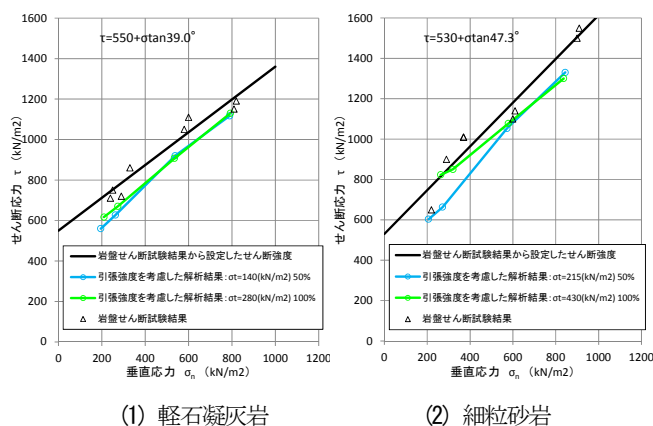


図-10 引張り強さの違いによるせん断強度比較

図-11 に軽石凝灰岩における破壊時のモールの応力円を示す。低垂直応力状態 ($\sigma_n = 50 \text{ kN/m}^2$) では、引張り強さ 100%設定時に比べて引張破壊がより早い段階で引張り強さに抵触し、解析せん断強度が小さくなるが、高垂直応力状態 ($\sigma_n = 500 \text{ kN/m}^2$) では、大きな差はみられない。

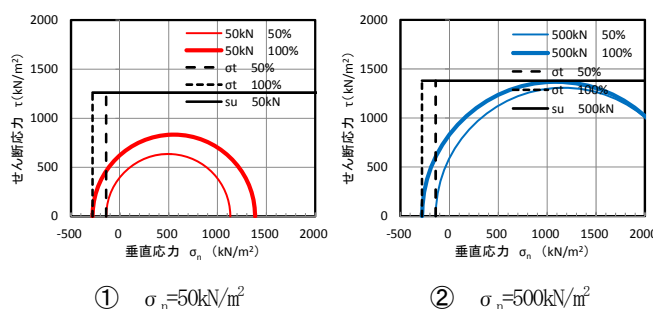


図-11 モール応力円の比較（軽石凝灰岩）

これらのことから、引張り強さが解析せん断強度に及ぼす影響は低垂直応力の場合に顕著であることが確認できた。

(4) 原位置試験を再現する物性値の検討

先の図-6 に示した岩石試験結果による入力物性値の解析せん断強度は、原位置せん断強度とわずかではあるがせん断強度に差が生じていた。ここで、試計算として、原位置せん断強度と整合するように、引張り強さをフ

ッティングさせた解析を実施した。引張り強さ 100%設定時に、解析せん断強度は、原位置せん断強度より小さかったことから、引張り強さを段階的に大きくし、フィッティングを行った。試計算より、軽石凝灰岩は引張り強さを 150%、細粒砂岩は引張り強さを 120%に設定した時に、原位置せん断強度と同等の値となった。

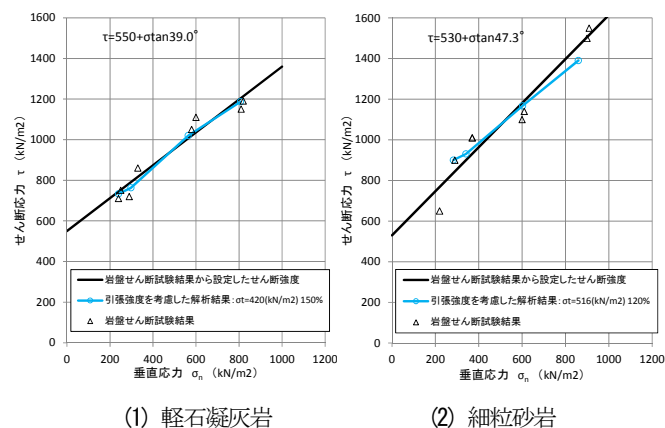


図-12 原位置せん断強度とのフィッティング結果

4. まとめ

ロックせん断試験は、岩石試験結果に基づく地盤パラメータ（変形特性、せん断強度、引張り強さ）によって概ね再現できることを確認した。原位置ロックせん断試験結果を再現するには、引張り強さの設定が大きく寄与し、特に、低垂直応力時のせん断強度特性は、引張り強さに支配されることが確認できた。

したがって、現状の基礎地盤の安定性評価では、引張強さを考慮せずに解析を行っているが、基礎地盤を構成する岩盤の破壊現象を的確に評価するには、引張り強さを適切に評価および設定し、その現象を表現できる解析手法により、評価を行う必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 宇野晴彦, 酒井俊明, 佐藤正行, 福井史朗, 人工岩材料を用いた岩盤せん断試験について, 第 25 回土質工学研究発表会, pp1075-1078. 1990.
- 2) 酒井俊明, 佐藤正行, 宇野 晴彦, 福井史朗, 軟岩地盤の原位置せん断強度特性について, 第 25 回土質工学研究発表会, pp1079-1082. 1990.
- 3) 谷和夫: 人口の泥質軟岩を用いた室内岩盤せん断試験, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp767-772, 1998
- 4) 伊藤悟郎, 小林正典, 大宮宏之: 引張応力下における岩盤のせん断挙動に関する研究 — 亀裂性岩盤を対象としたロックせん断試験の数値解析 —, 土木学会第 65 回年次学術講演会, III-200, pp.399-400, 2010.
- 5) 仲村治朗, 河村精一, 村中健二: 大型構造物基礎岩盤としての互層堆積軟岩の変形・強度特性に関する考察, 土木学会論文集C, vol.62 No.2, pp414-428, 2006.4

DETERMINATION OF THE ROCK MECHANICAL PARAMETERS ON THE NUMERICAL SIMULATION OF IN-SITU ROCK SHEAR TEST

Masashi OOTA, Risa NISHIYAMA, Kazuyuki KOMURO, Satoshi NAKANE,
Haruhiko UNO and Kensei KANAYA

Numerical simulation of the shear test mimics the rock failure process and plays an important role on the stability evaluation of the civil structure against earthquake. This study aims to represent the in-situ shear test in numerical model and to determine the rock mechanical parameters based on the laboratory test results. Then, we conducted the numerical simulation of the in-situ shear test based on the derived rock mechanical parameters in laboratory test. As the result, the tensile strength expresses great sensitivity on the rock failure process and is considered an important rock mechanical parameter for the stability evaluation of the building basement as the rock strength and the deformation properties.