

論文 セメントアスファルト乳剤複合体の応力緩和特性に関する研究

大下仁至^{*1}・木地稔^{*2}・上田満^{*3}

要旨：セメントアスファルト乳剤複合体（セメント，アスファルト乳剤，骨材の三成分よりなる混合物）について，配合，ひずみ速度などの異なる諸条件下で一軸載荷方式の応力緩和試験を行い，その結果を比較検討することによって衝撃吸収材としての基本的物性を求めた。また，緩和弾性率をもとに粘弾性モデルを利用した逆解析によって粘弾性常数等を求め，各配合における緩和弾性率の推定を試みた。その結果，セメントアスファルト乳剤複合体の応力緩和特性は C/E（セメントとアスファルト乳剤の質量比），ひずみ速度，骨材量，使用材料等に左右されることが明らかになった。

キーワード：CA複合体，C/E，応力緩和，緩和弾性率，粘弾性モデル

1. はじめに

アスファルトは一定の荷重がかかると時間とともに変形し，また一定変形を与えた後その変形を保つと内部に発生した応力をしだいに吸収する。これらの現象はクリープ又は応力緩和現象と呼ばれ，アスファルトのような粘弾性物質特有の性質である。このような物性により，アスファルトは衝撃吸収材として有効であるとされているが，感温性が高く温度上昇（50℃以上）によって半液状化するという問題点を持つ。

セメントアスファルト乳剤複合体（セメント，アスファルト乳剤，骨材の三成分よりなる混合物）は筆者等の数年来の研究により^{1)~3)}，感温性が低く，C/E（セメントとアスファルト乳剤の質量配合比）を変化させることにより弾性領域から粘弾性領域までその力学的な特性を変化させることができる。よって，セメントアスファルト乳剤複合体（以下 CA 複合体と称す）は一部ではすでに利用されているように，振動抑制・騒音低減のために新幹線や地下鉄のスラブ軌道と基礎との間に設置する^{4)~6)}，トンネルの裏込めに適用して免震効果を期待するとともに

に地盤との一体化を図ること等⁷⁾，諸条件下で広範囲にわたって適用できる可能性を持つ。

一般的に前述のような粘弾性的な性質を求めるための試験には，一定の荷重を載荷した状態で時間とともに増大するひずみを測定するクリープ試験と，一定の変形を与えた状態で減少応力を測定する応力緩和試験がある。本研究では粘弾性による衝撃吸収効果に主眼を置き検討しようとするものであるため，より直接的な方法として応力緩和試験を行った。従って，配合等の異なる諸条件下において応力緩和試験を行い，得られた結果を比較検討するとともに粘弾性モデルを用いて解析を行ったものである。

表-1 CA複合体の成分

CA複合体	A	B	C
セメント	普通ポルトランドセメント		
アスファルト乳剤	蒸発残留分の針入度 211		60/80
骨材	標準砂	砕砂，海砂	

*1山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻（正会員）

*2前田建設工業（株）（正会員）

*3山口大学助教授 工学部社会建設工学科（正会員）

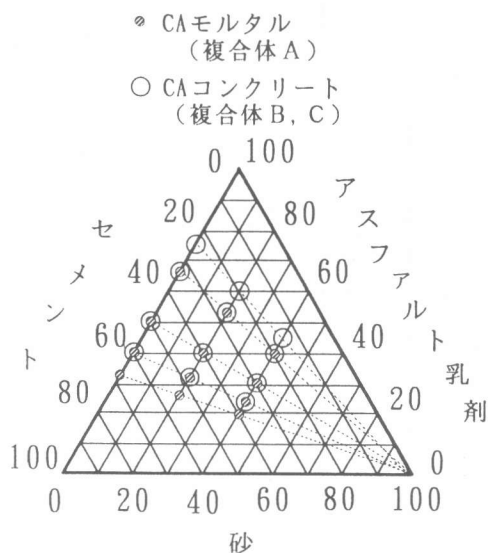


図-1 三角座標によるCA複合体配合表

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

CA複合体は基本的にセメント、アスファルト乳剤、骨材の3成分からなる。本研究では大別して骨材として砂のみを用いたCAモルタル(以下では複合体Aと称す)、複合体全体積の50%を砕砂としたCAコンクリート(以下では複合体B、Cと称す、図-2 参照)について実験を行った。各複合体種別の構成成分を表-1に示す。表中の成分の詳細は次のとおりである。普通ポルトランドセメント(比重: 3.15, 粉末度: $3280\text{cm}^2/\text{g}$)、ノニオン系のアスファルト乳剤(蒸発残留分針入度: 211, 60~80の2種, 濃度: 57.9%), 海砂(比重: 2.62, 粒径: $0.6\sim 0.074\text{mm}$)、砕砂(比重: 2.62, 粒径: $5\sim 0.6\text{mm}$)。CAモルタルの配合及びCAコンクリートのうち砕砂を除いた配合割合は図-1で示されるように決定した。図中の破線はCA複合体の物性に大きな影響を及ぼすC/Eが一定なものを示し、上から0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0となる。セメント、アスファルト乳剤、砂の配合比率が4:4:2のCA複合体は(4, 4, 2)等と以下では称す。

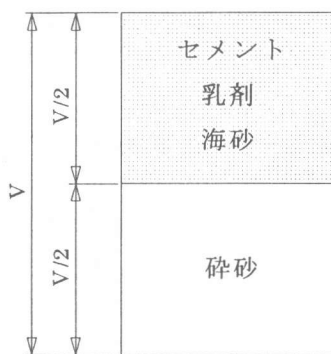


図-2 砕砂混入モデル(複合体B, C)

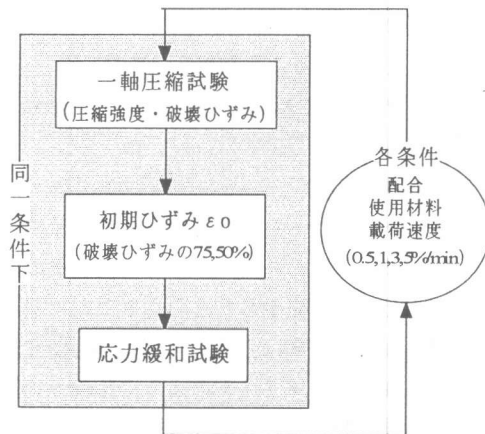


図-3 実験全体像

2.2 供試体の成形

自動ミキサーによってCA複合体の練混ぜを行い、各配合比に調整した乳剤・セメント・骨材を混合後型枠に打設し、半硬化後セメントペースト(C:W=100:29)によるキャッピングを行った。このときの供試体寸法は $\Phi 5\times 10\text{cm}$ の円柱供試体で、打設後24時間は型枠のまま恒温槽(温度: 20°C , 湿度: 80%)に静置し、脱枠後は恒温室(温度: 20°C , 湿度: 60%)にて27日間養生を行った。

2.3 実験全体像

本研究で採用した実験方法の全体的な流れを図-3に示した。まず一軸圧縮試験により供試体の圧縮強度及び供試体破壊時のひずみ(以下では破壊ひずみと称す)を求める。この破壊ひずみ以下となるひずみが発生するまで一定ひずみ速度で載荷し、その後一定ひずみを保持する。

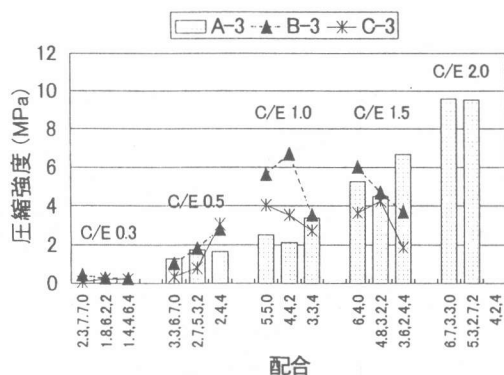


図-4 配合別圧縮強度 (3%/min)

以上一連の実験をひずみ速度等の条件を変化させて行い、それらの結果を比較するために、温度、湿度、試験機といった外的条件は同一とした。

2.4 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は万能圧縮試験機(最大荷重3tf, ひずみ制御方式)を用い、ひずみ速度一定の下で圧縮破壊が生じるまで载荷を行い、得られた応力-ひずみ曲線のピーク時における応力とひずみを圧縮強度、破壊ひずみとした。

このときの一定ひずみ速度は0.5, 1, 3, 5%/minの4種とした。

2.5 応力緩和試験

応力緩和試験は一軸圧縮試験と同寸法の供試体で行い、载荷も同じ試験機を用いて行った。各々のひずみ速度について一軸圧縮試験より求めた破壊ひずみの75%, 又は50%に達するまでその一定ひずみ速度で载荷した後、ひずみを拘束し、载荷開始より3時間にわたって時間経過に伴う応力の変化を測定した。応力の測定にはロードセルを、ひずみの測定には変位計を用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験の結果として、配合別の圧縮強度分布を、図-4に、破壊ひずみ分布を図-5に示す。図はC/Eが一定な各3配合(左から砂の配合割合が0, 20, 40%)のグループに分けて

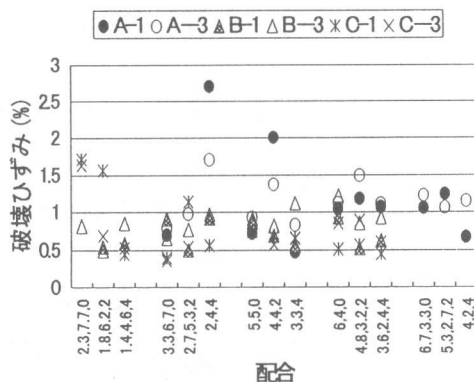


図-5 破壊ひずみの分布

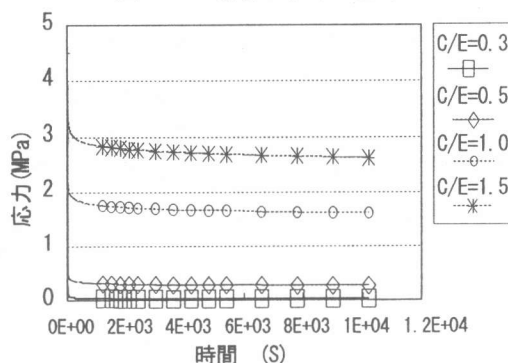


図-6 応力と時間

示した。凡例A-1,B-3等の数字はそれぞれひずみ速度を表す。モルタル状の複合体Aでは砂の配合比による影響はみられず、C/Eが大になるにつれ圧縮強度も増加する。CAコンクリートの複合体B,CではC/Eが1.0を越えたあたりから、砂の混合割合が増加するとともに圧縮強度は減少している。骨材量が増加することで、セメントの水和反応に必要な水分量が不足したことがこの要因であると思われる。また複合体Cの圧縮強度は複合体Bよりも小さい。複合体Bにおける乳剤の蒸発残留分針入度がCよりも大である(軟らかい)ため、骨材表面への付着性が良く骨材相互間の結合力が強いと推測できる。

また図-5に示されるように、CA複合体の破壊時のひずみはばらつきがあるものの、砕砂を含まない複合体Aのほうが大きいといえる。

3.2 応力緩和試験

(1) 緩和時間による考察

応力緩和試験から得られた応力と時間との

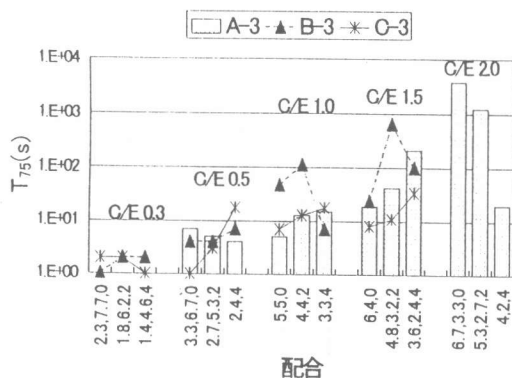


図-7 応力緩和時間 (ABC-T75)

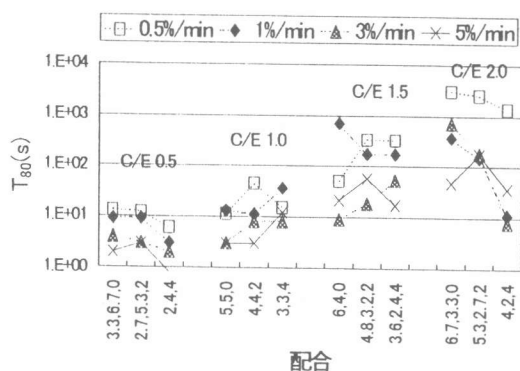


図-8 応力緩和時間 (A-T80)

関係の一例を、図-6に示す。この図にみられるように、CA複合体の応力の低減傾向は応力緩和過程初期に急激で、時間経過の増大に伴ってある一定応力に収束する傾向が存在するが、配合やひずみ速度によってその収束過程には相異がみられる。このことをより明確に判断するための指標として、応力がある値まで低減するのに要する時間に注目するため、ひずみを拘束した状態で応力が最高値の80%、75%まで減少するのに要する時間をそれぞれT80、T75とした。この結果として図-7に配合別のT75の値(縦軸は対数目盛とした)を示す。この範囲は数秒から 10^3 sのオーダーまでという広いものであり、図に示されるようにC/Eが小さいものは作用する応力は小さいものの応力減少割合が大きいといえる。また複合体CにおけるT75は複合体Bよりも小となり、応力減少割合が大きい。また、

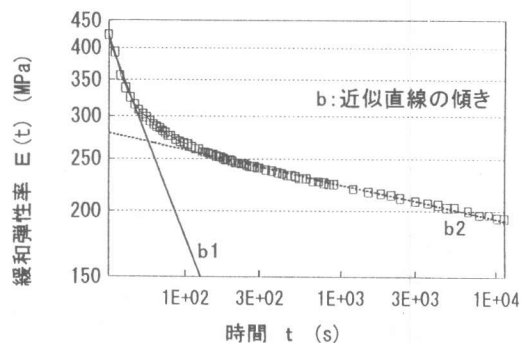


図-9 緩和弾性率と時間

ひずみ速度による影響を把握するため図-8に複合体Aの配合別T80を示す。この図に代表されるように、複合体A、B、Cいずれにおいても配合に関係なく載荷時のひずみ速度が増大するにつれ緩和時間は短くなる傾向を示す。

(2) 緩和弾性率による考察

粘弾性体には材料の応力緩和特性を顕著に表現できる物理常数として、次式のように定義される緩和弾性率が一般的によく用いられる。

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$E(t)$: 緩和弾性率

$\sigma(t)$: 緩和応力

ϵ_0 : 初期ひずみ

この緩和弾性率と経過時間との関係の一例を図-9に示す。同図には緩和弾性率、時間ともに対数目盛にて示した。この図より、緩和弾性率の低減は応力緩和過程初期において急激で、その後ある一定勾配にて低下する傾向が存在すると思われる。従ってこれを応力緩和過程初期と、一定勾配となる 2×10^2 (sec)以上の場合という2本の包絡線として代表させ、図中に示すようにそれぞれについて $\log E(t)$, $\log t$ の関係を直線で近似した。これらの近似直線には次の方程式が成り立つ。

$$\log E(t) = a - b \log t \quad (2)$$

但し a , b は回帰によって求められる常数である。また(2)式より

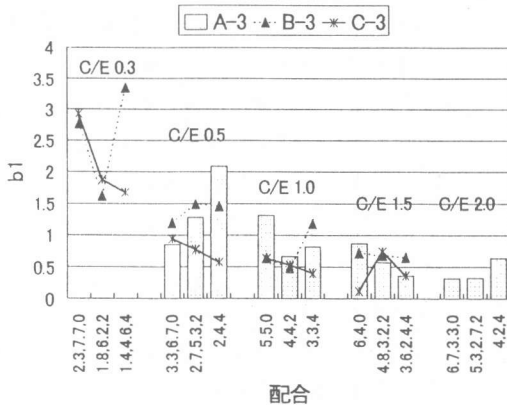


図-10 傾き b1

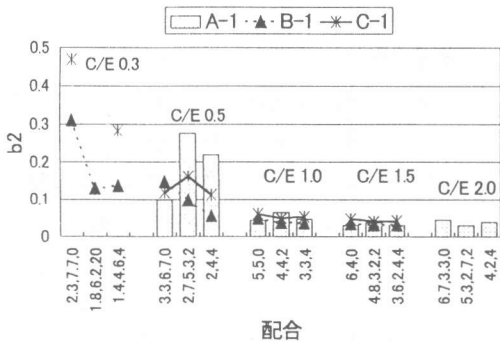


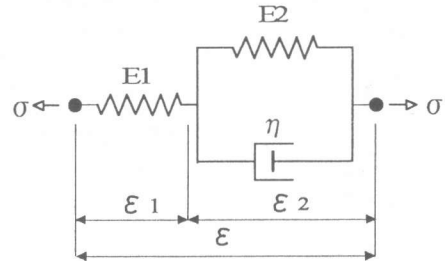
図-11 傾き b2

$$E(t) = A_0 \cdot 10^{-b \log t} \quad (3)$$

という時間の関数としての式が得られる。この緩和弾性率の低減傾向を判断する材料として、近似直線の傾きを比較することが考えられる。そこで前述した応力緩和過程初期及び勾配一定における近似直線の傾きを、それぞれ b1, b2 とし、配合別にそれらの絶対値を図-10, 図-11 に図示した。

これら両図に共通していえることは、C/E が小であるほど近似直線の傾き b は大となり、緩和弾性率の低減割合も大きい。また、図-11 中の B, C を比較すると、傾き b2 は C のほうが大である。従って、比較的時間が経過した後の継続的な応力緩和は複合体 C のほうが顕著であるといえる。

なおひずみ速度や砂の配合割合による変化は本



E1, E2 : 弾性係数, η : 粘性係数

図-12 三要素モデル

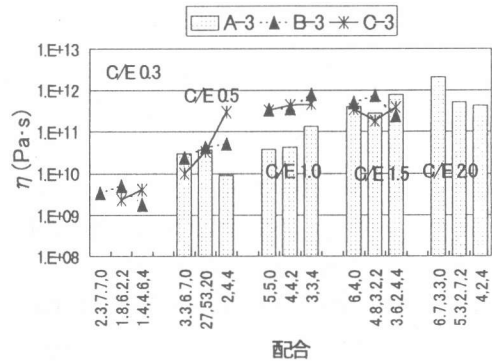


図-13 配合別粘性係数

実験の範囲内では明確に判断することができなかった。

4. 粘弾性モデル

4.1 粘弾性モデルについて

CA複合体のような粘弾性物質の粘弾性的挙動を理論的に解明するには、ばねとダッシュポットを組み合わせた粘弾性モデルを利用する方法がよく用いられる。本研究ではその中でも比較的簡易的な三要素モデル(図-12)を用いて考察を行った。

本モデルにおける応力とひずみとの関係から、次式の微分方程式が成立する。

$$\sigma + P_1 \frac{d\sigma}{dt} = q_0 \varepsilon + q_1 \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4)$$

$$\left(P_1 = \frac{\eta}{E_1 + E_2}, \quad q_0 = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}, \right.$$

$$\left. q_1 = \frac{E_1 \eta}{E_1 + E_2} \right)$$

式(4)を定ひずみ条件の下で解くと、次式のような緩和弾性率の理論式が得られ、

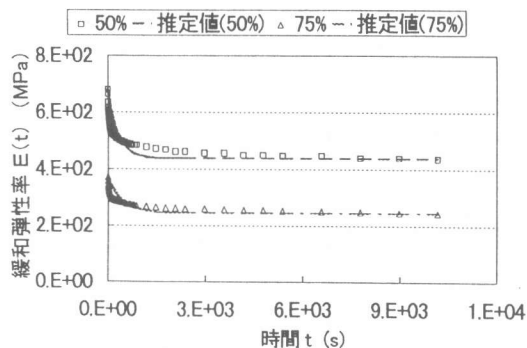


図-14 推定値と実測値の比較

$$E(t) = \frac{q_1}{P_1} e^{-t/P_1} + q_0(1 - e^{-t/P_1}) \quad (5)$$

となる。

4.2 粘弾性常数の推定

粘弾性常数は応力緩和試験で得られた緩和弾性率に式(5)を適用し、拡張カルマンフィルターによる逆解析を行い算出した。この粘弾性常数の一つである粘性係数の値を図-13に示す。縦軸は対数目盛にて示した。

η の値はおよそ 10^9 から 10^{13} (Pa·s) までの間で C/E が大になるに従い大きくなる。

また、粘弾性常数を緩和弾性率の理論式(5)に適用し、実測された緩和弾性率と比較した代表的なものを図-14に示す。この図に示されるように三要素モデルによる逆解析では応力緩和初期に若干の誤差が生じていることが分かる。この精度をさらに高めるためには、要素数を増やしたモデルを用いること等が考えられるが、本報告ではこれを次回の検討課題とさせて頂く。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論をまとめると以下ようになる。

- 1) CA複合体の圧縮強度は、モルタルのようにセメントの水和反応に十分な水分量が得られる範囲内ではセメント乳剤比(C/E)が大になるほど増大するが、アスファルト乳剤に比較してセメント量及び骨材量が過剰に増加するとその強度は次第に低下する。

2) CA複合体の破壊時のひずみは砕砂を含まないCAモルタルにおいて大である。またその値は0.5~1.0%程度である。

3) 載荷時のひずみ速度が速いほど、またC/Eが小さいものほどCA複合体の応力緩和特性は顕著である。しかしながら圧縮強度にみられたような骨材量による影響は確認することができなかった。

4) CA複合体の粘性係数 η の値は配合によって 10^9 から 10^{13} (Pa·s)の範囲内で、C/Eが大になるに従い増大する。

5) 三要素モデルによって概略の緩和弾性率は推定することができる。

参考文献

- 1) 菊田一寿, 上田満, 浜田純夫: セメントアスファルト乳剤複合体の短期クリープ特性, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 19, No. 1, pp. 764-769, 1997
- 2) 佐々木慎吾, 上田満, 浜田純夫, 村田秀一: 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, コンクリート工学年次論文報告集第19巻第1号, pp. 542-547, 1997
- 3) 菊田一寿・上田満・濱田純夫: CA複合体の温度依存性を考慮した短期クリープ特性, 土木学会中国支部第49回研究発表会発表概要集, pp. 565-566, 1997
- 4) 樋口芳郎・原田豊・杉山直行: 軌道用てん充モルタルの諸特性と施工性, セメント技術年報 XXV II, pp. 363-368, 1973
- 5) 鳥取城一: 鉄道軌道に用いられるセメントアスファルトモルタル, アスファルト, Vo. 134, No. 171, 1992
- 6) 羽賀修: スラブ軌道の現状と今後, あすふあるとにゅうざい, No. 135, pp. 11-14, 1999
- 7) 栗田明, アスファルト乳剤を用いた地下構造物の免震材料について, あすふあるとにゅうざい, No. 135, pp. 15-17, 1999