

P1. 亀裂性岩盤における原位置の一軸引張り試験の実施例

○石井秀明・近藤浩司・木村一成・長田朋大（(株)ナイバ）

西坂直樹・下口裕一郎・鈴木俊輔・大西耕造（四国電力(株)）

1. はじめに

近年、斜面の安定性評価や補強工の設計に岩盤の引張り強さを考慮することを目指して、現場で実施する岩盤の一軸引張り試験の研究・技術開発が進められている。しかし、試験の実施例が少なく研究段階にあることから、基準化の必要性が高いことは認められるものの時期尚早であると判断されている（地盤工学会岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討WG, 2014）。現状、亀裂を含む岩盤の引張り強さを評価することの困難さなどから、解析上は引張り強さを保守的にゼロと扱うことが一般的であり、より合理的な耐震安定性評価を行うため、まずは岩盤（原位置）の一軸引張り試験の実施例を蓄積していくことが重要である。

四国には中央構造線と接して南側に亀裂性岩盤である三波川帯の結晶片岩類が広く分布しており、多くの電力設備が立地する。これらの設備の設計においては、南海トラフの地震や中央構造線断層帯による地震を想定した大加速度に対する地盤安定性評価が求められるため、引張り強さを考慮した合理的な評価を行う必要がある。そこで、三波川帯の緑色片岩（塩基性片岩）を対象に、岩盤の一軸引張り試験を実施し、試験方法の基準化検討に資する。

2. 試験装置及び試験供試体の概要

今回、岩盤の一軸引張り試験を実施するにあたり、亀裂性岩盤での試験を念頭に、センターガイドを試験体中心に設置することで曲げモーメントによる亀裂の発生を抑制できる岡田ほか（2013）による中空円筒状の供試体を用いる試験方法を採用することとした。ただし、試験装置については数が少なく借用が困難であったため、岡田ほか（2013）の試験機の構造を踏襲し、装置を独自に作製することとした。その際、現地での作業性等を考慮し、試験装置の構成は表-1のとおりとした。試験装置の概要は図-1に示す。

供試体の寸法は岡田ほか（2013）に従い、φ600mmとした（図-2）。また、試験地点の緑色片岩が亀裂性岩盤であるとともに傾斜約20度の低角の片理を有することを考慮し、整形時の供試体破損を避けるため、供試体の頭部にφ25mmのアンカー孔を削孔してアンカーボルトを打設し、φ100mmの縁切り削孔によって供試体を作製することとした。

表-1 試験装置構成の概要

装置構成の概要			
センターロッド φ80	一式	載荷ロッドφ65	3本
油圧ジャッキ センターホール型	1MN 1基	圧縮型荷重計	500KN 3基
載荷ブロック-1 (リニアガイド付)	1基	引張型荷重計	300KN 3基
載荷ブロック-2	1基	変位測定器	一式
載荷ブロック-3 (リニアガイド付)	1基		

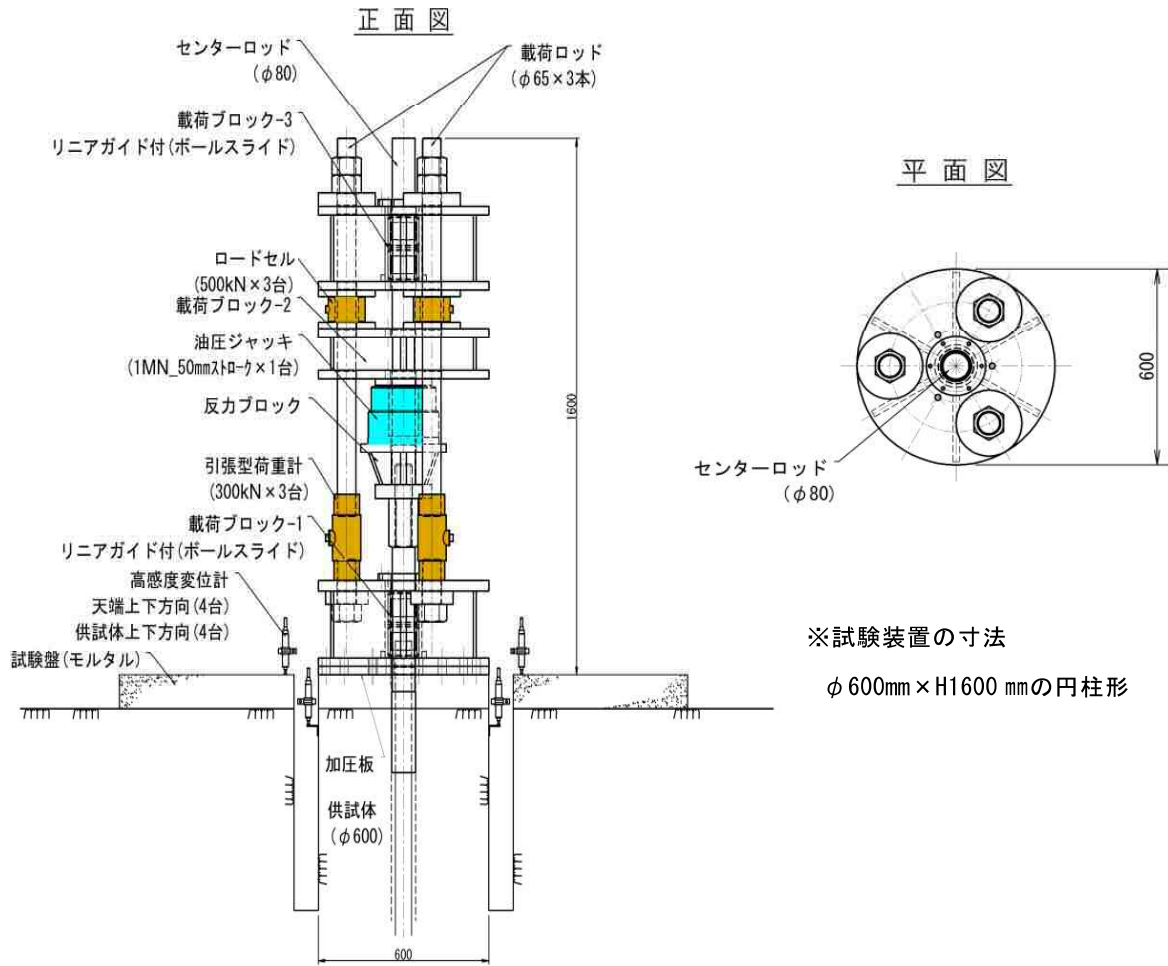


図-1 試験装置の概要図

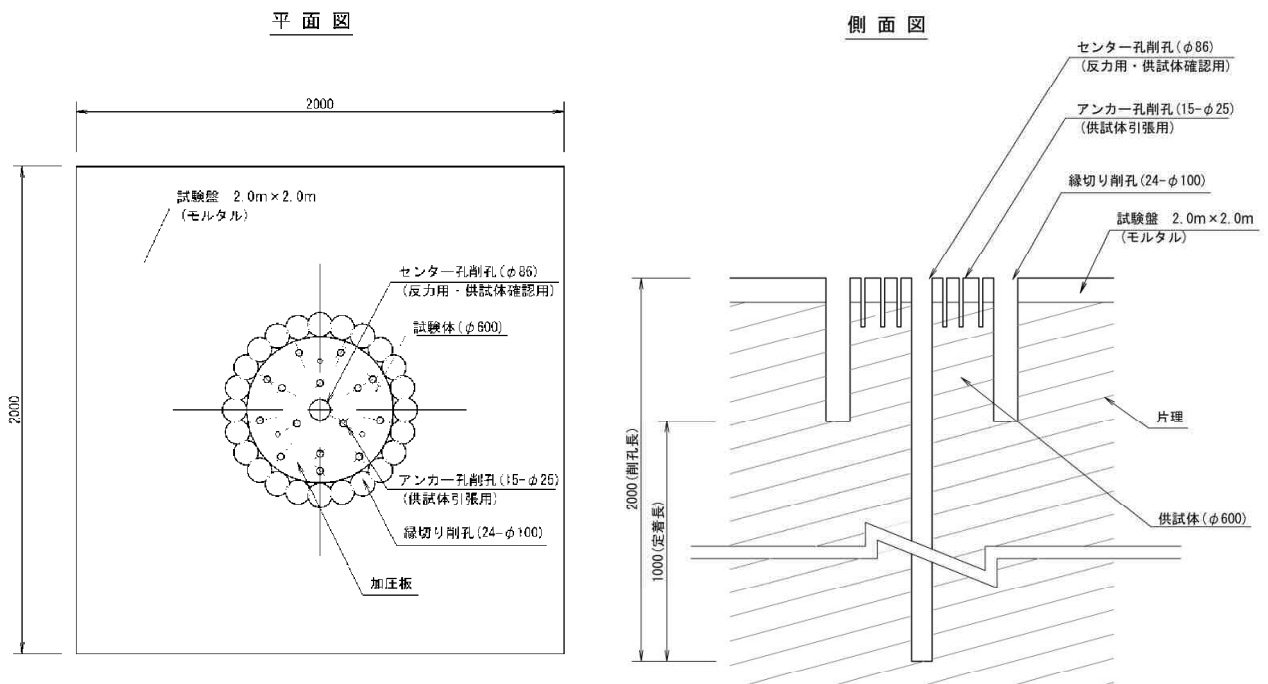


図-2 試験供試体の概要図

3. 試験の手順

試験の手順は、緑色片岩の特性や現地での作業性を考慮し、以下のとおりとした。

① 試験位置選定

評価対象岩盤を代表する箇所を選定する。低角の節理や断層等により岩盤を代表する引張り強度が得られないと想定される箇所を避ける。

② 試験盤打設

2m×2mの範囲で不陸整形を行い、清掃の後、モルタル（均しコン：厚さ約5cm）を打設し、試験面を水平仕上げする。

③ センター孔削孔

予めセンター孔及びアンカーボルト用に穴開けしたφ600mmの加圧板を配置し、この穴に沿ってφ86mmのセンター孔（掘進長2m）を削孔する。その際、オールコアを採取し、供試体全体に広がるような低角の弱面が試験区間に分布しないことを確認する。

④ アンカーボルト設置

試験面に加圧板を接着し、供試体頭部にアンカーボルトを設置するとともに、試験面に保護用上載荷重を載荷し、縁切り削孔による供試体の緩みや破損を防ぐ。

⑤ 縁切り削孔

加圧板周囲をφ100mm、掘進長約0.7～0.8mのラインドリリングにて縁切り削孔し、供試体を完成させる。供試体周囲の亀裂状況に異常がないことを確認する。

⑥ 試験の実施

保護用上載荷重を除去して試験装置をセットし、引張り試験を実施する。（載荷速度0.05MPa/min、計測データ収集頻度10Hz）

4. 試験結果の分析

岩盤の一軸引張り試験においては、剛性の小さい割れ目や弱部の影響により供試体上面の傾きが助長されて曲げモーメントが作用し、結果として供試体側面に割れ目や弱部からの亀裂が発生し測定強度が低下する可能性があるため、加圧板の傾きを許さず真っ直ぐ引っ張ることが要求される（岡田ほか、2013）。したがって、試験結果について、荷重～変位曲線や経時変化を慎重に分析し、適正に試験を実施できたことを確認することが重要である。

試験結果の一例（No.A 地点）を図-3（左）、図-4（左）に示す。引張り荷重～変位曲線図において、ピーク荷重が明瞭である。また、頭部変位の経時変化図において、ピーク荷重付近に達するまでN・S・E・W方向いずれの変位についても概ね均一に推移し、ピーク荷重の数10秒前からは破壊の進展とともにN・S方向の変位がN小、S大に多少振れながら全体としては頭部変位が急激に増加する。これらの計測データから、供試体を鉛直上方にほぼ真っ直ぐに近い状態で引っ張ることができ、試験を概ね適正に実施できたと判断される。

試験結果のもう一例（No.B 地点）を図-3（右）、図-4（右）に示す。引張り荷重～変位曲線図において、明瞭なピーク荷重が認められず、荷重が増減しながら変位が増加する。また、頭部変位の経時変化図において、ピーク荷重に達することなく頭部変位が増加して破壊に至る。その際、N・W方向に比べてS・E方向の変位が大きく表れており、曲げモーメントによって偏心が生じたと推察される。

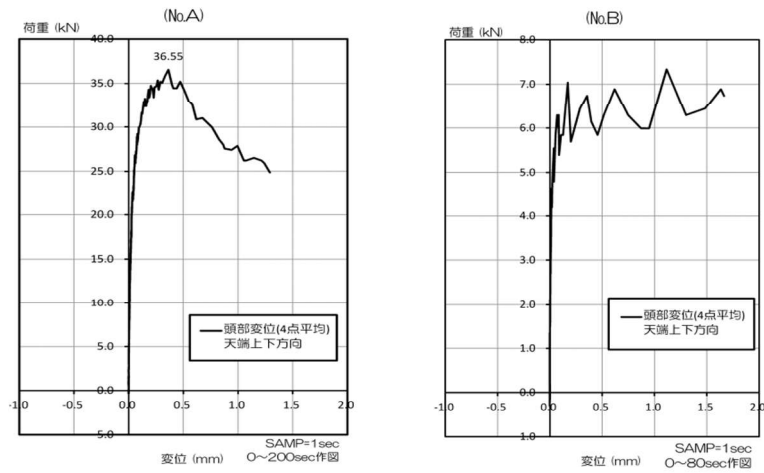


図-3 引張り荷重～変位曲線図（左：No. A、右：No. B）

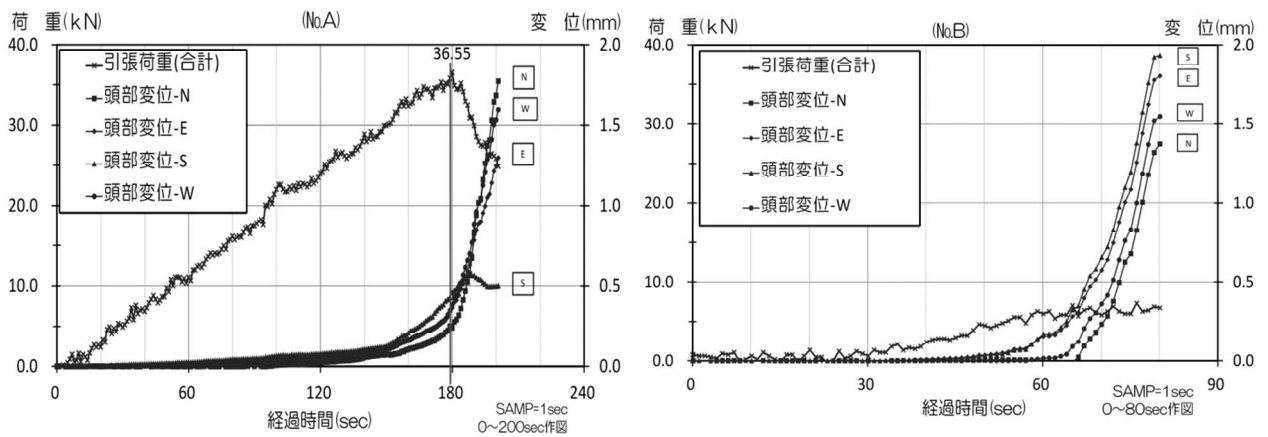


図-4 頭部変位の経時変化図（左：No. A、右：No. B）

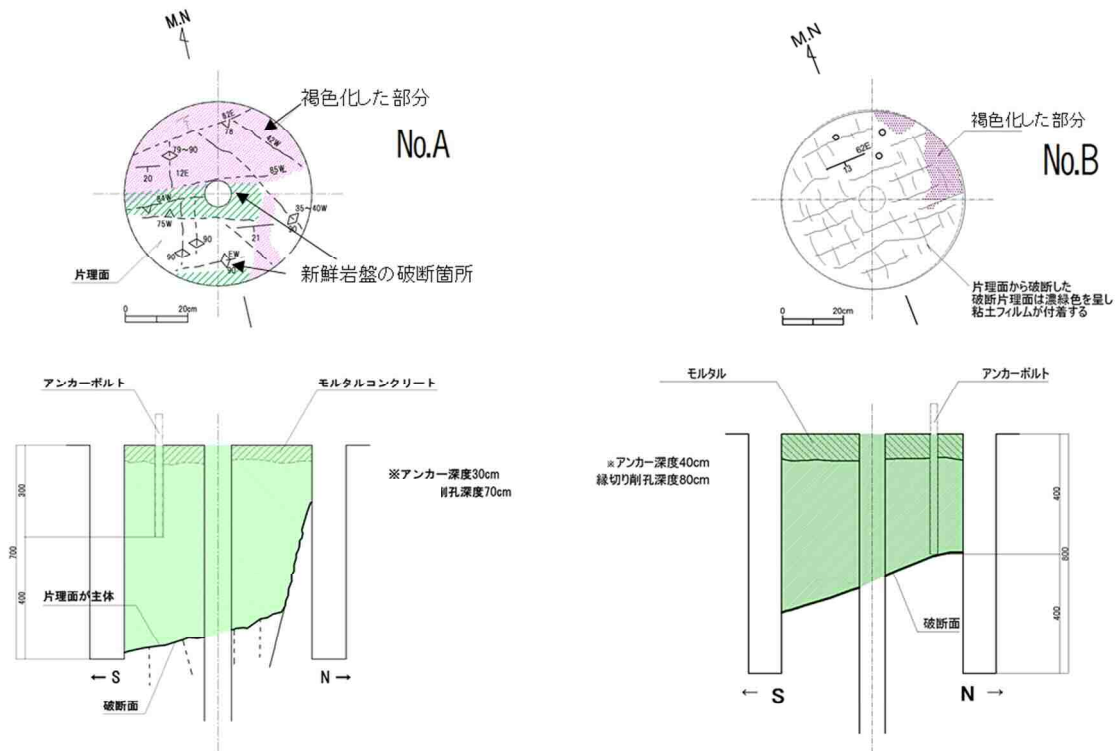


図-5 供試体破断面スケッチ（左：No. A、右：No. B）

No.A



破断箇所



図-6 試験後の供試体破断状況（上）と破断箇所のセンターコア状況（下）

ここで、各試験の供試体破断面スケッチを図-5に、破断状況写真を図-6に示す。No.Aの破断面では、北半分に風化による褐色化が認められるものの、中央部に東西に延びる幅約10cm程度の新鮮岩盤部が存在し、この部分がピーク荷重で破断したものと推察される。一方、No.Bの破断面では、濃緑色の粘土フィルムが全面に観察されて新鮮岩盤部が認められず、南東側の片理面に沿う弱面から破壊が進展して破断したようである。このように、亀裂性岩盤においては、細心の注意を払ったとしても引張り試験時に曲げモーメントが発生しやすく、試験結果を分析して慎重に採否を判断することが重要である。

5. 引張り強度の評価

表-2に引張り強度の算出方法を示す。計測した最大荷重は供試体重量を含んでいるため、破断した供試体重量の実測値を差し引いて実際に破断面に作用した引張り荷重を求める。供試体断面積について、試験後の破断面には凹凸がみられるが、供試体径 $\phi 600\text{mm}$ を破断面積（投影面積）とすれば、引張り強度が 0.106MPa （表-2⑤）と求まる。

前述のとおり、供試体破断面には風化によって褐色化した部分や新鮮岩盤部が確認される（図-5、図-6）。地質観察の結果から、褐色風化部はもともと引張り強度が小さい部分であり、試験時にはこれらの割れ目部分から逐次破壊が進行し、最終的には新鮮岩盤部の破壊がピーク強度と対応すると考えられる。褐色風化部を除いた面積から求められる引張り強度は 0.206MPa （表-3⑧）、新鮮岩盤部のみの面積から求められる引張り強度は 0.654MPa （表-3⑨）と算出される。したがって、試験位置における緑色片岩の引張り強度は $0.10\sim 0.65\text{MPa}$ 程度と評価される。

表-2 引張り強度の算出方法

供試体No.	①	②	③	④	⑤
	最大荷重 (kN)	供試体断面積 (m^2)	引張り強度 (Mpa)	供試体重量 (kN)	供試体重量を差し引 いた引張り強度(Mpa)
	試験値データ	$\phi 600\text{m}$ 試験盤面積 - 中心孔 $\phi 86\text{mm}$ 面積	①/②	破断供試体 実測値	(①-④) / ②
No.A	36.547	0.277	0.132	7.096	0.106

表－3 破断面観察結果を考慮した引張り強度の算出方法

供試体No.	⑥	⑦	⑧	⑨
	褐色風化部を除いた破断面積 (m ²)	風化部等弱面を除いた破断面積 (m ²)	褐色風化部を除いた面積から求められる引張り強度 (Mpa)	新鮮岩盤部の面積から求められる引張り強度 (Mpa)
	破断面観察から算定	破断面観察から算定	(①－④) / ⑥	(①－④) / ⑦
No.A	0.143	0.045	0.206	0.654

6. まとめ

今回、試験装置を新たに製作して岩盤の一軸引張り試験を実施し、亀裂性岩盤においても引張り強度がゼロでなく、一定の強度を有することを確認できた。今回の試験を通して得られた、今後解決すべき課題について以下に記す。

- (1) 亀裂性岩盤においては、細心の注意を払ったとしても引張り試験時に曲げモーメントが発生しやすく、岩盤内に潜在する弱面から破断が進展することが多い。破断面の観察や変位の経時変化等の試験結果を適正に評価し、採否を判断することが重要であるため、試験法の基準化に際しては、併せて試験結果の評価基準の制定が望まれる。
- (2) 偏った破壊進展に抗して上方一軸方向に引張るためには、センターロッドが十分なたわみ強さを有する必要がある。今回の試験装置ではセンターロッドのたわみ強さが若干不足していたと考えられ、対策案として、供試体周囲の縁切り孔内に滑車等を埋め込み配置して横方向変位を抑制することやセンターロッドの剛性を高めることが考えられる。
- (3) 引張り強度の評価においては、供試体が評価対象岩盤を代表できるか否かを破断面観察等により分析するなどし、必要に応じて得られた引張り強度を補正する必要がある。岡田ほか(2012)では、岩盤不連続面の幾何学情報を基に三次元の岩盤モデルを作成し、解析的に引張り強度を評価する手法が提案されている。原位置での岩盤の一軸引張り試験の結果が、同手法等の検証やキャリブレーションとして活用されていくことが望まれる。

最後に、試験装置の製作から試験の計画・実施、引張り強度の評価まで、(財)電力中央研究所の岡田哲実博士に終始ご指導を頂きました。ここに記して深謝の意を表します。

【参考文献】

- 地盤工学会 岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討WG (2014)：「岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討」に関する報告書
- 岡田哲実・納谷朋広・谷 和夫 (2013)：中空円筒状の試験体を用いた岩盤の引っ張り試験方法の考案、第48回地盤工学研究発表会講演集、pp. 601－
- 岡田哲実・小早川博亮・伊藤 洋 (2012)：不連続性岩盤の寸法効果を考慮した引張・圧縮強度の解析的評価方法の提案、電力中央研究所報告、