★★ 論文・報告 ★★

岩石の引張試験に関する検討*

正 会 員 平 松 良 雄**

西 原 正 夫***

准 会 員 岡 行 俊****

A Discussion on the Methods of Tension Test of Rock

Yoshio HIRAMATSU, Masao NISHIHARA and Yukitoshi OKA

Though the tensile strength of rocks is one of the controlling factors of rockpressure phenomena, the determination of it by simple tension tests has been scarcely made because of some difficulties in practice.

As an alternative of the simple tension test, the cylinder test has recently come into use for estimating the tensile strength of concrete, mortar and other materials, but it is theoretically apprehended that this method would give no correct value of strength because failures frequently occur in the vicinity of loading points and an uneven fracture is resulted, besides the material is subjected to a tensile stress as well as a far heavier compressive stress at the places where the fracture takes place.

The present paper describes the results of theoretical and experimental discussion on the applicability of the cylinder test to rocks.

It was noticed that the tensile strengths calculated from the cylinder tests are slightly greater than those from the simple tension tests, while both of them show the considerable variations, about 20~30%, which conceal the undesirable conditions of the cylinder test.

I. 緒 言

岩石の引張強度は盤圧によつて起る現象に密接な關係を有することは、一般に認められている。引張強度を求めるには単純引張試験が望ましいが、この試験法では試験片の製作が面倒で、試験の際チャックに接する部分に傷がつきやすく、試験片の軸に平行に張力を加えることが難しく、さらに普通の試料の大きさに対しては破断力が僅かであるなどの理由により、単純引張試験は実施し難い。最近モルタルやコンクリートなどの引張強度を求める方法として、圧裂試験法が注目されるようになり、さらに岩石についても、この方法が提唱されるようになって来た。しかし圧裂試験においては、破断面の応力状態が単純引張試験の場合のように簡単ではないから、圧裂試験をもつて直ちに引張試験に代え得るというのではない。この点に觸れた研究はすでに、二、三発表されて

いるが、あらためて岩石について実際に検討することは無駄でないと考え、筆者等は岩石の単純引張試験と圧裂試験とを實驗的に比較検討した。

II. 実 験

1. 試 料

試験に供する試料としては大理石、砂岩およびセメントモルタルの3種類を選んだ。大理石は岩石の中で可塑性が顕著であり、砂岩の脆い性質を有するので、これらを代表的材料として選んだのであり、モルタルはすでに數氏によつて研究されている結果と我々の結果とを比較するため採用したのである。

大理石および砂岩の産地は第1表に示したようである。砂岩の粗成粒子の粗さは一辺の長さ5mm程度のものが極く稀に含まれているが大部分は1mm以下である。セメントモルタルに用いた砂は-20メッシュとし、材料比、材齢などは第2表に示すようである。

単純引張試験片の形は第3図に示すように金属材料の試験に用いる形を採用し、圧裂試験片は円壱形とした。

*昭和29年3月9日受理

**工博 京都大学教授 鉱山学教室

***京都大学 鉱山学教室

****〃 〃

第1表 試 験 片

試料の種類	産 地	引 張 試 験 片			圧 裂 試 験 片			引 張 強 度	圧 縮 強 度	圧縮強度 引張強度
		試験 片数	直 径 (mm)	平行部分 の 長 さ (mm)	試験 片数	直 径 (mm)	長 さ (mm)			
大 理 石	A 山口県美禰郡 台山	7	16.3~17.7	50~70	5	21.0~25.2	31.9~68.1	36.1	487	13.5
	B 〃	4	16.9	40~60	3	19.4~24.9	37.9~59.3	59.4	1006	16.9
	C 岐阜県不破郡 赤坂	2	24.3	60	3	23.5~23.8	42.4~44.2	30.7	410	13.4
砂 岩	福岡県田川市 田川鉱業所 伊加利堅坑底 人 工	4	17.1	50~60	5	20.5	44.2	49.3	898	18.3
モルタル	I 〃	3	17.9	45~50	5	24.6	50.0	7.8	88	11.4
	II 〃	3	17.8	45~50	3	24.0	57.3~64.1	17.1	148	8.7
	III 〃	2	17.6	50	3	23.8	63.1~68.0	27.5	220	8.0
	IV 〃	1	18.2	50	3	24.7	55.4	60.8	541	8.9

参考の為に圧縮試験も行つたが、その試験片も円壱形とした。

第 2 表

種 類	セメント 砂 比	水セメント 比 (%)	材 齢(日)
モルタル	I 1:4	60	28
	II 1:3	50	26
	III 1:2	30	25
	IV 1:1	30	20

試験片の数、寸法、および圧縮強度、引張強度、さらに圧縮強度と引張強度との比などは第1表に示されている。引張強度は本論文で取扱っている中心問題であるが、本表には後述の単純引張試験結果の平均値が示されている。

2. 試験片の製作

試験片の製作には最も苦心を払つた。最初は小型のボーリング機械を使用して円壱形試験片を作つたが、表面に凹凸ができ、そのままでは試験に供することができなかった。後に金型と研磨剤とを用い、手仕上げで整形する方法を試み、満足できる結果を得た。まず、のみと槌とをもつて一辺の長さが試験片の直径の2.5倍位の角柱に割り、鉄板上で研磨剤を用いて角を研磨し断面を多角形とする。次にこれを半円形の溝をもつた金型の中におき、研磨剤を用いて転がしながら研磨し、段々と円壱形になるように整形する。研磨剤としては鉄砂を用い、初めの中は-60メッシュのものを、終りに近づくとき-120メッシュのものを、最後は研磨剤を用いないで研磨する。金型の溝の直径は最初38mmからはじめ、34mm, 30mm, 25mm, 21mmの順に減じて行き、所望の直径になるようにすると共に仕上の精度を高めて行く。

引張試験片は、一旦円壱形に整形した試験片を、さらに第1図に示すような金型を用い、上と同様にして平行部分を整形する。圧縮試験片および圧裂試験片は円壱形試料を適当な長さに切断し、第2図に示すような治具を用いて試験片の軸に直角に両端面を仕上げる。成層面の方向は破断面に直角とする。試験片の仕上の程度は第3

第1図
引張試験片製作

第2図
試験片の両端面
の仕上

図からも窺われるようで、軸方向の直径の偏差は0.7%以内、軸に直角な同一断面内の直径の偏差は0.9%以内である。

3. 試験方法

使用した試験機は松村式万能試験機（容量2.5t）である。単純引張試験の際の試験片の取付は、直角の溝のある二つの楔で試験片の端を握み、摩擦により固定した。試験片の取付は引張試験において苦心を要する点の一つであるが、最近 Obert 等は岩心から作つた精密に仕上げた円壱形の試験片に Hydrostone と称するセメントでつかみの部分を作り、球形座ジョイントを使用して引張試験を行い良好な結果を得た由であるが、多数の試験を行う際参考になると思う。

圧裂試験は試験片を側面から二つの平行平板で加圧して破断させる試験で、圧裂強度とは、すでに二三の人により行われているように、

$$\sigma' = 2P'/\pi dl$$

で定義される強度とする。ここに P' は破壊荷重、 d は試験片の直径、 l は長さである。

4. 試験結果

a. 破断面の状態

単純引張試験においては試験片の断面積の変化する角

の附近に応力が集中して、そこから破断する恐れがあるが、試験片の仕上の精度を高くし、試験機への取附を丁寧に行うことにより、懸念されたところの平行部分の端で破断するものは少なかった。破断の様子は第3図からも窺うことができる。破断面はほぼ軸に直角で幾分凹凸が認められる。破断の様子には材質によつての特徴が認められない。

圧裂試験においては破断面は大体において理論通り、また従来の経験通り二つの加圧線を含む面に近いことは

A. 大理石, B. 砂岩, C. セメントモルタル
第3図 単純引張試験片

1,2 大理石
3,4 砂岩
5. セメントモルタル

第4図 圧裂試験片

認められる。しかし厳密に言えば第4図に見られる如く中心を通る平面ではなく、かなりの凹凸が認められる。接触面附近では材質が破壊し、あとで試験片を取上げて観察すると同図に見られるごとくV型の隙間が生じているのが認められる。砂岩やセメントモルタルではこの現象が見られないこともあり、現われてもV型溝が細長い。大理石では浅いが、明瞭なV型溝が現われる。実物について観察すると、中心軸を通る面上に局部的に強い所があれば、そこを避けて破断が起つているように見受けられる所がある。

b. 強 度

この試験によつて得られた各試料毎の単純引張強度と圧裂強度との値を示せば第5図のようになる。この図は特にそれぞれの試験法によつて求められた値の分布状態を示そうとしたものである。試験片の仕上および試験の実施に細心の注意を払つたにもかかわらず、いずれの試験においてもかなりの偏差が現われた。

第5図 単純引張試験及び圧裂試験結果

第6図 単純引張強度と圧裂強度との関係

次に各試料について引張強度と圧裂強度との比較を行うと第6図に示すようである。この図は横軸に単純引張強度を、縦軸に圧裂強度をとり、平均値及び標準偏差を示したものである。

Ⅲ. 実験結果の検討

すでに述べたように、いずれの試験においても認められるかなり大きい偏差は実験技術の不完全にもよるであろうが、むしろ岩石の性質として不均一なことは免れ難く、その点が偏差の原因の主要部分を占めるものと思う。

第6図の中に引かれた点線のいずれの側に測定値が存在するかによつて一方の強度が他方の強度より大きく現われるか小さく現われるかが分る。一般的について実験結果はそのいずれの側にも存在する。いいかえれば一方の強度が必らず他方の強度より大きく現われるという傾向は認められない。

そこで圧裂試験法そのものについて考察を試みたい。今加圧面と試験片との接触が完全に直線的であり、試験片が均質等方性の弾性体であると仮定すれば、試験片の軸に直角な断面内の主応力 σ_1, σ_2 の分布は第7図の点曲線群のようになる。 σ_1 も σ_2 も上下対称であるから、この図ではそれぞれ断面の半分づつについて示してある。また点曲線は主応力方向を示すもので、しかも横方向の系統の点曲線群は σ_1 の方向を、縦方向の系統の点曲線群は σ_2 の方向を示す。

この図から上下の加圧点をそれぞれ A, B とすると、面 AB は主応力面で、その面上にはいたるところ $2P'/\pi dl$

第7図 圧裂試験片の主応力方向および等主応力線図

なる大きさの引張応力が作用していることが分る。また面 AB 上の点には外力方向の圧縮応力が現われ、その大きさは点の位置により異なるが、少なくとも引張応力の3倍以上に上る。それ故圧裂試験では組合応力により試験片が破壊するもので、条件が複雑である。これに反し単純引張試験の場合は、試験片の平行部分では外力方向に均一な引張応力が現われ、これに直角方向には応力がなく、条件が理想的である。

さて圧裂試験における組合わせ応力の下での破壊を Mohr の説によつて考察しよう。この説は応力を示す Mohr 円がその材料の破壊に関する限界曲線に接するとき破壊が始まるとするものである。いま第1表に示す結果から判断すれば大理石、砂岩およびモルタルの圧縮強度対引張強度の比はおおよそ 15:1, 18:1, 9:1 と見積られる。試みに大理石の場合の圧縮試験および引張試験による破壊の際の Mohr 円を描き、これらの円から破壊の限界曲線を推定し、さらにこの図上に圧裂試験による破壊の際の Mohr 円を描けば第8図のようである。圧裂試験の際の Mohr 円は限界曲線に接し、かつ $\sigma_2 = -n\sigma_1$ なる条件を満足するはずである。ただし n は3より大きい値で、實際上3~10倍とればよいと思う。第8図から圧裂試験における引張主応力は単純引張試験における引

第8図 種々の試験における破壊時の Mohr 円と Mohr の限界曲線

張主応力より幾分小さいことが分る。この議論には幾分仮定が入っているが、このように考えれば圧裂強度の方が引張強度より小さく現われるものと想像される。

一方圧裂試験においては前述のように破断は必ずしも面 AB に沿つて起つていない。破断が面 AB から偏れる程、引張破断の原因である引張応力が小さくなる。その程度は部分によつて異なるが、面 AB から直径の5%偏れると引張応力は8~20%低下する。それゆえ面 AB に沿つて破断が起らない場合、破壊荷重が大きくなり圧裂強度は強く現われることになる。

さらに加圧面と試験片との接触は直線的でなく、ある

巾を有することも圧裂強度に影響を与える⁴⁾。接觸面に作用する外力は、少し無理な仮定であるが、試験片の軸に直角で軸に向い、接觸の起っている範囲内では一様に分布しているという仮定の下に解析された結果からいえば、接觸面積が大きくなるにつれて面 AB の引張応力は均一引張の状態から明らかに不均一となり、その値は一般に減少する。この効果は中心附近では比較的僅かであるが端に近づく程大きくなる。とにかく接觸面積が大きい程破壊荷重が大きくなり、したがって圧裂強度は強く現われると考えられる。

以上を総括すれば圧裂試験においては単純引張試験におけるよりも強度が低く現われるだろうと想像される節と、破断の様子によって強度は影響を受け、かつ単純引張強度より幾分高く現われるだろうと想像される節とがある。したがってこのような考察を行ってもいずれの強度が高く現われるべきかは想像がつかない。ここで述べた各の事柄に前述の偏差がおおいかぶさり、結局第 7 図のような結果が得られたものと思う。

次に従来の研究結果と対照させるために、モルタルの試験結果について考えよう。第 6 図から、やや圧裂強度の方が大きく現われる傾向が認められる。内山氏の研究によれば第 6 図△印に示すように圧裂強度（直径 15cm、長さ 30cm の試験片使用）は、引張強度（平行部分の長さ 30cm、断面の直径 15cm の円錐形のつかみのある試験片使用）より 10% 余り大きく現われている。しかるに篠原氏のブリケット（最小断面 22.5×22.5mm、長さ 80mm）による引張強度は、逆に圧裂強度（直径 5~10cm、長さ 10~20cm の試験片使用）より約 20% 大きく現われている（第 6 図鎖線）。篠原氏は内山氏の結果と反対の傾向を得たことに注目し、圧裂強度は検討の余地ありとしているが、いずれの傾向に現われるにせよ、前述のように考えれば理由のあることである。筆者等の試験を両氏の試験と比較すると試験片および大きさが異なるのにかわらず、筆者等の試験結果はほぼ両氏の結果と同様で、その傾向は両氏の結果の傾向の中間に位することが分る。この比較から筆者等の実験は試料の数は多くないが、大体信頼してよいだろうと思われる。

大理石及び砂岩についても、セメントモルタルの場合と同様にいずれの強度も偏差が大きくて、両強度の比較が難しい。第 7 図を見れば、大理石では両種の強度はやや喰い違い、砂岩ではよく一致しているようであるが、これは試験の回数にもよることであるから、本研究結果から自信をもつていえることは単純引張強度と圧裂強度との関係は大理石、砂岩およびモルタルの何れにおいてもほぼ一致し、幾分圧裂強度の方が大きく現われる場合が多く、両者の喰い違いは±(20~30)%であるものと思われる。

IV. 結 論

岩石の引張強度を求める試験法として圧裂試験法は材料力学的には多くの欠点が認められるが、実施が容易である長所があるので、どの程度の信頼性をもつて適用できるかを確めるため、理論的に検討を加え、さらに性質の著しく異なる大理石、砂岩、ならびに参考のためにセメントモルタルの 3 種の試料を選び、単純引張試験と圧裂試験との比較実験を行った。

圧裂試験においては破断面上に現われる引張応力が不均一で、かつ、その面上の各点にはそれと直角方向に高い圧縮応力が現われ、また加圧面や破断面の状態によって応力状態が変わるという欠点が認められる。また実験結果から次のことが認められた。(1) いずれの試験法によっても強度の偏差が大きく±(20~25)%に達する。(2) 単純引張強度と圧裂強度とは一方が他方より大きく現われることも小さく現われることもあり、両者の喰い違いは±(20~30)%である。このことは理論的に考えても理由がつく。(3) やや圧裂強度の方が大きく現われることが多い。(4) しかし偏差が大きいためこの傾向は明瞭には認められない。(5) 圧裂試験における破壊状態には材質による特徴が認められた。

以上を総合して圧裂試験は 20~30% の誤差を覚悟すれば用いて差支えないものと思う。また単純引張試験を行っても必ずしも正確な値が得られるものではなく相当の偏差は避けられない。

本研究に要した費用の一部は科学研究費（総合研究）に仰いだこと、ならびに松岡秀夫、湯浅正己、矢野晴也、佐竹直人諸氏の熱心な協力を得て試験を実施したことを附記し感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 赤沢常雄：土木学会誌，29巻，1号，昭和18年11月，777頁~787頁
- 2) 内山実：鉄道技術研究所彙報，3巻，5号，昭和19年5月
篠原謹爾：材料試験，2巻，5号，昭和28年5月，130~135頁
- 3) L. Obert, S. L. Windes, & W. I. Duvall: Report of Investigations, Bureau of Mines, No. 3891, 1946, pp. 27~28
- 4) J. Kuno: 土木学会誌，19巻，1号，昭和8年1月，1頁~39頁
堀部富雄：日本鉱業会誌，66巻，747号，昭和25年8月，355頁
篠原謹爾：文献(2)