

原位置岩盤引張り試験法の開発と 実験および数値解析による妥当性の検証

岡田 哲実^{1*}・納谷 朋広²・三橋 祐太³・谷 和夫⁴

¹電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²株式会社ダイヤコンサルタント 地質解析事業部 (〒331-0811 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3)

³構造計画研究所 防災・環境部 (〒164-0011 東京都中野区中央4丁目5番3号)

⁴東京海洋大学 学術研究院 (〒331-0811 東京都港区港南4丁目5番7号)

*E-mail: t-okada@criepi.denken.or.jp

原位置岩盤の引張り強さを評価するための新しい試験方法を開発した。本試験ではボーリングにより作製された中空円筒状の岩盤供試体に対して破壊するまで引張り荷重を軸方向に負荷するものである。供試体の直径は60cm、高さは60cmである。開発した装置の検証のために模擬岩盤を用いて原位置引張り試験を実施した。また、模擬岩盤からサンプリングした直径5cmのコアを用いて、開発した装置と同じ仕組みの室内引張り試験を実施した。その結果、原位置岩盤引張り試験から得られる引張り強さは、コアの引張り試験から得られる引張り強さに対して40%程度の大きさとなった。この妥当性を検証するため、要素のばらつきの影響を考慮した数値解析を実施したところ、寸法効果を合理的に説明できる結果が得られた。

Key Words : tensile strength, direct tension test, in situ test, rock mass, scale effect

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震以降、原子力施設の耐震設計において基準地震動が増大している。水平動のみならず、上下動も比例して大きくなるため、岩盤の引張り強さ=ゼロで動的解析(等価線形解析)を実施した場合、非現実的な岩盤の引張り破壊領域が発生することがある。このため、現実に想定されるすべり破壊(せん断破壊)による不安定現象を合理的に評価できていない可能性がある。この解決手段として、解析手法の高度化¹⁾はもとより、現実の岩盤の引張り強さの考慮が必要である。

一方、岩盤の引張り強さを適切に評価するためには、せん断強さの評価と同様に原位置で力学試験をすることが望ましい。原位置岩盤引張り試験については、岩盤せん断試験と類似の構造で研究的に実施された事例はある^{2,4)}。しかし、大きな試験体に曲げを与えずに引張り荷重を負荷することは困難であり、未だ確立された試験方法が存在しない。

そこで本研究では、まず岩盤の引張り強さを評価するための原位置岩盤引張り試験法を新たに考案し、装置を開発した。次に、模擬岩盤を対象として開発した装置を用いて引張り試験を実施するとともに、同じ模擬岩盤から採取したコアを用いて、同様の原理に基づく室内引張

り試験を実施し、両者を比較した。さらに、両者の引張り強さの差、すなわち寸法効果を解釈するため、要素のばらつきの影響を考慮した数値解析を実施し、試験結果の妥当性を検証した。

2. 試験方法の提案

原位置岩盤引張り試験法として、強度特性のみならず変形特性も取得可能な一軸引張り試験タイプの試験方法を目指した。供試体を直接引っ張る一軸引張り試験のポイントは、供試体に作用する曲げモーメントを抑制することである。このためには、①载荷軸と供試体の中心軸を一致させること、②供試体と荷重を加える鋼製の加圧板(キャップ、ペDESTAL等)の端面の平行度を保つこと、③供試体の成形の精度を高めること、等が必要である。また、不連続面を含む不均質な天然の岩盤に対しては、引張り荷重を加える载荷軸と加圧板の接合部に回転を許す構造(球座やユニバーサルジョイント等)を用いることは好ましくない。回転を許す構造では、モーメント=ゼロは達成されやすいが、健岩部と比較して不連続面等の弱部を有する供試体に対しては、加圧板の回転による非一様な変形が助長され、結果として供試体に割れ

目や弱部からの破壊の進展の可能性が生じる。よって、不連続面を含む不均質な岩盤への適用も考えた場合、加圧板の回転を許さず、等変位で真っ直ぐ引っ張る試験方法が好ましい。なお、この条件を採用するためには、回転を許す構造以上に上記①②③に対しては注意を払い、精度を高める必要がある。以上より、図-1に示す中空円筒筒供試体を用いたセンターホールリニアガイド形式の引張り試験方法を考案した⁹⁾。

試験手順としてまず、ボーリングにより中空円筒形状の供試体を作製する。ボーリングマシンを動かさず外周と中央孔の2回のボーリングを行うため、中心位置がずれることはない。供試体作製後、中心位置がずれないようにスペーサーを設置後、中央孔に反力を兼ねるセンターガイドを挿入し、下端部を接着剤等で固定する。完全に固定後、スペーサーを除去し、リニアガイドの付いた加圧板、ロードセル、荷重ジャッキを設置し、岩盤と加圧板を接着剤等で固定する。以上で試験準備が完了し、センターガイド下端を反力にとり、ガイドに沿ってジャッキを収縮させて岩盤を引き上げ、引張り試験を行う。この方法により、原位置での作業にもかかわらず中心軸を一致させ、供試体を真っ直ぐに引き上げることが可能であり、供試体の中心で反力をとっているため、曲げモーメントも抑制することができる。

3. 試験装置の開発

(1) 原位置岩盤引張り試験装置の開発

考案した方法に基づき、最大荷重の大きさの異なる2つの試験装置を開発した。ともに通常の岩盤試験と同等のスケールである直径600mm程度の供試体を想定している。以降の検証試験に主に使用した最大荷重の小さい方（軟岩用と呼ぶ）の試験装置を図-2に示す。この装置は、リニアガイドを有する荷重盤の直上に250kNのジャッキを最大4台設置することにより、最大引張り荷重が1000kN（直径600mmとした場合の最大引張応力3.6MPa程度）まで載荷できる。このジャッキは電動モーターで駆動し、ジャッキ同士の同期をとって基本的に変位制御で載荷するものである。ロードセルは各ジャッキの下部に設置されている。ジャッキの上には引張り荷重を受ける反力板があり、反力を供試体下端に伝達するとともに載荷板の傾きを抑制するガイド（センターガイド）が中央に位置している。センターガイドの直径は80mmである。もう一方の最大荷重の大きい方（硬岩用と呼ぶ）の試験装置は最大荷重が5000kNまで載荷できる1個のジャッキを有する⁹⁾。このジャッキは油圧式であり、基本的には手動の油圧ポンプで荷重を加える。

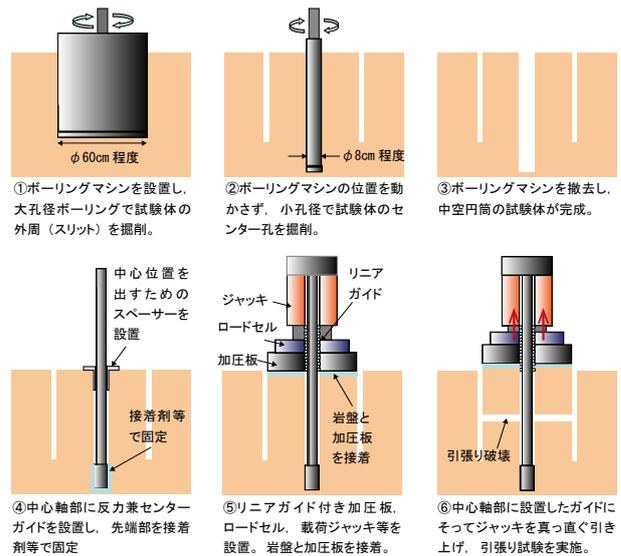


図-1 原位置岩盤引張り試験法

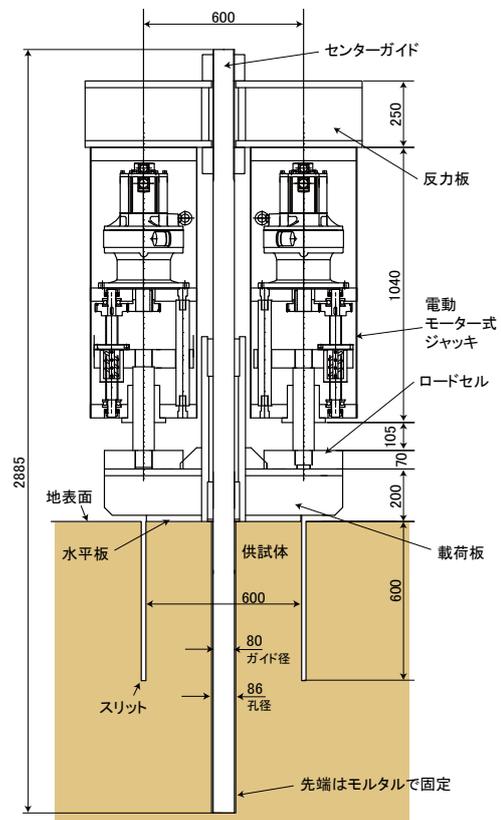


図-2 開発した原位置岩盤引張り試験装置

2) 室内引張り試験装置の開発

今回考案した中空円筒筒供試体の引張り試験の成立性を確認するため、同様の原理に基づいた室内引張り試験装置も開発した（図-3）。原位置と異なるのは、供試体サイズがφ50mmであること、下端もペDESTALがあること、供試体の中央孔を予め工作機械（旋盤）により加工

していることである。装置は圧力容器の中に設置し、一軸引張り試験だけでなく、三軸引張り試験も可能な構造となっている。センターガイドの径は6mmで、供試体の中央孔は8mmとした。荷重ジャッキは油圧式である。ロードセルはリニアガイドの摩擦を除去するため、リニアガイドの下に取り付けられている。なお、本装置により得られる引張り強さが圧裂引張り試験により得られる引張り強さと同程度であることは別途確認している⁷⁾。

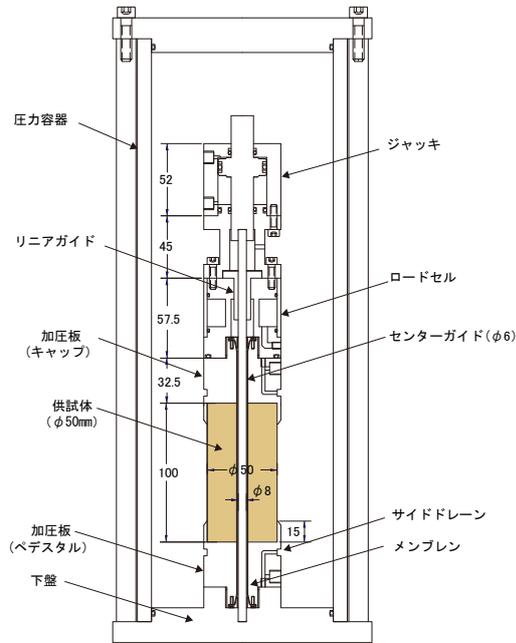


図-3 開発した室内岩石引張り試験装置

4. 試験方法の検証実験

開発した原位置試験装置および室内試験装置の検証を行うため、直径90cm、高さ150cmの円柱状の型枠にモルタルを打設し、これを模擬岩盤として実験に使用した。モルタルについては、セメント：水：砂=1：0.75：4の重量比で配合し、物性の安定する2か月以上養生したものを使用した。この模擬岩盤に対して原位置岩盤引張り試験を実施した。また、原位置岩盤引張り試験の中央孔あるいは変位計設置の計測孔より採取したコアを用いて室内引張り試験を実施した(表-1)。

原位置引張り試験については、全5ケース実施した。このうち4ケースは図-2に示した装置を使用し、1ケースは容量の大きい試験装置⁹⁾を使用した。試料No.M2-1以外については模擬岩盤と荷重板との接合は接着剤(エポキシ系2液混合型)とケミカルアンカーの両方を使用した。試料No.M2-1については、接着剤のみを使用した。

原位置試験、室内試験ともに、軸および周ひずみについては、ベディングエラーの影響を受けないように供試

体の側面で変位計とひずみゲージにより測定した。

表-1 試験一覧

試料 No.	原位置引張り試験		室内引張り試験	
	試験装置	荷重盤接着	試験装置	本数
M1-1	軟岩用	接着剤+アンカー	開発した装置 (室内用)	5
M1-2				3
M2-1		接着剤のみ		5
M3-1		接着剤+アンカー		3
M3-2	硬岩用		0	

5. 試験結果

各シリーズごとの引張り強さ q_t の比較を図-4に示す。全体的な傾向として、原位置引張り試験から得られた q_t は室内引張り試験の q_t と比較するとかなり小さい。ただし、各試料のばらつきも小さく、 q_t は1MPa程度である。これは室内引張り試験の約40%の強度であるが、既往の研究でモルタルの寸法効果⁹⁾でも同様の傾向が得られており、妥当な試験結果であると考えられるが、次章で数値解析により更に検証を行う。

今回実施した全ての原位置引張り試験および室内引張り試験の応力-ひずみ関係を図-5、図-6に示す。原位置引張り試験については、局所変位計によるひずみの平均値、室内引張り試験については、ひずみゲージの平均値を用いている。原位置試験、室内試験ともにM2のシリーズについてはやや剛性が小さい。また、原位置試験と室内試験を比較すると、強度差に比べ、剛性差は小さいことがわかる。コンクリートの寸法効果に関する既往研究でも同様の傾向を示した事例がある⁹⁾。以上より、局所変位計を用いた方法により、原位置で岩盤の平均的なひずみを計測できる可能性が高いことが示された。

原位置引張り試験および室内引張り試験の供試体の破壊位置と引張り強さの関係を図-7に示す。破壊位置については、供試体の中央高さから破壊面までの距離(hi)を供試体の高さ(ha)で除した値($hi/ha \times 100$ %)を用いた。よって、中央が0%、上端が+50%、下端が-50%となる。図より中央位置よりもやや上方で破壊した試験が多いことがわかるが、端部に破壊が集中している傾向は見られない。また、破壊位置と引張り強さの关系到明瞭な相関は見られないことから、端部近くで破壊することにより強度を過小評価しているわけではないことがわかる。なお、上端で破壊している原位置引張り試験の試料No.M2-1については、表-1に記載のとおり、アンカーなし、接着剤のみで水平板とモルタルを接着したケースであるが、水平板と供試体の境界で破壊してしまったのである。よって、大型の供試体では現状接着方法ではアンカーなしで接着するのは難しいことがわかった。

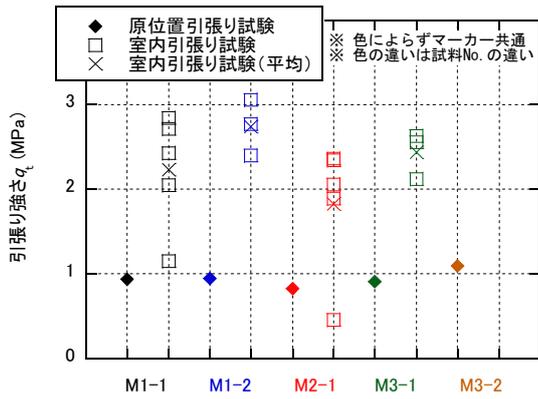


図-4 各試料ごとの引張り強さ

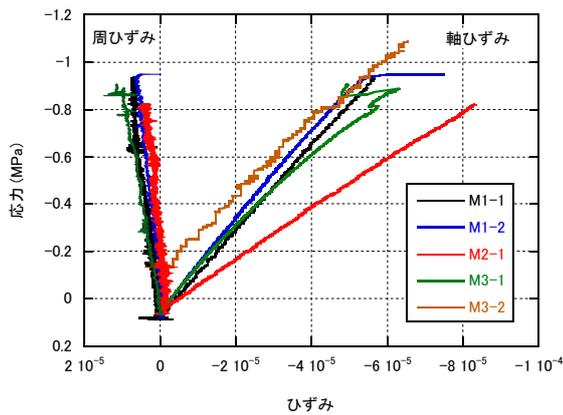


図-5 原位置試験の応力-ひずみ関係

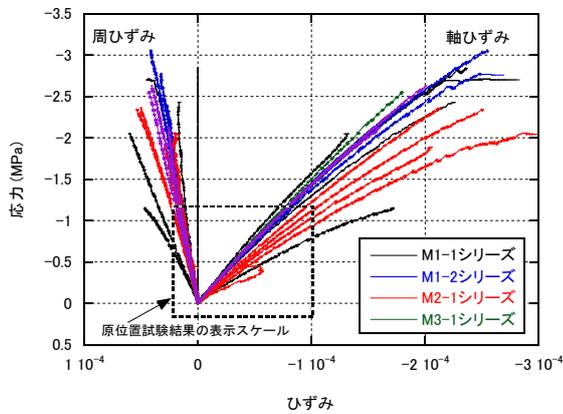


図-6 室内試験の応力-ひずみ関係

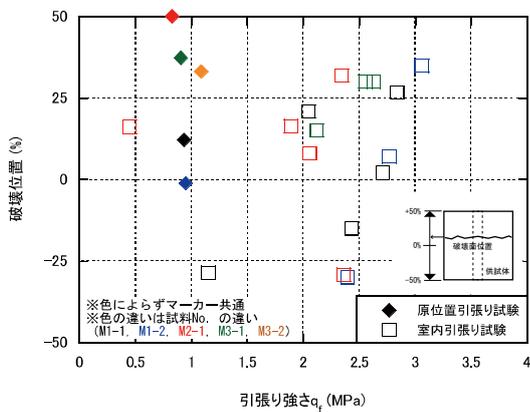


図-7 破壊位置と引張り強さの関係

6. 数値解析の概要

前章のとおり、原位置岩盤引張り試験の引張り強さの平均値は1MPa程度であり、室内引張り試験の引張り強さの約40%であった。室内引張り試験から得られた引張り強さ q_t 、ヤング率 E_{50} 、ポアソン比 ν_{50} を図-8に示す。また、各物性の平均値を表-2に示す。これら試験結果の累積密度関数を正規分布を仮定してフィッティングし、平均 μ および標準偏差 σ を求めた(表-3)。

物性のばらつきを評価するための数値解析には2次元のFEMを用いた。解析に用いたメッシュ図を図-9に示す。実験で使用した供試体は中空円筒型であるが、寸法とばらつきの影響を検討するため、中空部分はモデル化しなかった。原位置岩盤引張り試験の供試体の体積は、コア試験の供試体の体積の約800倍程度である。よって、

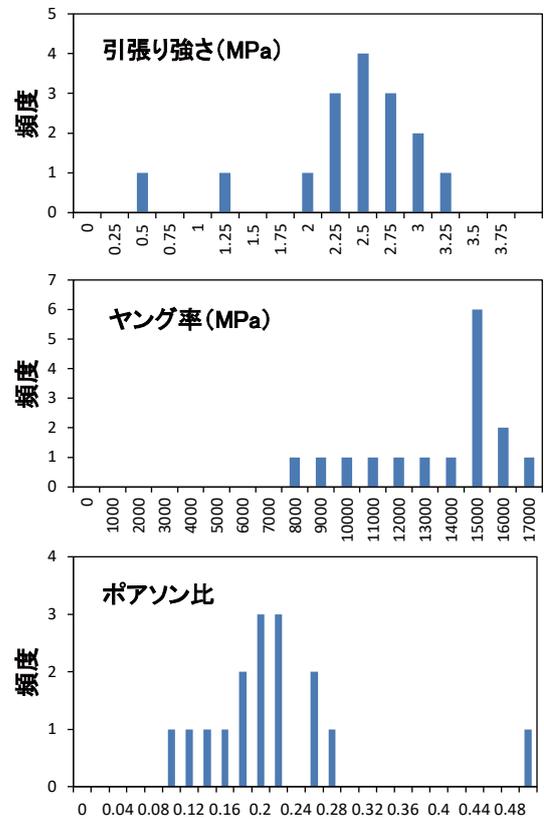


図-8 コアの物性のばらつき

表-2 コアの物性の平均値

要素試験	引張り強さ q_t (MPa)	ヤング率 E_{50} (MPa)	ポアソン比 ν_{50}
平均値	2.24	12910	0.20

表-3 コアの物性の正規分布の平均値と標準偏差

正規分布	引張り強さ q_t (MPa)	ヤング率 E_{50} (MPa)	ポアソン比 ν_{50}
μ	2.35	13283	0.19
σ	0.48	2715	0.058

表-4 解析ケース

ケース	引張り強さ q_t	ヤング率 E_{50}	ポアソン比 ν_{50}
No.1	正規分布	平均値	平均値
No.2	正規分布	正規分布	正規分布

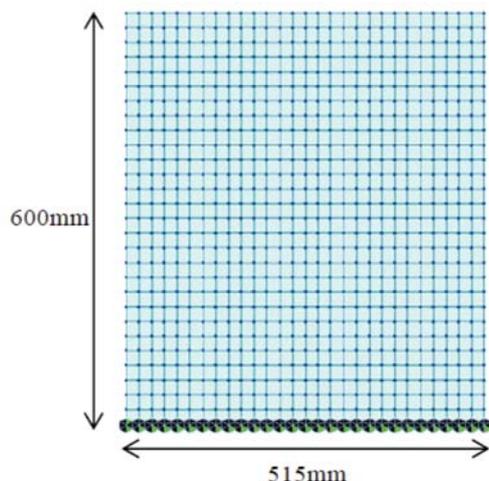


図-9 FEMメッシュ

各要素に物性のばらつきを与えることを想定して約800要素とすることを目安に、 $28 \times 28 (=784)$ 要素とした。境界条件について、下端については上下、水平方向とも固定し、上端については水平方向は自由、上下方向は上向きに強制変位を与えることで引張り試験を表現した。また、引張り破壊した要素については削除するように設定した。解析ケースを表-4に示す。ケースNo.1では、各要素の q_t は正規分布から任意に強度を抽出し、 E_{50} と ν_{50} については、一定値である平均値を用いた。ケースNo.2では、各要素の3つの物性の全てを正規分布から任意に抽出した。ただし、各物性の物性相関については考慮していない。両ケースともに計10回の解析を行った。

7. 解析結果

数値解析から得られた各ケース、全10回の等価応力と等価ひずみ関係を図-10に示す。等価応力は上端に作用する応力の平均値、等価ひずみは上端の変位を初期の高さで除したものである。両ケースとも応力がほぼ線形に同等の傾き（ヤング率）で上昇し、ピーク荷重を示した後、急に低下する傾向を示した。10回のピーク強度の平均値はケースNo.1が1.06MPaで、ケースNo.2が1.01MPaであった。これより q_t のばらつきの影響に比べ、 E_{50} と ν_{50} のばらつきの影響は小さいことがわかった。

結果として、数値解析と試験から得られた引張り強さは同等の値が得られた。また、数値解析から得られた原位置スケールのヤング率はコアスケール（要素）のヤン

グ率とほぼ等しく、この点も試験結果と整合する結果が得られた。つまり、原位置岩盤引張り試験の結果は、要素の物性のばらつきで解釈可能であることが示された。参考として、各解析ケースの破壊前後の垂直方向応力のコンターを図-11、図-12に示す。ともに破壊前後で破壊が急に進行することがわかる。

次に寸法効果の検討のためメッシュ数を 2×2 、 4×4 、 104×120 と変化させて、ケースNo.2と同様に3つの物性の正規分布を仮定して同様の解析を行い、要素数と q_t の関係を求めた（図-13）。要素数1個のデータとはコア（要素）の物性のばらつきを示すものである。この結果から要素数が多くなるとばらつきが小さくなり、1000個近くになると q_t が一定値となり、今回の原位置岩盤引張り試験の強度とほぼ等しくなることがわかる。

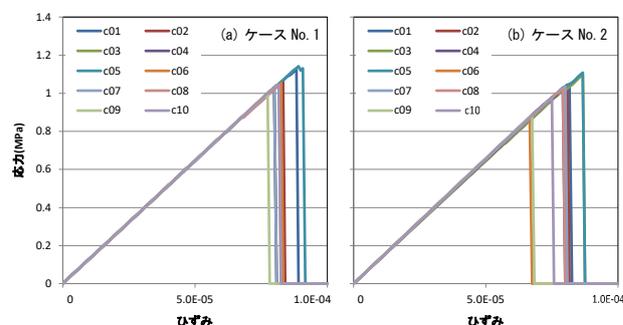


図-10 等価応力と等価ひずみの関係

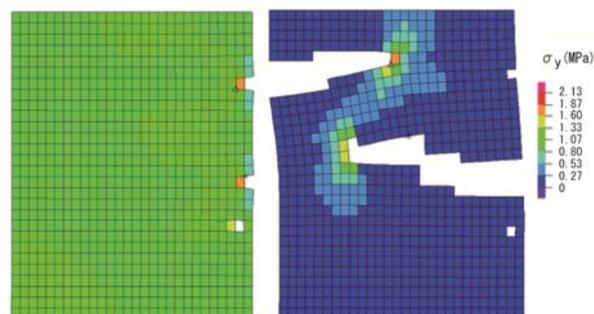


図-11 破壊前後の鉛直応力コンター（ケースNo.1）

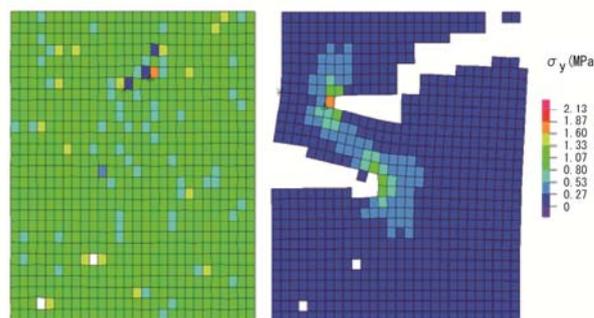


図-12 破壊前後の鉛直応力コンター（ケースNo.2）

8. まとめ

大口径のボーリングにより精度の高い中空円筒状の供試体を作製し、その中空部分に設置したリニアガイド兼反力伝達の役割を有する支柱に沿って供試体を真直ぐ引っ張る原位置岩盤引張り試験法を考案し、原位置試験装置と同様の原理に基づく室内試験装置を開発した。

岩盤に見立てたモルタルを型枠に打設後、供試体を作製し、開発した原位置試験装置を用いて引張り試験を実施した。また、供試体作製時のボーリングコアを用いて、開発した室内試験装置を用いた引張り試験を実施した。その結果、原位置引張り試験および室内引張り試験から適切な破壊形態が得られた。これより、曲げモーメントを抑制して試験されていることが示唆された。

原位置引張り試験およびコアの室内引張り試験から得られた引張り強さの寸法効果が、コアの物性のばらつきから解釈できることがわかった。つまり、開発した原位置岩盤引張り試験方法が原位置スケールの物性を評価する適切な試験方法であることが示された。

謝辞：本研究の一部は、電気事業連合会からの要請のもと、実施しました。本研究を進めるにあたり、地盤安定性評価検討会の電力各社の委員より検討内容の審議や取りまとめなど、ご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

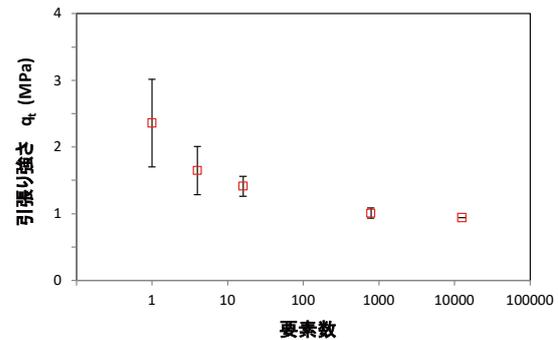


図-13 要素数と引張り強さの関係

参考文献

- 1) たとえば、石丸 真、岡田哲実、中村大史、河井 正、風間基樹：軟岩のせん断破壊後の強度変形特性のモデル化と斜面の地震時すべり安定性評価への適用、土木学会論文集, Vol.73, No.1, pp.23-38, 2017.
- 2) 野崎隆司、新孝一：引張を含む低垂直応力下での原位置岩盤せん断試験法の考案、電力中央研究所 研究報告, U03009, 2003.
- 3) 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, pp.414-428, 2006.
- 4) 大村英昭、伊藤悟郎、小林正典：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原位置引張試験—、土木学会第 66 回年次学術講演会, III-380, pp.759-760, 2011.
- 5) 岡田哲実、谷和夫：原位置岩盤引張り試験方法及び試験装置、特許第 5337004 号, 2009.
- 6) 岡田哲実、岡崎幸司、谷口友規、中村大史：頁岩を対象とした原位置岩盤引張り試験法の検証、第 50 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.495-496, 2015.
- 7) 納谷朋広、岡田哲実、谷口友規、中村大史：引張り強さの異なる複数の岩石を用いた軸引張試験と圧裂試験の比較、第 51 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.501-502, 2016.
- 8) 星野政幸、苔米地司：モルタルの引張強度に及ぼす寸法効果について、セメント技術年報, 31, pp.411-414, 1977.
- 9) 佐藤正俊、上田稔、長谷部宣男、近藤久雄：コンクリートの直接引張強度の寸法効果に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.459-464, 1993.

DEVELOPMENT OF IN-SITU TENSION TEST FOR ROCK MASSES AND THE VALIDATION BY THE TEST AND NUMERICAL ANALYSES

Tetsuji OKADA, Tomohiro NAYA, Yuta MITSUHASHI and Kazuo TANI

A new in-situ tension test was developed to investigate tensile strength of rock masses. The hollow cylindrical specimen prepared by a boring machine can be axially extended until tensile failure is observed under unconfined condition. The size of the specimen is 86mm in inner diameter, 600mm in outer diameter, and 600mm high. The in-situ tension tests were carried out on the mortar to verify the test procedure and equipments. Laboratory tension tests were also conducted using the specimens retrieved from the mortar. As a result, the tensile strength evaluated from the in-situ tension tests was about 40% with respect to that from the laboratory tension tests. To confirm the validity of the difference, FEM analyses of the in-situ tension test were carried out by considering the variation of the mechanical properties based on the laboratory tests. Consequently, the test results were successfully simulated by the analyses as a scale effect.