

1. はじめに

近年, メンテナンスフリーのスラブ軌道用マニ充填として開発されたセメントアスファルト複合グラウト(以下, CAGと略称)は, 路盤コンクリートと軌道スラブとの間に介在し, 軌道の高い敷設精度・列車衝突の緩和により集心地を快適に保つ役割をにない, その優れた施工性, 強度, 弾性, 耐候性, 経済性等から比較的温暖な地域で大量に供用されてきた<sup>1), 2)</sup>。ところが寒冷・積雪の厳しい地域へ適用するには, 本複合材の宿命ともいえる施工性保持のため多量の水を必要とすること, アスファルトの温度依存性が現われること等から, 耐凍害性と感温性が重要な問題として指摘された。

そこで筆者らは, 各種の構成材料, 主材比および混和材料に関する硬化体の微細組織から力学的特性, 耐久性に及ぶ室内・現場での広汎な実験的検討を行い, 実用的な対策として消泡剤とAE剤並びに高速練りの組合せにより複合材へ微小気泡を適量導入する手法が耐久性向上に著効のあることを見いだした。本文では, 開発グラウトを主体とし, 把握した諸特性のうち耐凍結融解性, 耐ひびわれ性, 感温性に焦点を合わせ, その概要を述べる。

2. 実験方法

数十種類のCAGから開発された消泡AE型CAM, 比較のためにポリマー混入の特殊CAPと温暖地で供用された在来型CAMの3種類を選び, 対比して以下に記す。

(1) 使用材料

セメントは早強ポルトランドセメント。膨張性混和材はCSA系のデンカAM。アスファルト乳剤(以下, 乳剤と略称)はアニオン系のTA・TA', ノニオン系のNA・NA'(A'はポリマー混入)。細骨材は1.2mm以下, FM≒1.8の川砂。アルミニウム粉末はセメント混合用。消泡剤はTSA730(東芝シリコン社製)。AE剤はヴァインソル(山京化学社製)。水は飲料水。乳剤のA'以外はいずれも市販品を使用した。

(2) 配合と練りませ

表1, CAGの標準配合 (kg/m<sup>3</sup>)

配合NO	種別	早強	膨張性	アスファルト	細骨材	水	アルミ粉末	消泡剤	AE剤
		C	AM	A					
8	在来型CAM	250	44	470	590	約88	0.04		
2	特殊CAP	538		753			0.04		
33	消泡AE型CAM	255	45	480	600	約75	0.04	0.15	7.5

注, 1) 流下時間: JIS-T118~26秒  
2) 空気量: NO.33...9~16%, 40他は7~9%

各CAGの標準配合を表1, 練りませ方法を図1に示す。これから注目すべき点は, 配合ではNo.33の消泡剤とAE剤(コンクリート常用量の約10倍)が最適添加量を示し, 練りませ方法では材料の投入順序と高速練りで良質の気泡が導入され, その後直ちに低速かく拌へ移行することにより約60分以上の可使用時間が確保され, 耐凍害性が著増するCAMが得られることである。

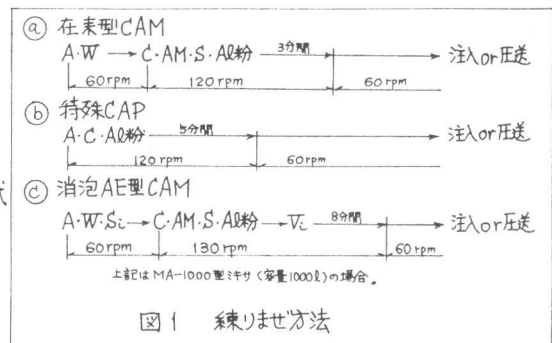
(3) 試験方法

土木学会標準示方書, JISおよびASTMの各試験方法によるが, 水中急速凍結融解試験はCAGの諸特性を考慮して約5.5hr/サイクル・超音波法で相対動弾性係数を求めた。特殊なものは試験結果に付記した。

3. 実験結果とその考察

(1) CAGの構造組織

本グラウトの構成は, 図2に示すようにセメントマトリックス, アスファルト, 砂の3相複合材と看做され, それぞれの容積比は概ね23~40%, 30~46%, 0~25%, そのほか毛細管水が約8~14%, 空隙が約6~10%の範囲を占めている。硬化体の微細組織は, 図3でわかるようにセメント水和物が密につまり絡み合っ骨格を形成し, アスファルトがその周辺と空隙部に皮膜あるいは充填された状態で連続層となって一体化している。これは, アスファルトの容積がセメントマトリックスの約114~130%にも達すること, このグラウトが相当な感温性



と粘弾性体的な挙動を示すこと、防水性に留むことおよび既往の研究<sup>2),3)</sup>等が傍証となる。

したがって、耐凍害性の向上や感温性の軽減を図る上で、セメント硬化体やアスファルト自体の特性のほかにもセメント水和物がアスファルトでコーティングされた複雑な構造組織としての特徴が反映すると考える。

## (2) 耐凍結融解性

セメント系硬化体の凍結融解による劣化機構は、氷晶の体積膨張で生ずる移動水の圧力によるとの水圧説<sup>4)</sup>が基本とされ、CAMは上記の組織と毛細管水が約8~14% (乳剤中の水と混練り水を合わせた全水量/セメントで約60~85%) という多水量形複合材であるため同じ範ちゅうに属するようである。これは、在来型CAMの凍結融解前後の気泡径分布の変化を調べた図4で明らかのように、凍融後は前に比べて大径気泡の新ピークが現われかつ多孔質に変化したことから推察され氷晶圧の緩和が効果的な手段であるという裏証を得た。

したがって、本研究では消泡剤とAE剤による気泡の改良と量の確保、アスファルトの増量による伸び能力、ポリマー混入によるじん性、減水剤による単位水量の減少、膨張性混和材や水滓スラグによる緻密化等種々の改善策を試みた。これらから、著効のあった気泡の質と量の改善、アスファルト増量とポリマー混入のCAMを代表として図5に示す。この図のうち、在来型CAMはアスファルトの粘性と乳化時に添加する数種類の界面活性剤の作用により通常の混練りでも約6%の空気が抱き込まれ、これとアスファルトの効果で多水量系にも拘わらずプレーンモルタルに比べて凍害劣化が小さい。しかし、気泡の賦存状態は図6に見られるごとく比較的大径のものが多く、その改善策として、質的には破泡性の消泡剤を適量添加すると、泡膜の表面張力の局部的減少による破泡・微小化作用で空気量が約2%まで減じ、凍害劣化がかなり改善される。量的には、AE剤を多量添加すると、界面張力の低下による起泡作用で微細な独立気泡が約10%ほど導入され、耐凍害性が相当に向上するが、強力な混練りを必要とし、経時変化が著しい等の問題を内蔵していた。そこで両者の効果を最良に組み合わせることに着目したのが消泡AE型CAMであり、耐凍害性が顕著に向上することを数多くの試験によって確認した(図8)。

気泡の賦存状態は、図6と7を対比してわかるように、独立気泡が微細化して分散している。実用的には、有効な連行空気量は約9~16%の範囲が好ましいこと、消泡剤の過量添加はAE剤

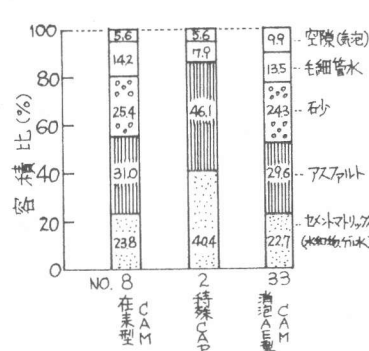


図2 CAMの構成容積比(スラッシュ用)

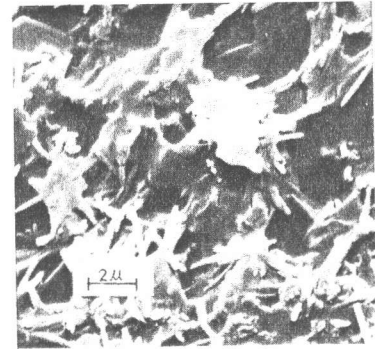


図3 CAMの結晶組織(超型電顕)

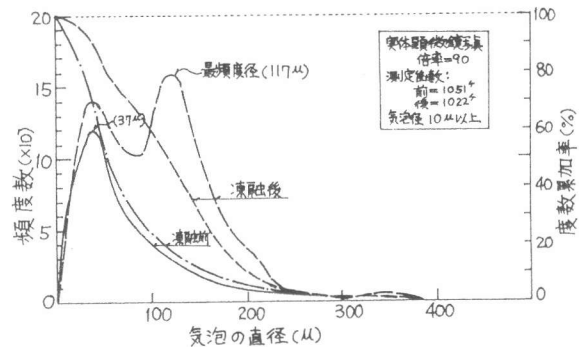


図4 凍結融解前後の気泡径の分布例(在来型CAM, 180℃)

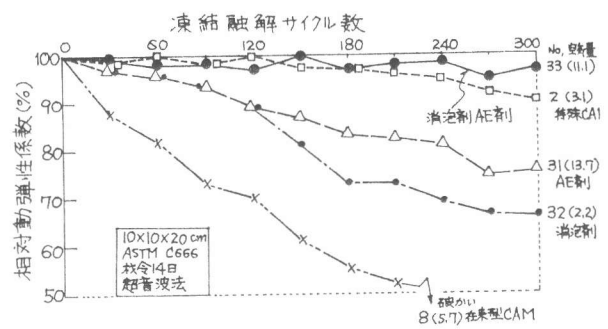


図5 消泡剤, AE剤が耐凍害性に及ぼす影響

に組み合わせることに着目したのが消泡AE型CAMであり、耐凍害性が顕著に向上することを数多くの試験

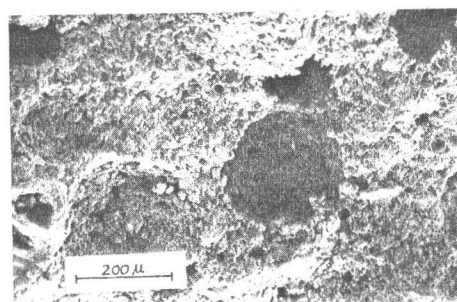


図6 在来型CAMの気泡

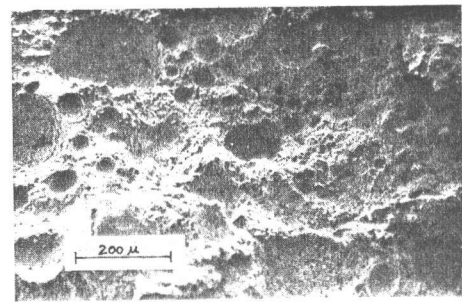


図7 消泡AE型CAMの気泡

の起泡力を消失させること、所定空気量の確認後直ちに低速かく拌に移行すると空気量の経時的変化が少ないこと等を把握すると共に簡易な直視式空気量測定方法を確立した。一方、アスファルトの増量とポリマーの応力緩和性等の効果は、特殊CAPで代表されるように凍害劣化の顕著な改善が認められるが、経済性等の問題から選外とした。

### (3) 耐ひびわれ性

ひびわれの発生は、供用の機能や凍害劣化の促進に関与するもので問題視された。その原因は、材料自体の特性のほか施工、荷重、環境条件等の内・外的因子が多数交絡するが、発生メカニズムは何らかの原因で引張応力が作用したことに帰結できる。ここでは、発生側の特性として乾燥収縮・熱特性、緩和側の特性として伸び能力・応力緩和性・見掛け弾性率について検討した。

a) 乾燥収縮；セメント系硬化体の本質的欠陥であるが、膨張性混和材を使用したCAMとそうでない特殊CAPの乾燥による長さ変化は図9に示すように、前者の約1000 $\mu$ に対して後者はその約3倍も大きい。後者は、収縮補償性混和材と砂がなく、単位セメント量が多いこと等を原因として挙げられる。

b) 熱特性；環境温度による変形は拘束条件とあいまってひびわれ発生と密接な関係がある。温度と熱線膨張係数との関係を図10に示す。CAPは、アスファルトのないセメントモルタルに比べて温度依存性が極めて高い。その傾向は、低温になるほど（高温>低温）、アスファルトの多いものほど（CAP>CAM）、吸水の多いものほど（吸水>乾燥）大きくなる。温度による変形または応力に対して施策が必要と考えられる。

また、熱伝導率は図11に示すようで、この値はアスファルトのないものに比べて約1/10と小さく、かつ零度付近で急増する特徴がある一方、比熱は約2倍も大きい値を示すため、熱拡散率は小さい。

これら熱特性は、いずれもアスファルトの特徴が反映したものであり、アスファルトの多い特殊CAPや連行空气の少ない在来型CAMの場合、水中急速凍結融解試験（ASTM C-666）のように苛酷な条件では、供試体内・外部の温度勾配が急となり過ぎ、その熱応力の繰返しで疲勞破壊を招く事例（表面化なしに割裂）もあった。

### c) 伸び能力

各温度におけるCAPの引張による応力-歪み曲線を図12に示す。破壊ひずみは、アスファルトのないものに比べて概ね1桁大きく、優れた伸び能力（曲げ/圧縮強度でも約25倍大きい<sup>3)</sup>は注目に値する。現象的には、CAMはダクティル破壊、特殊CAPは急激なブリITTLE破壊の挙動を呈し、そのひずみは前者のほうが後者よりも・高温のほうが低温よりも大きい反面、応力はこれと全く逆傾を示す。これら

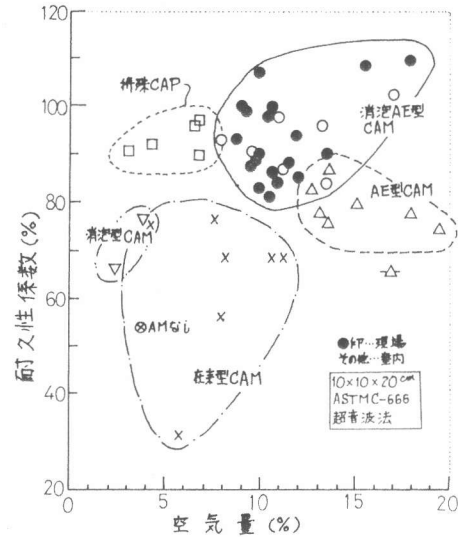


図8, CAPの耐久性係数

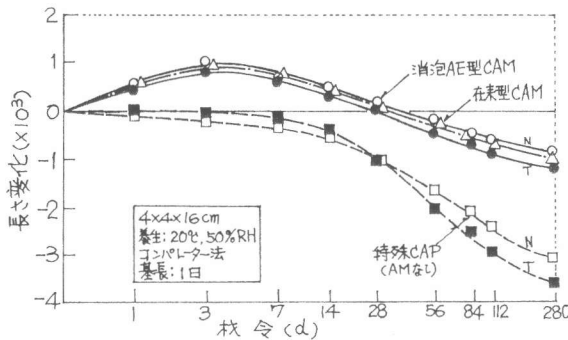


図9 乾燥収縮

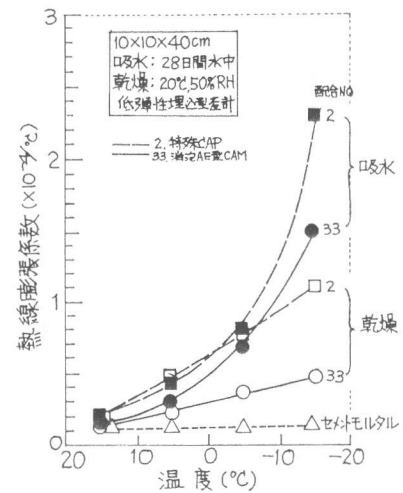


図10 熱線膨張係数

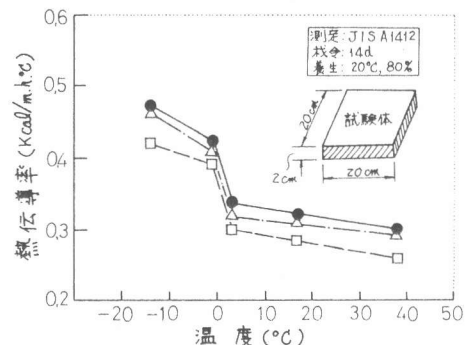


図11, 環境温度と熱伝導率との関係

性状は、アスファルトの特質・砂と気泡のひびわれアレスター効果の寄与と考えるべきであらう。

d) 応力緩和性と静的弾性率; 一定ひずみを持続させた時のCAMの圧縮応力と見掛け静的弾性率の変化を図13に示す。この図から、破壊応力の約1/3という載荷初期の応力とそれにもとづく静的弾性率は、数分後には初期値の約半分まで急減し、その後安定するという粘弾性体特有の現象があらわれる。

上記c), d)特性は、長期に作用する死荷重、乾燥収縮、温度等による発生応力を緩和する特筆すべき特徴と看做され、消泡AE型CAMは耐ひびわれ性の優れた材質であると評価される。

#### (4) 感温性

乳剤・セメント比を変えたCAMの温度と圧縮強度との関係を図14に例示する。アスファルトが多いほど、低温になるほど強度は増大する。また、静的弾性率も同じ傾向を示しアスファルトの感温性状が顕著に現われる。これは本材の不可避的な特性で抜本的な改善は望めない。そこで、実用面からの理論解析および実測結果の検討を行い、低温時における強度の増加は軌道スラブの応力・変位を減少させるので問題とならないが、弾性率すなわちスラブ支持ばね係数の増加は構造物の高周波振動を増大させるので、環境規制区域では防振ゴム併用等の施策が望まれた。

上述までの成果以外に、各種の材料・温度・施工方法に対する施工性、充填性、力学特性、耐候性等莫大かつ広汎な検討を経て、本複合グラウトの設計施工標準が確立された。

#### 4. まとめ

寒冷・積雪の地域において、軌道支持物下の緩衝材として供用するため、CAMの耐久性の向上について検討した結果を以下に要約する。

① 消泡剤とAE剤の併用および所定の練りませ方法により、CAM組織内の気泡の改質と適量が確保され、耐凍害性が画期的に改良される。

② 乾燥収縮、温度変形に比べて伸び能力、応力緩和性、静的弾性率等の前者を緩和する性能のほうが優れ、耐ひびわれ性に属する材質と評価される。

③ アスファルトの特質とする感温性は不可避的であるが、実用上支障がない範囲と看做される。

これらの成果および種々の検討に基づき、新しい手法で開発された消泡AE型CAMは、耐凍害性その他特性が最も優れ、実用上十分な機能を有すると評価され、目下東北・上越両新幹線で本格的に供用されつつある。

終りに、本研究施行に当り、絶大な実験協力を戴いた電気化学工業(株)、東亜道路工業(株)、日産化学工業(株)の関係者および指導と援助を受けた部内の皆様方に対して衷心から感謝の意を表します。

#### [ 文 献 ]

- 1) 佐藤, 樋口 “道床部に着目した新軌道の研究” 土木学会論文報告集, No.184, 1970.12
- 2) 樋口, 原田, 杉山 “軌道用7充モルタルの語性値と施工性” セメント技術年報, XXVII, 1973
- 3) 樋口, 原田, 上野 “超速硬質セメントアスファルトグラウトの耐凍害性” セメント技術年報, XXX, 1976
- 4) 供, 鎌田 “コンクリートの凍害と初期凍害” コンクリート工学, Vol.16, No.5, May, 1978

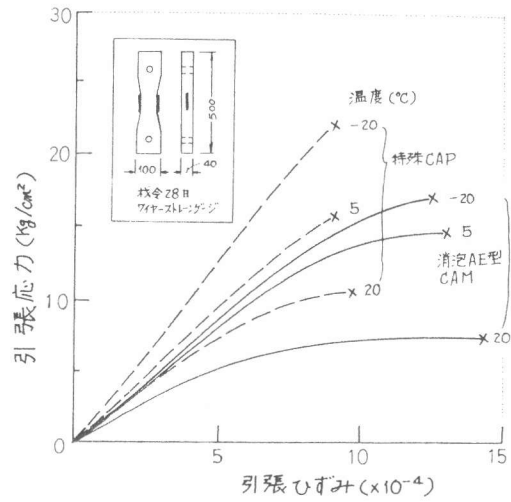


図12, 引張による $\sigma$ - $\epsilon$ 曲線

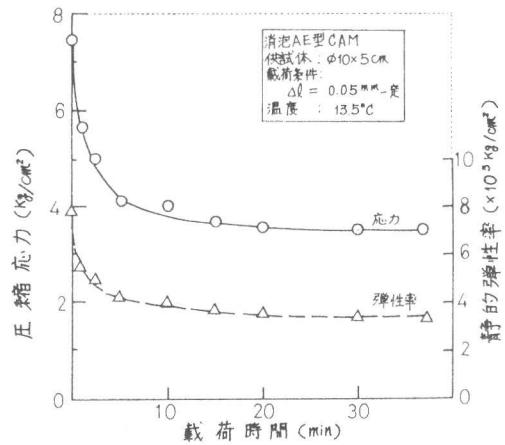


図13, 応力緩和曲線(歪一定)

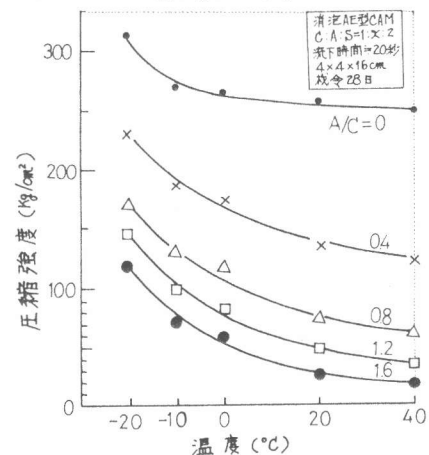


図14, 圧縮強度の温度依存性