

論文 新幹線スラブ軌道用セメント・アスファルト複合体の応力緩和特性

河内亮次^{*1}・山本孝洋^{*2}・寺田 純^{*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・アスファルト複合材料は、マイクロサーフェシング工等の道路舗装のみならず、構造用部材に用いられている。そこで、本研究は、セメント・アスファルト複合材料（以下ではCA 複合体と称すことにする）を新幹線スラブ軌道に適用することを考慮し、CA 複体内を伝わる弾性波の減衰特性より動的応力緩和特性の評価を行った。応力緩和特性は、他の建設材料についても測定した。また、温度が、CA 複体の応力緩和特性に与える影響についても検討した。CA 複体の内部抵抗は、他の比較材料に比べ大きく、温度による影響も大きいことが確認された。

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 複合体は乳剤中の水分とセメントとの水和生成物及び、アスファルトの両者が結合材となり外力に対して抵抗力を発揮する。CA 複合体の土木構造用部材への適用例は新幹線、地下鉄等のスラブ軌道用複合材^{1),2)}、舗装用マイクロサーフェシング材³⁾、地下構造物用免震材⁴⁾、止水目的のフェーシング材⁵⁾、など近年、増加傾向にある。新幹線スラブ軌道用 CA 複合体は当初、ベースとなる高架等のコンクリートと軌道スラブ間の衝撃を和らげる目的で採用された。しかしながら、この衝撃吸収、応力緩和の効果そのものの検証は十分にされたとはいえなかった。筆者等は数年来、広範囲の配合における CA 複合体のコンシステンシー、セメントコンクリートスラブとの付着強度、乾燥収縮、線膨張係数等の諸特性を明らかにし⁶⁾、CA 複体の力学特性はセメントとアスファルト乳剤の混合比率に影響されることを示した。そこで、本研究は新幹線スラブ軌道用 CA 複体の動的な応力緩和特性を明らかにすることを主目的とした。応力緩和特性は物体内を伝わる弾性波の共振波形より求められる Q 値で代表させた。Q 値は、他の土木構造用部材(大理石、セメントモルタル、ステンレス、木材)についても求め、CA 複

体との比較検討を行った。Q 値を求める実験過程から、動弾性係数が同時進行にて求められるので、これらについても報告する。また、新幹線スラブ軌道が駅構内等に使用された場合、外気温による影響を受けることから、温度が CA 複体の Q 値に与える影響も検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

CA 複合体はセメントとアスファルト乳剤のみからなるペーストタイプ複合材を複合体 A、セメント、アスファルト乳剤、砂の三成分からなる複合体で砂の混合割合が 40%のものを複合体 B、60%のものを複合体 C とした。使用材料は、セメント；普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm³、粉末度：3280cm²/g）、アスファルト乳剤；ノニオン系乳剤（蒸発残留分針入度：60～80、蒸発残留分濃度：57.9%）、海砂；山口県宇部産（密度：2.62 g/cm³、粒径：0.6～0.074mm）とした。図-1 は複合体 A, B, C の各配合を三角座標上にて示したものである。三角座標の各辺はセメント、アスファルト乳剤、海砂の配合割合を示し、本研究では三角座標上に示す格子点の配合を使用した。図中の点線は同一の C/E であることを示している。C/E は、セメント乳

*1 山口大学大学院 理工学研究科（正会員）

*2 ニチレキ(株) 研究開発センター 開発部 調査試験課

*3 山口大学大学院 理工学研究科

*4 山口大学工学部 社会建設工学科 助教授（正会員）

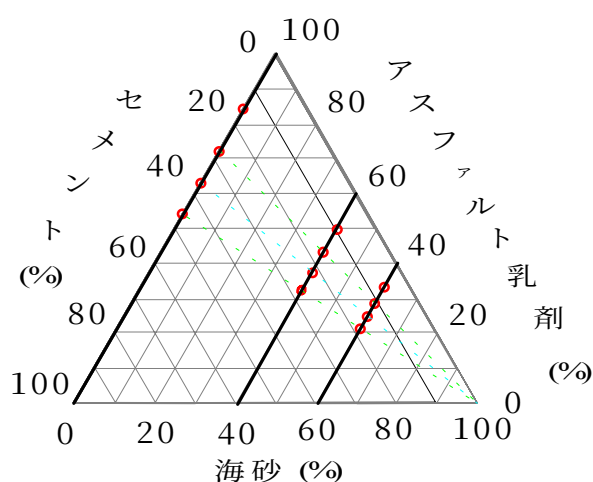


図-1 三角座標配合

表-1 供試体寸法及び形状

供試体種別	形状	寸法 (mm)
CA 複合体	角柱	25×25×300
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
大理石	円柱	φ 14×120

化剤比を表している。供試体の作製は、基本的に型枠への流し込みによる打設を行った。しかし、複合体 C において $C/E=0.6$ 以上については、流し込みが不可能であったため締め固めにより打設を行った。Q 値測定を行う場合、その供試体は棒状供試体でなければならず、その直径(角柱の場合は辺長)は長さの $1/10$ 程度か、それ以下であることが望ましいとされる。このようなことを配慮し、表-1 に示す供試体寸法を採用した。比較材料について、セメントモルタルは JIS.R5201 にて用いられる配合、木材はスギ、ステンレスはオーステナイト系ステンレス鋼、大理石を用いた。同一配合の供試体数は、各 3 本とした。

2.2 実験方法

実験は、まず端子を材齢が 1 ヶ月の供試体の両端に貼り付けたものを所定の温度に制御され

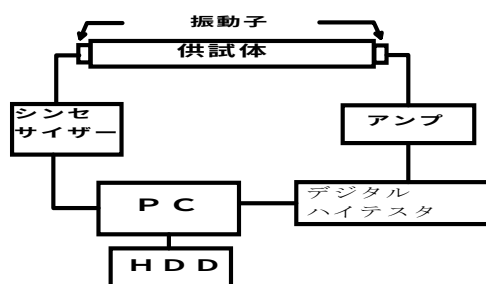


図-2 Q 値測定システム

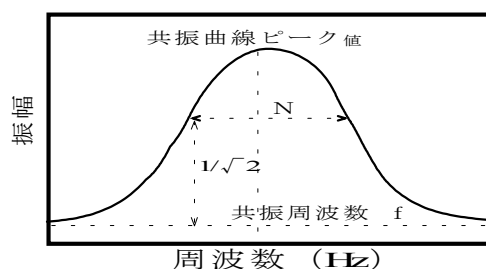


図-3 共振曲線例

た恒温槽で 2 時間養生し、供試体を恒温槽の設定温度の状態にした。実験時の温度は、 -15°C から 35°C まで 10°C 間隔に変化させた。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、データをパーソナルコンピュータに転送し、パーソナルコンピュータで共振曲線を描く。図-2 は Q 値測定システムである。

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、波形より供試体中を伝わる弾性波速度、動弾性係数、Q 値が決定される。図-3 は、モデルとしての共振曲線で、横軸には入力周波数、縦軸は出力された振幅を出力電圧にて示したものである。Q 値は無次元量であ

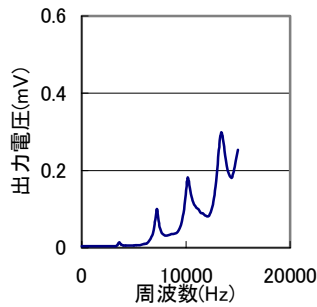


図-4 共振曲線例（複合体 B）

り、本研究で用いた周波数範囲内において Q 値は周波数に依存しないとされている。また Q 値は、弾性波の減衰を表すパラメーターとして用いられる。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ーであり、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 値の定義式を以下に示す。

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

f：共振周波数（Hz）

N：振幅極大値の $1/\sqrt{2}$ の値の周波数幅⁶⁾

動弾性係数 E_D は以下に示す関係式にて求められる。

$$E_D = DW f^2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

f：共振周波数 (Hz)

W：供試体の質量 (kg)

D：供試体の形状で定まる定数

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

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

L：供試体長 (cm)

b, t：直方体供試体の断面の辺長 (cm)

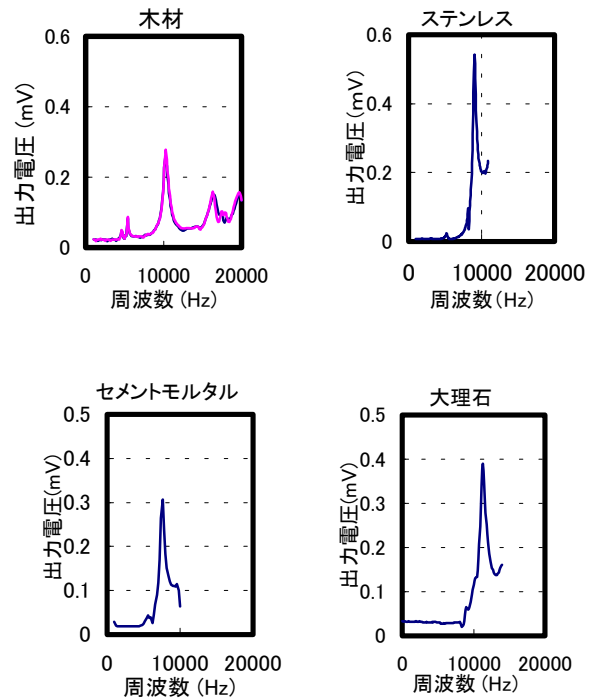


図-5 共振曲線

4. 実験結果及び考察

4.1 実測された共振波形

図-4 は複合体 B (C/E=0.8) の共振曲線例である。一次共振点、続いて二次、三次、四次共振点と明確に表れている。図-5 は他の比較材料の共振曲線を示したものである。これらの図と比較すれば、CA 複合体の共振曲線は他の比較材料に比べ緩やかな曲線を描くことが顕著に表れている。また、CA 複合体の共振波形には他の材料には見られない乱れが生じ、CA 複合体は空隙率が 20~30% と大であるため、材料の均一性に欠けることを示す結果となった。⁷⁾

4.2 CA 複合体及び、比較材料の Q 値

共振曲線はパルス状で鋭い比較材料は、大きい Q 値を示し、弾性波の減衰は小さいが CA 複合体のように N が大きく Q 値の小さいものは内部抵抗が大きく振動し、波動の減衰傾向が顕著であることを示している。図-6 は、温度-15℃における複合体 A, B, C の Q 値を C/E 別に示したものである。C/E が大きくなるにしたがって、複合体 A の Q 値は次第に大となった。その値は C/E が 0.2 ~ 0.8 に対して 13.3 ~

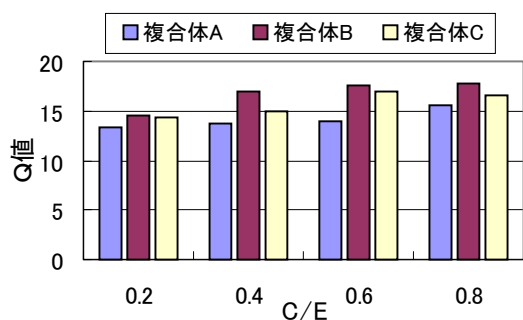


図-6 各配合の Q 値の比較

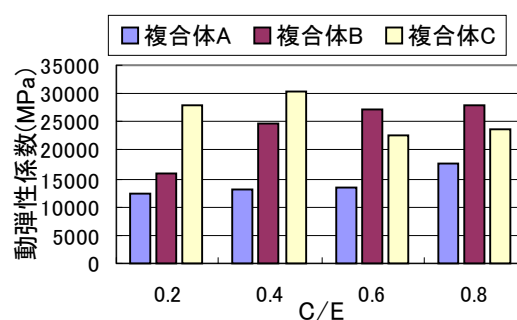


図-9 各配合の動弾性係数の比較

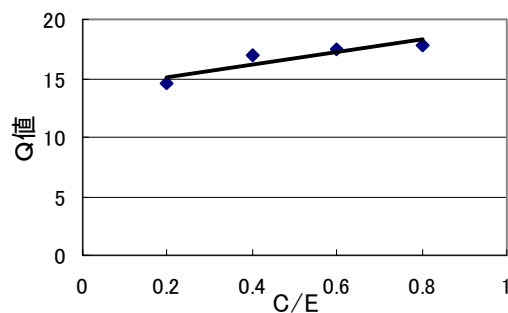


図-7 Q 値と C/E の関係

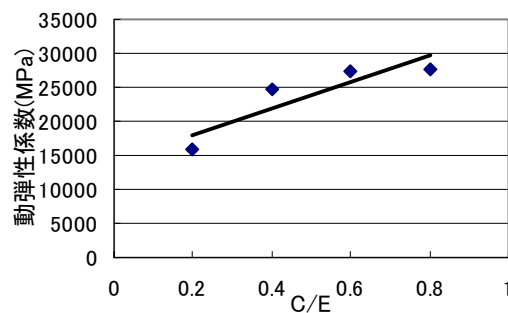


図-10 C/E と動弾性係数の関係

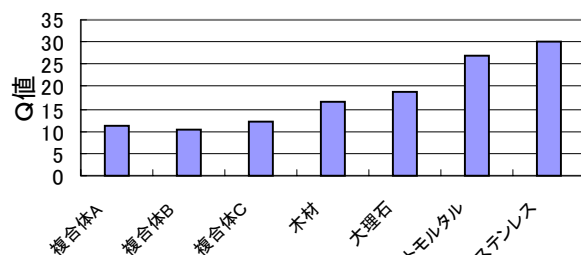


図-8 CA 複合体と比較材料の Q 値

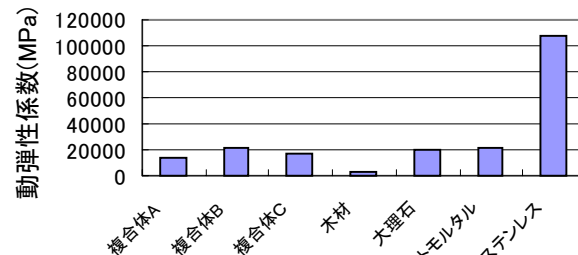


図-11 CA 複合体と比較材料の動弾性係数

15.5 となった。複合体 B の Q 値は C/E が 0.2～0.8 に対し、14.5～17.8 と大きくなっている。しかし、複合体 C の Q 値は C/E が 0.2～0.8 に対して 14.5～16.5 と再び小さくなっている。これより砂混合割合がある一定量を超すと Q 値は小さくなることがわかる。この要因として、砂混合割合が大きくなると空隙率も大となるためであろう。C/E が CA 複合体の Q 値に与える影響を検討するため、複合体 B の Q 値と C/E の関係を図にしたものが図-7 である。明らかに Q 値と C/E は線形関係にあると思われるので、この関係を直線回帰した。その結果以下の回帰式が得られた。

$$Q \text{ 値} = 5.125 \times C/E + 14.13 \quad \dots \dots (3)$$

複合体 A, C についても、砂混合割合を固定すると同様な関係が成立した。図-8 は、複合体 A, B, C (C/E=0.8, 温度 15℃) と比較材料の Q 値を示したものである。CA 複合体の Q 値は他の比較材料の 1/2 程度であり小さいものとなった。

4.3 CA 複合体及び、比較材料の動弾性係数

セメントコンクリート等では動的な荷重が作用する箇所への部材の適用に際して、部材の動弾性係数値にて設計することが検討されている。新幹線スラブ軌道等に CA 複合体を用いる場合、その動的な弾性係数を求めることは必須条件となろう。特にアスファルト系材料の力学特性は载荷速度による影響が顕著である。図-9 は、複合体 A, B, C の動弾性係数を C/E 別に示したものである。C/E が大きくなるにしたがって、

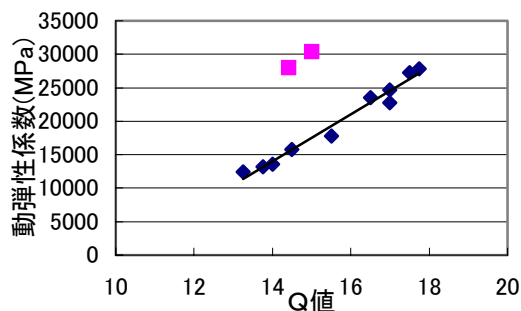


図-12 Q値と動弾性係数の関係

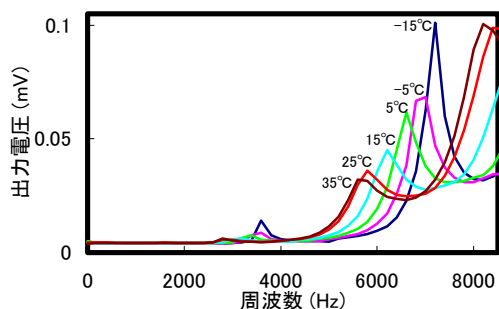


図-13 温度別共振曲線

複合体 A の動弾性係数は次第に大となった。また、砂の混合割合が増加するにしたがって、締め固めを行った複合体 C を除いて動弾性係数は大きくなった。締め固めが必要な複合体は、締め固め後も空隙率が大きいため、動弾性係数は大きく減少することが分かる。図-10 は、複合体 B の C/E と動弾性係数の関係を示したものである。この両者の関係は線形関係にあると思われるので、直線回帰した。その結果、回帰式は以下ようになった。

$$E_D = 19318 \times C/E + 14217 \quad \dots \dots (4)$$

上式は複合体 B について求めたものであるが、複合体 A についても同様な傾向が存在した。図-11 は CA 複合体と他の比較材料の 15°C における動弾性係数を示したものである。木材の動弾性係数は他の材料に比べ最も小さい。

4.4 Q 値と動弾性係数の関係

図-12 は CA 複合体の Q 値と動弾性係数の関係を示したものである。図には縦軸に動弾性係数、横軸に Q 値にて示した。空隙率の高い複合体 C の 2 点が特異点となっている。この 2 点を除い

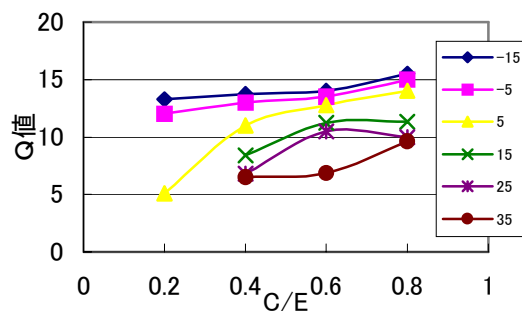


図-14 C/E と Q 値の関係（複合体 A）

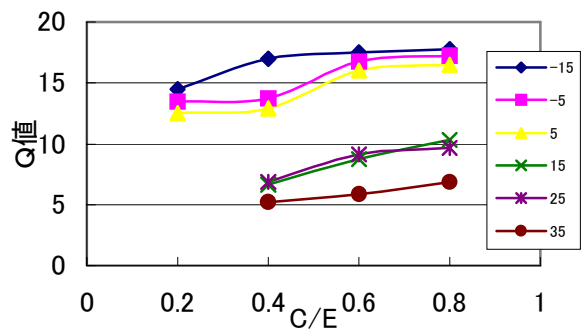


図-15 C/E と Q 値の関係（複合体 B）

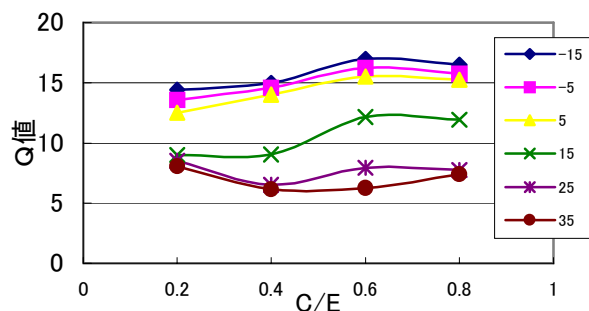


図-16 C/E と Q 値の関係（複合体 C）

たものに対して動弾性係数と Q 値の関係を直線回帰した結果以下の回帰式が得られた。

$$E_D = 3504.6 \times Q - 35057 \quad \dots \dots (5)$$

回帰による相関係数は 0.97 であり相関性は認められる。

4.5 温度と CA 複合体の動的応力の関係

図-13 は、複合体 B (C/E=0.8) の各試験温度における出力波形である。縦軸のスケールを最大振幅に合わせたため、高温時の共振点が明確に現れていないが、低温時には多数の共振点が観測される。共振時の周波数は温度の低下とともに高周波側に移動し、共振振幅も同様に温

度低下に伴って大きくなるのが顕著に表れて

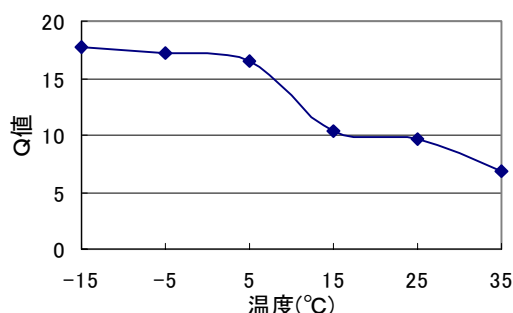


図-17 Q 値と温度の関係（複合体 B, C/E=0.8）

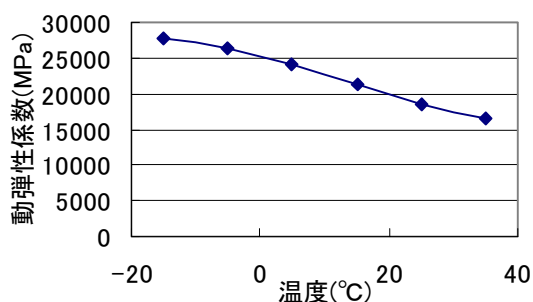


図-18 温度と動弾性係数の関係

いる。図-14, 15, 16 は C/E と Q 値との関係を複合体 A, B, C について示したものである。Q 値は C/E が大きくなるに従い大きくなるが、その増大率は C/E=0.4 ~0.6 にかけて大きくなった。これらの結果より求めた Q 値の温度依存性を図-17 に示した。Q 値は、温度の低下に伴い大となる。しかしながら、0°C以下での Q 値はほぼ一定の値を示した。これは、CA 複合体は多くの未水和水を保持し、これらが凍結することおよび、アスファルトの硬化によって、より硬質な材料に変化した結果である。図-18 は温度と動弾性係数との関係を複合体 B (C/E=0.8) について示したもので、温度が高くなるにしたがい、動弾性係数は小さくなった。

5. まとめ

本研究にて用いた CA 複合体、比較材料において、その動的応力緩和特性は以下になる。

- (1) 15°Cにおいて、CA 複合体の Q 値は他の比較材料の Q 値の 2/3~1/3 と小さく、その値の範囲は 10~12 であった。

- (2) CA 複合体の動弾性係数は 15°Cにおいて大理石、セメントモルタルの 7 割から同等程度の値となった。

- (3) CA 複合体の Q 値、動弾性係数値は配合決定要因の C/E に影響される。

- (4) CA 複合体は、温度が高くなるとともに Q 値も動弾性係数も低下し、Q 値は 35°Cにおける 5 から-15°Cにおける 18 までの値をとる。

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 XX V 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，Vol. 134, No. 171, pp. 25-35, 1992
- 3) (社)日本アスファルト乳剤協会，技術委員会：マイクロサーフェシング技術マニュアルについて，あすふあるとにゅうざい，133号，pp. 3-8, 1998
- 4) (社)土木学会：地震から地下構造物を守る，土木学会誌，vol. 83, No. 13, pp. 21-26, 1998
- 5) 川武志，堅川孝生：セメント乳剤コンクリートの遮水壁への適用，あすふあるとにゅうざい，No. 78, pp. 4-14, 1984
- 6) 上田満，園田雄亮，佐藤勝俊，安藤豊：セメントとアスファルト乳剤の質量比がセメント・アスファルトモルタルの基礎的特性に与える影響，コンクリート工学論文集，Vol. 14, No. 3, pp. 45-55, 2003
- 7) M. Nafi toksoz・David H. Johnston：Society of Exploration Geophysicists USA , Tulsa, Oklahoma, pp. 20-30
- 8) 上田満，村田秀一：セメントアスファルト複合体の 3 軸圧縮強度特性に関する基礎研究，土木学会論文集，No. 5851, V-38, pp. 137-152, 1998