

# 常温水中硬化型瀝青系新複合材料の開発と特性 —地中構造物の防水用材料として—

森吉昭博\*・深井一郎\*\*・竹内幹雄\*\*\*  
・井戸田芳昭\*\*\*\*

アスファルト乳剤とセメント等硬化剤および液体状高吸水性ポリマーを混合した瀝青系新複合材料を開発した。常温下でこれらの材料を混合攪拌すると5~30秒でソフトクリーム状にゲル化し水中でも希釈されることなく硬化する。硬化後の物性は止水性とたわみ性に優れている。この特性をシールドトンネルの裏込め部分に応用すれば、トンネルの防水性能と耐震性能の向上に寄与できると考えられる。本文は、この裏込め材料の開発とその基本物性試験結果について報告するものである。

**Keywords :** asphalt emulsion, cement, polymer, waterproof backfilling material for underground structures

## 1. はじめに

軟弱地盤や滞水地盤でのトンネル築造に大きな有効性をもつシールド工法は施工技術のめざましい進歩により都市部を中心として大口径、大深度のトンネルの施工を可能にした。この傾向につれ、トンネルの防水、および耐震はますます重要な課題となってくる<sup>1),2)</sup>。

シールドトンネルの防水性について著者らは、裏込め注入部分に着目し検討を進めている。従来の裏込め注入工は、

- ① 地山の緩みと沈下の防止
- ② セグメントからの漏水防止
- ③ セグメントリングの早期の安定

等の目的をもって施工されている<sup>3)</sup>。裏込め注入工はトンネルの最外周部に位置し、一次防水材として最も重要な位置にあると考えられるが、今までは主としてシールド工とコーキング工に重点が置かれていた。

シールドトンネルの裏込め注入材料は、砂-モルタル系、ケイ酸-モルタル系、可塑性材料など多種使用されているが、どれもセメント系材料が主であり、構造部材と考えてはならないため比較的貧配合であった。また、セメント系材料の性質として破壊ひずみが小さく、軟弱地盤地帯における地盤沈下や地震時の地盤の動きに追従できず、ひびわれが発生しやすいため、長期的な防水を考えた場合、問題が生じることもあった。

また耐震面においては、一般に地盤は均一ではなく、地盤の振動は場所により異なるため、地中構造物は地盤剛性の変化部や構造形態の変化部で被害が生じやすく、十分な検討が必要となる。

このような地盤剛性急変部で集中する断面力を和らげる方法の一つとして、地盤と構造物との境界で構造物に作用する変形を軽減する方法、つまり、柔らかい裏込め材を注入することによる地中構造物の地震時応力低減構法の開発にも取り組んできた<sup>4)-7)</sup>。

このような観点からたわみ性を有する材料として瀝青材料に着目した。

常温・気中で硬化する材料として軌道スラブ充填などに使用されているアスファルト・セメント混合材等がある<sup>8)</sup>。しかし、この材料は水中で希釈されることから裏込め材としての使用は不可能である。

以上から、水中施工が可能で、十分なたわみ性を有しかつ防水性を同時に向上するための瀝青系新複合材料(以下、新材料という)<sup>9)-12)</sup>を開発したので、この特性について報告する。

## 2. 瀝青系新複合材料の概要

この新材料はアスファルト乳剤、セメント等硬化材、高吸水性ポリマーを混合して得られる。

最初にそれぞれの基本材料について説明し、次に混合攪拌後の性状について述べる。

### (1) アスファルト乳剤

アスファルト乳剤は、普通比較的硬質なストレートアスファルトを乳化剤と安定材を含む水中に微粒子(数ミクロン)として分散させ液状としたものである。

今回使用したアスファルト乳剤は、セメントと均一に混合できるノニオン系(乳剤が中性を示す)のタイプのものであり、乳剤中のストレートアスファルトの体積は全体の60%程度で、針入度は90程度と170程度のもの2種類とし、いずれも乳化剤を含んだ水の体積は40%程度である。アスファルト乳剤の比重は1.01~1.03である。

\*正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科  
(〒060 札幌市北区13条西8丁目)

\*\*工博 北海道大学教授 工学部電気工学科

\*\*\*正会員 工修 技術士(株)奥村組技術開発部

\*\*\*\*正会員 (株)奥村組技術開発部

Table 1 Composition of New Bituminous Composit Material (Weight Ratio).

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
Asphalt Emulsion P-90	100	100	100	100	100	100	—	100	100	100	100	100
Asphalt Emulsion P-170	—	—	—	—	—	—	100	—	—	—	—	—
High Early Portland Cement	30	30	30	40	—	—	30	30	30	30	30	20
Jet Cement	—	—	—	—	20	30	—	—	—	—	—	—
High-Water-Absorbing Polymer	3	4	5	4	4	4	4	3	4	2	—	—
Filler *	—	—	—	—	—	—	—	10	—	—	—	—
Sand **	—	—	—	—	—	—	—	—	10	—	—	—
Bentonite ***	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.5	—	—

\* Filler (Calcium carbonate 200 #)      \*\* Sand (Toyoura standard sand)  
 \*\*\* Bentonite (Gunma-Bentonite 200 #)

(2) セメント等硬化剤

普通セメント, 早強セメント, 高炉スラグ等目的に合わせて使用可能である。

(3) 高吸水性ポリマー

今回使用した高吸水性ポリマーは, 施工上取り扱いやすい液体状であり, 油の中に固形分が懸濁しているカチオン系 (液が弱酸性) 油中水型アクリル重合体である。

外観は乳白色液体で, 固形分は平均5ミクロン以下の粒子であり, 純水に対しては300倍の吸水能力をもっている。ただ吸水能力はpHや各種電解質の存在により変化する。ここではセメントによるアルカリや乳剤中の電解質に左右される。

高吸水性ポリマーは, アスファルト乳剤中の水を保水し, 増粘する目的で使用する。保水後は外部の水に対して溶解せず, 実用的な圧力をかけても, 吸水後の水を放出しない特徴を有している。高吸水性ポリマーの比重は, 1.05~1.10である。

(4) 混合攪拌後の性状

上記の基本材料を使用して, 最初にアスファルト乳剤とセメント等硬化剤を混合攪拌し, 次に高吸水性ポリマーを混合攪拌すると, 混合後5~30秒でソフトクリーム状にゲル化し, 以後セメントの水和反応によって硬化していく。ゲルタイムは, 高吸水性ポリマーが乳剤と混合後, 乳剤中の水分を保水することによるため高吸水性ポリマーの量を変えることにより調整可能である。

また, アスファルト乳剤とセメントの混合物は水に対して希釈されるが, 高吸水性ポリマーを混合すると強い粘性および凝集力を示し水に対して希釈されない。硬化後はアスファルト独特の粘性を有し柔らかく, 硬化後の固さはセメント量により変化する。

シールドトンネルの裏込め注入工は, 最近1.5ショット方式で施工されることが多い。新材料についても, A液をアスファルト乳剤とセメントを混合したもの, B

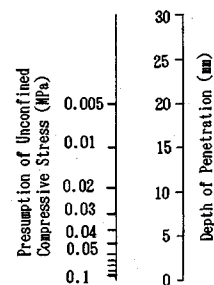


Fig.1 Relation between Depth of Penetration and Presume of Unconfined Compressive Stress.

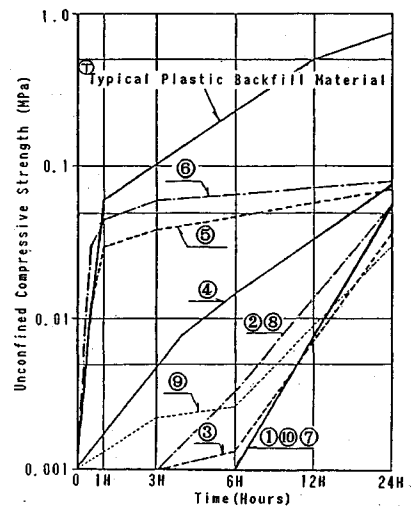


Fig.2 Results of Cone-Penetration Test.

液を高吸水性ポリマーとし, それぞれ圧送し注入する直前にA液とB液を混合することで施工が可能である。

3. 瀝青系新複合材料の特性

新材料の基本材料であるアスファルト乳剤, セメント, 高吸水性ポリマーの量および性質, そして増量を目的とした添加剤 (砂, 石粉, ベントナイト) も含めてパラメ

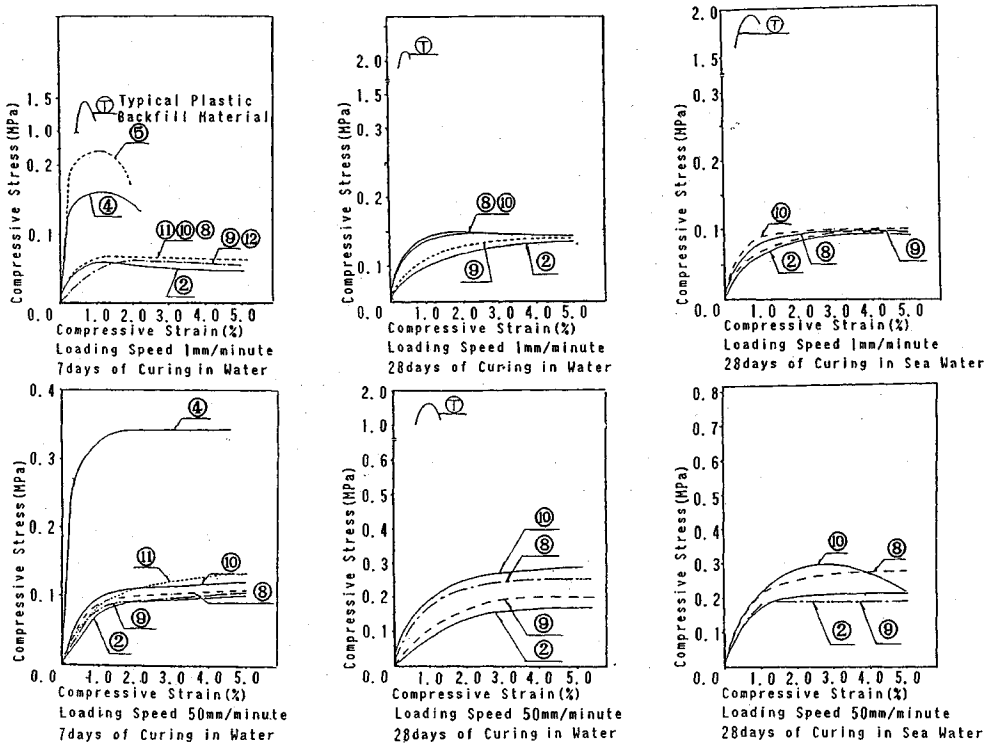


Fig.3 Results of Unconfined Compression Test.

トリックに配合を変化させ実験を行った。

実験は、コーン貫入試験、一軸圧縮試験、曲げ試験、透水試験、中空ねじりせん断試験を行った。コーン貫入試験は混合後 24 時間以内の硬化の程度を検討するために、また、一軸圧縮試験および曲げ試験は新材料の硬化後の弾性係数、強度およびひずみを検討するために実施した。また、中空ねじりせん断試験は新材料のせん断弾性係数や減衰定数を求め耐震性を検討するために実施した。

今回の実験は、シールドトンネルの裏込め材を開発対象としているから、一般的な地下水の温度とされる 15°C で行った。また一軸圧縮試験はアスファルトに速度依存性があることから、ひずみ速度 1%/分および 50%/分の 2 種類で行った。

また微視的構造を解明するため電子顕微鏡にて観察を行った。

(1) 配合

実験に使用した配合を Table 1 に示す。なお、配合②は基本配合である。

(2) 実験結果

a) コーン貫入試験 (試験温度 15°C)

混合後のゲル化した材料の初期の強度をみるために、重量 1.76 N (0.18 kgf) 先端角度 15°C のコーンを用いて貫入深さを測定し、初期の一軸圧縮強度を推定した。

推定には、Fig.1 に示す貫入量—軸圧縮強度の関係<sup>13)</sup>を使用した。この関係は、セメントモルタルに対してのものであり、新材料に直接当てはまるものではないが、定性的な傾向をつかむことは可能である。測定結果を Fig.2 に示す。

配合①、②、③より高吸水性ポリマーを増加させると初期強度発現時間がわずかであるが変化する。

配合②と⑦を比較するとアスファルト乳剤中のストレートアスファルトの柔らかい配合⑦の方が初期強度発現時間が少し遅いことがわかる。

初期強度は主としてセメントの性質に左右される。ジェットセメント (超早強) を使用した配合⑤、⑥は初期強度発現は 30~60 分で起こるが、早強セメントを使用した配合②、④などは 3~4 時間かかる。また添加剤を混入しても顕著な差はない。

従来裏込め注入材として使用されているセメント系可塑性注入材の初期強度発現結果 ① もあわせて表示しているが非常に速い強度発現を示している。これは、セメントの水和を促進させる急硬材 (ケイ酸ナトリウムが主成分) を使用しているからである。

シールドの裏込め材は充填後ある時間帯は充填性能を増すために流動性を保ち、それ以後は地山の緩みを防止する目的から急速に強度が大きくなるものが求められていた。しかし、地山の緩み防止は空隙を早期に充填する

ことが重要であり、初期強度は二次的なものと考えられ、事実この観点からの施工も行われていた。

一方、組み立てられたセグメントの早期安定やシールド推進反力をセグメントで受けることを考慮すれば、裏込め材の初期強度も必要であろう。過去の軟弱地盤での施工実績と1リング当たりの施工サイクルを考慮すれば、混合後3時間程度で、0.02 MPa (0.2 kgf/cm<sup>2</sup>) 程度の圧縮強度は必要と考えられている。したがってこの場合ジェットセメントでは、この条件を満たしていることがわかる。

b) 一軸圧縮試験 (試験温度 15°C)

混合後 φ50 mm×100 mm の円柱状の供試体を作製し一軸圧縮試験を行った結果を Fig.3 に示す。7日間および28日間水中養生したものと、海水への耐久性を調べるために28日海水養生した供試体を作製し実験した。載荷速度は1 mm/分と50 mm/分の2種類で試験を行った。

i) 基本配合②で7日間水中養生した供試体の最大圧縮強度は1 mm/分の載荷速度で0.05 MPa (0.5 kgf/cm<sup>2</sup>)、50 mm/分では0.1 MPa (1.0 kgf/cm<sup>2</sup>) の値を示した。圧縮応力-圧縮ひずみの関係を見ると、圧縮ひずみが1~2%で剛性が変化し、以後ほぼ一定の応力を示す。

ii) 基本配合②で28日間水中養生した供試体の最大圧縮強度は1 mm/分の載荷速度で0.08 MPa (0.8 kgf/cm<sup>2</sup>)、50 mm/分では0.16 MPa (1.6 kgf/cm<sup>2</sup>) の値を示している。

iii) どの配合においても、載荷速度が50 mm/分は1 mm/分に比較して2.0~2.5倍の大きな値を示しているが、これはアスファルトの圧縮強度がひずみ速度に依存する性質によるものと考えられる。今後、新材料のひずみ速度依存性について調べる必要があると考えられる。

iv) 28日間養生したものは7日間養生したものに対し約2倍の最大圧縮応力を示している。

v) 28日間海水養生したものは水中養生したものに比べ5~10%程度大きな圧縮応力を示している。したがって、1か月程度では新材料が海水に浸され劣化するという事はないと考えられる。

vi) 強度を促進する目的としてセメント量を多くした④の配合で7日間養生したが一軸圧縮強度は、載荷速度1 mm/分で0.15 MPa (1.5 kgf/cm<sup>2</sup>) の値を示している。

しかし、圧縮応力-圧縮ひずみの関係を見ると、ひずみが1.2%付近で最大応力を示し、以後、低下している。つまり圧縮強度は小さいもののセメントモルタル系材料に性質が近くなる。アスファルト独特のたわみ性もセメントを多く混入すると低減してしまうと考えられる。

vii) 砂、ベントナイトおよび石粉(フィラー)を添

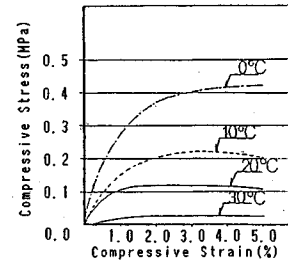


Fig.4 Dependent on Temperature of Compressive Stress.

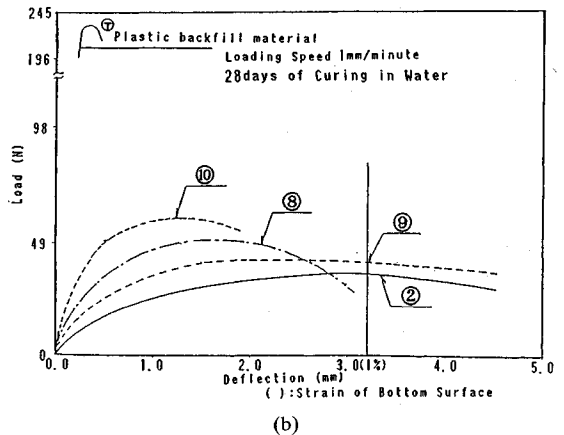
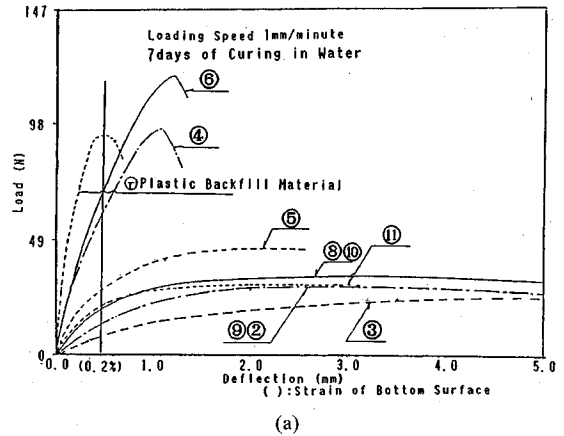


Fig.5 Results of Bending Test.

加剤として加えた配合⑧、⑨および⑩は28日養生強度で比較すると加えない場合の配合②より大きな強度を示した。このうち砂を混入した配合⑨の場合は、ベントナイト、石粉を混入した配合⑩および⑧に比べて強度発現は小さい。また、たわみ性は添加剤を加えても失われることはなかった。

新材料の圧縮強度の試験温度を変えて行った結果を Fig.4 に示す。配合②に対して一軸圧縮試験を、0°C、10°C、20°C、30°Cで行った。アスファルトの性質を反映し温度が低下するに従って圧縮強度は増大するがたわ

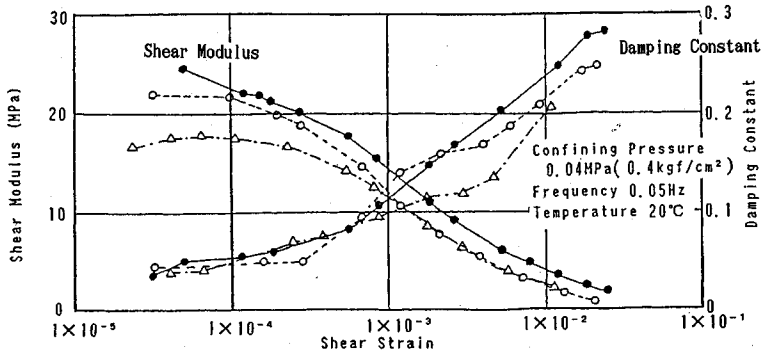


Fig.6 Results of Hollow-Cylindrical Torsion Test (● 14 days of Curing in Water, ○ 10 days of Curing in Water, △ 7 days of Curing in Water).

Table 2 Results of Permeability Test Coefficient of Permeability (cm/s).

Condition	7 Days of Curing		28 Days of Curing	
	P=0.1MPa	P=0.3MPa	P=0.1MPa	P=0.3MPa
Plastic Backfill Material	$1.7 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-7}$	—	—
New Material	$8.0 \times 10^{-9}$	$2.0 \times 10^{-9}$ ~ $2.0 \times 10^{-9}$	—	$8.9 \times 10^{-10}$ ~ $1.9 \times 10^{-9}$

み性は保持していることがわかる。載荷速度は 50 mm/分である。

シールドトンネル裏込め材の硬化後の物性は、その材料が非圧縮性であることが重要である。また、圧縮強度については従来より地山相当という表現がされているが、圧縮強度で考えるならば一次覆工時のセグメントの浮き上がり防止に対して所定の安全性を有する強度 [通常の場合、自重を除いた浮力は 0.06 MPa (0.6 kgf/cm<sup>2</sup>) 程度であり、これに安全率として 1.5 を乗じると、0.09 MPa (0.9 kgf/cm<sup>2</sup>) となる]  $q_u=0.1$  MPa (1 kgf/cm<sup>2</sup>) 程度を確保していれば十分であると思われる。

c) 曲げ試験 (試験温度 15°C)

40 mm×40 mm×160 mm の直方体の供試体を作製し、7 日間および 28 日間水中養生したのに対し曲げ試験を行った。

曲げ試験はスパン 100 mm の単純ばりで中央載荷方式とした。載荷速度は鉛直下向き 1 mm/分にて試験を行った。結果を Fig.5(a), (b) に示す。

基本配合②の 7 日間および 28 日間水中養生した供試体に対しては鉛直中央のたわみが 5 mm になっても破壊せずたわみ性を十分保持している。これに対しベントナイト、石粉を加えた配合⑧、⑩は 28 日間水中養生したものは 7 日間水中養生したものと比較すると多少たわみ性に欠けている。

配合②、⑧、⑨、⑩とも最大曲げ応力度は、0.08~0.12 MPa (0.8~1.2 kgf/cm<sup>2</sup>) であり、このうち配合

②では最大曲げ応力が発生したときの外縁の曲げひずみは 1~3 % であった (弾性係数は圧縮試験より求めた)。

セメント量が多い配合④やセメント系の可塑性注入材に対しても同様の試験を行ったところ 0.1~0.3 % の小さなひずみの範囲で破壊した。

d) 透水試験

近年、シールドトンネルの施工箇所は深くなる傾向にあり、それに伴いトンネルに作用する水圧も大きくなってきている。したがって高水圧下での材料の透水係数の把握が重要になる。

今回、配合②で 7 日間水中養生したものと 28 日間水中養生したのものに対して、試験時の圧力を 0.1 MPa (1 kgf/cm<sup>2</sup>) と 0.3 MPa (3 kgf/cm<sup>2</sup>) で透水試験を行った。

透水試験結果を Table 2 に示す。

裏込め材の中でも、透水係数が小さいとされている可塑性注入材の一配合例と比較しても新材料ははるかに小さな透水係数を示しており、圧力が上昇するに従って、より不透水性を示す傾向にある。

e) 中空ねじりせん断試験

せん断弾性係数と減衰比を測定するため、配合②で作成した新材料に対して、中空ねじりせん断試験を行った。

供試体は、外径 10 cm、内径 6 cm、高さ 17.2 cm であり 7~14 日間湿潤養生したものである。拘束圧は 0.04 MPa (0.4 kgf/cm<sup>2</sup>)、振動数は 0.05 Hz で行った。せん断弾性係数-せん断ひずみ、減衰定数-せん断ひずみの関係を Fig.6 に示す。図より、新材料にひずみ依存性があることがわかる。

10 日間養生した供試体に対してせん断ひずみが 3 % 弱の大ひずみを与えた後、その 4 日後に再度同じ供試体を使って行ったところ逆に剛性が若干上回っていた。

セメントの硬化による影響も考えられるが、一度は非線形と思われる領域まで載荷したにもかかわらず、4 日の間にアスファルトの自癒性 (ダイラタンシー) により回復したものと考えられる。Fig.7 に、せん断ひずみが、 $1 \times 10^{-2}$  のときの繰返し応力-ひずみの関係を示したが、

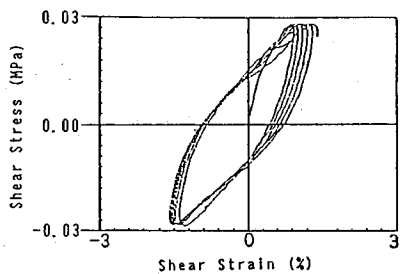


Fig.7 Stress-Strain Diagram.



Fig.8 Photograph of New Bituminous Composite Material.

大ひずみにもかかわらず比較的安定した結果になっている。また、減衰定数-せん断ひずみの関係は粘性土の上限値に近い。

f) 電子顕微鏡による観察

Fig.8に、新材料を-110°Cで凍らせ打撃による劈開面を500倍に拡大した電子顕微鏡写真を示す。

セメントの水和反応によってみられるであろう水酸化カルシウムの板状結晶、エトリンジャイトの針状結晶は見出されていない。光学的顕微鏡撮影結果からアスファルトは結晶体としての形態をとどめていないことが知られている。新材料もアスファルトに近い状態になっており、セメント水和物等をアスファルトで包み込んだ連続体であると考えられる。

4. 初期強度発現型瀝青系新複合材料<sup>14)</sup>

前述のとおりアスファルト乳剤、早強セメント、高吸水性ポリマーを使用する限り、その他の添加剤を混入しても初期強度が小さい結果となった。

そこで、初期強度を必要とする場合を想定して高吸水性ポリマーの代わりにセメントの水和反応を促進する急硬材を使用し試験を行った。急硬材は、NATMの吹付けコンクリートに使用されているアルミン酸塩系の液状品を用いた。また、高吸水性ポリマーを使用しないため水への希釈性が心配されることから増粘材としてベントナイトを混合した。

(1) 配合

Table 3 Composition of New Bituminous Composite Material (Weight Ratio).

	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	㉑
Asphalt Emulsion P-90	100	100	100	100	100	100	100
Portland Cement	30	30	25	—	30	45	30
Bentonite	6	3	6	3	10	14	6
Water	—	—	—	—	20	40	—
Flash-Setting Agent	10	10	12	6	10	10	7.5
Retarder	—	—	1.5	—	—	—	1.5
Blast-Furnace Slag	—	—	—	—	20	—	—
Lime	—	—	—	—	10	—	—
Water-Cement Ratio	133	133	133	133	200	178	133

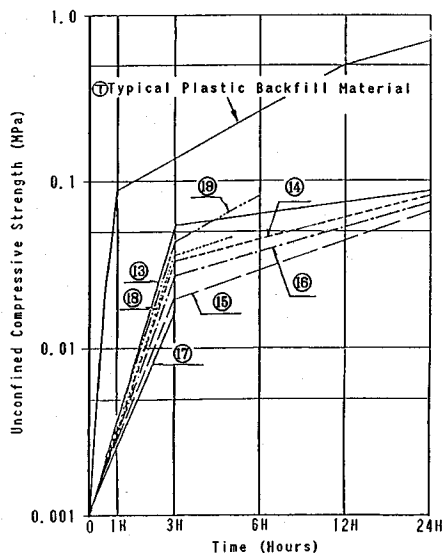


Fig.9 Results of Cone Penetration Test.

実験に使用した配合を Table 3 に示す。

(2) 実験結果

a) 初期強度 (試験温度 20°C)

Fig.9に混合後の時間とコーン貫入試験から推定した一軸圧縮強度との関係を示す。

配合⑱を除くすべてにおいて、3時間で0.03~0.05 MPa (0.3~0.5 kgf/cm<sup>2</sup>)の強度が達成できた。セメント量については、配合②と同様にアスファルト乳剤の重量比30%を目安とした。混合後約10秒で粘性をおび、約1分で容器を逆さにしても垂れない状態になった。

Table 4 Composition of New Bituminous Composit Material (N/m<sup>3</sup>).

	A Liquid				B Liquid	
	Asphalt Emulsion	Portland Cement	Bento nite	Retarder	Flash-Setting Agent	High-Water-Absorbing Polymer
Composition ②	8634 N	2587 N	—	—	—	343 N
Composition ⑬	8174 N	2038 N	490 N	118 N	980 N	—

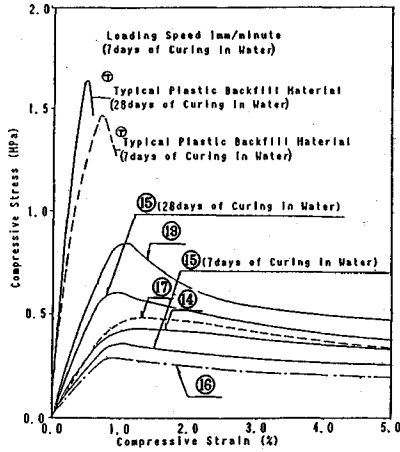


Fig.10 Results of Unconfined Compression Test.

しかし、混合物は柔らかく1時間程度は加圧により流動する状態を保っていた。

b) 一軸圧縮試験 (試験温度 15°C)

7日間水中養生した後の一軸圧縮試験結果を Fig.10 に示す。

配合⑭, ⑯, ⑰では、圧縮ひずみ 1.2% 程度で最大応力を示し、以後徐々に応力が低下する傾向を示している。

最大圧縮強度が 0.5 MPa (5 kgf/cm<sup>2</sup>) 程度までであれば最大応力達成後も供試体にクラックの発生等の顕著な変化は身受けられなかった。図中に 28 日養生のデータ⑮も示したが最大強度に達した後いくぶんの強度低下はあるが所定の強度を保持したまま、たわみ性を所持している。強度が高くなるに従い、たわみ性に欠ける傾向にある。

なお、透水係数は配合⑯では②の高吸水性ポリマーを使用したものとほぼ同じであった。

5. シールドトンネル裏込め材としての注入施工実験

シールドトンネルの裏込め注入材として新材料を使用することを想定して、注入実験を行った。実際にポンプを使って A 液, B 液を圧送し、ラインミキサーにて混合後、シールドトンネルのテールボイドを模擬した置換装置内へ注入した。A 液, B 液の混合状況、先端ホース

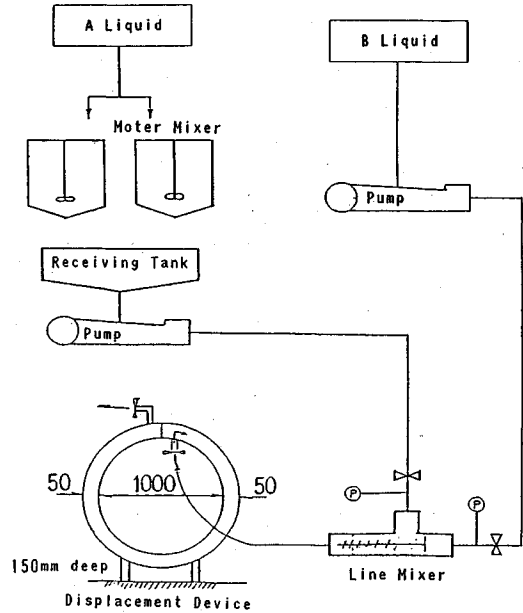


Fig.11 Impregnation Experiment.

からでるゲルの状況、水への希釈性の状況および清掃を含めた設備等のハンドリングの把握を行った。

(1) 配合

実際に使用した配合を Table 4 に示す。

(2) 実験ケース

実験は次の 2 ケース (養生は 3 日間) で行った。

Case-1 置換装置内は空洞にしておき、注入後硬化した状況を確認した。

Case-2 置換装置内は水で満たしておき、その中へ注入する。注入した量だけは排水口より排水させる。つまり、水と新材料を置換し水への希釈性を確認する。

後に硬化した状況を Case-1 のものと比較した。

(3) 注入施工実験の手順

注入施工実験の手順を Fig.11 に示す。

(4) 実験結果

実験より両配合とも次の結果が得られた。

a) 注入圧は注入孔において 0.3 MPa (3 kgf/cm<sup>2</sup>) 程度で異常なく、圧送量も計画どおり管理可能であった。

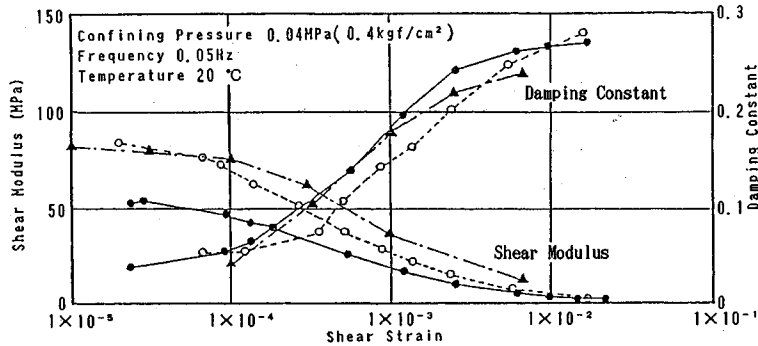


Fig.12 Results of Hollow-Cylindrical Torsion Test (▲ Standard Sand in Toyoura (Void Ratio 0.64), ● 13 days of Curing in Water, ○ 11 days of Curing in Water).

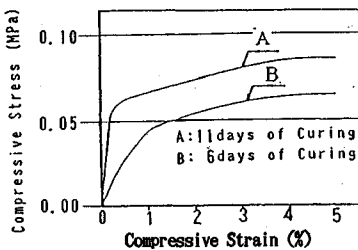


Fig.13 Results of Unconfined Compression Test.

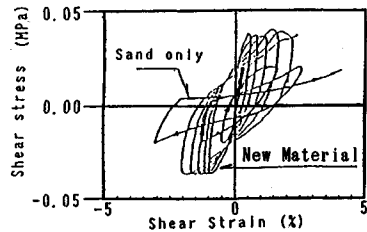


Fig.14 Stress-Strain Curve.

Table 5 Presumption of Unconfined Compressive Stress.

	Composition ②	Composition ⑤
Arch Crown	0.052 MPa	0.28 MPa
Invert Arch	0.048 MPa	0.26 MPa
Springing (left)	0.049 MPa	0.28 MPa
Springing (right)	0.051 MPa	0.27 MPa

b) ラインミキサー部の長さは 20 cm で、ラインミキサーから注入孔までのホースの長さは 5 m で良好な攪拌状態が確認できた。

c) Case-2 の場合、新材料は水に希釈されることなく完全に置換が可能であった。また硬化後の状態を確認するため、注入 3 日後にコーン貫入試験にて測定した。測定結果を Table 5 に示すが、どこの場所でも均一な品質であることが確認できた。

d) A, B 両液が混合された先のホースは、注入後スポンジを圧送し清掃する必要がある。

## 6. 増量材 (砂) を混入した瀝青系新複合材料

前述の Fig.5 (a), (b) に示されたように新材料に砂を添加してもたわみ性は 28 日養生試験体においても低下しないことが確認されたので新材料に増量材として砂を混入することを考えた。砂粒子は、アスファルトの連続層の中で独立した状態で存在することが予想され、このときの混合物の材料物性を把握するために実験を行った。

この混合物の変形に対する性質を把握するために豊浦標準砂と新材料の混合供試体を作製し、8~13 日間湿潤養生した後、中空ねじりせん断試験を行った。得られたせん断弾性係数-せん断ひずみと減衰定数-せん断ひずみの関係および一軸圧縮試験の結果 Fig.12, 13 に示す。拘束圧は 0.05 MPa (0.5 kgf/cm<sup>2</sup>)、振動数は 0.05 Hz で行った。配合は重量比でアスファルト乳剤 100 に対して、砂 350、セメント 30、高吸水性ポリマー 4 としている。

また、Fig.12 に、豊浦標準砂の拘束圧 0.05 MPa (0.5 kgf/cm<sup>2</sup>) で間隙比 0.64 のときの代表的なせん断弾性係数-せん断ひずみ、減衰定数-せん断ひずみの関係<sup>15)</sup>をあわせて示した。これと新材料と砂との混合物を比較すると減衰定数、せん断弾性係数ともほぼ同じ値を示していることがわかる。また、新材料と砂の混合物はひずみが大きくても破壊せず大きな減衰が得られることがわかる。

次に Fig.13 の一軸圧縮試験結果より新材料と砂の混合物は粘土のような性質を示していることがわかる。圧縮ひずみが 5% の大きなひずみを与えても破壊せず、変形に追従できることから長期の不透水性が保持できると思われる。

Fig.14 に新材料と砂の混合物のせん断ひずみが 1.8 × 10<sup>-2</sup> のときの繰返し応力-ひずみ曲線を示した。また、豊浦標準砂の相対密度 47%、拘束圧 0.1 MPa (1 kgf/cm<sup>2</sup>) のときのデータもあわせて示したが新材料と砂の混合物は大ひずみにおいても比較的安定していることが



わかる。

施工方法についても、高圧ポンプを使用して圧送することにより十分可能であると思われる。

また、配合、温度による変化、透水係数についても今後、検討していく必要がある。

## 7. ま と め

種々の実験の結果、新材料について次のような結論が得られた。

(1) 通常の裏込め材の1/100以下の透水係数を有する。

(2) 圧縮ひずみ1~2%で最大圧縮応力度に達し、それ以上のひずみに対しても一定で、安定している。また、圧縮ひずみ5%以上に対しても破壊しないたわみ性を有する。

(3) 初期強度は急硬材を使用することにより発現可能である。

(4) 砂を混入した新材料は、数回の大ひずみを繰返し載荷しても破壊せず、安定した性質を有する。

(5) 実用的な面では、従来の設備で注入が可能である。

以上の結論から高い防水性能が要求されるシールドトンネルの裏込め材に適していると考えられる。

## 8. お わ り に

今回、シールドトンネル裏込め材を目的とした瀝青系新複合材料について報告した。このほか、止水性、たわみ性を利用した止水壁等への展開、液状化防止を目的とした地盤改良材としての展開、さらにはこの材料の軟らかさとたわみ性を利用すれば、地中構造物に作用する地震時の外力を低減できることが数値解析の結果判明している。モデル実験等により解明していく予定である。

アスファルトの歴史は古く、種々の利点をもっており土木材料としても安価である。従来から道路舗装に主として利用されているが、今回、水中でも常温で使用できるということで応用範囲がますます広がっていきとえられる。ジオフロントのかけ声が高い今日、今回の開発が良質な社会資本のストックに寄与するところがあれば著者らにとり望外の喜びである。

最後に、研究遂行にあたり適切な助言を賜りました東海大学久保慶三郎教授、終始温かい目で開発を支援頂きました池田 功氏をはじめとする(株)奥村組の関係各位、また実験開発等でご協力して下さいました大野健一郎

氏および東亜道路工業(株)の関係各位に心より感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 元山 宏・三木克彦・立石俊一・竹内幹雄：地盤剛性急変部におけるトンネルの模型振動実験，第20回地震工学研究発表会，pp.337~340，1989年10月。
- 2) 竹内幹雄・高橋 忠・元山 宏・渡辺啓行：地盤剛性急変部の線状地中構造物の地震時応力評価法，土木学会論文集，第422号/1-14，pp.323~332，1990年10月。
- 3) トンネル標準示方書(シールド編)・同解説，pp.146~148
- 4) 深井一郎・森吉昭博・竹内幹雄・井戸田芳昭：トンネル及びトンネルの築造方法，公開特許公報(A)平2-74795，平成2年3月。
- 5) 建設省土木研究所・(財)先端建設技術センター・(株)奥村組・鹿島建設(株)・(株)鴻池組・清水建設(株)・大成建設(株)・飛鳥建設(株)・(株)間組・フジタ工業(株)：地下構造物の耐震設計技術に関する研究，平成元年度共同研究報告書，1990，pp.282~324，1990年3月。
- 6) 鈴木猛康：シールドトンネルの免震構造に関する研究，土木学会第20回地震工学研究発表会講演概要，pp.565~568，1989年7月。
- 7) 宇波邦直・鈴木猛康：シールドトンネルの免震構造に関する研究(その1)(その2)，土木学会第45回年次学術講演概要集，第1部，pp.1204~1207，1990年9月。
- 8) 渡邊借年・鳥取誠一・原田 豊：スラブ軌道用セメントアスファルト複合材料の耐寒性能の向上に関する実験的研究，土木学会論文集，第408号/1-14，pp.205~214，1989年8月。
- 9) 森吉昭博・深井一郎・竹内幹雄・井戸田芳昭：地中構造物の防水，減震用材料としてのアクアファルトの開発と特性，土木学会第44回年次学術講演概要集，第3部，pp.68~69，1989年10月。
- 10) Moriyoshi, A., Fukai, I. and Takeuchi, M.: A composite construction material that solidifies in water, Nature, Vol.344, No.6263, pp.230~232, March 1990.
- 11) 深井一郎・森吉昭博・竹内幹雄・大野健一郎：アスファルト乳剤を主成分とする混合組成物，公開特許公報(A)平2-166164，平成2年6月。
- 12) 深井一郎・森吉昭博・竹内幹雄：アクアファルト，商願昭63-146688，平成2年6月。
- 13) 三木五三郎ほか：裏込め注入工法の設計と施工，山海堂，pp.148~152。
- 14) 下村真弘・金井 誠・竹内幹雄・大野健一郎：シールドトンネル防水材としての裏込め注入材料実験，土木学会第45回年次学術講演概要集，第3部，pp.104~105，1990年10月。
- 15) 石原研而：土質力学の基礎，鹿島出版会，pp.198。  
(1990.11.6受付)

## THE DEVELOPMENT AND CHARACTERISTICS OF NEW BITUMINOUS COMPOSITE MATERIAL THAT SOLIDIFIES EVEN IN WATER — NEW WATERPROOF BACKFILLING MATERIAL FOR UNDERGROUND STRUCTURES—

Akihiro MORIYOSHI, Ichiro FUKAI,  
Mikio TAKEUCHI and Yoshiaki IDOTA

The new bituminous composite material is obtained by mixing with asphalt emulsion, cement and high-water-absorbing polymer. This material's components are used in liquid state and through mixing, they form a gel, 5~30 seconds. In this situation, it is not dispersed to water and become hard gradually. The hardened mixture has very low water permeability and high ductility. To obtain this material's characteristics, experiment has been carried out. The result shows that the property is low rigidity and its flexibility gives difficulty to happen the cracks. In this report, application for shield tunnel backfilling material is presented to improve the waterproof and it's possible to decrease the energy by earthquake. Basic experiment result shall be reported.

---