

論文 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

伊岐見 哲也^{*1}・鎌田 敏郎^{*2}・内田 慎哉^{*3}

要旨：本論文は、鉱物油に曝されている基礎コンクリートに生じる材料劣化のメカニズムを解明するために行った基礎研究である。実験では、表面を油で覆われた粗骨材を用いたコンクリートを作製し、一軸圧縮載荷試験を行った。圧縮載荷時の圧縮強度および静弾性係数を算定するとともに、AE法による圧縮破壊性状の評価を行った。その結果、鉱物油の影響により圧縮強度および静弾性係数は低下することが明らかとなった。さらに、AE計測で得られた累積AE発生数比およびAE活性度は、粗骨材周辺の油の有無による圧縮破壊性状の違いを評価できることを明らかにした。

キーワード：鉱物油、圧縮破壊性状、非破壊検査、AE法、ビッカース硬さ試験、画像解析

1. はじめに

コンクリートの化学的腐食の1つに油による材料劣化¹⁾がある。一般的に油は、動植物油と鉱物油の2種類に分類することができ、コンクリートの多くは動植物油によって浸食されることが既に知られている。動植物油に含まれるグリセリンエステルあるいは遊離脂肪酸が、セメント水和物である水酸化カルシウムと反応して、コンクリートの材料劣化を引き起こす²⁾。

他方、潤滑油として用いられている鉱物油では、動植物油と比較して上記の成分があまり含まれていないため、コンクリートへの浸食は起こらないというのが通説となっている。しかしながら、近年、常に鉱物油に曝されるプレス機あるいは圧縮機の基礎コンクリートにおいて、材料劣化が確認される例が顕在化している³⁾。また、上記の条件下にある基礎コンクリートの多くは、プレス機などの変動荷重を常時受けているため、材料劣化も非常に著しくなっている。このような事例は、動植物油による化学的腐食とは異なるメカニズムによって、油によるコンクリートの材料劣化が生じる可能性を示唆する

ものであり、この種の劣化の機構を解明することは急務と考えられる。

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材料劣化のメカニズムを解明するための基礎研究として、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た。実験では、一軸圧縮載荷試験を行い、圧縮強度および静弾性係数を算定するとともに、アコースティック・エミッション法(AE法)による圧縮破壊性状の評価を行った。また、コンクリート中に含まれる油の存在が、耐荷性状やひび割れの発生程度に与える影響についての検討も行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

AE法による圧縮破壊性状の評価を行うため、直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を作製した。供試体の作製にあたっては、粗骨材の表面が油で覆われていることが前提となる。そこで、吸水率の高い人工軽量粗骨材を使用して、以下に示す手順によってこれを模擬した。まず、骨

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科助教授 工博 (正会員)

*3 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻 (正会員)

材を 105C°の乾燥炉にて重量が一定となるまで乾燥させた。続いて、乾燥させた粗骨材は、直ちに鉱物油に浸し、骨材重量の増加が緩やかとなるまで油に浸漬させた。さらに本研究では、供試体内部に含まれる鉱物油の割合が圧縮破壊性状に与える影響を確認するため、使用した粗骨材に対する油に浸漬した粗骨材の割合（本研究では、「油の体積濃度」と定義する）を、50%および 100%とした 2 種類の供試体を作製した。また比較用に、油で浸漬されていない粗骨材を用いた「健全供試体」も作製した。表－1 にコンクリートの配合を示す。

2.2 一軸圧縮载荷試験

一軸圧縮载荷は、油圧式試験機を用いて行い、圧縮強度を算定した。また、供試体の側面中央部の 2 箇所には、図－1 および写真－1 に示す位置にひずみゲージを貼り付けて、静弾性係数を算出した。

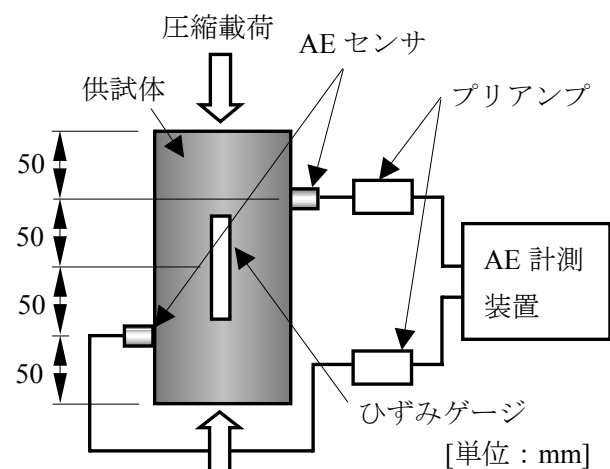
2.3 AE 計測

一軸圧縮試験時における AE 計測概要を図－1 および写真－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、2 つのセンサを図に示す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、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。使用した AE センサは、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、载荷初期における载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、供試体両端面に

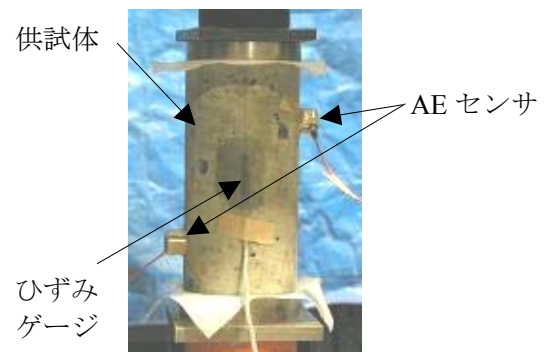
はシリコングリスを塗布するとともに、载荷盤と供試体の間に厚さ 0.1mm のテフロンシートをそれぞれ挿入した。

2.4 断面観察

作製された供試体における粗骨材とモルタルの界面性状の差違を把握するため、ビッカース硬さ試験を行った。また、圧縮载荷によって発生したひび割れの量を評価するため、画像解析も行った。これら断面観察用の供試体は、供試体長さ方向にダイヤモンドカッターで切断して作製した。以下にこれらの実験手順を示す。



図－1 一軸圧縮载荷および AE 計測概要



写真－1 一軸圧縮载荷および AE 計測概要

表－1 コンクリートの配合

油の体積濃度	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量					AE剤 Ad (ml)
				水 W (kg)	セメント C (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材の絶対容積		
							Vg ^{*1} (l)	Vg ^{*2} (l)	
0% (健全)	15	50	44	176	352	754	370	0	1408
50%	15	50	44	176	352	754	185	185	1408
100%	15	50	44	176	352	754	0	370	1408

*1: 油に浸漬していない粗骨材

*2: 油に浸漬した粗骨材

(1) ビッカース硬さ試験

ビッカース硬さの測定にあたっては、図-2に示すように、対象とした粗骨材界面からの距離が10, 30および50 μm の3点について行った。なお、各点における測定は、異なる3個の粗骨材の界面に対して各1回ずつ計3回行った。計測に用いた荷重は0.01Nで、荷重保持時間は30secとした。

(2) 画像解析

画像解析を行うにあたり、まず、供試体の切断面（縦100mm、横200mm）を赤インクにより染色した。続いて、染色面をグラインダーにより研磨し、ひび割れ部分を浮き出させた。その後、インク染色面を写真に撮り、画像解析を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 ビッカース硬さ

図-3に骨材界面から10, 30および50 μm の距離で計測されたビッカース硬さの平均値を示す。計測では、健全および油の体積濃度が100%の供試体を対象とした。これによれば、健全供試体では、油の体積濃度が100%のものと比較して、ビッカース硬さで5倍程度異なっている。このことから、両者の供試体では、粗骨材とモルタルの界面性状が明らかに異なり、油の体積濃度100%の場合、粗骨材界面近傍は脆弱な組織構造となっていることが確認できた。なお今回は、油の体積濃度が50%の供試体におけるビッカース硬さの確認は行っていない。これは、表面を油で覆われた粗骨材とそうではない粗骨材（油に浸漬していない人工軽量粗骨材）の割合が50%であるため、得られるであろうビッカース硬さは、上記2種類の供試体で得られた値の中間程度だと推測できるからである。

以上のことから、本研究で作製した供試体では、供試体内部に含まれる鉱物油の割合がそれぞれ異なることが確認できた。そのため、作製した3種類の供試体は、鉱物油の割合が圧縮破壊性状に与える影響を確認する対象として適切

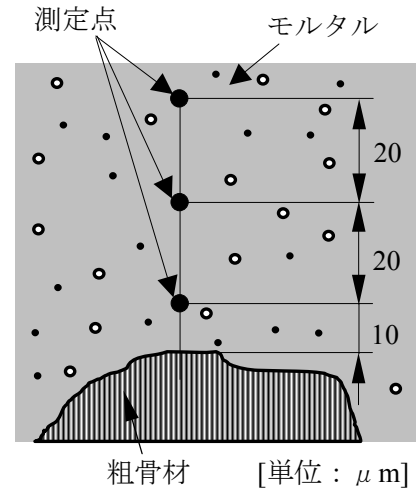


図-2 ビッカース硬さ試験概要

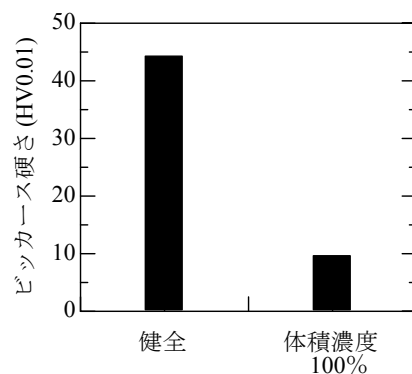


図-3 ビッカース硬さ

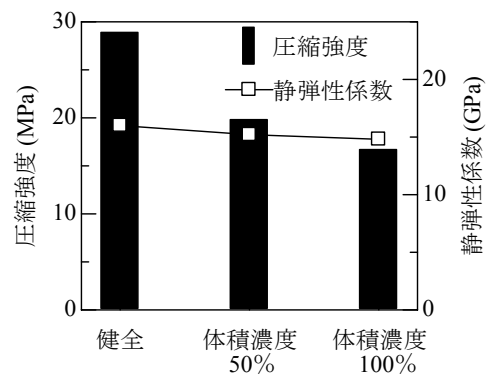


図-4 圧縮強度および静弾性係数

であると推測できる。

3.2 圧縮強度および静弾性係数による検討

一軸圧縮載荷試験によって得られた圧縮強度および静弾性係数を図-4に示す。図に示す圧縮強度は、油の体積濃度が大きくなるにつれて、著しく低下していることがわかる。しかも、健全供試体と体積濃度100%の間で、圧縮強度に約2倍の差が生じている。このような強度低下は、鉱物油が原因と考えられる。油の存在により骨材界面での付着強度が低下するとともに、非圧

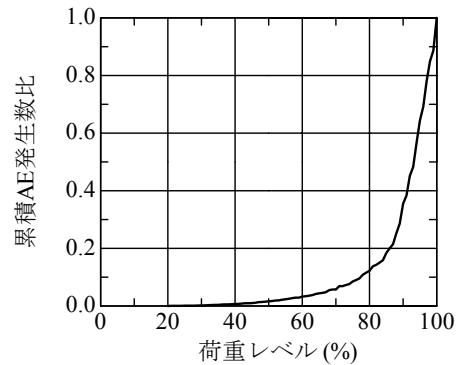
縮性流体である油は、加えられた応力の伝達性能が非常に良いため、これがひび割れを進展させる要因となり、圧縮強度が低下したものと考察できる。これに対して静弾性係数は、体積濃度の増加に伴って低下する傾向を示しているものの、低下程度は圧縮強度と比較して小さいことが示された。

3.3 AE 計測による検討

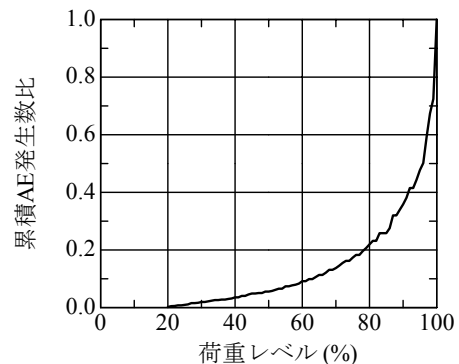
(1) 累積 AE 発生数による評価

図-5に一軸圧縮载荷中に得られた累積 AE 発生数比と破壊荷重に対する荷重の割合（以降、荷重レベルと呼ぶ）との関係を示す。この図に示す累積 AE 発生数比とは、荷重レベル 100%の時点における累積 AE 発生数を 1 として、それに対する各荷重レベルでの累積 AE 発生数との比率として定義したものである。また、载荷初期における供試体と载荷盤の摩擦によって生じる AE を除去するため、20%までに発生した AE を発生数として考慮しなかった。この図によれば、いずれの場合においても、荷重レベルの増加に対する AE 発生数の増分（傾き）は、終局破壊近傍では急激に大きくなっている。しかも、このような傾向は、健全供試体において特に顕著になっていることがわかる。これに対して、低荷重レベルにおいては、油の体積濃度が大きいほど、AE の発生数比がより多くなる傾向を示した。コンクリートに荷重レベルの小さい圧縮力が作用すると、粗骨材とモルタル界面に存在する遷移帯では、体積変化がほとんど生じない。これに対して、粗骨材が油で覆われている場合、油の圧縮率が極めて低いため、粗骨材の近傍において体積変化が生じる。この体積変化に伴い、粗骨材近傍にひび割れが生じる。これにより、低荷重レベルにて AE の発生頻度が増加したと考察できる。

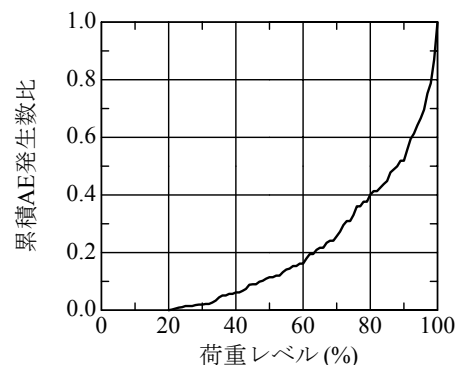
以上のことから、AE 累積発生数比を活用することにより、粗骨材周りの油の存在が、より低荷重レベルでの圧縮破壊の進展に影響を与えることが把握できた。



(a) 健全供試体



(b) 油の体積濃度 50%



(c) 油の体積濃度 100%

図-5 累積 AE 発生数比

(2) AE 活性度による評価

本研究では、図-5に示した累積 AE 発生数比と荷重レベルの関係を定量化するため、コンクリートの圧縮破壊過程⁴⁾に基づく以下の解析を行った。すなわち、荷重レベル 20 から 40%においては、粗骨材とモルタル界面の遷移帯にて微小なひび割れが発生し始める。この領域を便宜的に第 1 段階と定義した。続いて、遷移帯に発生した微小なひび割れが遷移帯にて増加するとともに、モルタルにも微小ひび割れが形成され始める領域を荷重レベル 40 から 80%とし、これ

を第2段階とした。第2段階以降から最大荷重（荷重レベル100%）に達するまでの間を第3段階とする。各段階において、荷重レベル1%の増加に対する累積AE発生数比の増分を算出した。得られた値を各段階で平均し、これを本研究ではAE活性度と定義した。図-6に各段階におけるAE活性度を示す。この図によれば、第1および第2段階において、油の体積濃度が増加することにより、AE活性度も大きくなっていることがわかる。しかしながら、第3段階では、健全供試体の方がAE活性度が明らかに大きい。ここで第1段階に着目すると、健全供試体におけるAE活性度が、油の体積濃度100%のそれと比較して、約8倍も大きくなっている。これは、コンクリートの圧縮破壊過程を考慮すると、遷移帯における微小ひび割れの発生と対応しており、油によって微小ひび割れが増加し、その結果、活性度が大きくなったと考えられる。なお、このような傾向は、既往の研究成果⁵⁾とも一致している。続いて、第2段階における活性度も、健全体と体積濃度100%では、およそ3倍も異なっている。これより、遷移帯においてひび割れがさらに促進され、かつモルタル部分へと微小ひび割れが進展した可能性が考えられる。

以上のことから、荷重レベル20から40%におけるAE活性度に着目することにより、粗骨材界面近傍の油の存在が圧縮破壊の進展に与える影響の程度を把握することができた。さらに、本研究の範囲内では、荷重レベル40から80%におけるAE活性度から、油の存在が、この荷重範囲でのモルタル破壊の進展にも影響を及ぼしている可能性が示された。

3.4 画像解析による断面観察

第2段階で発生したひび割れ程度を把握することを目的に、荷重レベルが40および80%まで載荷した後、直ちに除荷した供試体を対象に画像解析を行った。写真-2に、染色後および二値化処理後の切断面の一例を示す。染色されたひび割れの長さおよび幅より面積を算出するため二値化処理を行い、切断面の全断面面積に対する

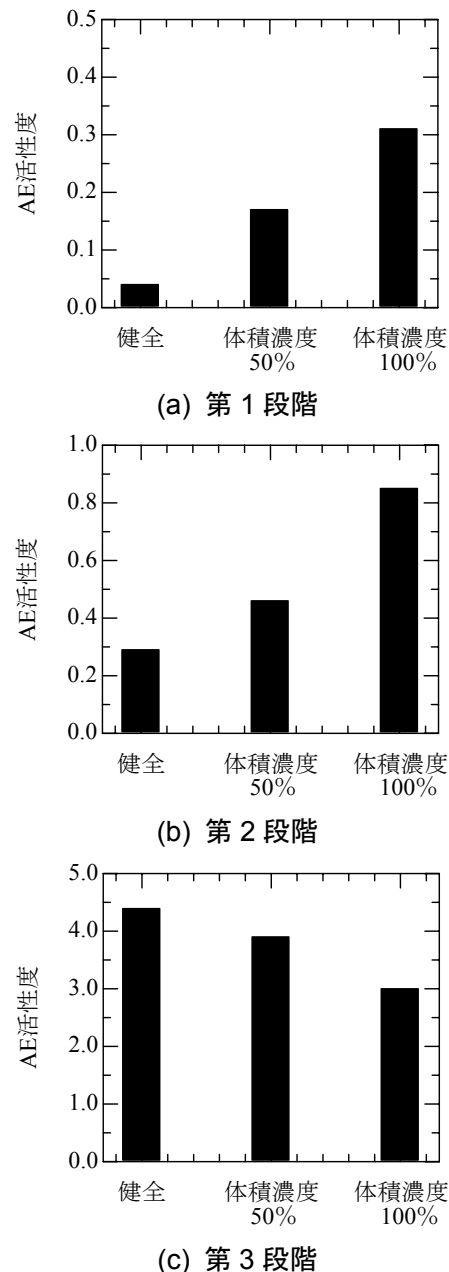


図-6 AE 活性度

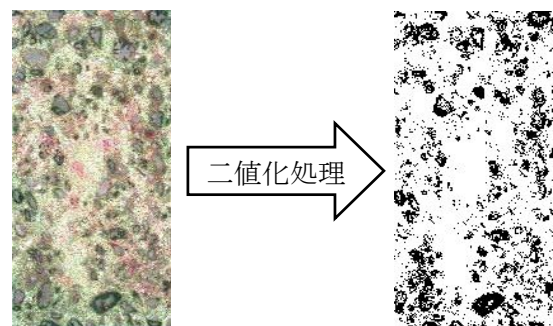


写真-2 微小ひび割れ発生状況

染色部分の面積の比率（これ以降、ひび割れ面積比とする）を算出した。本研究では、この指標によりひび割れ発生程度を評価した。なお、

油の有無によるひび割れ進展程度の違いを観察するため、健全および油の体積濃度が 100%の 2 種類の供試体を対象とした。表-2 に各供試体におけるひび割れ面積比を示す。いずれの供試体においても、荷重レベルが 80%のひび割れ面積比が、40%のそれと比較して大きくなっていることがわかる。このことから、荷重レベルが 40% 増加することにより、微小ひび割れがさらに発生したことがうかがえる。さらに、各供試体における荷重レベル 80%と 40%の差は、油の体積濃度が 100%のものが、健全と比べて 1.5 倍程度大きい。これより、粗骨材周りの鉱物油により、微小ひび割れの発生が促進されたと考えられる。

以上のことから、画像解析の結果からも、AE 活性度と同様、モルタルへと進展する微小ひび割れをおおよそ把握することが可能である。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 油に浸漬した粗骨材の割合が大きいコンクリートほど、圧縮強度および静弾性係数が低下することが確認できた。
- 2) 粗骨材周辺の油の存在がコンクリートの圧縮破壊に与える影響を把握するためには、累積 AE 発生数比および AE 活性度に着目するのが有効と考えられる。
- 3) 荷重レベル 20%から 40%における AE 活性度から、粗骨材周辺の油の存在により、粗骨材とモルタルの界面、つまり遷移帯における微小ひび割れが発生しやすくなることが明らかになった。
- 4) 荷重レベル 40%から 80%における AE 活性度は、画像解析により評価したひび割れ発生状況と良い対応を示した。この荷重レベルの範囲でも、油で覆われた粗骨材の使用が圧縮破壊の進行に与える影響を把握できた。

油に曝されているプレス機の基礎コンクリートの多くは、稼働時においてコンクリートに変動荷重が常時作用する。そのため今後は、繰り返しの一軸圧縮載荷試験を行い、コンクリート

表-2 ひび割れ面積比

	荷重レベル		差
	40%	80%	
健全供試体	22.4	32.3	9.9
油の体積濃度 100%	26.9	41.6	14.7

の疲労特性について検討する予定である。また、鉱物油によるコンクリートの材料劣化のメカニズムについても明らかにしたいと考えている。さらに最終的には、コンクリート内部の油の含有量や油による劣化程度を、コアなどの採取による微視的な破壊を伴わない、非破壊検査手法の確立を目指す必要がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、株式会社日建設計シビルの川満逸雄氏に多大なるご助力を頂きました。ビッカース試験の実施においては、岐阜大学の植松美彦助教授にご指導頂きました。また、実験に用いた人工軽量粗骨材は、太平洋マテリアル株式会社よりご提供頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 東京大学工学部建築学科 岸谷研究室：コンクリートの耐化学薬品性，セメント・コンクリート，No.308，pp.31-38，1972
- 2) 水上国男著，岸谷孝一ほか編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 化学的腐食，技術堂出版，pp.28-32，1986
- 3) 株式会社神戸製鋼所 機械エンジニアリングカンパニー：レスプロ圧縮機基礎の補修 <http://www.kobelco.co.jp/p109/rotatingservice/remodel/remodel_002.htm> 2005/5/20 アクセス
- 4) J. Glucklich: *Proceedings of a Conference on the Structure of Concrete*, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, Slough, U. K., pp.176-189, 1968
- 5) 長滝重義，大即信明，鎌田敏郎，岩波光保，黒坂 基：AE 法によるコンクリートの品質評価に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，No.49，pp.546-551，1995