

論文 鉱物油中におけるコンクリートの圧縮疲労試験時の AE 特性

内田 慎哉^{*1}・鎌田 敏郎^{*2}・大内 一^{*3}・川満 逸雄^{*4}

要旨：本論文は、鉱物油中におけるコンクリートの圧縮疲労試験時の AE 特性について検討したものである。実験においては、疲労試験から S-N 曲線を算出し、疲労寿命による検討も併せて行った。その結果、鉱物油の非圧縮性挙動によって生じるコンクリート中での損傷の進展過程は、载荷繰返し回数比と累積 AE 発生数比との関係より把握できることが明らかとなった。また、浸漬条件の違いによる疲労破壊形態の変化は、振幅規模別頻度分布により評価できることもわかった。

キーワード：鉱物油、圧縮疲労試験、S-N 曲線、非破壊検査、AE 法、弾性波伝播速度

1. はじめに

鍛造施設にあるプレス機の基礎コンクリートの多くは、40～50℃の環境下におかれている¹⁾。そのため、コンクリート表面には、乾燥収縮ひび割れが発生しやすい状態にあるものと考えられる。また、上記のような条件下にある基礎コンクリートは、プレス機の運転のために用いる鉱物油に常に曝されているため、ひび割れ開口部も鉱物油で満たされている場合がほとんどである。さらに、プレス機の変動荷重によりひび割れ内部での油の非圧縮性流体としての挙動が原因で、ひび割れがさらに進展するといった圧縮疲労による材料劣化が顕著になるものと考えられる。

これに対して著者らは、表面を鉱物油で覆われた粗骨材を用いたコンクリートを作製し、静的圧縮試験における破壊性状を、アコースティック・エミッション法 (AE 法) によって得られた AE 特性から把握した²⁾。この基礎研究の結果、粗骨材周辺の油の有無による圧縮破壊性状の違いを AE 発生数により評価できることを明らかにした。しかしながら、コンクリート全体が鉱物油で覆われた条件下での圧縮破壊性状につい

ては未検討であり、また疲労特性についての検討も加えられていない。

そこで本研究では、鉱物油に曝されている基礎コンクリートにおける圧縮疲労による材料劣化機構を解明するため、鉱物油中においてコンクリートの圧縮疲労試験を行い、疲労試験時の AE 特性について把握することを試みた。実験では疲労試験から S-N 曲線を算出し、疲労寿命による検討も併せて行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

実験にはレディーミクストコンクリートを用いた。粗骨材の最大寸法 15mm、スランプ 12cm、呼び強度 24N/mm² の普通コンクリートである。また、使用した油は、密度 0.86g/cm³、動粘度 45.3mm²/s の鉱物油である。

2.2 供試体の作製と養生方法

圧縮疲労試験時における AE 特性を把握するため、直径 75mm、高さ 150mm の円柱供試体を作製した。供試体は、打設後 1 日で脱型し、20℃一定の水槽で水中養生を材齢 28 日まで行った。その後、温度 20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿室

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 工博 (正会員)

*3 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻教授 工博 (正会員)

*4 (株) 日建設計シビル 技術開発部部长 工博 (正会員)

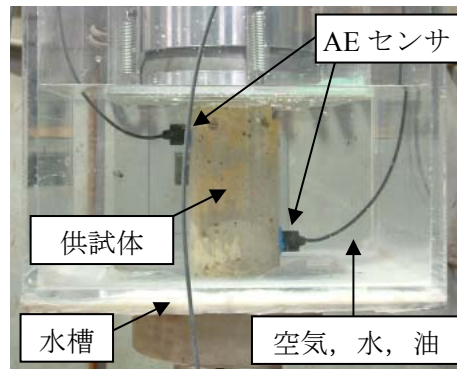
にて 14 日間気中養生した。気中養生された供試体は、短時間に供試体内部へ油を浸透させるため、105℃ の乾燥炉にて質量が一定となるまで乾燥させた後、直ちに鉱物油に浸漬した。このような手順で作製した供試体を、本研究では油中供試体と呼ぶ。なお、比較用に、乾燥炉から取り出した後に再度水中養生した供試体（水中供試体）と乾燥後直ちに供試体にポリ塩化ビニリデン製ラップを巻き付け、気中養生した供試体（気中供試体）も併せて作製した。各供試体は、載荷直前まで気中、水中および鉱物油中に養生し、質量変化が一定となった後に載荷試験を実施した。各供試体における静的圧縮試験材齢は、気中、水中および油中供試体の順に、それぞれ 52, 66 および 92 日である。

2.3 静的圧縮試験

実験に用いた静的圧縮試験機は、容量 250kN の電気油圧サーボ式である。いずれの供試体においても、静的圧縮試験は、底面が鋼板、側面がアクリル板で作製された水槽（写真－1 参照）に供試体を設置して行った。ただし、油中および水中供試体については、容器内にそれぞれ水および鉱物油を満たした状態で静的圧縮試験を実施した。また、供試体の側面中央部の 2 箇所にはひずみゲージを貼り、静弾性係数も算出した。

2.4 圧縮疲労試験

写真－1 に圧縮疲労試験状況を示す。圧縮疲労試験機および使用した容器は、静的圧縮試験に用いたものと同じである。載荷速度および繰り返し応力などの試験条件は、建材試験センターから発行されている JSTM C 7104³⁾ を参考に、載荷速度 5Hz の正弦波の載荷波形とした。繰り返しの下限応力比は気中、水中および油中供試体の静的圧縮強度に対してそれぞれ 10%、上限応力比は同じく静的強度の 80%とした。ただし、油中供試体については、上限応力比の違いが圧縮疲労破壊特性に与える影響を把握するため、70 および 60%についても実施した。表－1 に実験ケースを供試体本数と併せて示す。



写真－1 圧縮疲労試験および AE 計測概要

表－1 実験ケース

浸漬 条件	試験 種別	上限応力比 (%)	下限応力比 (%)	本数 (本)
気中	静的	—	—	3
	疲労	80	10	5
水中	静的	—	—	3
	疲労	80	10	5
油中	静的	—	—	3
	疲労	80	10	5
		70	10	5
		60	10	5

2.5 AE 計測

圧縮疲労試験時における AE 計測状況を写真－1 に示す。AE センサは、供試体内部で発生した AE のみに着目するため、供試体高さ方向における両端部より 30mm の位置にそれぞれ設置した。センサにて検出された AE 信号は、プリアンプおよびメインアンプでそれぞれ 40dB の増幅処理を行った後、60dB のしきい値を超えた信号をデジタル化し、AE 計測装置に記録した。実験に使用した AE センサは、水中および油中においても AE 計測ができるように、防水・防油処理を施したものを使用した。センサの特性は、0～約 1MHz までに幅広い応答感度を有し、かつ 150kHz に共振点を有するものである。また、載荷初期における載荷盤と供試体端面の摩擦によって発生する AE を減じるため、載荷盤と供試体の間に厚さ 0.1mm のテフロンシートを挿入した。

2.6 弾性波伝播速度計測

気中、水中および油中供試体における圧縮疲労試験時のひび割れ発生程度の差を把握する

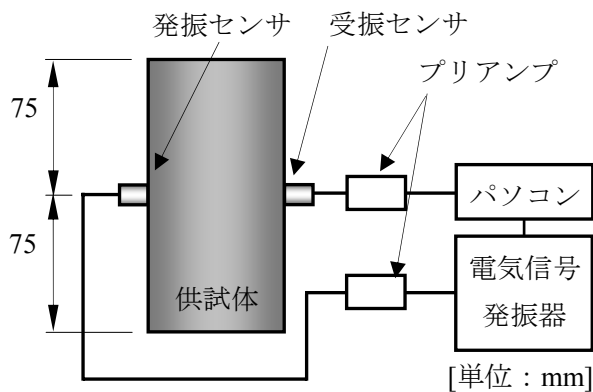


図-1 弾性波伝播速度計測概要

ことを目的に、弾性波伝播速度計測を行った。伝播速度の計測は、上限応力比 80%での疲労試験において適当な間隔で繰り返し载荷を止めた直後に実施した。また、油中および水中供試体については、それぞれ鉱物油および水で満たされた状態にて速度計測を行っている。なお、いずれの供試体においても、荷重を除荷した状態で計測を行った。図-1 に弾性波伝播速度の計測概要を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度および静弾性係数

静的圧縮強度および静弾性係数を図-2 に示す。図に示す水中供試体の圧縮強度は、気中のそれよりも 23%程度低下しており、松下の研究とほぼ同じ結果である⁴⁾。このような強度低下は、水が原因と考察できる。つまり、非圧縮性流体である水は、加えられた応力の伝達性能が非常に良いため、これがひび割れを進展させる要因となり、圧縮強度が低下したものと考察できる。これに対して、油中供試体の圧縮強度は、気中のそれと比較して同程度になっている。鉱物油も水と同様に非圧縮性流体であるため、水中供試体同様に強度低下が予測されたが、本実験では確認することができなかった。これは、水および鉱物油の粘性係数の違いによるものと考えられる。油の粘性係数は、水のそれよりも明らかに大きい。そのため、载荷速度一定の静的圧縮载荷の場合では、形成されたひび割れの内部に鉱物油が進入しにくく、強度低下が生じにく

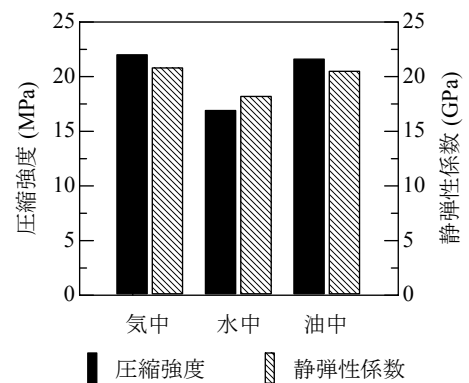


図-2 圧縮強度および静弾性係数

表-2 圧縮疲労試験結果

条件	上限応力比 S (%)	供試体番号 r	疲労寿命 Nr (回)	平均疲労寿命 N
気中	80	1	6825	4.32
		2	7032	
		3	14505	
		4	15648	
		5	386900	
水中	80	1	131	3.10
		2	142	
		3	3930	
		4	4264	
		5	9671	
油中	80	1	430	3.92
		2	9354	
		3	12397	
		4	17374	
		5	44743	
	70	1	1570	4.14
		2	14620	
		3	18059	
		4	22956	
		5	54233	
	60	1	905	4.47
		2	8309	
		3	71185	
		4	200770	
		5	217028	

いものと考えられる。一方、静弾性係数は、気中および油中の弾性係数がほぼ同じであり、水中のみ低下する結果となった。このような変化傾向は、圧縮強度での結果と同じである。

3.2 S-N 曲線

表-2 に圧縮疲労試験の結果を示す。なお、表中に示す r は供試体番号を示しており、疲労寿命

の小さい順に番号を振っている。また、平均疲労寿命とは、供試体番号ごとに疲労寿命 N_f の対数を取り、これを各試験条件の上限応力比ごとに平均した値である。これを基に、繰り返し荷重の上限応力比 S と平均疲労寿命 N との関係（S-N 曲線）を図化したものを図-3 に示す。この図によると、油中および水中供試体での疲労寿命は、気中供試体のそれと比較して低下していることがわかる。また、油中および水中供試体の両者における疲労寿命の低下程度は、水中供試体の方が明らかに大きい。疲労試験の場合、ひび割れの開閉が繰り返されるため負圧が生じやすい状況となり、鉱物油および水がひび割れ内部へと浸透しやすくなる。水の圧縮率（ $0.45(1/\text{GPa})^{5)}$ ）は、油の圧縮率（ $0.6 \sim 0.7(1/\text{GPa})^{6)}$ ）よりも低いため、作用した応力に対して体積変化を生じにくく、ひび割れを進展させる駆動力となる。これにより、疲労破壊の進行程度に差違が生じたものと考察できる。

3.3 AE 計測

AE 計測によって検出された AE の発生数を基に、累積 AE 発生数比を算出し、この特性値により疲労破壊の進展過程の評価を行った。また、振幅規模別頻度分布も算出し、疲労破壊形態に

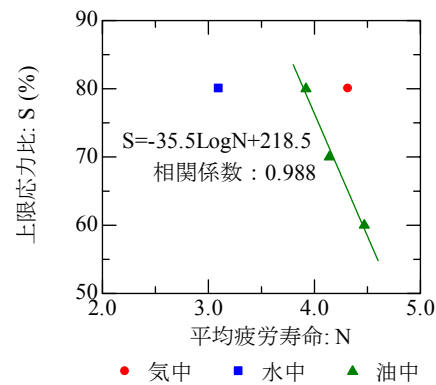


図-3 S-N 曲線

についての考察も加えた。なお、AE 計測は、各供試体それぞれについて 3 本ずつ実施した結果、AE の発生挙動は疲労寿命によらず、各供試体内では同じ傾向であった。そのため、これ以降に示す累積 AE 発生数比および振幅規模別頻度分布は、各供試体の代表的な結果のみを示している。

(1) 疲労破壊の進展過程の評価

図-4 に圧縮疲労試験中に得られた累積 AE 発生数比と疲労寿命に対する繰り返し回数の比（以降、繰り返し回数比）との関係をそれぞれ示す。これらの図に示す累積 AE 発生数比とは、繰り返し回数比 100% の時点における累積 AE 発生数を 100 として、それに対する各繰り返し回数での累積 AE 発生数との比率として定義した

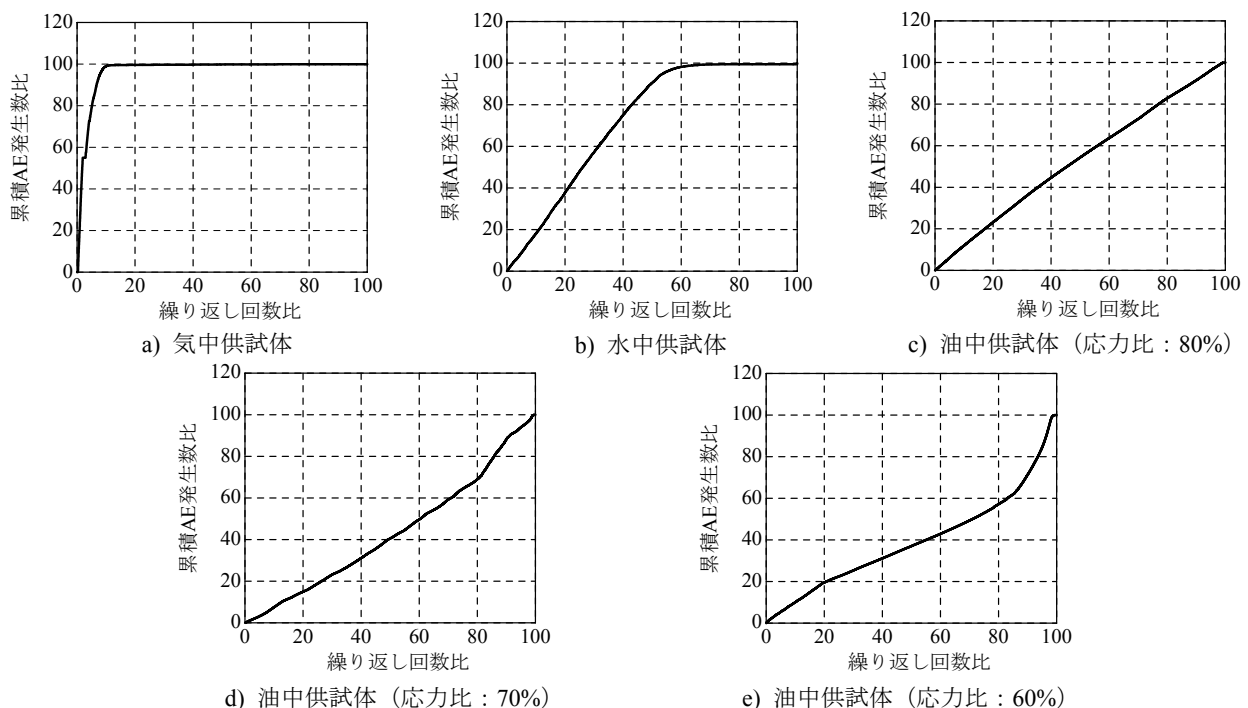


図-4 累積 AE 発生比

ものである。この図に示す気中供試体では、繰り返し回数比 10%までの極初期に AE が著しく発生しているものの、これ以降 AE はほとんど検出されていない。このような AE 発生挙動から、コンクリート内部におけるひび割れの発生および伝播が安定する繰り返し回数比は、およそ 10%と考えられる。図-5 のみかけの弾性波伝播速度においても、繰り返し回数比 10%以降の速度変化は小さく、内部損傷の進展が緩やかであったことが推察される。一方、水中供試体では、繰り返し回数比 60%まで AE が継続的に発生しており、気中における AE 発生挙動とは明らかに異なる傾向を示している。これは、水のくさび作用の影響により、繰り返し回数比 60%程度までコンクリート内部の組織構造が変化し続けたと考えられる。さらに油中供試体では、繰り返し回数比が 100%となるまでの間、継続して AE が発生している。これより、油中供試体では、気中および水中供試体よりも長い時間、つまり疲労寿命となるまでの間、組織構造などが継続して変化していると思われる。これについては、図-5 からわかるとおり、伝播速度は繰り返し回数の増加に伴って低下しており、損傷が継続的に進展したことを裏付けるものと思われる。

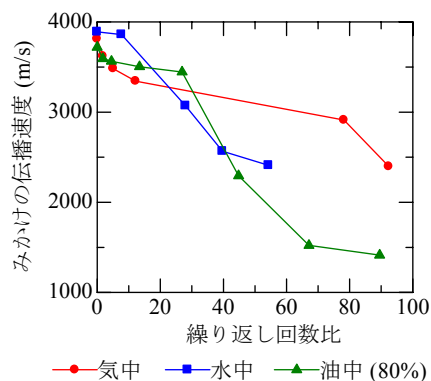


図-5 疲労試験時のみかけの伝播速度

続いて、上限応力比が 70 および 60%の油中供試体(図-4 参照)では、80%のそれと比較して、疲労寿命近傍での AE 発生数の増分がより顕著になる傾向を示している。このことから、上限応力比の低下に伴い、コンクリート内部の組織構造の変化は、疲労破壊に近づくにつれて著しくなると考察できる。

以上のことから、累積 AE 発生数比に着目することにより、鉱物油中におけるコンクリートの圧縮疲労破壊に伴うコンクリート内部の組織構造の変遷を把握することが可能であると考えられる。

(2) 疲労破壊の形態の評価

振幅規模別頻度分布を図-6 に示す。ここでいう頻度分布とは、疲労破壊過程において発生し

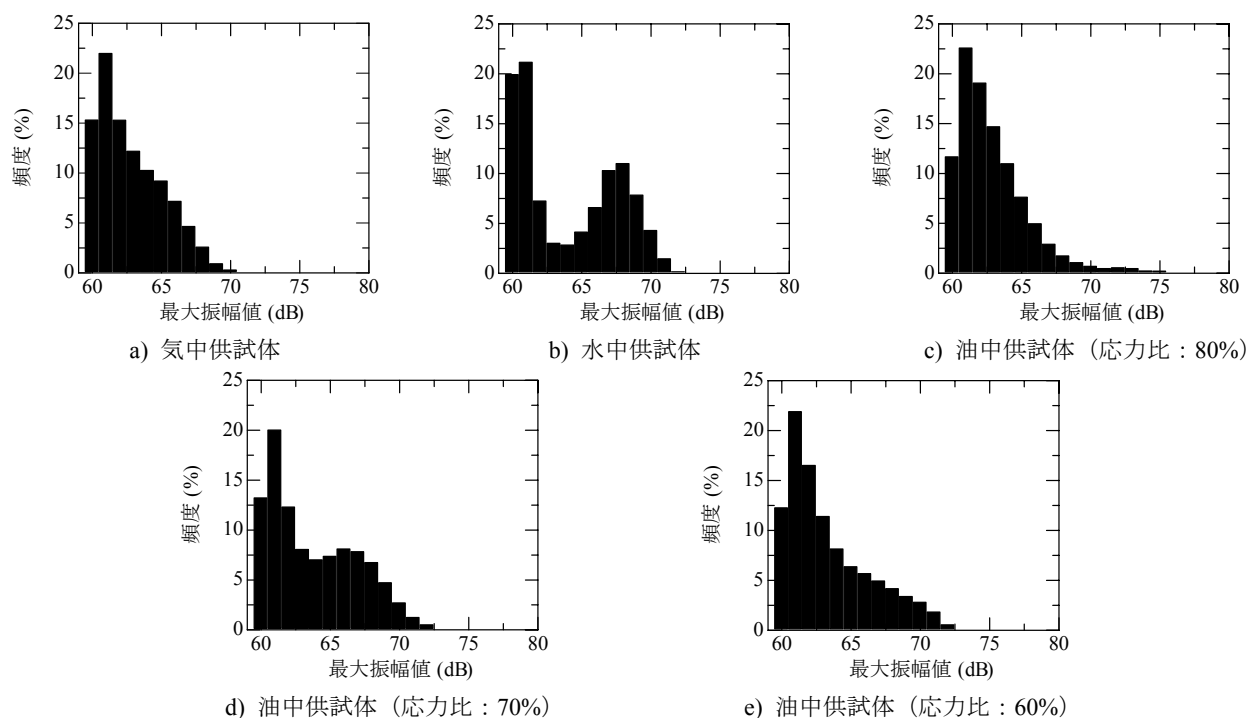


図-6 振幅規模別頻度分布

た1イベントごとのAEの最大振幅値とその発生頻度との関係を示したものである。これによれば、気中供試体では振幅値 61dB をピークとして、振幅規模が大きくなるに従って AE の発生頻度が小さくなる傾向を示している。一方、水中供試体では、60～61dB でのピークに加えて、65 から 70dB 付近にも頻度の大きいピークが発現しており、2 ヤマのピークが現れている。既往の研究成果⁷⁾によれば、コンクリート供試体に対する静的な圧縮荷重で発生する AE の振幅規模の割合はほとんど変化しないとされている。また、頻度分布において振幅の大きな AE が発生する要因としては、コンクリートに引張応力が作用することにより発生した引張型のひび割れである⁸⁾との報告もある。これより、水中供試体における頻度分布が異なる理由としては、非圧縮性流体である水が、発生しているひび割れ部に進入し、水の応力伝達性能により、周辺コンクリートに圧縮応力を作用させ、結果的に引張型のひび割れを発生あるいは伝播させたものと考察することができる。これに対して、油中供試体（上限応力比：80,70 および 60%）では、水中供試体同様に、規模の大きい振幅値において AE が発生しているものの、その発生頻度は水中供試体と比較して小さい。

以上のことから、振幅規模別頻度分布は、浸漬条件の違いによって生じるコンクリート内部での疲労破壊の形態を反映した AE 特性値であると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 鉱物油中での静的圧縮強度および静弾性係数は、気中での強度および弾性係数とほぼ同程度であることを確認した。
- 2) 鉱物油中のコンクリートの疲労寿命は、気中のそれと比較して明らかに小さいものの、水中での疲労寿命ほど小さくないことが明らかとなった。
- 3) 鉱物油の非圧縮性挙動によって生じるコン

クリート中での疲労損傷の進展過程は、載荷繰り返し回数比と累積 AE 発生数比との関係より把握できることが明らかとなった。

- 4) 浸漬条件の違いによる疲労破壊の形態の変化は、振幅規模別頻度分布により評価できると考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、大阪市立大学の角掛久雄助手ならびに伊藤益嗣君に多大なるご助力を頂きました。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 川満逸雄，鎌田敏郎，内田慎哉：潤滑油に曝されるコンクリート構造物における劣化事例，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.671-676，2006
- 2) 伊岐見哲也，鎌田敏郎，内田慎哉：表面を油で覆われた粗骨材を用いたコンクリートにおける AE 法による圧縮破壊性状の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1973-1978，2006
- 3) 財団法人建材試験センター：JSTM C 7104 繰返し圧縮応力によるコンクリートの疲労試験方法，1999
- 4) 松下博通：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究，土木学会論文報告集，No.296，pp.87-95，1980
- 5) 国立天文台編：理科年表（机上版），丸善，p.375，2006
- 6) 不二越ハイドロニクスチーム：新・知りたい油圧／基礎編，ジャパンマシニスト社，p.235，1996
- 7) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論 第2版，森北出版，pp.40-42，2005
- 8) 鎌田敏郎，岩波光保，長瀧重義：AE 法によるコンクリートのひび割れ種類の識別，東京工業大学 土木工学科研究報告，No.55，pp.1-12，1997