

論文 セメントアスファルト乳剤複合体の三軸圧縮試験による 実験的研究

佐々木慎吾*¹・上田満*²・濱田純夫*³・村田秀一*⁴

要旨：セメント、アスファルト乳剤、砂の三成分よりなるセメントアスファルト乳剤複合体に三軸圧縮試験を行い、Mohrの応力円群を描くと破壊包絡線が右下がりとなる複合体が存在した。これは側圧が一軸圧縮強度以下の場合の現象で、それ以上の側圧では右上がりの物性に変化している。これらの要因を究明するため材料特性を種々に変化させた三軸圧縮試験を行い検討したところ、セメントとアスファルト乳剤の質量比(以下ではC/Eと称す)や空隙の存在が大きな要因であることが判明した。

キーワード：C/E, 三軸圧縮試験, Mohrの応力円, 破壊包絡線, 空隙率

1. はじめに

アスファルト乳剤にセメント、砂を加えることによって得られるセメントアスファルト乳剤複合体(以下CA複合体と称す)を地中に於ける連続壁に適用すべく三軸圧縮試験等[1、2]を行い、Mohrの応力円群を描くとその破壊包絡が右下がり、すなわち内部摩擦角が負となる複合体の存在が確認された。このようなMohr-Coulombの破壊理論が適用され難い材料には発泡スチロール、軽量気泡コンクリート等[3~5]が存在するが、これらの一般的な物理特性として空隙率が高いこと、骨材最大寸法に比較して空隙の直径が大きいこと等が議論されている。発泡スチロール等は材料の物性および力学的な特性を連続的に変化させることが困難な材料であるが、CA複合体はC/E(セメントとアスファルト乳剤の質量比)を変化させることによりその力学的な特性を弾性領域から粘弾性領域さらには粘性流動領域まで変化させることができる。そこで本研究では破壊包絡線が負となる要因を究明するため、C/Eを広範囲に変化させたCA複合体に対し予備圧縮等の諸条件を施した三軸圧縮試験を行い、細孔径分布測定等も同時に行った。また破壊理論的に究明するため、Muskhelishviliの提案式[6、7]を用いて複合体の破壊理論についても検討した。

2. 実験概要

使用材料は普通ポルトランドセメント(比重：3.15、粉末度：3280cm²/g)、ノニオン系のセメント混合用乳剤(YON乳剤→濃度：57.9% 蒸発残留分の針入度：211)、豊浦標準砂(比重：2.63)の三成分で、配合は図-1に示す三角座標の格

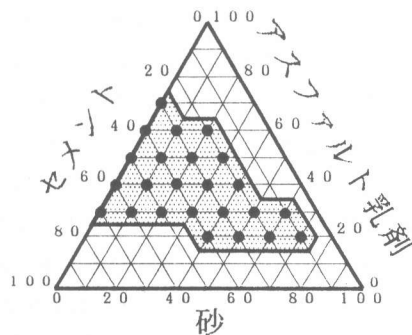


図-1 三角座標による配合分布図

* 1 山口大学大学院 工学研究科社会建設工学専攻 (正会員)
 * 2 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (正会員)
 * 3 山口大学教授 工学部社会建設工学科、Ph. D. (正会員)
 * 4 山口大学教授 工学部社会建設工学科、工博

子点上24配合とした。セメント、アスファルト乳剤、砂の質量配合比が3:2:5のCA複合体は325等と以下では称する。供試体は $\Phi 5 \times 10$ cmの円柱供試体で打設後24時間は温度20℃、湿度80%以上の恒温槽にて型枠のまま養生し、脱型後は温度20℃の室内にて28日間養生した。一軸圧縮試験は万能圧縮試験機(最大荷重5tf、ひずみ制御方式)を用い、ひずみ速度一定(3mm/min)のもとで行った。三軸圧縮試験は供試体にゴムスリーブを装着し、真空ポンプの圧力により三軸室内に水を送り込んで側圧をかけ、万能圧縮試験機によりひずみ速度一定(3mm/min)のもとで軸圧をかけた。側圧の大きさは一軸圧縮強度以上及び以下の各々に対し三段階ずつ変化させた。予備圧縮試験は材齢7日の供試体に対し一軸圧縮強度の0.5、1.0、1.5倍の圧力で2時間等方圧縮し、材齢28で三軸圧縮試験を行った。いずれの試験も室温20℃の下で行った。また、一軸及び三軸圧縮試験終了後の供試体に対しポアサイザ9320システムを用いて水銀の圧入及び退出から試料中の細孔径(空隙)別の容積分布を測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 破壊応力の定義

図-2に配合550の軸差応力-ひずみ関係を示す。この図より軸差応力は側圧が一軸圧縮強度内では極値が存在し、一軸圧縮強度外では単調増加する傾向にあることがわかる。従って一軸圧縮強度内外の側圧による破壊応力の定義が困難なものと思われる。そこで傾きの変換点における応力を破壊応力とした場合とひずみが0.05に於ける応力を破壊応力とした場合についてMohrの応力円群の傾向を検討した結果両者に大差はなかった。よって、本研究では傾きの変換点を破壊応力とした。

3.2 Mohrの応力円群の傾向

破壊包絡線の傾き、すなわち内部摩擦角は試験結果をもとに配合ごとにMohrの応力円を描き、最小自乗法により求めた。一軸圧縮強度以下の大きさの側圧の場合の内部摩擦角を ϕ 、粘着力をCとし、一軸圧縮強度以上の大きさの側圧の場合を同様に ϕ' 、 C' と定義した。Mohrの応力円群はCA複合体の配合によって図-3に示すような3タイプに分類された。破壊包絡線の傾きが正の場合(aタイプ)、一軸圧縮強度内は山型で強度外は正の場合(bタイプ)、一軸圧縮強度内は負で強度外は正の場合(cタイプ)である。aタイプは一般によくみられる土、セメントコンクリート等と同じ破壊現象であり、一軸強度内外の側圧によるMohrの応力円群に連続性がみられる。しかし、bタイプ及びcタイプは一軸圧縮強度を境にそれ以下と以上の側圧に対するMohrの応力円群に連続性が見られない。

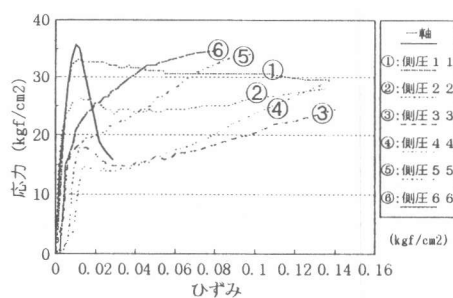


図-2 550の軸差応力-ひずみ関係

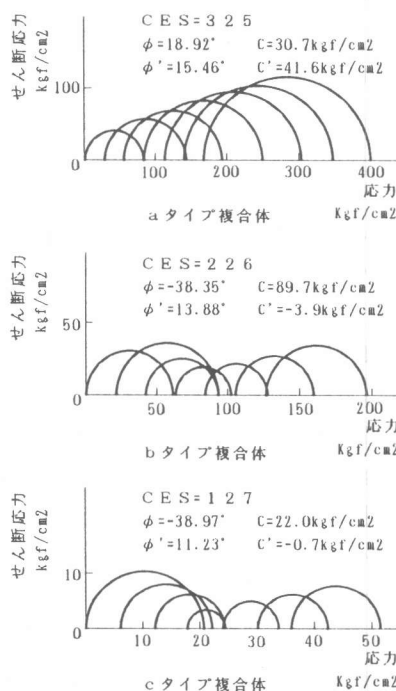


図-3 Mohrの応力円群の3タイプ

また、一軸圧縮強度外の破壊包絡線から粘着力を求めると負となる複合体も存在する。このような現象は従来の破壊現象からすれば説明のつかないものとなる。このようなCA複合体には粘着力Cや内部摩擦角 ϕ という表現は適切でないと思われるが以下では敢えてそう呼ぶことにする。

3. 3 CA複合体のC/E別特性

図-4に示すようにC/Eと一軸圧縮強度の間には正の相関がありC/Eが1.0増すごとに一軸圧縮強度が約50kgf/cm²上昇することが分かる。図-5にC/Eと空隙率の関係を示す。空隙率は試験直前の供試体の密度と配合比、及び材料の比重より算定した。この図より空隙率はC/Eが1.0で極大値をとる正規分布的な様相を呈す。これより外力に抵抗する要素として粒子間の噛み合わせはあまり期待できず、どちらかという粒子相互間の結合力によって外力に抵抗すると考えられる。また図-6に示すC/Eと内部摩擦角の関係では、C/Eが大では内部摩擦角は正の値を有し、C/Eの減少に伴って正から負の値へ変化し、C/Eが1.0付近で負の極値をとり、更にC/Eの減少により内部摩擦角は0°に収束する傾向を示す。また、図-4～図-6を互いに比較すると次のような見解が得られる。側圧により体積は減少しようとするが密閉された空隙、残留水等により体積変化が妨げられる形となり、不連続な内部応力が生じ複合体中の粒子相互間の付着力が弱められ軸方向の応力が低下し軸差応力が小さくなると考えられる。即ち破壊包絡線が右上がりとなるものは空隙が少なく且つ一軸圧縮強度が大であり、密閉された空隙等による不連続な内部応力の影響をあまり受けず圧縮に対して強いセメント水和物のマトリックスを形成しているものと思われる。またC/Eが小さい配合では、一軸圧縮強度は小さいが空隙が少ないので内部の不連続応力の影響は小さく、CA複合体が粘性土的な力学性状を呈し、せん断応力は粘着力による影響が大であるものと思われる。C/Eが1.0付近では、一軸圧縮強度は大きい空隙率が極大で細孔直径も大であるため内部応力の影響を強く受け、セメント水和物のマトリックスが細孔周辺壁にて破壊しせん断抵抗が減少し、結果として内部摩擦角が負の極値を呈するものと考えられる。

3. 4 予備圧縮による影響

図-7に予備圧縮圧別のMohrの応力円群を示す。図より非圧縮時には破壊包絡線が右下がりとなる物性を有していた複合体に予備圧縮圧を増加させると内部摩擦角が負から正の値へ変化しているのが分かる。従って、破壊包絡線が右下がりとなるような物性を有するCA複合体ではそのセメント水和物のマトリックスが力学的に不安定な構造を持ち、予備圧縮圧の影響を多分に受けて空隙が大きく減少し内部組成が変化し、新たにセメント水和物とアスファルトの付着が向上して

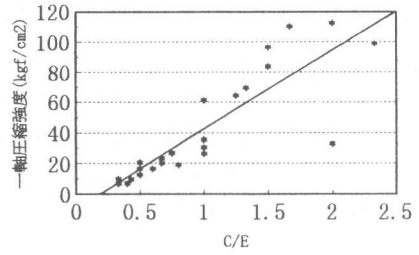


図-4 C/Eと一軸圧縮強度の相関性

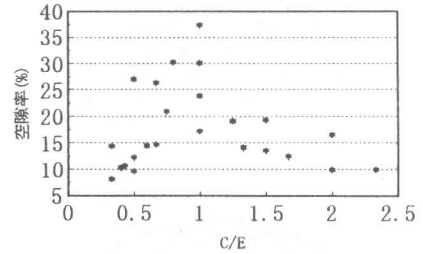


図-5 C/Eと空隙率の相関性

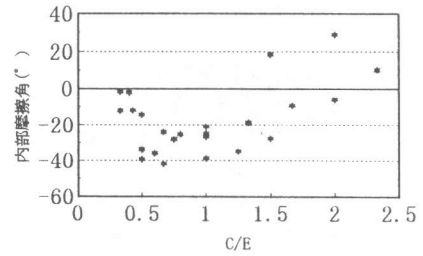


図-6 C/Eと内部摩擦角の相関性

複合体の結合力と粘着力のバランスが良くなるものと考えられる。等方圧縮による空隙の減少率を表した図-8から実際に等方圧縮により空隙が減少しているのが確認できる。また破壊包絡線の傾きの符号変換点を図-9に示す。図より本来破壊包絡線が右下がりとなるCA複合体は一軸圧縮強度に相当する予備圧縮圧で等方圧縮されると物性変化を呈することが分かる。b、cタイプCA複合体で一軸圧縮強度以上の側圧を受けると破壊包絡線の傾きが正に変化しているが、これと同様の効果があるためと考えられる。

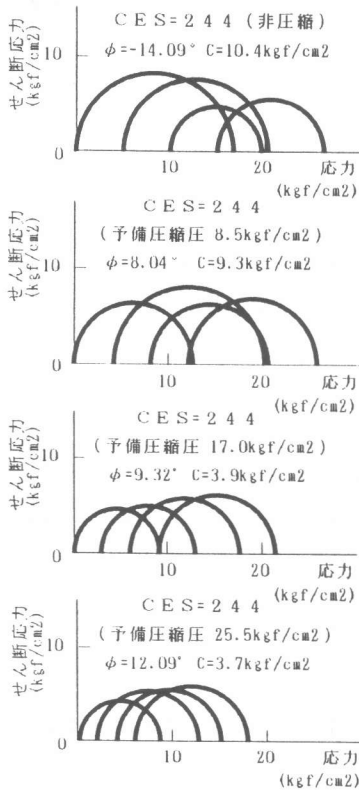


図-7 予備圧縮圧別のMohrの応力円群

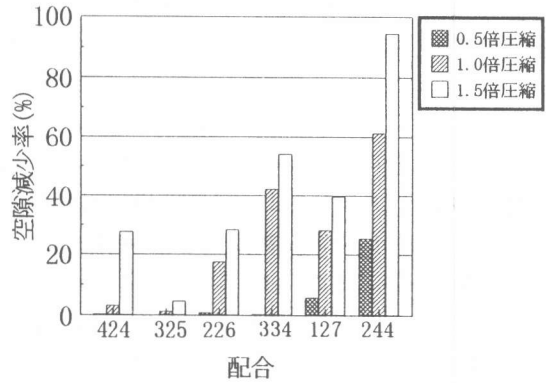


図-8 予備圧縮による空隙減少率

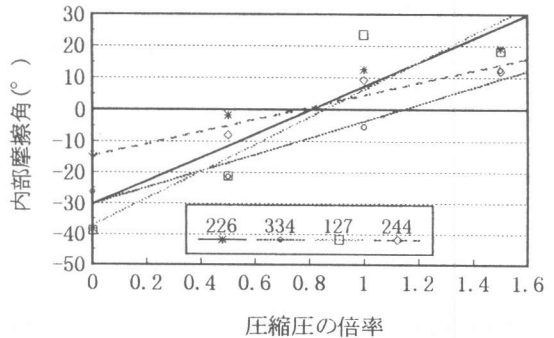


図-9 破壊包絡線の傾きの符号変換点

3.5 細孔径分布測定

図10に一軸圧縮試験終了後と三軸圧縮試験(一軸圧縮強度の2倍の側圧)後の細孔直径と累積細孔容積の関係を内部摩擦角が正(a)と負(b)の場合について示した。負のものは元来空隙が多いため一軸圧縮試験後

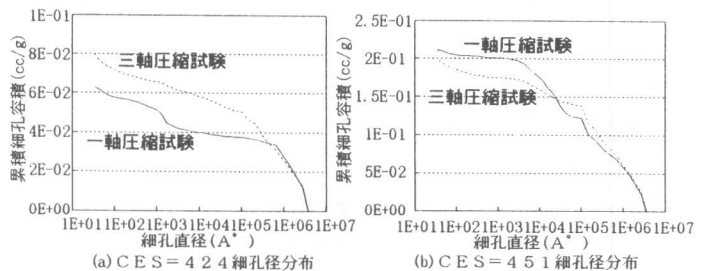


図-10 細孔径分布測定結果

より三軸圧縮試験後の方が全細孔容積(空隙)が実際に減少しているのがわかる。正のものは三軸

圧縮試験後の方が全細孔容積が多くなっているが、これは側圧により逆に小さな細孔が多数発生したためだと思われる。

4. 破壊形態による破壊包絡線の分類

Muskhelishvili[6、7]によると材料中の空隙が破壊崩落線の傾きに影響を与えるとしている。空隙を楕円孔とし図-11に示すような楕円孔の载荷軸方向壁の①が引張りにて破壊すると脆性破壊となり、破壊崩落線の傾きは正となる。

また载荷軸直角方向壁面②が圧縮によって破壊すれば塑性破壊となり破壊崩落線の傾きが負となるとしている。CA複合体は一軸圧縮強度内の側圧による破壊は脆性破壊に近いものであり、強度外は塑性破壊であるものと思われる。従ってCA複合体は脆性破壊、塑性破壊の中間的な破壊とみられその結果、破壊包絡線の傾きが負となることになる。Muskhelishviliの破壊理論を適用してCA複合体の破壊の形態について検討してみる。そこで壁面①、②に作用する壁面に平行な応力 σ_θ を提案式により示すと(1)、(2)式となる。

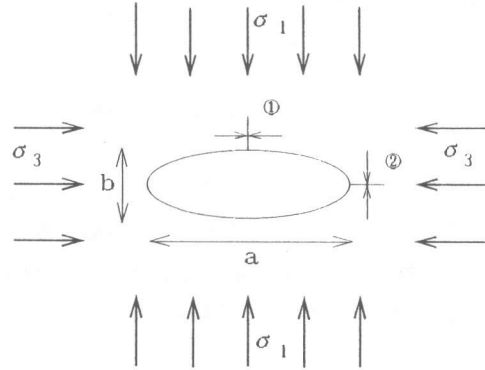


図-11 楕円孔の最大接線応力の発生分類

$$\textcircled{1} : \sigma_\theta = (2b/a + 1)\sigma_3 - \sigma_1 \quad (1)$$

$$\textcircled{2} : \sigma_\theta = (2a/b + 1)\sigma_1 - \sigma_3 \quad (2)$$

a: 楕円孔の長軸、b: 楕円孔の短軸、 σ_θ : 壁面の接線応力、 σ_1 : 载荷軸方向応力、 σ_3 : 側圧

また破壊崩落線の方程式は破壊包絡線の傾きが正の場合、負の場合にたいして(3)、(4)式となることが提案されている。Tは楕円孔周辺の引張強度で、Kは圧縮強度である。

$$\textcircled{1} : \tau = \frac{b/a\sigma + T/2}{\sqrt{2b/a + 1}} \quad (3)$$

$$\textcircled{2} : \tau = \frac{a/b\sigma + K/2}{\sqrt{2a/b + 1}} \quad (4)$$

τ : せん断応力、T: 楕円孔周辺の引張強度、K: 楕円孔周辺の圧縮強度

またTとKは粘着力をCとすると次式から得られる。

$$\textcircled{1} : T = 2C\sqrt{2b/a + 1} \quad (5)$$

$$\textcircled{2} : K = 2C\sqrt{2a/b + 1} \quad (6)$$

T、Kの値を各配合について求め、一軸圧縮強度との関係を描くと図-12となる。Tは一軸圧縮強度に等しく、Kは5倍の値となっているのがわかる。次に式(1)、(2)を用い側圧 σ_3 が一軸圧縮強度以下の範囲に於いて σ_1 と σ_θ の関係を求め、図-13に内部摩擦角が負となる代表的な配合である127についてその結果を示した。この図より壁面①に作用する σ_θ が引張強度Tに達する前

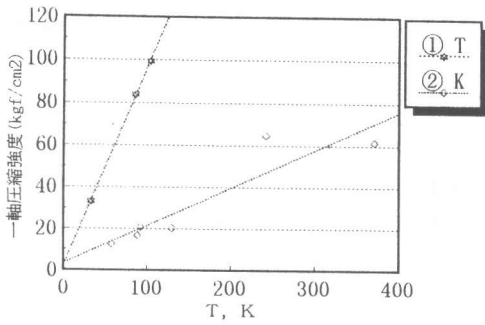


図-12 一軸圧縮強度とT, Kの関係

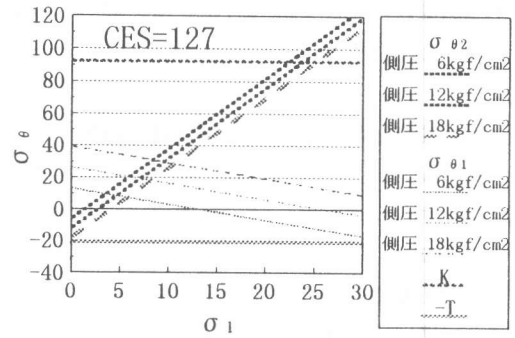


図-13 一軸圧縮強度と最大接線応力の関係

に、壁面 ②に於いて σ_{e2} が圧縮強度Kに達し破壊を起こすことが確認できる。即ち破壊包絡線の傾きは負となることが推察される。CA複合体の場合セメントコンクリートなどに比べ圧縮強度に比較して引張強度が大である(配合によっては引張強度が圧縮強度に近い値を示すCA複合体も存在する)こともその要因と思われる。

5. まとめ

- 1) 一軸圧縮強度とC/Eは比例関係にある。
- 2) CA複合体の破壊包絡線の傾きはC/Eに依存し、負の勾配が極大を有するのはC/Eが1.0の場合でその付近の配合では破壊包絡線の傾きは完全に右下がりとなる。
- 3) 負の破壊包絡線を有するCA複合体は一軸圧縮強度以上の圧力で圧縮されると空隙が減少し、正の破壊包絡線を有す性状に変化する。
- 4) 対象とした配合のCA複合体は塑性破壊に近い破壊をするものと思われる。

謝辞: 本研究の遂行において材料の提供及びご指導を頂いたニチレキ(株)、住友大阪セメント(株)の関係者各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 星原隆士、上田満、浜田純夫、黒川卓郎、安久憲一：セメントアスファルト乳剤複合体の力学特性、土木学会第45回中国四国支部学術講演会講演概要集、pp. 668-669、1993
- [2] 祇園和男、上田満、浜田純夫、黒川卓郎、安久憲一：セメントアスファルト乳剤複合体の乾燥収縮および曲げ特性、土木学会第46回中国四国支部学術講演会講演概要集、pp. 662-663、1994
- [3] 浜田英次、山内豊聡：軽量盛土材としての発泡スチロールの力学特性、土と基礎、Vol. 37、No2, pp. 13-18、1989
- [4] 古谷俊明：軽量盛土材としての気泡モルタル、土と基礎、Vol. 37、No2, pp. 73-77、1989
- [5] 峯岸邦夫、久保哲也：発泡ビーズ混合軽量化土の力学特性、第31回地盤工学研究発表会講演集、pp. 2511-2512、1996
- [6] Dr. S. URIEL ROMERO, B. BRAVO GOMEZ : Brittle and Plastic Failure of Rocks
- [7] SAVIN G. N, MUSKHELISHVILI : Stress Concentration Around Holes, Pergamon Press, 1961