

モルタル及びコンクリートの剪断強度と強度分布の均一性係数

＝圧裂引張及び圧縮試験による剪断強度の推定＝

長谷川 武 司・鎌 田 英 樹*・小 林 浩*

Shear Strength and Its Distribution Function
on Concrete and Mortar Sample derived from
Radial and Axial Compression Test

Takeshi HASEGAWA, Hideki KAMADA and Hiroshi KOBAYASHI

Abstract

Experimental observations for shear strength on concrete and mortar samples show that values range between 6 and 10 MPa and coefficients of uniformity derived from these distribution lie between 9 and 13. Shear strength may be related with the coefficient of uniformity and may give an explanation on stress drop distribution of acoustic emissions.

1. はじめに

モルタルやコンクリートのアコースティックエミッション (AE) 特性に関する一連の実験 (長谷川ら、1980、1983) により、AE 振幅分布の m 値は低軸圧で大きく、軸圧の上昇に伴って小さくなること、AE 波スペクトルの卓越周波数は破壊強度の約 80% 付近で一度上昇した後、軸圧の上昇に伴い低下し破壊に至ること、カイザー効果が認められること等の結果を得た。一方、長谷川 (1985) は、モルタルの実験データを用い、AE の発生が主として剪断破壊によるものと考え、AE 発生時の応力降下量を求め 0.002～3 MPa の範囲にあること、その分布から得られるワイブルの均一性係数が 5～9 程度であることを示した。応力降下量は AE 発生時に於ける偏差応力と平均応力の差であるため、局所的応力集中があれば、巨視的な剪断強度以下になる必然性はないと考えられる。しかし、破壊の爆発的進行が最弱リンクによって決定されるならば、平均的には剪断強度以下に求められるであろう。また、応力降下量の分布より得られた均一性係数が強度試験より得られるものと、どう関連しているかについて検討が必要である。そこで本研究では、モルタル及びコンクリート供試体について圧裂引張試験および圧縮試験を行い、剪断強度と均一性係数を推定し応力降下量との比較を行った。又、この実験の際に発生する

AE の振幅分布およびカイザー効果についても調べた。

2. 実験方法

岩石試料では、試料製作や供試体にかかる荷重を均等にすることの困難なことから一軸引張試験で信頼度におけるデータを得ることが難しい。この実験上の困難を避けるために、円板形の岩石試料を作成し、上下から圧縮する圧裂引張試験が行われる。この場合、円板の内部には中心線にそって左右に分離しようとする引張応力が生じ、最終的にこの応力によって引張破壊を起す。破断したときの応力すなわち引張強度 S_{pt} は、載荷荷重 P 、円板の半径 R 、円板の厚み T に対して

$$S_{pt} = P / \pi R T \quad (1)$$

で与えられる。ところで、力が加えられる部分が変形して理論的な集中荷重でなく幅をもった面荷重となる場合には、(1)式で計算される引張強度に誤差を生ずる。淡路ら (1978 a, b) は、圧裂引張試験法における試料の応力解析を行い、これに基礎をおいて円弧状の内面を有する円弧型圧子を用いる新しい圧裂引張試験法を提案した。この方法では、円弧型圧子の内径を適当に選ぶことによって接触部でのくずれを避けることができ、かつ接触部の影響は次式(2)で表わされるように簡単な補正を施すのみでよい。すなわち、円弧型圧子を用いた圧裂引張試験に

* 機械工業科 第14期卒業生

において円柱断面中央の最大引張応力 S_{ht} は、試料と圧子の接触幅の $1/2$ である b に対して

$$S_{ht} = \{1 - 1.15(b/R)^2 + 0.22(b/R)^3\} S_{pt} \quad (2)$$

のように b/R の関数として表すことができる。淡路ら (1978 b) によれば $b/R = 0.27$ 以上で圧裂引張強度は一軸引張強度と良好な一致を示しており我々の実験もこの数値を採用し図1に示す円弧型圧子によって行なわれた。

圧裂引張試験用の供試体は、半径 5 cm、長さ 20 cm の型枠を用いて打ち込まれたモルタル及びコンクリートを半分に切断したものである。この供試体の水-セメント比は 40%、砂-セメント比は 1.72 であり、打ち込み後 120 日間の水中養生を経て実験に供された。載荷荷重は、改造された手動式コンクリート試験機を用い、約 60 KPa/min の割合で引張応力が上昇するようにした。

圧裂引張試験では、それぞれ 5 個の供試体を用いたが、そのうち一つの供試体については 3 回の載荷を行ない、A E 特性及び歪分布を調べ、他の供試体については強度試験のみを行った。ところで剪断強度 S_s は次の式

$$S_s = S_c \cdot S_t / \sqrt{2 S_t (S_c - 3 S_t)} \quad (3)$$

で示されるように、圧裂引張強度 S_t と圧縮強度 S_c によって算出される (山口・西松: 1977)。このため、圧縮試験を同一サンプルについて行ない S_c を求め S_s を決めた。

A E 波の測定系は、長谷川ら (1983) と同じ仕様である。ただし、今回は振幅分布に関しコンパレーターを多数並べた計数器に依る方法をとらず、山本ら (1977) に従い、直線検波及びパルス化を行った A E 信号をフォトコーダーに記録し、これを読み取った。この方法はノイズとシグナルの弁別比を上げる為に役だった。尚、フォトコーダーの記録紙上で 1 mm は、A E センサー出力の 0.2 mV に相当する。

3. 実験結果

供試体表面で計測された歪のデータは、図2のようになった。図で、左が荷重中心線方向の歪、右がこれと直交する歪である。歪ゲージは供試体のほぼ中心に接着されており、引張応力が圧縮応力の $1/3$ になる (山口・西松, 1977) はずで、この結果はこれをほぼ満たすデータになっている。しかし、詳

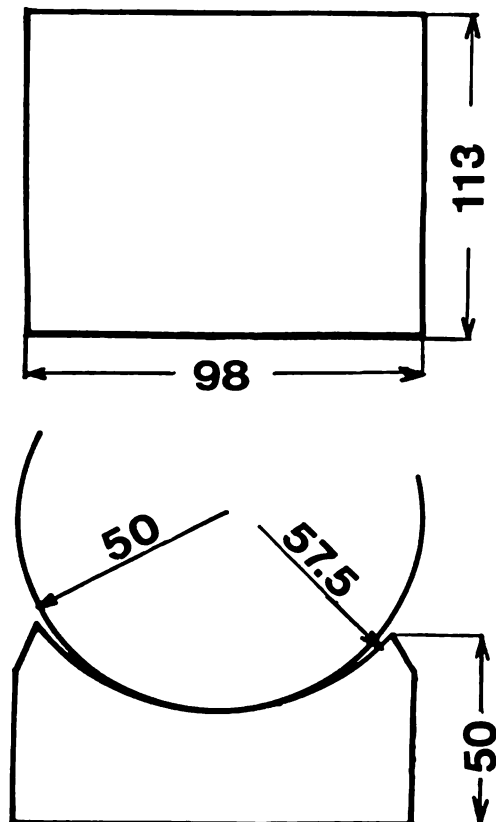


図1 円弧型圧子の寸法。単位はmm

細に検討すると、引張方向の歪の変化は圧縮方向と比べ必ずしも一様ではなく、載荷の状態や歪の測定法など検討の余地があるものと思われる。

圧裂引張強度、圧縮強度について得られた値は表のようになった。載荷の途中で接触部の崩れが発生しコンクリートは 4 例、モルタルは 3 例の剪断強度が求められ、6~10 MPa となった。圧裂引張強度に関しコンクリート、モルタルの両者に顕著な違いはないが、モルタルの圧縮強度が大きく剪断強度の値に系統的に反映されている。この実験で得られたコンクリート及びモルタルの圧裂引張強度 3~4 MPa は通常引用される値よりもやや大きい。これは、コンクリートやモルタルを打ち込んだ後の水中養生期間が長く、十分に固結した為と思われる。同じことは圧縮強度についても見られる。

淡路ら (1978 a) は均一性係数 ν が、変動係数 (母標準偏差/母平均) C_v と次の式

$$C_v = \sqrt{2\nu\Gamma(2/\nu) / \Gamma^2(1/\nu) - 1} \quad (5)$$

によって表されることを用い、 C_v より ν を図式的に求める方法を示した。剪断強度の C_v は、コンク

リート13%, モルタル9%であり, 淡路ら(1978 a)のチャートから均一性係数 ν を決めると, それぞれ9, 13となった。サンプル数は少ないが他の研究による値(山口・西松, 1977)と大差がなく, AEの応力降下量分布より求められた値にも近い。

AE計数率を図3に示す。ここで白丸は初载荷, 4角形は再载荷, 黒丸は破壊に至る再々载荷である。モルタル及びコンクリートの何れにも, カイザー効果とみられる履歴応力値が, 明瞭に認められる。ところで, コンクリートとモルタルではAE発生率に大きな差がありAEの発生機構が骨材の粒径に依存

している事を示唆するものと考えられる。

次に, 振幅分布は記録紙上の読取値(mm)に対する累積度数で表し図4に示した。この分布より求められる石本-飯田の m 値は, 宇津(1965)の式

$$m = N \log e / (\sum \log a_i - N \log a_{min}) + 1 \quad (4)$$

によった。図4の分布は 0.6 mm よりほぼ直線状であり, $a_{min} = 0.6 \text{ mm}$ とした。計算によると, コンクリートの m 値は初载荷, 再载荷時及び再々载荷時について4.9, 4.4, 3.3となり, モルタルでは再载荷及び再々载荷時について2.5, 1.7がそれぞれ得

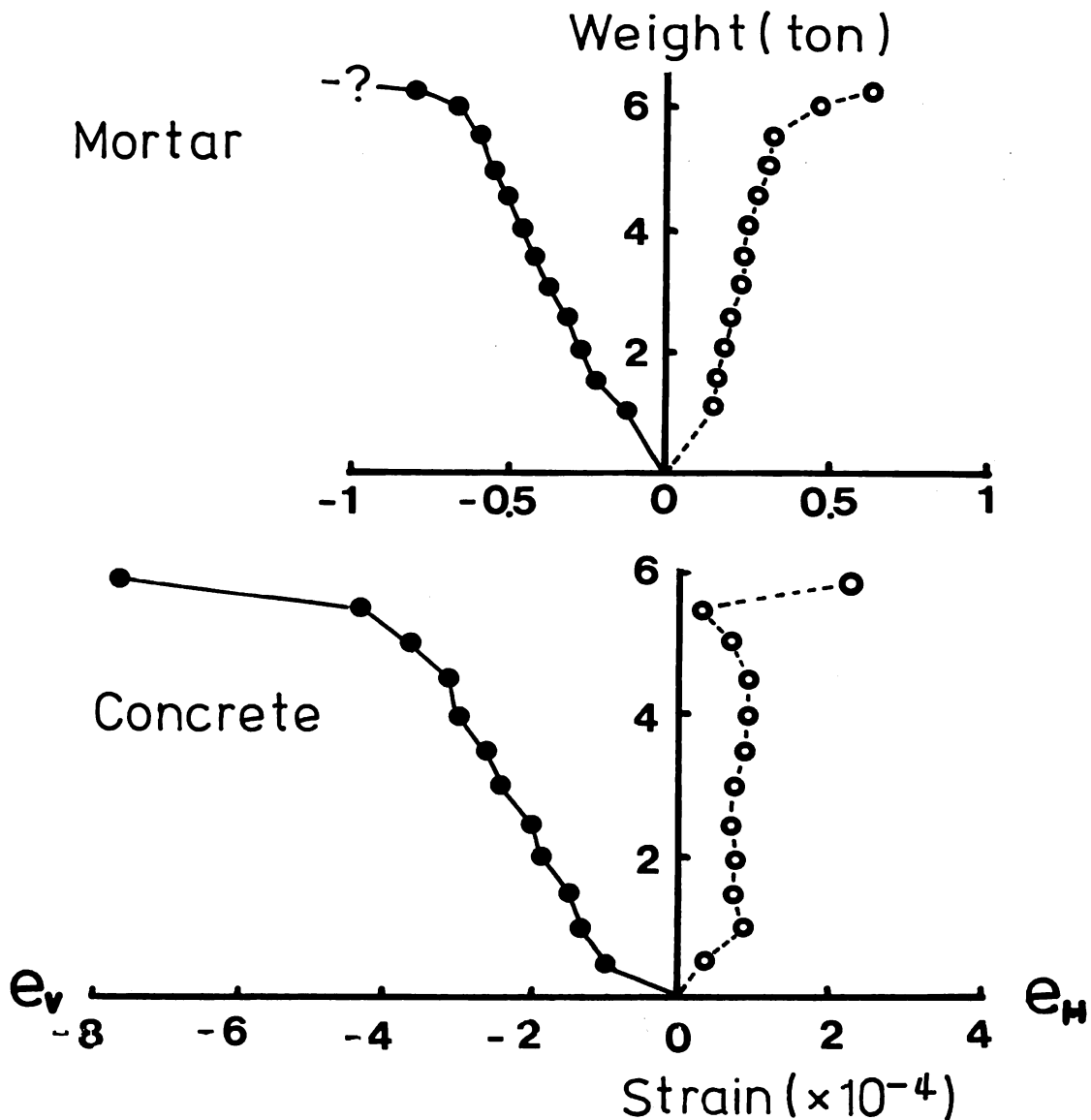


図2 载荷荷重と歪

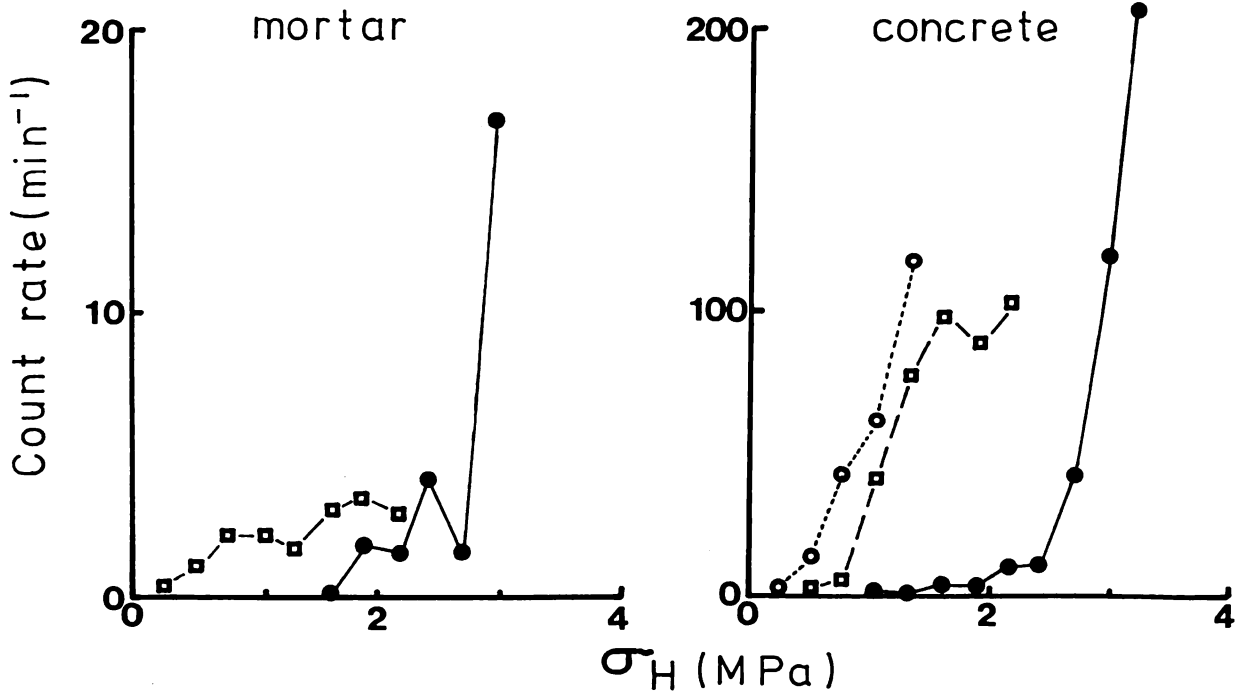


図3 AE計数率と引張応力の関係
白丸は初載荷、四角形は再載荷、黒丸は再々載荷に相当する。

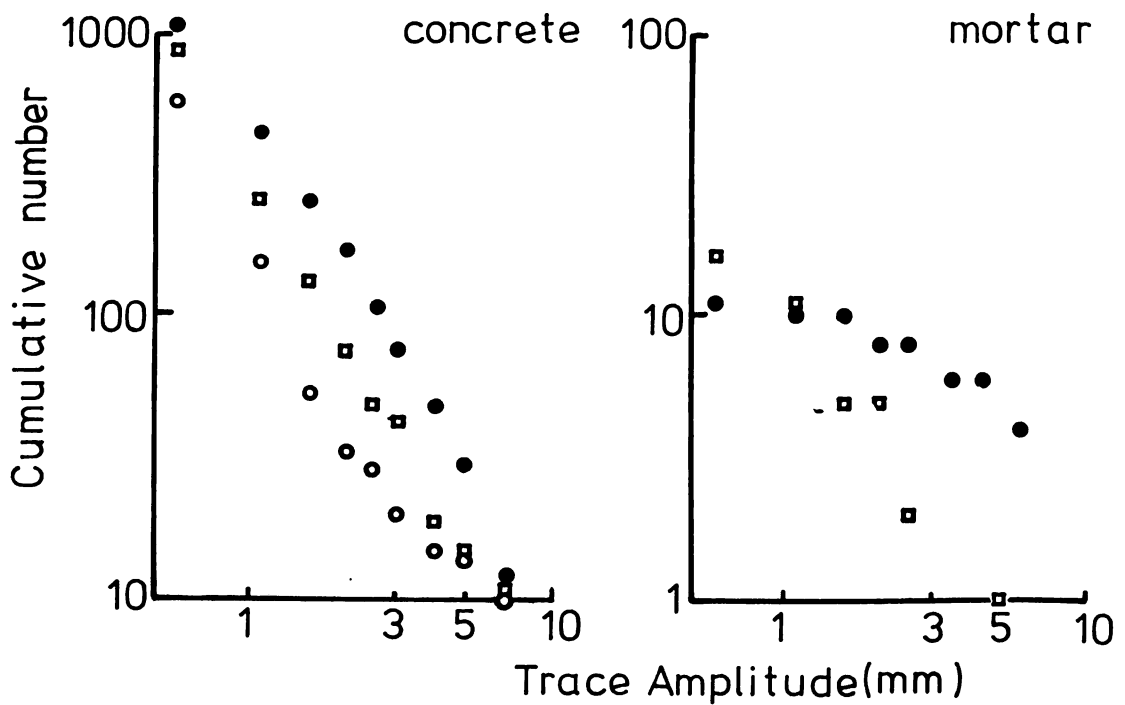


図4 AE振幅の累積頻度分布
記号の定義は図3と同じ

モルタル及びコンクリートの剪断強度と強度分布の均一性係数
 ——圧裂引張及び圧縮試験による剪断強度の推定——

表 コンクリート、モルタルの圧裂引張強度、圧縮強度および3試に基く剪断強度。単位はMPa。

	サンプル番号	1	2	3	4	5	平均
コン ク リ ト	圧裂引張強度	4.0	3.5	3.2	3.1	3.2	3.4
	圧縮強度	50	42	—	31	52	44
	剪断強度	8.1	7.0	—	5.9	7.1	7.0
モ ル タ ル	圧裂引張強度	4.2	2.9	3.4	3.5	3.5	3.5
	圧縮強度	80	87	83	—	—	83
	剪断強度	10.0	8.4	9.0	—	—	9.1

られた。コンクリートのm値が岩石供試体によるAEや、自然地震と比べ際立って大きいことが特徴的であり、応力または構造の不均質性がコンクリートの場合大きいものと考えられる。一方、破壊応力値まで載荷した再々載荷時のm値が、それ以前の値よりも小さくなる傾向はこの実験でも認められたと言える。

4. 議論

AE波の応力降下量に関する長谷川(1985)の結果では、分布が0.002~3MPaの範囲にあり、平均で0.5MPaと求められている。これらの値は今回得られた剪断強度に対し、最大で50%、平均的には約10%の大きさしかない。即ち、AE発生の際に於ける平均応力を剪断強度に相当すると考えるならば応力集中による偏差応力値は平均で剪断強度の10%増と言える。Yamamoto(1981)によれば、巨視的破壊強度付近で岩石試料内微小クラックの破壊強度分布はワイブル分布より僅かにずれている。Yamamoto(1981)は、これをクラック周辺の応力集中に依るとし、この効果が高々20%以内と見積った。ところで、AEは載荷された供試体に内在する微小クラック周辺で応力集中が起り、剪断強度を越える偏差応力値になった状態で誘発されやすくなる。このAE発生メカニズムをYamamoto(1981)に従って解釈すると、偏差応力値は剪断強度に対し平均で20%程度増加すべきであることを示し、前述の応力降下量及び剪断強度の観測事実は、これを裏付けるものであろう。

前節では、少数例の剪断強度より均一性係数を求め、他の研究による値と類似であることを見いだした。分布型を論ずる場合、通常は十分に多数のデータによるべきであるから、前節の結果は偶然によるのかもしれない。しかし、剪断強度には0を越える下限が存在し、且つ無限大の強度も有り得ないのでワイブル分布又はこれに類する分布が先験的に判明

していることになる。かくして、淡路ら(1978a)に従った解析値は、剪断強度のデータがワイブル分布であると仮定し当はめを行ったものと解釈され、少数例にかかわらず比較的妥当な結果を得たと考えられる。ここで得た均一性係数は壊れにくさの指標となっており、剪断強度の大小との相関が見られる。また、AEの応力降下量分布から得られた均一性係数が剪断強度分布のそれと同じ程度の大きさを示すこと。圧縮強度と均一性係数の相関も剪断強度と同様であること(長谷川, 1984)から、両者が同じ物理的内容を持つと期待される。

5. おわりに

本文では、コンクリート及びモルタル供試体の圧裂引張試験による引張強度と圧縮試験による圧縮強度から剪断強度を求めること、その分布関数をワイブル分布したときの均一性係数を求めることについて検討した。その結果、剪断強度は6~10MPa、均一性係数は9~13であることが分った。又、剪断強度と均一性係数の間には正の相関が存在するらしいこと、応力降下量の分布より得られた均一性係数が前述のそれと同等であるらしいことも判明した。今後は、強度分布とAE特性の相方にわたるデータ蓄積及び理論面での研究を行い、均一性係数を物理的に解明していくつもりである。

本研究の遂行に当って、東北大学理学部の鈴木先生、高木先生、平澤先生には絶えず励ましを頂きました。供試体の製作に当って本校土木工学科の諸先生には大変御世話になりました。記して深く感謝致します。

参 考 文 献

淡路英夫・佐藤千之助 1978a, ヘルツの接触圧を考慮した圧裂引張応力, 材料, 第27巻, No.295.

336 — 341.

漆路英夫・佐藤千之助 1978, 円弧型圧子による
圧裂引張試験法の検討, 材料, 第27巻, No. 295,
342 — 348.

長谷川武司・藤嶋幸成・武藤正文 1980., モルタル
およびコンクリートの一軸圧縮により発生する縮小
破壊音について(I), 秋田高専研究紀要, No. 15. 27-34

長谷川武司・伊藤哲也・長岡信一 1983 モルタル
およびコンクリートの一軸圧縮により発生する微小
破壊音について(III), 秋田高専研究紀要, No. 18.
112 — 118.

長谷川武司 1984, 圧縮応力下にある岩石のアコー
スティックエミッション特性 —地震学的手法によ
る応力降下量の分布について—, 第6回岩の力学国
内シンポジウム講演論文集, 19-23.

長谷川武司 1985. 応力降下量の分布について—微
小地震およびAEの場合—, 地震学会秋季大会講演
予稿集(投稿中)

宇津徳治 1965. 地震の規模別度数の統計式
 $\log N = a - bM$ の係数 b を求める一方法, 北大地球
物理報告, No. 13. 99 — 103.

山本清彦・楠瀬勤一郎・平澤朋郎 1977. 繰り返し
軸応力下で岩石に発生する微小破壊の m 値, 地震第
2集, 第30巻, 477 — 486.

Yamamoto, K. 1981.
Theoretical determination of effective elastic
constants of composite and its application to
seismology, 東北大学理学部博士論文.

山口梅太郎・西松裕一 1977. 岩石力学入門(第
2版), 東京大学出版会.