

ポーラスコンクリートの多重パラメータの応答に関する実験的研究

大洞光央*¹・渡邊晋也*¹

An experimental study on multi-parameter response of porous concrete

Mitsuo DAIDO and Shinya WATANABE

Abstract

A new type of concrete called porous concrete has been developed with the considerable of living environment for minute animals and plants. Since it contains numerous relatively continuous large pores, it is weak compared with conventional concrete. For this reason, it is necessary to pay careful attention to the maintenance of a structure utilizing porous concrete. Since research and the utilization of this material have been very recent, an appropriate method for their maintenance and management are not yet developed. Aydan and others (2001, 2002, 2003 and 2004) achieved success for maintenance and management of construction rock structures in the field of rock mechanics by AE and electrical potential measurement. The authors applied this idea to the porous concrete in this research.

Multi-parameters are stress, strain, AE and electrical potential and they measured during uniaxial compression tests on porous concrete samples. Every parameter was automatically measured. Moreover, electrical resistivity was measured when electrical potential is not measured. Furthermore, nondestructive tests for physical characteristics of porous concrete were also performed. From these results, the changes of electrical potential and AE were measured before failure. It is thought there experimental study provide fundamental data for the development of maintenance and management of the structures utilizing porous concrete.

1. はじめに

植物や生物が生息可能な、今までのコンクリートにはない環境に配慮した数多くのメリットを有している、ポーラスコンクリートと呼ばれる新しい材料が開発されている。このポーラスコンクリートは、粗骨材に結合材であるセメントペーストおよびモルタルを薄く付着させ粗骨材を接着させた連続空隙を多く有するコンクリートである。河川の護岸などで、Photo 1のような大きな空隙を持つポーラスコンクリートの使用が多くなってきている。

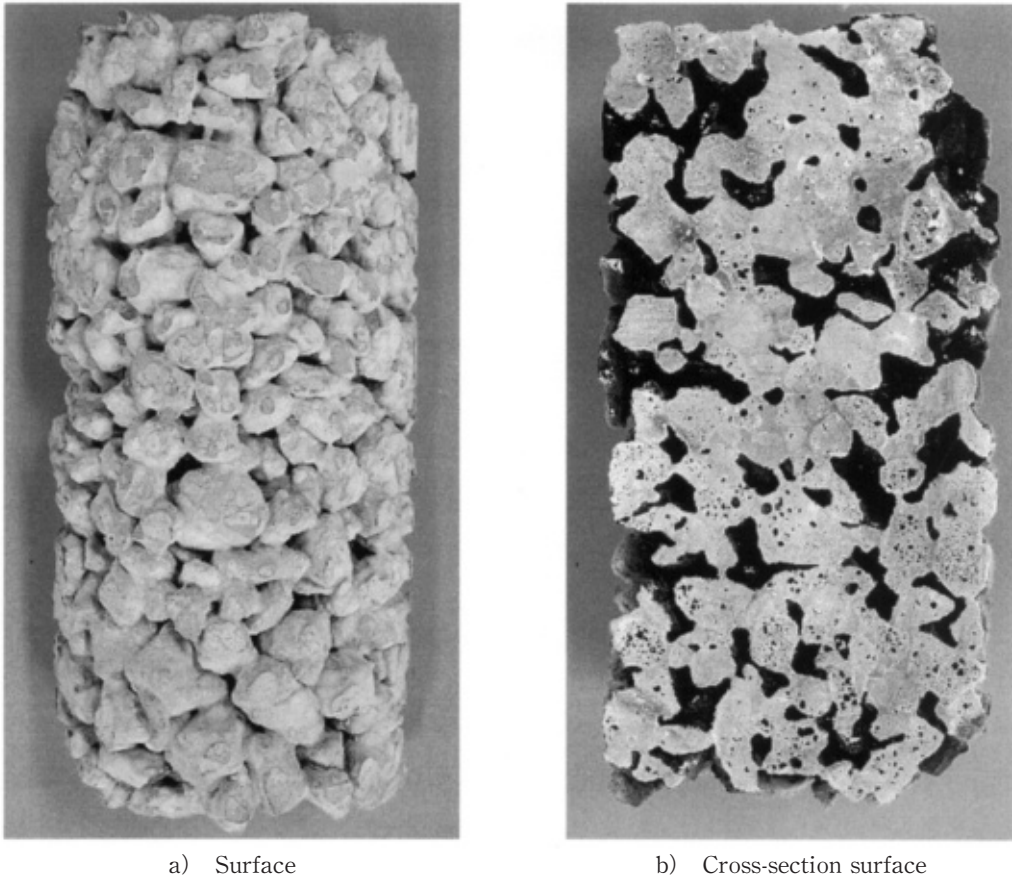
ポーラスコンクリートは大きく連続的な空隙を多く含むため、これを使用した構造物は従来のコンクリートを使用したものと比較して弱い。さらに、自然環境と接する表面積が大きいため風化や劣化と言った作用を受けやすいものと考えられる。このため、構造物の維持管理には細心の注意を払う必要がある。しかし、ポーラスコンクリートは近

年になって研究・施工が盛んに行われている為、このような構造物を維持管理するための適切な方法が未だ開発されていない。岩盤力学の分野では Aydan ら (2001, 2002, 2003, 2004) により AE (音) 計測や自然電位計測で成果が上げられており、本研究ではこの考えをポーラスコンクリートに適用した。

以上のことを踏まえて、ポーラスコンクリートを使用した一軸圧縮試験を、荷重・変形・AE・自然電位の多重パラメータの自動計測により実施した。また、自然電位計測の代わりに直流定電流電源を使用した比抵抗 (電気抵抗率) 計測も行った。さらに、コンクリート分野で一般に行われている、非破壊試験を行う事で、ポーラスコンクリート自体の特性についての検討も行った。その結果を報告する。

2004年9月13日受理

*1 東海大学大学院海洋学研究科海洋工学専攻 (Tokai University, Graduate School of Marine Science and Technology)



a) Surface

b) Cross-section surface

Photo 1 Porous concrete

2. 実験概要

2.1 実験装置

実験に使用した圧縮試験装置は油圧式の一軸圧縮試験機を使用した。この装置は2000(kN)まで載荷することが可能である。使用した荷重計は500(kN)まで計測可能である。変位計は高感度変位計を使用し、10(mm)の計測範囲を持つ。荷重計と変位系は計測ステーションを通してノートパソコンに接続した。圧縮試験中の計測する音はAEセンサーからAEテスターを通してノートパソコンに接続した。自然電位や比抵抗を計測する際に電圧は電位ロガーを使用して計測した。比抵抗測定には特別に製作した直流定電流電源を使用した(大洞, 2004)。この電源は0.005(mA)から0.123(mA)までの電流を流すことが可能であり、安全のため最大出力電圧は20Vに制限している。

2.2 実験方法

一軸圧縮試験は「コンクリートの圧縮強度試験方法(JIS A 1108-1999)」に従い実施した。荷重・変形・AE・自然電位の計測はFigure 1に示したように、荷重計を供試体の下に設置し、変位計を加圧板に接触させ、AEセンサーは供試体の側面に瞬間接着剤を使用して固定し、さら

に供試体の上下に供試体の断面とほぼ同じ面積の平面電極をはさみ電位差を測定した。これらのすべてのデータはノートパソコンにより同時に自動的に計測された。比抵抗を計測する場合には供試体の上下にはさんだ電極に、直流定電流電源より強制的に電流を流し、同じ電極で電位差を測定した。電位差を測定する方法は、時々刻々のデータをそのまま計測する直流(DC)による方法と、データの変化を計測する交流(AC)による方法がある。今回の実験では比抵抗計測に直流の定電流電源を使用したこともあり、自然電位と比抵抗計測の両方ともDCによる計測を行った。供試体はそれぞれのケースで5本用意し、そのうち2本は荷重・変形・AE・自然電位を計測し、次の2本は荷重・変形・AE・比抵抗を計測した。残る1本は予備的なものとし、自然電位と比抵抗の結果に応じて実験を行った。

2.3 材料とその特性

2.3.1 使用材料

本研究で使用したポーラスコンクリートは4種類作製した。供試体の種類の内訳は、①砕石+セメントペースト(以下S)②砕石+モルタル(以下M)、この2種類は同じ粗骨材を使用しているが、結合材を変化させた。理由としてポーラスコンクリートでは結合材の性質がポーラスコンクリート自体の性質に寄与する事が考えられるからであ

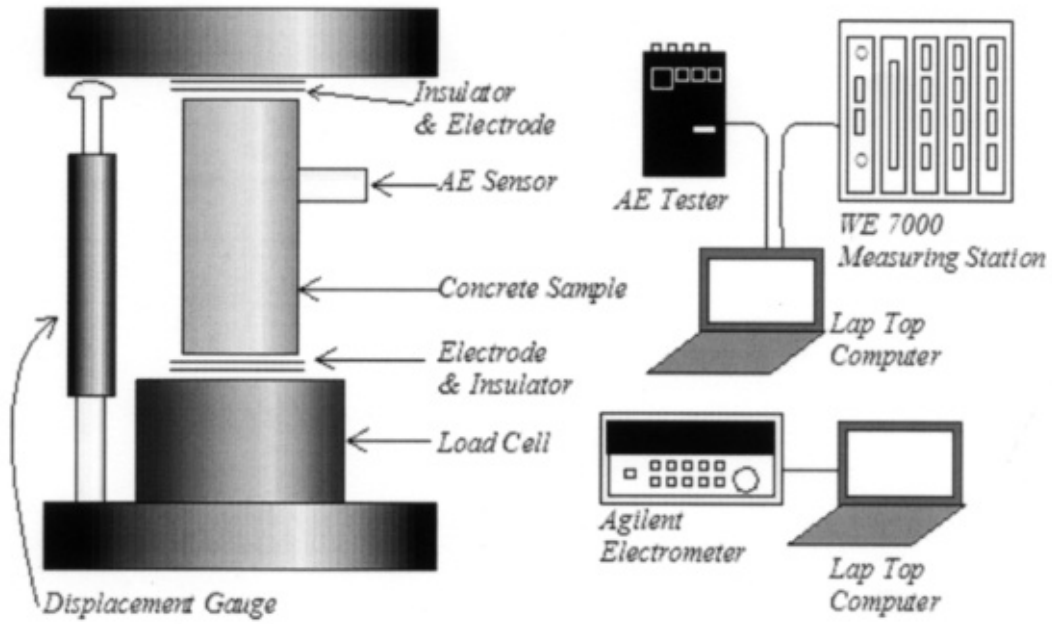


Figure 1 A sketch of experimental set-up and used equipments.

Table 1 Properties of materials

Materials	Density (g/cm ³)	Percentage of absorption (%)	Solid volume (%)	Fineness modulus (F.M.)	
Portland Cement	3.16	—	—	—	
Fine aggregate	2.64	—	53.37	—	
Aggregate	Macadam	2.71	2.48	58.01	6.67
	Blast furnace slag	2.45	4.04	67.90	6.68
	Converter slag	3.09	3.43	60.67	6.30

Table 2 Mixture proportion of the porous concrete

Test piece name	Objective Porosity (%)	W/C (%)	P/G•M/G (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)			SP (C×%)
							Macadam	Blast furnace slag	Converter slag	
Macadam cement Paste	18	25	44	111	444	—	1541	—	—	0.7
Macadam mortar			44	88	350	140	1541	—	—	
Blast furnace slag			23	68	273	—	—	2549	—	
Converter slag			44	99	398	—	—	—	1837	

W/C: Water/Cement
W: Water
G: Aggregate

P/G: Paste/Aggregate
C: Cement
SP: High-range water-reducing and air-entraining admixture

M/G: mortar/Aggregate
S: Fine aggregate

る。残りの2種類は産業副産物である③高炉スラグ（以下B）と、④転炉スラグ（以下T）を砕石の代わりに使用した。増え続ける産業副産物は限られた処分場内での処分が困難になっており、2次使用の必要性が高まっている。よって本研究では代表的な産業副産物を使用した。本研究で使用した材料の性質を Table 1 に示す。

2.3.2 配合

本研究で作製したポーラスコンクリートの配合を Table 2 に示す。水セメント比を25%一定、高性能 AE 減水剤 (SP) はセメントに対して0.7%添加した。

2.3.3 供試体寸法および養生条件

試験体の作成方法は JCI の「ポーラスコンクリートの供試体の作り方 (案)」に準拠し作製した。締め固め方法としては突き棒で2層に分けて突き固めを行った。試験に用いた供試体は10×20cmの円柱供試体とした。なお、円柱供試体には上・下部にはセメントペーストを用いてキャッピングを施した。試験体は脱型後6ヵ月間標準養生（水温20±2°C）を行った。

2.3.4 供試体の試験方法

ここでは、現在コンクリート分野で行われている一般的な非破壊・破壊試験及び、試験結果について記載する。試験方法を Table 3 に示す。

Table 3 Measurement items and methods

Items	Method
Unit mass of concrete	JIS A 1104
Longitudinal wave velocity	JCI Recommendation
Dynamic modulus of elasticit	JIS A 1127
Compressive strength	JIS A 1108

3. 実験結果と考察

今回行った実験の計測項目は荷重・変形・AE・自然電

位・比抵抗であるが、この内、自然電位と比抵抗は同時に計測することができない。そのため自然電位を計測した場合と比抵抗を計測した場合に分けて考察する。

3.1 供試体の物理特性

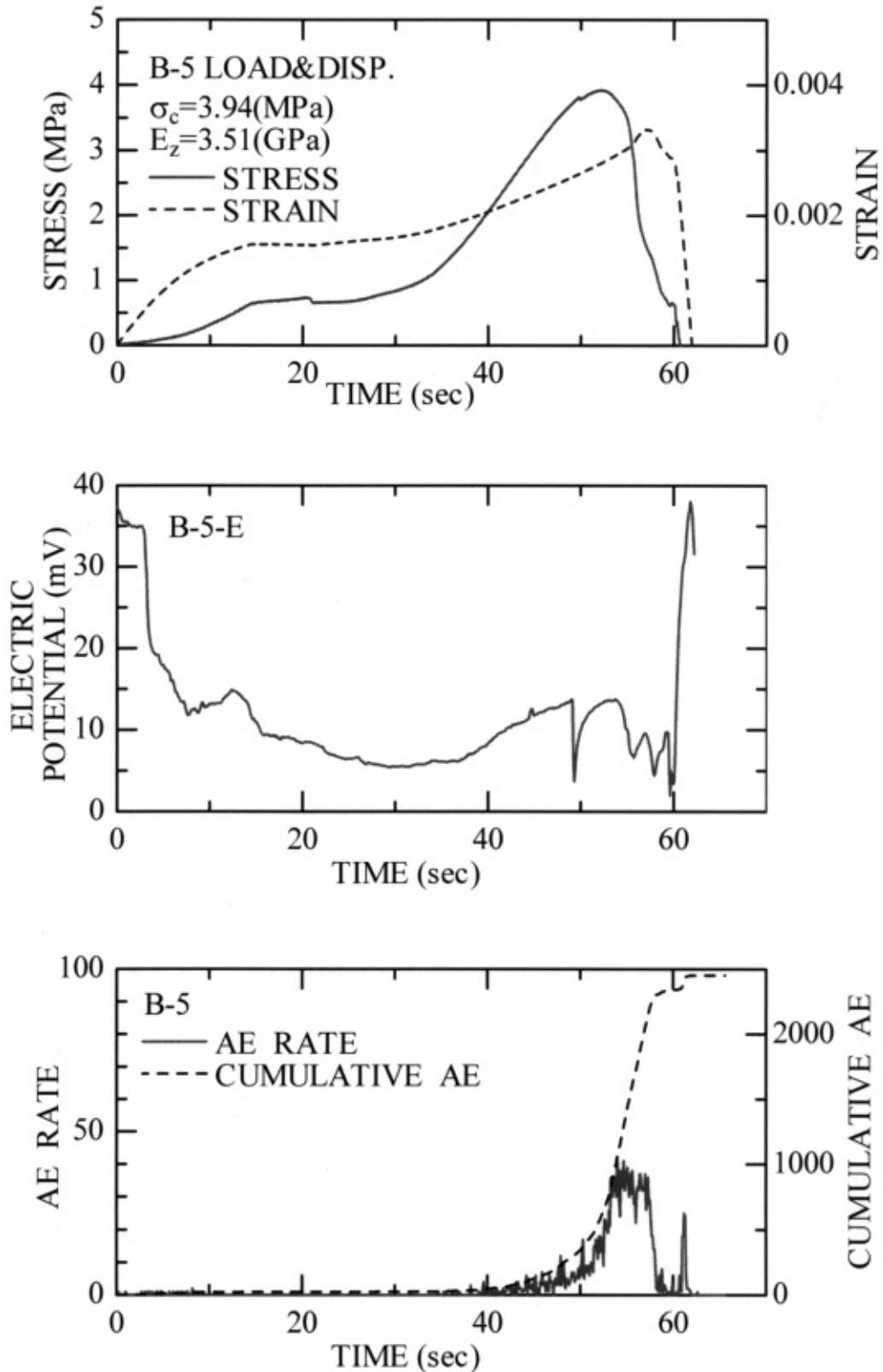
試験結果を Table 4 に示す。ポーラスコンクリートは普通のコンクリートに比べて、空隙が多数あることから、非破壊試験での評価は難しいと考えられていた。しかし、Table 4 に示したように空隙率が高い場合には他のすべてのデータが低く現れ、空隙率が低い場合には他のすべてのデータが高く現れることが確認された。よって、空隙率に対する他のデータの関係を把握することで、非破壊試験である縦波伝播試験（弾性波）や動弾性係数から、ポーラスコンクリートの性質を評価できるのではないかと考えられる。

3.2 荷重・変形・AE・自然電位

一軸圧縮過程における多重パラメータの応答から、空隙率の近い M と T のタイプの実験で非常に似た傾向が観察され、使用骨材などの材料による大きな違いを観察することは出来なかった。しかし、空隙率に対しては多重パラメータ応答の中で空隙率が低くなると破壊に至る過程で自然電位の変化が緩やかになる傾向が明確に観察された。以下に、空隙率が高い場合の B のタイプの供試体に対する実験結果と、空隙率が低い場合の M のタイプの供試体に対する実験結果を示す。初めに B のタイプの実験結果として Figure 2 の a) に応力とひずみ, b) に自然電位, c) に AE のデータをそれぞれ同じ時間軸に乗せた図を示す。実験開始から15秒ほどひずみの値に大きな変化が見られるが、これはコンクリートの供試体に荷重が一樣に載荷されるように一軸圧縮試験機が自動的に調整していることが原因である。この調整が終わった後、圧縮試験が本格的にスタートする。実験開始から50秒ほどで供試体に大きな縦亀裂が発生し、その後、全破壊に至る。自然電位の図を見ると実験開始当初に大きく変動しているが、これは供試体と平面電極との接触状況が大きく変化することが原因であ

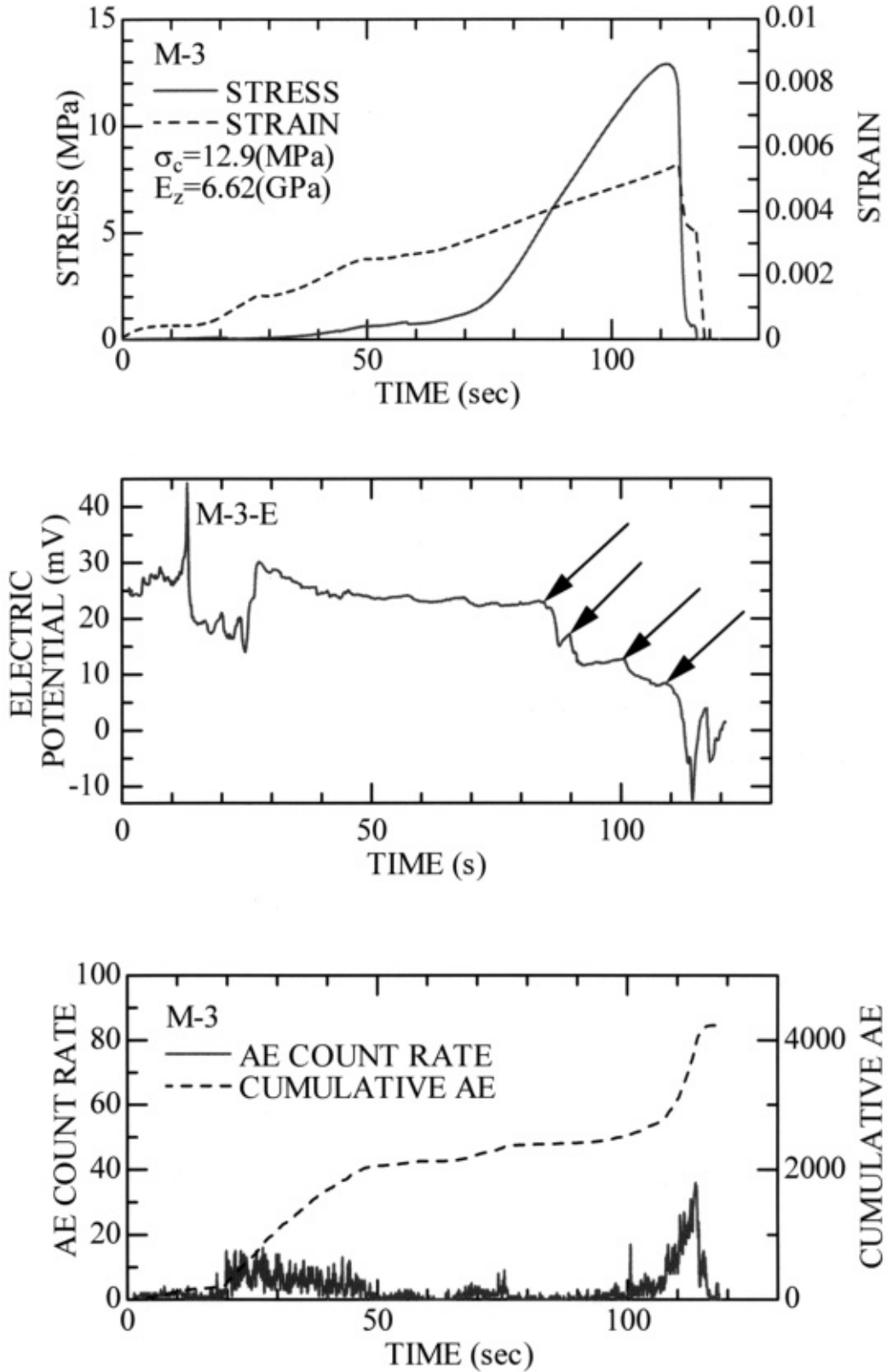
Table 4 Properties of concrete samples

	Macadam cement	Macadam mortar	Blast furnace slag	Converter slag
Unit mass of concrete (t/m ³)	2.10	2.03	1.83	2.25
Longitudinal wave velocity (km/sec)	4.83	4.49	3.67	4.18
Dynamic modulus of elasticity (×10 ⁴ N/mm ²)	2.31	1.82	0.99	1.96
Compressive strength (N/mm ²)	19.14	12.72	4.29	10.58
Porosity (%)	21.14	28.52	38.72	27.15



上 a) Stress and strain variation
 中 b) Electric potential variation
 下 c) AE rate and cumulative AE variation

Figure 2 Stress, Strain, Electric potential, AE rate and Cumulative AE variation of sample type-B



上 a) Stress and strain variation
 中 b) Electric potential variation
 下 c) AE rate and cumulative AE variation

Figure 3 Stress, Strain, Electric potential, AE rate and Cumulative AE variation of sample type-M

る。この変動は圧縮試験機の自動的な調整が終わるころには沈静化している。全破壊の前に発生した縦亀裂に対する応答は、縦方向のひずみの図からは反応が現れないが、自然電位には10(mV)ほどの変動が見られ、ほぼ同時にAE RATEにも明らかな反応が見受けられた。全破壊の直前にAEの急増点が見られることも特徴的である。空隙率が低いMのタイプの供試体に対するAEと自然電位の応答にも破壊前より何らかの兆候を示していることが観察された。この結果をFigure 3に示す。この場合にも縦方向のひずみの応答からは破壊の兆候を示す反応は見受けられない。BIENIAWSKI (1967)の示した岩石が脆性破壊に至るまでの様相は大きく次の3つのように分類できる。①圧縮強度の35%までは完全な弾性変形を示し、供試体に初めから存在している亀裂に進展は見られない。②35%を超えると縦方向のひずみは依然として線形的な変化を示すものの横方向のひずみは線形的な変化から離れ始める。この35%を超えたところから存在している亀裂に安定した進展が見られ始める。③80%を超えると縦方向のひずみも線形

的な変化から離れ始め、存在している亀裂の進展の様子も不安定になる。MのタイプではBのタイプと比べて緩やかであるものの、自然電位の応答には矢印で示した4回の大きな反応が見られた。初めの2つの反応はそれぞれ圧縮強度の42%と51%の時点で発生している。このときAEには明確な反応が見受けられないが、上記の②の状況に対応して自然電位には亀裂の進展に伴って変化する様子が観察される。このことは横方向のひずみの変化と並べるとより明確になるものと推測される。自然電位の3つ目の反応は圧縮強度の83%付近にて発生しAE RATEにも明確な反応が見られ、不安定な亀裂の進展と大きく関連しているものと考えられる。さらに、4回目の自然電位の反応は累積AEの変曲点と高い相関性が観察される。

3.3 荷重・変形・AE・比抵抗

計測項目を荷重・変形・AE・比抵抗とした場合の結果をFigure 4とFigure 5に示す。実験初期の供試体と平面電極の接触状況の変化による比抵抗の値の変動は、すべて

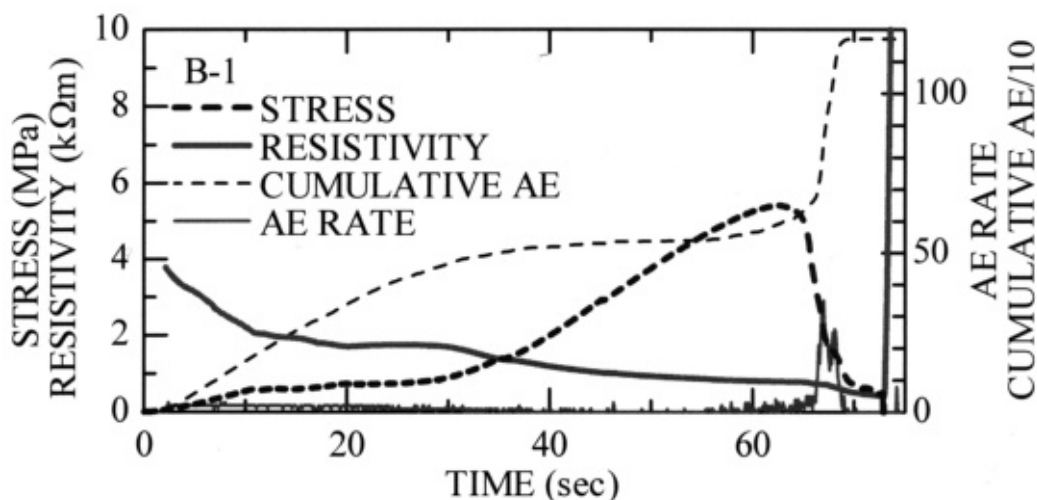


Figure 4 Stress, resistivity, AE rate and Cumulative AE variation of sample type-B

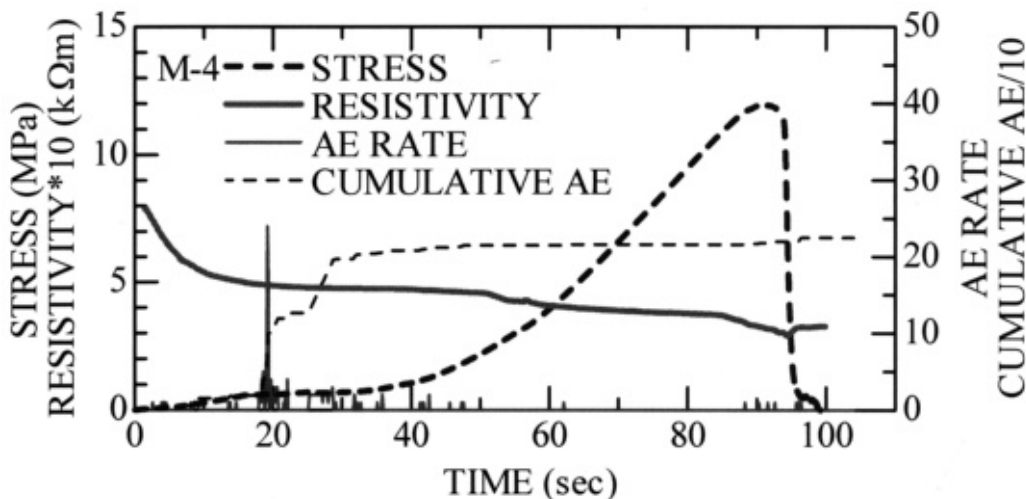


Figure 5 Stress, resistivity, AE rate and Cumulative AE variation of sample type-M

の実験で大きく下がることが観察された。安定した後、Figure 4に見られるように圧縮試験中の比抵抗の変化はいずれの結果も値が小さくなっていく傾向が観察された。また Figure 5 のように圧縮強度の91%付近から変化を伴う試験結果も存在した。このような結果が現れる原因は、比抵抗を計測している場合にも不安定な亀裂発生に伴い自然電位が発生し、これが計測している電位差に影響を与えているものと考えられる。このことは比抵抗の計測による破壊予測の可能性を示唆しているものと推測される。

4. まとめ

岩石に対する自然電位と AE の応答に関して、供試体の破壊前に明確な反応が見られることは Aydan et. al. (2003) に示されているが、同様の現象がポーラスコンクリートでも観察された。ポーラスコンクリートを使用した護岸などの非常に広範囲の構造物を維持管理する場合には、ある一定間隔で均等に計測する場合と弱い部分を集中的に計測する場合、さらに、この2つを組み合わせる場合が考えられる。今回の実験結果より、空隙率が高く弱い供試体から、そして、空隙率が低く強い供試体からも自然電位や AE に破壊前の明確な変化が見受けられた。自然電位については空隙率が少なくなると破壊に至るまでの変化が緩やかになる傾向も観察された。これらの実験結果は、従来のコンクリートと比べて均質な構造を作りにくいポーラスコンクリートを用いた広範囲の構造物での、リアルタイムに維持し管理する手法の開発に向けた基礎的データとなり得るものと考えられる。

5. 今後の課題

構造物の維持管理を行う場合にはクリープ試験の結果も重要であるものと考えられる。よって、同様の材料を用いたクリープ試験を多重パラメータ計測にて行う必要性が高い。

自然電位は様々な要因によって変化する可能性がある。特に試験を行うサンプルに水分が含まれている場合には、その水分の移動によっても自然電位が発生する (Aydan 2002)。よって、自然電位のデータを評価する場合には、供試体内部に含まれる水分の条件を変えた実験も必要であるものと考えられる。

今回行った計測項目は荷重・変形・AE・自然電位・比抵抗である。このうち、変形計測は円柱供試体の軸方向の

みを計測したが、3.2節に示したように半径方向の変形量を計測することも必要である。また、その他の項目として加速度・熱の計測も行うことが比較的容易に可能である。さらに、今回の実験を通して弾性波速度にも興味を湧き、多重パラメータの項目の中に弾性波速度も加えたいと感じた。

今回の結果を現場で適用する場合には、小型で簡易な計測システムが要求されるものと考えられる。同様の実験を簡易な計測装置を用いて行う必要性も高い。

参考文献

- Aydan, Ö., T. Minato & M. Fukue (2001). An experimental study on the electrical potential of geomaterials during deformation and its implications in Geomechanics. *38th US Rock Mechanics Symposium, Washington*, Vol. 2, 1199-1206, 2001.
- Aydan, Ö., T. Ito, T. Akagi, H. Watanabe, H. Tano (2002). An experimental study on the electrical potential of geomaterials during fracturing and sliding. *Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering*, Seoul, Korea, July, 211-218.
- Aydan, Ö., N. Tokashiki, T. Ito, T. Akagi, R. Ulusay, H.A. Bilgin 2003. An experimental study on the electrical potential of non-piezoelectric geomaterials during fracturing and sliding, *9th ISRM Congress*, South Africa.
- Aydan, Ö., M. Daido, Y. Owada, N. Tokashik, K. Ohkubo (2004): The assessment of rock bursting in rock engineering structures with a particular emphasis on underground openings. *3rd Asian Rock Mechanics Symposium (3rd ARMS)*, Kyoto (in press).
- Aydan, Ö., M. Daido (2002): An experimental study on the seepage induced geo-electric potential in porous media. *J. of the School of Marine Science and Technology, Tokai University*, No.55, 53-66.
- Bieniawski, Z.T. (1967). Mechanism of brittle fracturing of rock. Part II- Fracturing in tension and under long term loading. *Int. J. Rock Mech. And Mining Sci.*, 4, 425-430.
- Ito, T., Aydan, Ö. and Akagi, T. (2003): Experiments on the electric potential of rocks during fracturing and sliding. *25th Rock Mechanics Symposium of Japan, Tokyo*.
- 大洞光央 (2004): 熱・応力・浸透・拡散場の連成問題に関する基礎的研究, 東海大学修士論文。

要 旨

植物や生物が生息可能な環境に配慮したポーラスコンクリートと呼ばれる新しい材料が開発されている。ポーラスコンクリートは大きく連続的な空隙を多く含むため、これを使用した構造物は従来のコンクリートを使用したものと比較して弱い。このため、構造物の維持管理には細心の注意を払う必要がある。しかし、ポーラスコンクリートは近年になって研究・施工が盛んに行われている為、このような構造物を維持管理するための適切な方法が未だ開発されていない。岩盤力学の分野では Aydan ら (2001, 2002, 2003, 2004) により AE (音) 計測や自然電位計測で成果が上げられており、本研究ではこの考えをポーラスコンクリートに適用した。

ポーラスコンクリートを使用した 1 軸圧縮試験を、応力・ひずみ・AE・自然電位の多重パラメータを自動計測により実施した。また、自然電位計測の代わりに直流定電流電源を使用した比抵抗計測も行った。さらに、コンクリート分野で一般に行なわれている、非破壊試験を行う事で、ポーラスコンクリート自体の特性についての検討も行った。これらの結果から、自然電位と AE の変化が供試体の破壊前に計測され、ポーラスコンクリートを使用した構造物での管理手法の開発に向けた基礎的データとなり得るものと考えられる。