第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集
公益社団法人土木学会　2014 年 1 月　講演番号 1

遠心載荷を用いた軟岩の引張り試験方法の開発

佐藤弥那子[1*]・田井絵理子[2]・早野公敏[3]・谷和夫[4]

[1]横浜国立大学　工学部建設学科　（〒204-8501　横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5）
[2]東京都建設局　（元横浜国立大学　大学院都市イノベーション学府）
[3]横浜国立大学　大学院都市イノベーション研究院
[4]（独）防災科学技術研究所　兵庫耐震工学研究センター
*E-mail: sato-minako-fw@ynu.ac.jp

岩石の引張り強さを求める室内試験方法として，圧裂引張り試験，一軸引張り試験，三軸引張り試験などがある．しかし，セメント改良土や軟岩を対象とした圧裂引張り試験は，載荷幅が広がりやすいため理論的に厳密でない．また，一軸引張り試験や三軸引張り試験は供試体を設置するために高い技術が要求されるという問題がある．そこで遠心力を利用した，新しい引張り試験方法を開発し，セメント改良土，田下凝灰岩，泥岩の引張り強さを求めた．さらに圧裂引張り試験と一軸引張り試験から得られる引張り強さとの比較を行った．

Key Words : *centrifuge, tension test, Brazilian split test, soft rock, cement treated soil*

1. はじめに

岩石の引張り強さは，斜面の安定性や岩盤構造物の設計を行う際に重要な物性値である[1), 2), 3)]．引張り強さを求める室内試験方法として一軸引張り試験や圧裂引張り試験があるが，セメント改良土や軟岩に対する適用には課題が多い．例えば，一軸引張り試験では，載荷軸と供試体の中心軸のずれや載荷軸の傾斜の影響により，引張り強さを過小評価している可能性がある．また，曲げモーメントの発生を防止するために供試体の作製が非常に面倒な上，供試体の取り付けが難しく，高い試験技能が必要である[2),3),4),5)]．一方，圧裂引張り試験では，一様な線荷重が供試体の側面に付与されると仮定し導かれたものであるが，剛性の低い試料の場合，帯荷重（載荷幅≠0）が付与されるため，理論的に厳密ではない[6)]．さらに，載荷点近傍でせん断破壊が生じ供試体全体に引張り破壊を生じさせることができず，引張り強さを正しく評価できない[1),7)]．

勝田は新たに遠心力を利用した引張り試験の装置を考案し，試験方法の原理を示し装置の概念を提案した[4)]．しかし，計算により引張り試験が可能であることは示されているが，試験装置自体は製作されておらず実際の適応性，妥当性は検討されていない．さらに，遠心引張り試験装置から得られる引張り強さが既往の試験に対してどのような違いが生じるのかを検討する必要がある．そこで，勝田[2)]の提案をもとに装置を製作し，軟岩（田下凝灰岩，泥岩）およびセメント改良土の引張り強さを求めた．そして，圧裂引張り試験や一軸引張り試験から得られる引張り強さとの比較を行った．

2. 遠心引張り試験装置

(1) 装置の概要

作製した遠心引張り試験装置の概要を**図−１**および**写真−1**に示す．遠心引張り試験とは，円柱状の供試体をほぼその中心を回転軸として水平面で高速回転させ，その回転によって生じた遠心力を利用して引張り応力を作用させて引張り破壊を生じさせ，引張り強さを評価するものである．供試体の両端に重りをつけることにより，供試体に作用する引張り応力を増加させることができる．

直径ϕ = 50mm，湿潤密度ρ_t = 2.0g/cm^{3}の供試体に直径ϕ = 52mm，長さL_m = 10mmの真鍮製の錘を装着した場合に，供試体の破断に必要な回転速度Rと供試体の長さL_sの関係を**図−2**に示す．作製した遠心引張り試験機の仕様は，最大回転速度R_{max} = 4000(rpm)なので，供試体の長さL_s = 100mmの場合にσ_t = 1000kPa以下の引張り強さが理論上計測可能である．

この遠心引張り試験の特徴は，次の4つである．

・圧裂引張り試験では課題の多い軟岩を対象としている．

・ほぼ純引張りの応力状態を作ることが出来る．
・一軸引張り試験の問題点である供試体の設置が簡便である．
・一軸引張り試験や圧裂引張り試験では多数の供試体を要する引張り強さのばらつきの評価を比較的容易におこなえる．

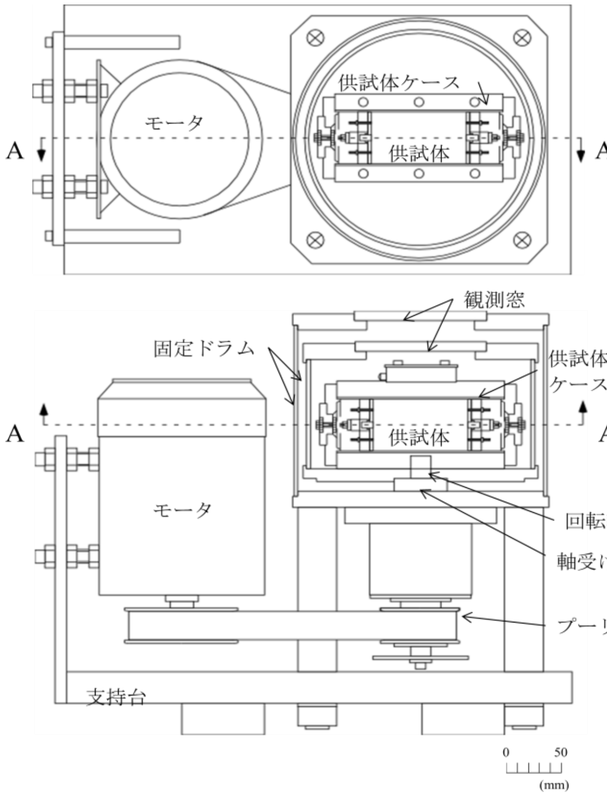


図-1　遠心引張り試験装置の概要

写真-1　作製した遠心引張り試験装置

(2) 破断検知システム

遠心載荷中に供試体の破断を検知するためのシステムを構築した．この破断検知システムを図-3に示す．供試体両端に装着した電極端子と供試体ケースに設置された外部端子が供試体の破断によって接触すると電気回路がつながり，電球が点灯する．この電球の点灯で供試体の破断を検知することができる．

(3) 引張り強さの求め方

図-4に示す供試体ケースの中心を回転軸として，破断面に作用する最大遠心力F_{max}から引張り強さσ_tを評価した．ここでA_sは供試体の断面積であり，L_sは供試体の長さである．同図より，供試体破断面に作用する遠心力Fは，次式にて表わされる．

$$F=\int_{-t}^{\frac{L_s}{2}-d} r\omega^2\rho_{t,s}A_s dr+\int_{\frac{L_s}{2}-d}^{\frac{L_s}{2}-d+L_m} r\omega^2\rho_{t,m}A_m dr \quad (1)$$

なお，rは回転軸からの距離，ωは角速度，$\rho_{t,s}$は供試体の

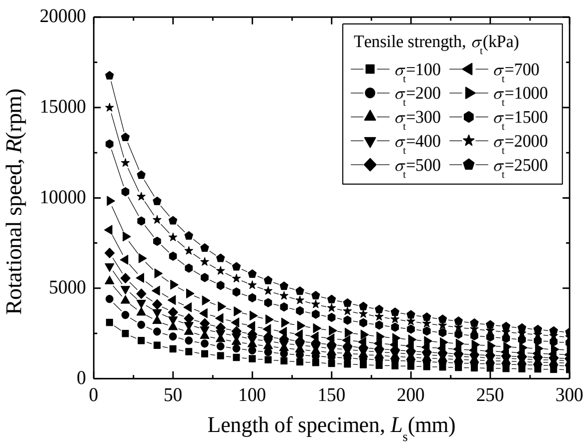


図-2　破断に必要な回転速度と供試体長さの関係

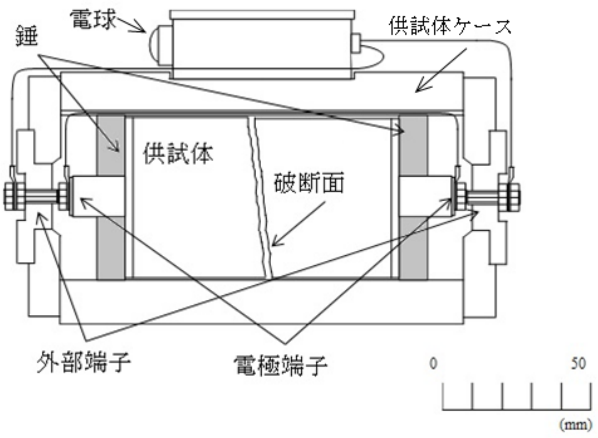


図-3　構築した供試体破断検知システム

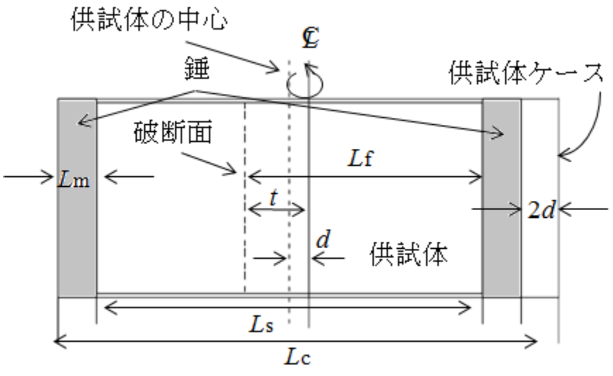
湿潤密度，A_mは錘の断面積，$\rho_{t,m}$は錘の密度である．ただし，破断面から回転軸までの距離tは，破断面が供試体の中心より左側に位置する場合は式(2)，破断面が供試体の中心と回転軸の間に位置する場合は式(3)となる．

$$t = L_f - (\frac{L_s}{2} - d) \tag{2}$$

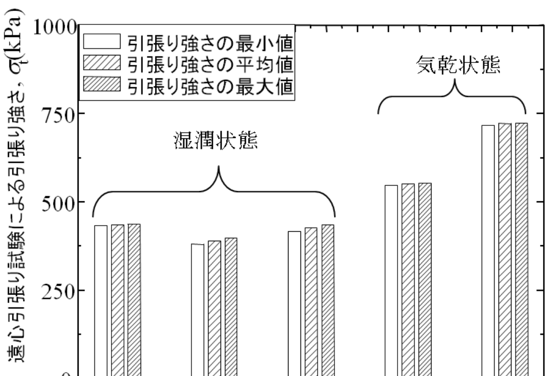
$$t = L_f - \frac{L_s}{2} \tag{3}$$

破断面に作用する引張り強さσ_tは，最大遠心力F_{max}を断面積A_sで除して求める．

遠心引張り試験により引張り強さσ_tを求める上で，回転軸と破断面の距離tは重要であるが，破断面が供試体軸に完全には直交しない場合がある(写真–2参照)．そこで，田下凝灰岩の5ケースについて，供試体の破断面から回転軸までの距離tの最大値，最小値およびそれらの平均値を計測し，引張り強さσ_tにどの程度の違いが生じるかを検討した．その結果を図–5に示すが，最大値と最小値の差が10mm以下であり，引張り強さが最大でも4.9%しか差がなかった．そのため，本研究では平均値を用いて引張り強さを評価することとした．



図–4　引張りのパラメータの定義



図–5　破断面の位置のばらつきが引張り強さ算定に及ぼす影響

3. 用いた試料

試料として田下凝灰岩と泥岩およびセメント改良土を用いた．田下凝灰岩と泥岩は異方性があり不均質な試料として，セメント改良土は比較的等方で均質な試料として選択した．田下凝灰岩は層理面に垂直方向にコア抜きされたものである．田下凝灰岩の気乾状態とは，乾燥炉に4時間放置した状態，湿潤状態とは供試体の作製後水中養生した状態のことである．また，泥岩は目黒区大橋地区で採取されたものを使用した．セメント改良土は一軸圧縮強さの平均値qul = 2000 kN/m^{2}程度，σ_t = 300 kN/m^{2}となる供試体を作製することにした．そのため，三平らの報告[2)]を参照し，目標強度より豊浦砂，普通ポルトランドセメント，ベントナイト，水の質量配合比を表–1に示す値とした．

遠心引張り試験では，直径ϕ=50mm，長さL_s=100mmのものを使用し，圧裂引張り試験では直径ϕ=50mm，高さH_0=50mm，一軸引張り試験では直径ϕ =50mm，高さH_0=100mmの寸法の供試体を使用した．

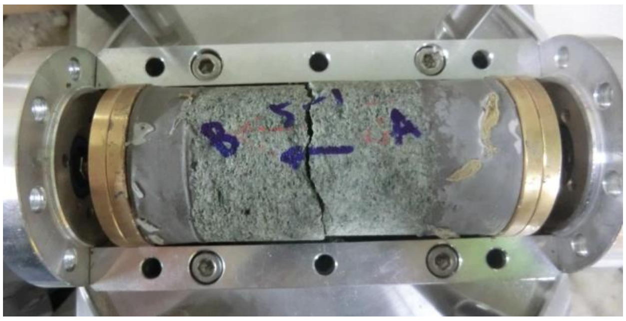
4. 試験結果

(1) 遠心引張り試験による引張り強さ

写真–2に遠心引張り試験による供試体の破断状況を示す．**表–2**, 3に田下凝灰岩および泥岩の遠心引張り試験結果を示す．特に田下凝灰岩については**表–2**および**図–5**からわかるように岩石の気乾状態，湿潤状態の違いで差が見られた．これは，田下凝灰岩に含まれるみそ部分が乾燥することによりその強度が増したためと考えられる．

表–1　セメント改良土の質量配合比

材料	豊浦砂	普通ポルトランドセメント	ベントナイト	水
配合比 (%)	66.3	10.0	5.0	18.7



写真–2　供試体の破断状況（田下凝灰岩）

表-2　田下凝灰岩の遠心引張り試験の結果一覧

case	含水比 ω (%)	引張り強さ σ_t (kPa)	破断時の回転速度 R_f (rpm)	破断位置 t(mm)
T-1 (湿潤)	16.67	438.1	2075	-1.66
T-2 (湿潤)	16.88	391.3	2016	21.87
T-3 (湿潤)	14.47	417.1	2034	22.1
T-4 (気乾)	6.493	541.0	2408	-12.12
T-5 (気乾)	—	675.6	2668	-4.15

表-3　泥岩の遠心引張り試験の結果一覧

case	含水比 ω (%)	引張り強さ σ_t (kPa)	破断時の回転速度 R_f (rpm)	破断位置 t(mm)
D-1	22.61	129.8	1155	-1.71

(2) 圧裂引張り試験と一軸引張り試験による引張り強さの比較

図-6, 7に遠心引張り試験と他の試験方法により測定した引張り強さを示す.

図-6より遠心引張り試験による引張り強さσ_tは，一軸引張り試験による引張り強さ$\sigma_{t,UNI}$と比較すると，セメント改良土と湿潤状態の田下凝灰岩では$\sigma_{t,UNI}$のばらつきの範囲内であり平均値も近い．一方，気乾状態の田下凝灰岩では$\sigma_{t,UNI}$に比べて遠心引張り試験による引張り強さσ_tがやや低い値となった．遠心引張り試験及び一軸引張り試験は長軸方向に引っ張るので異方性の影響はない．そのため曲げや偏心の影響がある場合，一軸引張り強さのほうが低いケースが生じるはずであるが，気乾状態の田下凝灰岩については遠心引張り強さのほうがやや低い値であった．これが試料の不均質性によるものなのか，あるいは別の要因によるものなのかについて詳細な理由は現時点で不明であり，今後の課題としたい．

一方，**図-7**より圧裂引張り試験による引張り強さ$\sigma_{t,BR}$と比較すると遠心引張り試験による引張り強さσ_tは，セメント改良土の場合にばらつきの下限値，田下凝灰岩と泥岩の場合により小さい値となり，岩種により異なる傾向を示した．セメント改良土は相対的に均質な材料なため遠心引張り試験結果は圧裂引張り試験結果のばらつき内に収まったが，田下凝灰岩と泥岩の破壊面においてそれぞれみそや貝殻が確認できたため，強度の弱いところ

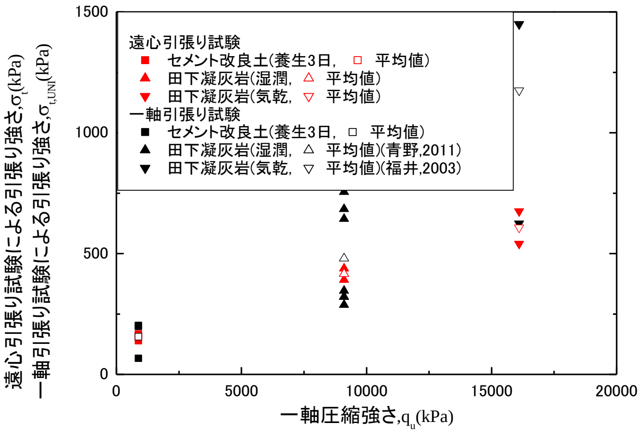


図-6　遠心引張り試験と一軸引張り試験[1),8)]による引張り強さの比較

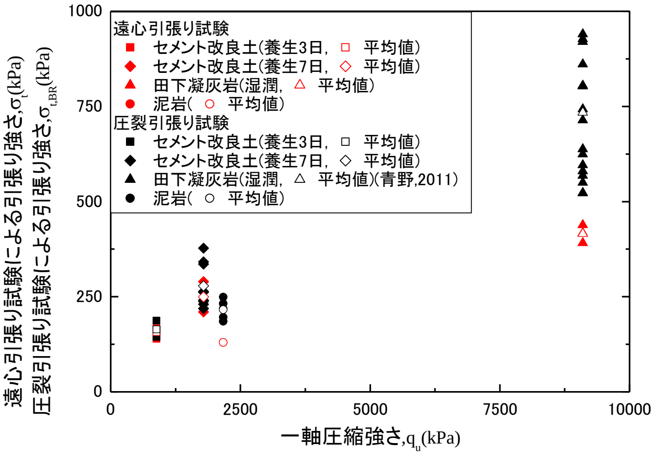


図-7　遠心引張り試験と圧裂引張り試験による引張り強さの比較

で破断したことが影響したと考えられる．遠心引張り試験では長軸方向に一様に引っ張るためこの弱点からの破壊が起こるが，圧裂引張り試験は破壊面が固定されるため必ずしも供試体の最も弱いところで破壊するとは限らない．そのため，田下凝灰岩や泥岩は，圧裂引張り試験による引張り強さと比較して，遠心引張り試験による引張り強さが小さい値になったのだと考える．

5. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す．

・遠心力を利用した引張り試験装置を開発し，この装置によりセメント改良土と軟岩の引張り破壊を生じさせ

られることを実証した.

・本研究で作製したセメント改良土は比較的等方性で均質な材料であるが，その場合，遠心引張り試験による引張り強さは，圧裂試験による引張り強さのばらつきの下限値を示した．一方，一軸引張り試験による引張り強さと比較すると，平均値はほぼ同様であり，かつ遠心引張り試験による引張り強さのばらつきは小さかった.

・使用した泥岩や凝灰岩については異方性や不均質性が相対的に認められるものであるが，その場合，遠心引張り試験による引張り強さは，圧裂試験による引張り強さよりも小さい値を示した．みそや貝殻が確認できたため，強度の弱いところで破断したことが影響したと考えられる．一方，一軸引張り試験による引張り強さと比較すると，湿潤状態の凝灰岩についてセメント改良土と同様の傾向が認められた.

謝辞：田下凝灰岩は（財）電力中央研究所から，泥岩は首都高速道路（株）からそれぞれ提供を受けました．ここに謝意を表します.

参考文献

1) 青野泰久：岩石のさまざまな引張り試験方法の検討，横浜国立大学卒業論文，2011.
2) 三平 伸吾，古関 潤一：セメント改良砂の一軸・三軸引張試験, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 3 部(B), 56 巻, pp.310 -311，2001.
3) 福井勝則，金豊年，大久保誠介：一軸引張荷重下での岩石の完全応力－歪曲線，資源と素材，Vol.111，pp.25-29, 1995.
4) 勝田海斗，谷和夫：軟岩を主な対象とした新しい引張り試験方法の提案, 第 13 回岩の力学シンポジウム, pp.185~190, 2013.
5) A,Coviello., R,Lagioia. and R,Nova.：On the Measurement of the Tensile Strength of Soft Rocks, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.38/No.4,pp.251-273l,2005.
6) 林為人，高橋学，中村敏明，藤井幸泰： 稲田花崗岩の引張強さ･変形特性およびその異方性 - 岩石の一軸引張り試験と圧裂試験の比較を中心として - ，地盤工学ジャーナル，Vol.3/No.2，pp.165-173， 2008.
7) 工藤洋三，佐野修，古川浩平，中川浩二：花崗岩の圧裂強度実験結果のばらつきに関する研究，土木学会論文集，第 400 号/III-10，pp.233-241，1988.
8) 福井勝則，大久保誠介，岩野圭太：一軸引張応力下での三城目安山岩と田下凝灰岩の載荷速度依存性，土木学会論文集，第 729 号/III-62，pp.59-71，2003.

DEVELOPMENT OF CENTRIFUGAL TENSION TEST FOR SOFT ROCKS

Minako SATO, Eriko TAI, Kimitoshi HAYANO and Kazuo TANI

There are several types of laboratory tension tests for rocks. However, Brazilian split tests cannot give tensile strength of soft rocks accurately, because the actual loading conditions are far from the theoretical assumptions. On the other hand, uniaxial tension tests and triaxial tension tests require large efforts and craftsmanship techniques to set up the specimen. We therefore developed a new method to obtain tensile strength of soft rocks. We obtained tensile strength of Tage tuff, mudstone and cement treated soil by applying centrifugal acceleration to the specimens. The tensile strength obtained from the centrifugal tension tests were compared with those obtained from Brazilian split tests and uniaxial tension tests.