

論文 使用骨材, 及び配合がセメント・アスファルトモルタルの三軸 圧縮強度特性に与える影響

梅田 隆全*¹・藤本 晋矢*²・丸山 賢二*³・上田 満*⁴

要旨: セメントとアスファルト乳剤を混合す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は使用材料、配合によってその三軸圧縮特性に顕著な変化をもたらす。以前の筆者の研究¹⁾により、骨材に標準砂を用いたセメント・アスファルトモルタルの三軸試験の結果、圧縮強度以内の側圧による破壊包絡線の傾きが負になるという結果が得られた。そこで本研究では、圧縮強度以内の側圧にても破壊包絡線の傾きが正となるセメント・アスファルトモルタルの配合、使用骨材を求めることである。さらにセメント・アスファルトモルタルの破壊形態の検証も合わせて行った。

キーワード: 複合体, アスファルト乳剤, モール円, 砕砂, 塑性破壊

1. はじめに

セメント・アスファルトモルタル（以下では、単にモルタルと称す）において骨材を標準砂とした場合、その三軸圧縮試験結果より得られるモールの破壊包絡線の傾きが負となるものが存在した。¹⁾拘束圧の増加によって一時的にはあっても、軸方向圧縮強度が低下することは材料特性としてけっして良い材料とはいえない。特に、比較的浅い地下に遮水壁として用いる場合等においては周辺地盤からの拘束圧は小さいものである。この小側圧における煎断強度の低下という欠点を補うため、まず最初に、標準砂を粒度範囲の比較的広い海砂に変えた場合の複合体の三軸試験を行った。次に、目潰し材としてアスコンに用いられるフィラーを骨材代替に用いたモルタルの三軸試験を行った。次に、経済的な面を考え、粒径の多少大きい砕砂を複合体中に大量に混合することを次の手段として行った。砕砂の混合割合を複合体の全体積に対して50%混合させると、一軸強度以内の側圧にても破壊包絡線の傾きが正になることが、すべての配合について確認された。この配合にお

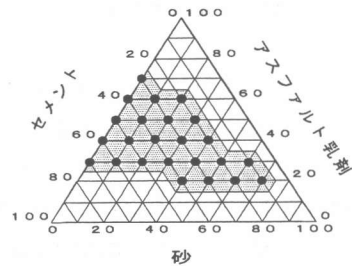


図-1 三角座標による配合分布図

る骨材としての砕砂、海砂の合成粒度は海砂の場合に比べ連続的な粒度となり複合体の密度も増加していた。

2. 実験概要

配合は図-1に示す速硬性セメント（比重：3.09、粉末度：6280 cm²/g）、ノニオン系のセメント混合用乳剤（蒸発残留分濃度：57.9%、蒸発残留分の針入度：211）、海砂（比重：2.62、粒径：0.6mm以下）の三成分により構成される三角座標によって決定し、セメント及びアスファルト乳剤の配合が0のものを除く格子点上24配合

*1 山口大学大学院 理工学研究科 (正会員)
 *2 (株式会社) ピー・エス
 *3 山口県建設技術センター 業務課長
 *4 山口大学工学部 社会建設工学科 (正会員)

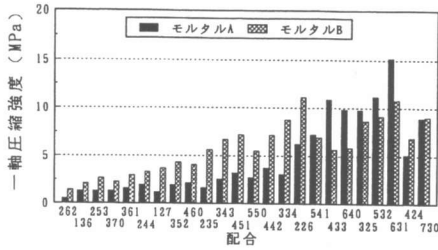


図-2 配合別一軸圧縮強度

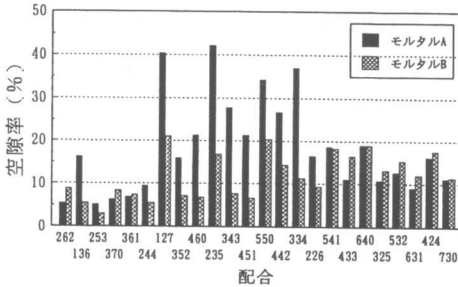


図-3 配合別空隙率

(10%ピッチ)とした。試験方法は、 $\phi 5 \times 10$ cmの円柱供試体を打込後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を行った。脱型後、供試体は温度20℃の室内にて27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て三軸室の中にセットし、三軸室内に水を送り込んで側圧をかけ万能試験機によりひずみ速度一定のもとで軸圧をかけた。ひずみ速度は3mm/minとした。割裂強度はJISA1113に準拠して求めた。¹⁾

3. 骨材に海砂を用いたモルタルの破壊包絡線
普通ポルトランドセメント、標準砂を用いたモルタルはモルタルA、速硬性セメント、海砂を用いたモルタルはモルタルBとする。用いたアスファルト乳剤は両者とも同一とした。一軸強度について各配合別に比較したものが図-2である。なお図中の262とはセメント、アスファルト乳剤、砂の混合割合が2:6:2であることを示し以下ではすべてこのように略記する。両モルタルともにC/E(セメントとアスファルト乳剤との質量比で

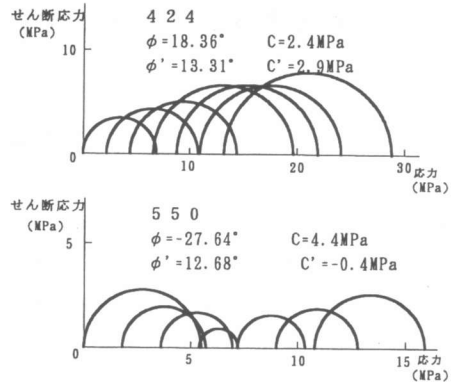


図-4 Mohrの応力円群の代表(モルタルB)

あり以下ではすべてこのように略記する)が1.00以下の配合においてはC/Eが大になるに従って強度の増加が認められる。又、この範囲内の配合ではモルタルBの圧縮強度がモルタルAのものより大となり配合によっては2倍程度も大となるものが存在した。割裂強度に関しても両モルタルについて同様な傾向がみられる。両モルタルの空隙率の比較を行ったものを図-3に示す。モルタルBの空隙率はモルタルAに比べC/Eが1.00付近の配合において小さいものとなった。モルタルAの場合、空隙率が高く破壊包絡線の傾きが負の大きい値となるのは主としてC/E=1.00付近における配合のものであった。そこで、Mohr円群の分布をモルタルBについて示したものが図-4である。破壊包絡線の傾きが正の場合と負の場合の例を両図に示した。CA424モルタルの破壊包絡線の傾きは両モルタルともに正であるが、モルタルBの粘着力が0.7mpa程度大となり早強セメントの効果がみられる。

4. フィラーを砂の代替として用いた複合体の破壊包絡線

海砂の代替にフィラー(粒径:0.08mm以下、比重:2.60)を骨材として用いた複合体の三軸試験を行った。それらの結果を図-5に示す。三軸試験に際して、側圧は一軸強度以内の側圧にて行った。又、側圧は一軸強度内で5種変えて行った。図に

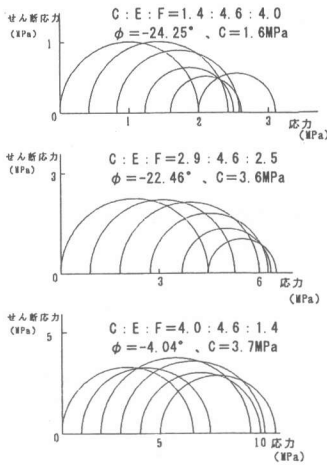


図-5 フィラーを用いたモルタルのMohr円

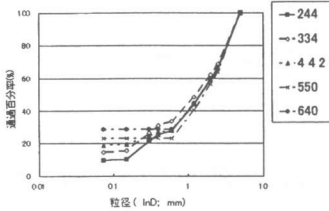


図-8 骨材の粒度分布 (複合体B50)

示すように、Mohr円群は山型になっており、破壊包絡線の傾きを最小二乗法で求めると相関係数は小さいものとなった。スラリー状を示すモルタルに限定するためアスファルト乳剤の混合割合は一定で、セメントとフィラーの混合割合を変化させた配合3種にて実験を行った。図を見ると、フィラーをセメントで置き換えることによる強度の増加は顕著になっている。又Mohr円群が一軸強度以上の、ある一定値付近に収束する傾向が存在する。フィラーを骨材とする場合、標準砂、海砂を骨材に用いた場合よりも材料が緻密で均一な材料となりやすい。このような傾向は標準砂、海砂を全く含まないペーストタイプモルタルA,Bにもみられた。

5. 骨材に海砂、砕砂の両者を用いた複合体のMohr円

前述モルタルBに砕砂(粒径:5~0.6mm,

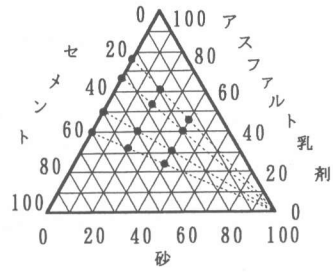


図-6 三角座標による配合

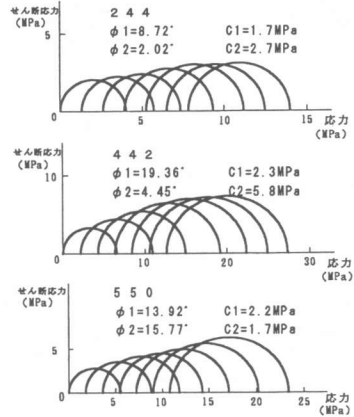


図-7 海砂、砕砂を用いた複合体のMohr円

比重:2.60)を体積割合で50%混合した複合体に対して三軸試験を行った。砕砂を除くモルタルの配合決定法に際して図-6に示す12配合とした。以下では速硬性セメントを用いた複合体をB50、普通ポルトランドセメントを用いた複合体をC50と区別した。

(1) 三軸試験結果

試験結果を図-7に示す。244、442配合の結果はB50、550の結果は複合体C50についてのものである。これらの配合においてはモルタルA,Bともに破壊包絡線の傾きは正であった。いずれのMohr円群においても破壊包絡線の不連続性はみられない。他の配合についても同様な結果となった。この主たる原因は空隙率の低下にあり、砕砂を混合することにより海砂と砕砂の合成粒度がモルタルの場合に比べ最密構造を得ることが出来る粒度分布に近くなったためと思われる。

(2) 海砂、砕砂両者の合成粒度等

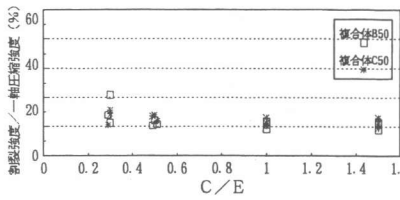


図-9 割裂強度／一軸圧縮強度関係

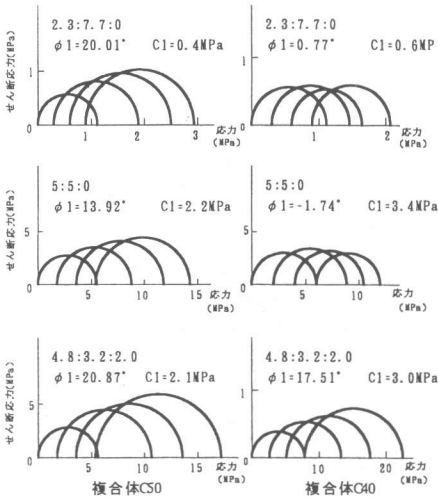


図-10 Mohrの応力円群の砕砂の混合割合による影響

一般に、粒度分布の良い材料は空隙率が小さく、外力に対する煎断抵抗も大であるものと思われる。そこでモルタルとCA複合体の粒度分布を示したものが図-8である。海砂の混合割合によって、多少の差はあるもののCA複合体の粒度分布は最大粒径5mm以下の比較的連続的な粒度分布になっている。海砂も標準砂に比べれば粒度範囲は広いが最大寸法が小さい。図-9はCA複合体の一軸強度に対する割裂強度の割合をC/Eとの関係で示したものである。2種複合体の一軸強度、割裂強度の絶対値に差はあるもののこの両者の強度比にはほとんど差が認められない。

6. 砕砂の混合割合が破壊包絡線の傾きに与える影響

砕砂の混合割合が複合体の破壊包絡線に与える影響を検討するために砕砂の混合割合を変えた

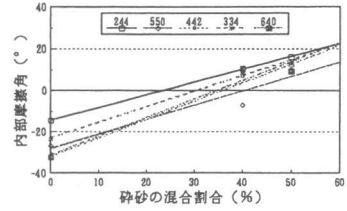


図-11 内部摩擦角の符号変換点

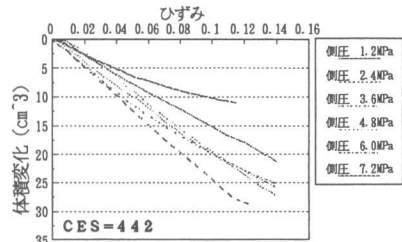


図-12 三軸試験過程における体積変化

複合体の三軸試験を行った。使用セメントは普通ポルトランドセメントとし、加えた側圧は一軸強度以内の側圧3種とした。配合別にMohr円群の変化を示したものを図-10に示す。C50は砕砂を体積割合で50%、C40は40%混合させた複合体とした。配合が550、即ちC/Eが1.00を境に破壊包絡線の傾きが砕砂の混合割合が少なくなるに従って小さくなり、配合によっては破壊包絡線の傾きが負になるものも存在した。破壊包絡線の傾きを内部摩擦角と仮定しこの値を砕砂の混合割合との関係を図-11に示した。配合によって内部摩擦角が正となる砕砂混合率が異なるが40%前後がその限界値であると思われる。

7. 三軸試験による体積変化

三軸試験過程における体積変化の結果を図-12に示す。図は標準砂を用いたモルタルの例を示した。同図においてモルタルの体積変化は軸ひずみが大になるに従って大となる。特記すべきことは破壊包絡線の傾きが負のモルタルにおいては側圧増大に伴い軸ひずみ増大による体積減少割合は極値を示し、正の傾きを持つモルタルではその値は一定値に収束する。体積減少量と破壊包絡線の傾きとの比較を定量的に行うため体積減少比を次のように仮定する。即ち、図-13において載荷初期

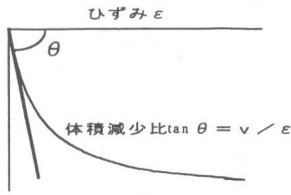


図-13 体積減少比の定義

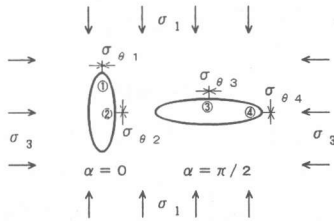


図-15 最大接線応力の発生分類

における体積減少と軸ひずみとの比として体積減少比を定義する。但し縦軸の体積減少は供試体全体積に対する体積減少比として表示する。従って体積減少比は次のようになろう。

$$\text{体積減少比} = \tan \theta = \delta v / \delta \varepsilon \dots (1)$$

図-14は破壊包絡線の傾きが正の場合と負の場合の比較を容易にするためモルタル部分の配合が同一なものについて体積減少比を示したものである。体積減少比を求めるにあたって側圧は一軸強度に相当する側圧の場合とした。砕砂を混合した場合、体積減少比は小さくなる。体積減少比は載荷初期における体積減少割合の比較が可能であるが、配合による差はあるもののCA複合体はモルタルに比べ載荷初期から体積減少が小さいことが認められる。

8. 破壊形態の検証

Muskhelishvili²⁾によると図-15に示す楕円細孔の周辺壁①が引張によって破壊した場合を脆性破壊とし、この脆性破壊による破壊包絡線は以下のような式で表せるとしている。

$$\tau = (b \sigma / a + T / 2) / \sqrt{2b/a + 1} \dots (2)$$

但し、 τ : せん断力, σ : 応力

a : 楕円孔の長軸/2

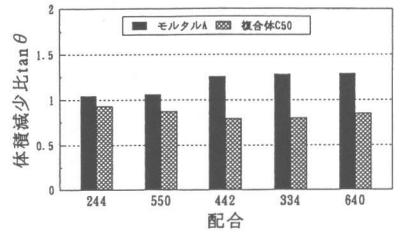


図-14 配合別体積減少比tan θの比較

b : 楕円孔の短軸/2

T : 細孔周辺壁の引張強度

又、彼らによると塑性破壊は周辺壁②が圧縮によって破壊した場合に相当しこの場合、破壊包絡線の方程式は同様に以下のようになるとしている。

$$\tau = (-a \sigma / b + K / 2) / \sqrt{2a/b + 1} \dots (3)$$

複合体に三軸的に応力が作用した場合、細孔の周辺壁①、②に作用する応力 σ_3 、 σ_4 は以下のようになる。

$$\sigma_3 = (2b/a + 1) \sigma_2 - \sigma_1 \dots (4)$$

$$\sigma_4 = (2a/b + 1) \sigma_1 - \sigma_2 \dots (5)$$

但し、 σ_1 : 軸圧, σ_2 : 側圧

一定側圧 σ_2 を作用させ、軸圧 σ_1 を増加させる三軸試験においては、式(4)、(5)に相当する応力が細孔周辺壁に作用する。この載荷仮定において σ_3 、 σ_4 が複合体の圧縮強度または引張強度を超えた場合に破壊となる。複合体の楕円細孔の寸法は破壊包絡線の傾き ϕ から以下の式によって推定できる。¹⁾

$$b / a = 1 / (\tan \phi (\tan \phi - \sqrt{\tan^2 \phi + 1})) \dots (6)$$

(1) モルタルの破壊

破壊形態の検証を行うため具体的な例として配合550の場合を検討する。CA550モルタルの場合、一軸強度内側圧による破壊包絡線の傾き、仮定の粘着力は -28° 、 4.43Mpa 、一軸強度以上側圧の場合同様に 13° 、 -0.42Mpa 、空隙を含んだモルタルの圧縮強度は 5Mpa 、引張強度を割裂強度と仮定す

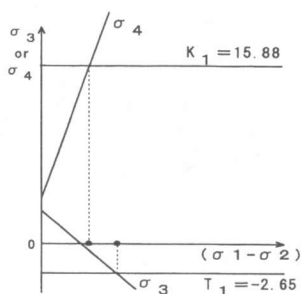


図-16 塑性破壊

れば0.8Mpaである。従って圧縮強度：引張強度＝6：1程度である。また、細孔の短軸と長軸の比は式(6)によって計算すれば0.886、破壊包絡線と式(3)を比較することにより空隙を除く細孔周辺壁材料の圧縮強度は15.88Mpaと推定される。従って、空隙を除く材料の引張強度を上記の圧縮強度と引張強度の比を参考にすれば2.65Mpaであろう。又、本研究の場合側圧を作用させる段階にて側圧のみならず、軸圧も側圧に相当する圧力が作用するので、式(4)、(5)を変形すれば以下ようになる。

$$\sigma_3 = -(\sigma_1 - \sigma_2) + (2b/a)\sigma_2 \quad (7)$$

$$\sigma_4 = (2a/b + 1)(\sigma_1 - \sigma_2) + (2a/b)\sigma_2 \quad (8)$$

従って、供試体に側圧 σ_2 を作用させその後、定側圧の元で一定ひずみ速度にて軸圧を作用させるので式(7)、(8)において $(\sigma_1 - \sigma_2)$ の軸差応力が次第に大となる。この過程において細孔上部が引張によって破壊するのが先か、細孔側壁部が圧縮によって破壊するのが先かによって脆性破壊、塑性破壊の判断が行える。このことを考慮して破壊形態を検討したものが図-16である。図は一軸強度内側圧による判定結果で $(\sigma_1 - \sigma_2)$ の増大によって σ_4 が圧縮強度に到達するのが早いことが実証され塑性破壊であるものと思われる。

(2) 複合体の破壊

砕砂50%混合の場合の破壊形態検証例を示す。モルタル部分の配合がCA550の場合を例示する破壊包絡線の傾きは15°粘着力は3.46Mpaである。空隙を含む複合体の圧縮強度は測定結果より

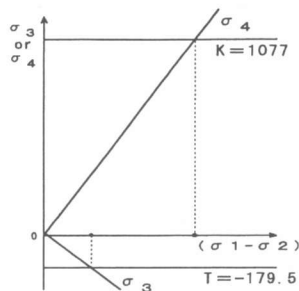


図-17 脆性破壊

9Mpa、引張強度は1.5Mpaである。上記と同様にして検討したものが図-17である。明らかに脆性破壊であろうことが確認できる。破壊形態検証例に示したCA550モルタルは砂を含まずペースタイプ複合体であるが、これに最大粒径5mmの砕砂を体積割合で50%混合することにより破壊形態が塑性破壊から脆性破壊に変化した。

9. まとめ

- 1) 砕砂を複合体全体積に対して50%混合させた複合体の破壊はモルタル部の配合にかかわらず脆性破壊となる。
- 2) 最大粒径0.6mm以下の砂を骨材に用いたモルタルの破壊はその配合によっては塑性破壊、脆性破壊の両破壊形態を示す。
- 3) フィラーを砂の代替に用いたモルタルのMohr円群の分布は、一軸強度以上の一定応力に収束する傾向が存在する。
- 4) 砕砂を混合することによって、三軸試験過程における複合体の体積減少比は小さくなり、モルタルに比べ体積減少量は10%程度小さくなる。

参考文献

- 1) 上田満、村田秀一、金田雅之、佐々木慎吾、濱田純夫、セメントアスファルト複合体の三軸圧縮特性に関する基礎研究、土木学会論文集、No. 585/V-38, pp. 137-152, 1998
- 2) Savin, GN: Stress Concentration Around Holes, Pergamon Press 1961