

# 論文 セメント・アスファルト複合体の動的応力緩和特性に関する基礎的研究

大庭 克\*1・大下 仁至\*2・上田 満\*3

**要旨**：本研究の主目的はセメント・アスファルト複合体（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）のQ値を求めることである。Q値は岩石等の応力緩和特性を把握する際によく用いられる指標である。実験は供試体の一端に弾性波を入力し，他端の出力波と共振させて共振曲線を描く。得られた共振曲線より，動弾性係数，Q値が求められCA複合体（以下ではセメント・アスファルト複合体をこのように称する）のみならず，他の建設材料についても測定した。その結果，複合体のQ値及び動弾性係数はC/E（セメントとアスファルト乳剤の質量比）や骨材混合割合に影響されることが明らかとなった。

**キーワード**：CA複合体，C/E，応力緩和，Q値，動弾性係数

## 1. はじめに

CA複合体はC/Eを変化させることにより弾性領域から粘弾性領域まで力学的な特性が変化する。またこの材料は応力緩和現象を示す材料として知られている。応力緩和現象はCA複合体にひずみを与えた後，そのひずみを一定に保つと内部に発生した応力が吸収されるという現象である。この特性を持つCA複合体は震動抑制・騒音低減材として，新幹線や地下鉄の軌道スラブと基礎との間に充填材として使用されている<sup>1)</sup>～<sup>3)</sup>。また，トンネルの裏込めに適用し免震効果を期待するとともに地盤との一体化を図るなど，広範囲にわたって適用される<sup>4)</sup>。

本研究は混合タイプCA複合体の衝撃吸収効果に主眼を置いて検討しようとするものであり，CA複合体の動的な応力緩和特性に注目し，Q値測定を行ったものである。従来の研究は円柱供試体に一定のひずみ速度で荷重をかけ破壊前ひずみを保持することによって行う静的応力緩和試験が主流であった。本研究では動的な応力緩和特性としての動弾性係数とQ値を求めた。Q

値は一般に物体内を伝わる弾性波の減衰傾向をあらわすとされている。特にQ値は地震波が岩盤を伝わる速度，減衰傾向を推定するために，室内実験によって求められるものとして知られている。本研究の主目的は共振法による動的応力緩和試験をCA複合体，構造用部材（セメントモルタル，スチール等）に対して行い，求められたQ値の比較検討を行うことである。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び配合

CA複合体はセメント，アスファルト乳剤，骨材の三成分より構成されるものとした。複合体は骨材として砂のみを用いたCA複合体を以下では複合体Aと称す。また，複合体全体積の50%を砕砂としたCA複合体は複合体Bと称すことにする。**表-1**は各複合体の構成成分を示す。表中の各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は密度：3.15g/cm<sup>3</sup>，粉末度：3280cm<sup>2</sup>/g，アスファルト乳剤はノニオン系アスファルト乳剤（蒸発残留分針入度：60～80，

\*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 日本振興株式会社

\*3 山口大学助教授 工学部社会建設工学科（正会員）

表-1 CA複合体の構成成分

CA複合体	A	B
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 60/80	
骨材	海砂	砕砂, 海砂

表-2 供試体寸法及び形状

供試体種別		形状	寸法 (mm)
CA複合体	a	角柱	25×25×300
	b	円柱	φ 20×200
	c	円柱	φ 15×200
	d	円柱	φ 13×120
セメントモルタル		角柱	25×25×300
木材		角柱	18×18×250
ステンレス		円柱	φ 15×200
岩石		円柱	φ 14×120

濃度：57.9%), 海砂は密度：2.62 g/cm<sup>3</sup>, 粒径：0.6~0.074mm, 砕砂は密度：2.62 g/cm<sup>3</sup>, 粒径：5~0.6mmであった。

## 2.2 CA複合体供試体寸法及び作成方法

自動ミキサーにより各配合比に計量したアスファルト乳剤, セメント, 骨材を混合後, 型枠に打設した。24時間型枠のまま恒温槽に静置した後脱枠し, 27日間恒温室において養生を行った。

本研究で実験に用いた供試体寸法は4種類とし, それぞれの寸法及び形状は表-2に示すとおりである。弾性波速度は材料, 配合によって一定値を示すが供試体寸法の差が, 共振周波数に与える影響を検討するため異なる寸法の供試体を用いた。

## 2.3 比較対象の構造用部材及びその供試体

比較対象として用いた構造用部材は, セメントモルタル, 木材, ステンレス, 岩石とした。これら供試体寸法は表-2の通りである。

## 2.4 実験方法

Q値測定は共振法により行い, パーソナルコンピュータで測定システムを制御した。HP-IBインターフェースを介して接続された

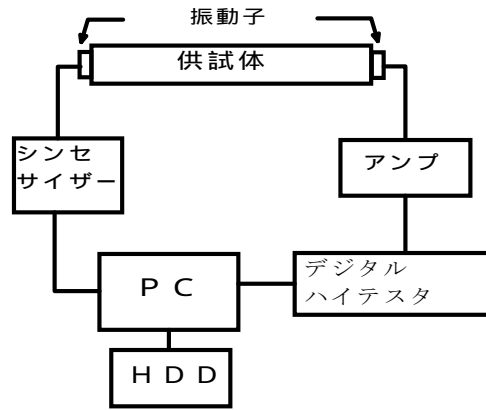


図-1 測定装置の概略

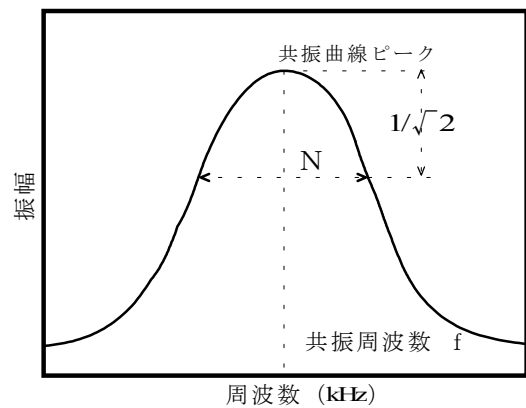


図-2 共振曲線

シンセサイザーが周波数を徐々に変化させながら正弦波を出力し, 供試体の両端に取り付けた振動子の一端に入力する。弾性波は供試体内部を伝播し, 他端の振動子で出力される。出力された信号はアンプにより増幅され, 受信機 (デジタルハイテスタ) に入力される。受信機は実行値を読み取り, データをコンピュータに転送する。図-1は測定装置の概略図である。

## 3. 解析方法

共振法は供試体の一端に正弦波を入力し, 供試体の他端の出力波と入力波を共振させることにより共振周波数を求める方法である。求められた共振周波数より, 供試体中を伝わる弾性波速度, 弾性係数, Q値が決定される。求められた弾性係数は, 静的圧縮試験により求められる静弾性係数に対して, 動弾性係数と呼ばれる。

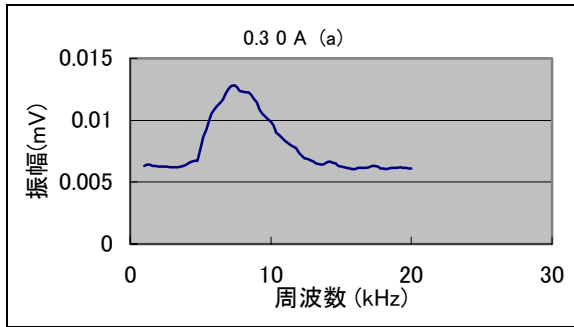


図-3 共振曲線 (C/E=0.3, 複合体A, 種別 a)

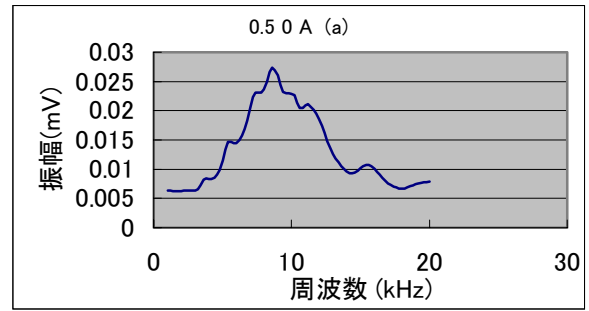


図-5 共振曲線 (C/E=0.3, 複合体A, 種別 a)

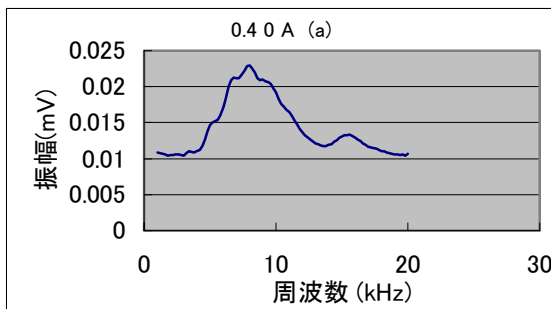


図-4 共振曲線 (C/E=0.3, 複合体A, 種別 a)

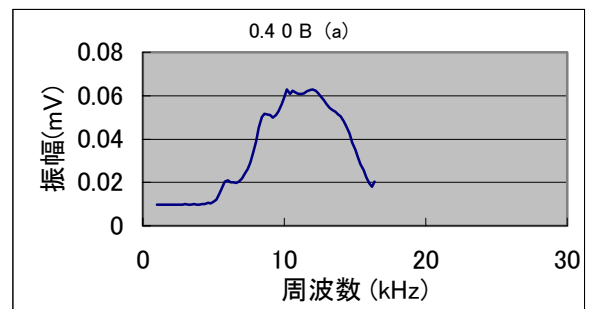


図-6 共振曲線 (C/E=0.3, 複合体B, 種別 a)

### 3.1 共振曲線

共振曲線は入力された弾性波と出力波の振幅によって示される曲線であり、一定の振幅の振動を供試体の一端に入力し、供試体他端の振動振幅を入力周波数に対してプロットして作られる曲線である。図-2は共振曲線の具体例を示したものである。

### 3.2 Q値, 動弾性係数

Q値は無次元量であり、本研究で用いた周波数範囲内において、Q値は周波数と無関係であるとされている。またQ値は弾性波の減衰を表すパラメータとして用いられる。このQ値の逆数 $Q^{-1}$ は物体の内部抵抗の大きさを表すパラメータであり、内部摩擦と呼ばれるものである。つまり $Q^{-1}$ の値が大きいほど内部摩擦が大きいと考えられる。このQ値は共振曲線より求められ、Q値の定義式は以下に示す。

$$Q = \frac{f}{N} \quad (1)$$

$f$ ,  $N$ はそれぞれ図-2中に示した値であり、 $f$ は共振周波数を示し、 $N$ は共振振幅ピーク値の $1/\sqrt{2}$ を結ぶ周波数幅を示している。また動弾性係数 $E_D$ は以下に示す関係式にて求められる。

$$E_D = DWf^2 \quad (2)$$

$f$  : 共振周波数 (c/s)

$W$  : 供試体の重量 (kg)

$D$  : 供試体の形状で定まる定数

$$D = 0.00408 \frac{L}{bt} \quad (\text{角柱供試体}) \quad (3)$$

$$D = 0.00519 \frac{L}{d^2} \quad (\text{円柱供試体}) \quad (4)$$

$L$  : 供試体長 (cm)

$b, t$  : 直方体供試体の断面の辺長 (cm)

$d$  : 円柱供試体の直径 (cm)

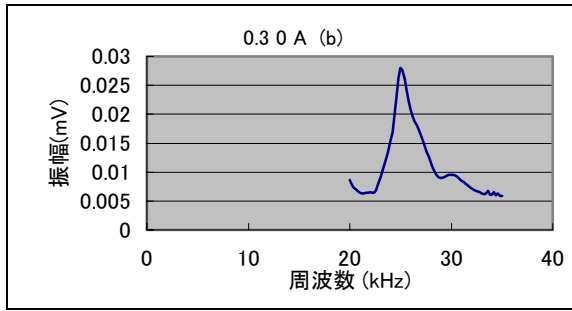


図-7 共振曲線 (C/E=0.3, 複合体A, 種別 b)

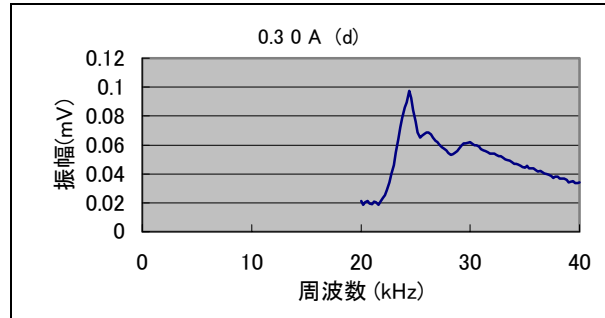


図-9 共振曲線 (C/E=0.3, 複合体A, 種別 d)

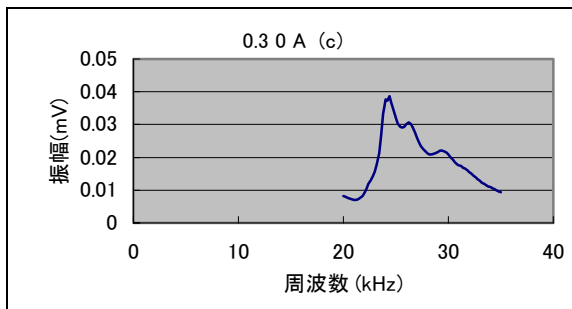


図-8 共振曲線 (C/E=0.3, 複合体B, 種別 c)

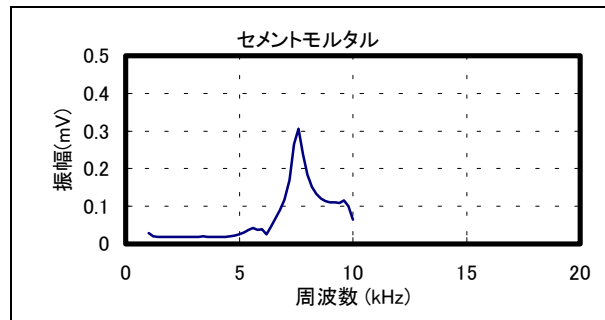


図-10 共振曲線 (セメントモルタル)

#### 4. 実験結果及び考察

##### 4.1 共振曲線

###### (1) C/E による影響

C/E が共振曲線に与える影響を検討した。図-3～図-5 は海砂混合割合が 0%, 供試体寸法及び形状は供試体種別が a で, C/E のみ異なる複合体 A の共振曲線である。図-3～図-5 はそれぞれ C/E が 0.3, 0.4, 0.5 の複合体の共振曲線を示した図である。各図の共振曲線は周波数が約 8kHz 付近で共振点を示しており, C/E が大きくなるに従い共振周波数は大きくなっている。また各共振曲線の共振振幅は C/E が大きくなるに従い大きくなっており, C/E が 0.5 の複合体の振幅は, C/E が 0.3 のものと比較して約 3.5 倍となった。即ち, C/E が大きくなるにつれ波動が伝播しやすい硬質な複合体になると考えられる。ただし, 図中の縦軸の振幅単位は出力電圧を mV 単位で示したものである。

###### (2) 砕砂の有無による影響

図-6 は複合体 B において C/E が 0.4, 海砂の混合割合が 0%, 供試体種別が a の複合体の共振曲線を示した図である。即ち図-6 は図-4

に対する比較用である。両者の図に示される共振曲線を比較すると, 図-6 に示される共振周波数が約 12kHz であり, 図-4 と比較して約 4kHz 大きくなっている。また共振振幅も大きくなっており, 図-4 と比較して約 2 倍の大きさを示している。本研究で行った共振法は供試体中に正弦波を伝播させるため, 砕砂という骨材最大寸法の異なる媒体が存在する複合体 B では, 正弦波の伝わり方は複合体 A に比べ複雑になることは明らかであり, これが共振曲線に反映されていると考えられる。

###### (3) 供試体寸法及び形状による影響

図-3 及び図-7, 図-8, 図-9 はそれぞれ寸法及び形状が異なる供試体の共振曲線の比較図である。即ち, それぞれの図は同一配合のものであり, 供試体種別が a, b, c, d である。図-7～図-9 の共振曲線は周波数が約 25kHz 付近で共振点を示した。また共振振幅は供試体長が短くなるに従い大きくなり, 供試体長のもっとも短い供試体種別 d の共振振幅は供試体種別 a のものに比べ約 13 倍となった。

###### (4) 比較材料の共振曲線

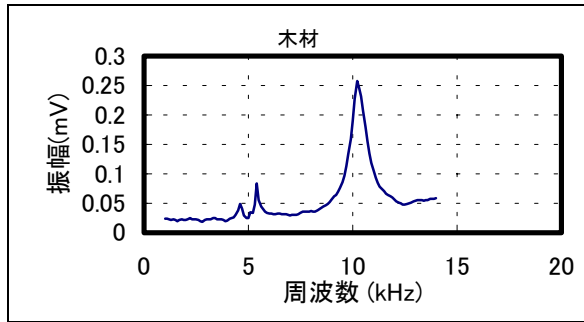


図-11 共振曲線(木材)

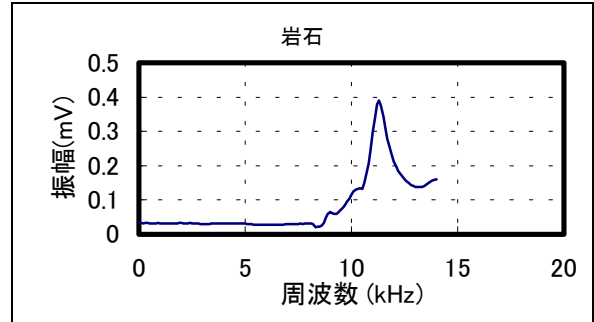


図-13 共振曲線(岩石)

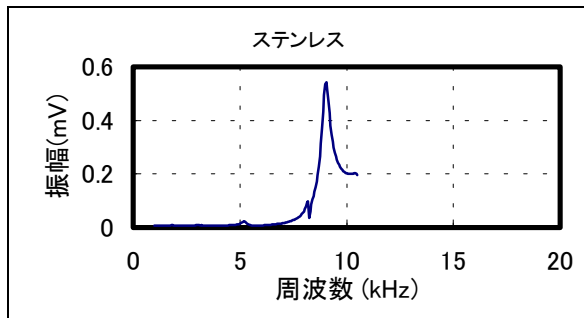


図-12 共振曲線(ステンレス)

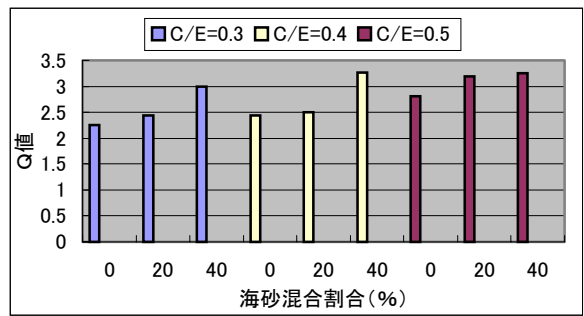


図-14 海砂混合割合によるQ値の比較

図-10～図-13 は今回比較材料として用いたセメントモルタル、木材、ステンレス、岩石の共振曲線である。これらの共振曲線はCA複合体の共振曲線と比較してピークの鋭い曲線となっており、その中でもステンレスが最も鋭いピークを示した。ステンレスの共振曲線を示す図-12と、ステンレスと同寸法及び同形状であるCA複合体の共振曲線を示す図-8を比較すると、ステンレスの共振振幅はCA複合体の共振振幅の約18倍となった。

#### 4.2 Q値

図-14はCA複合体の各配合におけるQ値の値を示したものである。図は複合体A、供試体種別aのもので、異なるC/Eに対して縦軸にQ値、横軸に海砂の混合割合を示したものである。図より同一のC/Eに対しては、海砂の混合割合が多いものほど、Q値が大きくなった。また海砂の配合割合が同一であれば、C/Eが大きくなるに従い、Q値が大きかった。

図-15はCA複合体と比較材料のQ値を示したものである。比較に用いているCA複合体はC/Eが0.3、海砂の混合割合が20%、供試体種

別がaの複合体A及び複合体Bである。各比較材料のQ値はCA複合体のQ値より大きくなり、その中でもステンレスがCA複合体の約8倍のQ値を示し最も大きな値をとった。また比較材料の中では最もQ値の小さかった木材においてもCA複合体の約4倍のQ値をとった。

$Q^{-1}$ は内部摩擦を表す指標であり、 $Q^{-1}$ が大きければ内部摩擦は大きくなる。従ってQ値が小さいものほど内部摩擦は大きいので、応力緩和は顕著であると考えられる。実験結果より、C/Eが0.3、海砂の混合割合が40%の複合体Aは、0%のもの約33%Q値が大きくなる。また、海砂の混合割合が0%、C/Eが0.5の複合体Aは、0.3のもの約25%Q値が大きくなる。即ち、本研究の範囲内ではC/Eが0.3、海砂の混合割合が0%の複合体Aが最も応力緩和が顕著であるといえよう。

#### 4.3 動弾性係数

図-16はCA複合体の各配合における動弾性係数の値を示したものである。図中の値は複合体A、供試体種別aのもので、異なるC/Eに対して縦軸に動弾性係数、横軸に海砂の混合割合

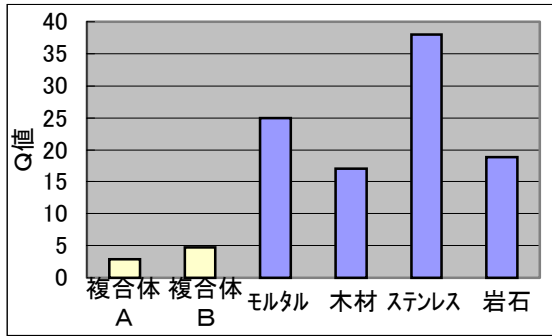


図-15 比較材料のQ値

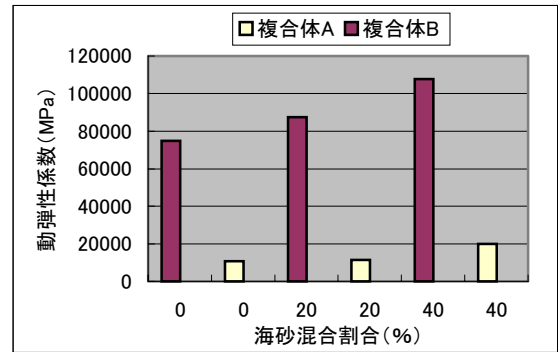


図-17 砕砂の有無による動弾性係数の比較

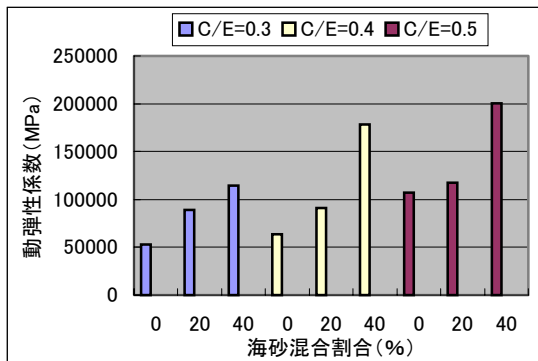


図-16 各配合の動弾性係数の比較

を示したものである。図より同一の C/E に対しては、海砂の混合割合が多いものほど、動弾性係数の値が大きくなる。また海砂の配合割合が同一であれば、C/E が大きくなるに従い、動弾性係数の値も大きくなる。

図-17 は C/E が 0.5、供試体種別が a の複合体 A 及び B の動弾性係数の値を示した図であり、複合体中の砕砂の有無による動弾性係数の相違を示したものである。砕砂を混入した複合体 B の動弾性係数は砕砂を混入しない複合体 A のものより約 5~8 倍程度大きくなっていることが分かる。

## 5. まとめ

本研究の範囲内でえられた実験結果を以下にまとめる。

- (1) C/E が 0.5 の複合体の共振振幅は、C/E が 0.3 のものの約 3.5 倍となった。
- (2) 比較材料の共振曲線は鋭くなったが、CA 複合体のものはなだらかであった。

- (3) C/E が大きくなおかつ海砂の混合割合が多い複合体ほど Q 値は小さくなり、同一の海砂混合割合で、C/E が 0.3 から 0.5 に変化した場合 25% 程度、同一の C/E で、海砂混合割合が 0% から 40% 増加した場合 33% 程度大きくなる。
- (4) 本研究で用いた比較材料の中では、ステンレスの Q 値が最も大きくなり、CA 複合体の約 8 倍程度の値をとった。
- (5) 複合体 B の動弾性係数は複合体 A のものより約 5~8 倍程度大きくなった。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 羽賀修：スラブ軌道の現状と今後，あすふあるとにゆうざい，No. 135，pp. 11-14，1999
- 4) 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，あすふあるとにゆうざい，No. 135，pp. 15-17，1999
- 5) 山口梅太郎・西松祐一：岩石力学入門，財団法人 東京大学出版会，pp. 196，1973
- 6) M.Nafi toksoz・David H.Johnston：Society of Exploration Geophysicists USA，Tulsa，Oklahoma