

# 次世代高性能床版の開発(その2)

## ～充填材における性能照査～

### Development of New System of Slab with Half Rigid Joint (Part 2) ～Verification Test on the Filler～

北 慎一郎 Shinichiro KITA  
ソリューション共創センター  
ソリューションビジネス部

櫻井 信彰 Nobuaki SAKURAI  
ソリューション共創センター  
ソリューションビジネス部

赤江 信哉 Shinya AKAE  
太平洋マテリアル株式会社  
開発研究所 機能性材料グループ

谷口晋二郎 Shinjiro TANIGUCHI  
アルファ工業株式会社  
技術部

#### 抄 録

高速道路における床版取替工事に適用するため、プレキャスト PC 床版を充填材のみで橋軸方向に接合する、「半剛接合構造」を提案している。提案構造が供用期間において所定の使用性や耐久性を保持するために必要な、充填材に要求される施工性能・継手性能・耐久性能を整理して、各種試験を実施した。その結果、エポキシ樹脂モルタルは急速施工性に課題があるものの、環境作用に対する十分な耐久性を有することがわかった。また、提案構造に適用するエポキシ樹脂モルタルはフィラー量が多いため、継手幅はポリマーセメントモルタルと同等程度必要であると判断した。ポリマーセメントモルタルは単位水量の適切な管理とポリマー量の増加により、低弾性率と凍結融解抵抗性との両立が可能であることがわかった。

#### Abstract

Our company is developing “Half Rigid Joint”, which is characterized as to connect precast pre-stressed slabs with only filler in bridge axial direction, for the application to slab replacement work in highways. We conducted several tests to ascertain the workability, joint mechanical performance, and chemical durability required for the filler to maintain the specific usability and durability on the proposed joints over the service period. According to the test results, Epoxy Resin Mortar showed sufficient durability, though lack of hardening ability required for rapid construction. And, it was revealed that Epoxy Resin Mortar required the same joint width as Polymer Cement Mortar due to its fillability. Polymer Cement Mortar could achieve both low static elasticity and enough freeze-thaw durability by the appropriate management for the unit water and polymer content.

## 1 緒言

我が国の高速道路は、その40%が供用後30年経過し、重交通による疲労や環境因子による劣化が顕著になっており、東・中・西日本高速道路(以下、NEXCO 各社)では大規模更新・大規模修繕が計画<sup>1)</sup>され、現在実行されている。

大規模更新の中で過半を占めるのが床版取替工事であり延べ224kmの工事が計画されている。床版取替工事では、工事渋滞による経済損失を可能な限り少なくするため、急速施工が要求されることから、現地施工が省略できるプレキャストPC床版の適用が一般的である。プレキャストPC床版は陸上輸送する都合上2.5m以下の幅に分割輸送されて、ループ継手に代表される鉄筋継手で現場接合される。我々は、プレキャストPC床版本体のコンクリートよりヤング係数が小さく、付着強度・引張強度はコンクリートのそれらと同等以上の充填材料で構成する、新形式の継手構造を提案しており、検証を進めてきた。図1に概要を示す。

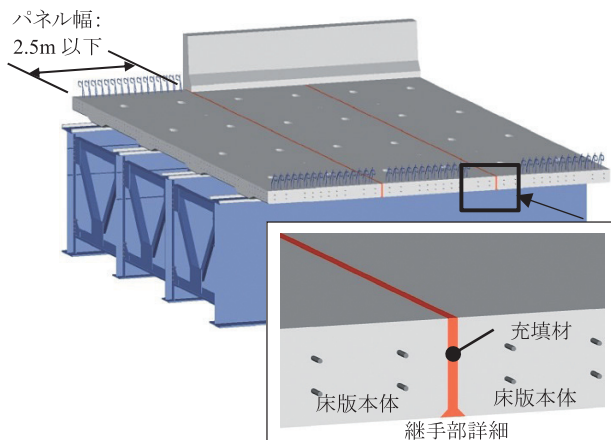


図1 提案継手概要  
Fig. 1 Concept of Half Rigid Joint

これまでの様々な解析検討や構造試験により、提案構造は十分な耐荷性能と疲労耐久性を有していることを確認した<sup>2)</sup>。しかし、プレキャスト床版の接合部に作用する引張応力は、鉄筋で伝達させるのが一般的であり、充填材料のみで伝達する構造形式はこれまでにない。また充填材料には有機物が含まれていることから、環境作用による劣化が懸念された。

そこで、提案構造が供用期間において所定の使用

性や耐久性を保持するためには、充填材には力学的な性能の他に、施工性能・継手性能・耐久性が必要と考えて、これらの性能検証を実施した。本稿ではその試験内容や結果について報告する。

## 2 材料試験

### 2.1 検証した充填材料

これまで構造試験で適用してきた、ポリマーセメントモルタル(以下、PCM)と、エポキシ樹脂モルタル(以下、ERM)について、材料試験を実施した。PCMは床版の断面修復材として使用されている配合を基に改良したものであり、静弾性係数はコンクリートの1/3から1/4程度となっている。ERMは床版のひび割れ補修に使用されている配合を基に改良したものであり、静弾性係数が1/10程度と小さい。また一部の試験では比較検証のため、プレキャストPC床版を想定した呼び強度50N/mm<sup>2</sup>のコンクリート試験体も作成した。これら検証に使用した材料の特性を表1に示す。

表1 検証に使用した材料の特性(材齢(打設後の経過日数):28日)

Table 1 Properties of Materials (Age : 28days)

材料名	環境温度	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	備考
PCM	23℃	9.5	32.6	
ERM		3.8	52.4	
コンクリート		31.1	58.8	呼び強度50 (比較用)

### 2.2 試験の種類

表2に充填材の性能照査試験項目を示す。充填材の施工性能、継手性能および耐久性能に関する照査は、NEXCO 構造物施工管理要領・試験法439「床版上面における断面修復用補修材の試験方法」<sup>3)</sup>に準拠した。構造物施工管理要領の性能照査と異なる試験項目、試験法および基準値については、黄色でハイライトをつけ記載している。これらの変更内容の詳細については3章で述べる。

## 3 試験の概要と結果

### 3.1 施工性能に関する試験

#### 3.1.1 硬化時間

PCMはJIS A 1147に基づいて貫入抵抗値で硬化

表2 充填材の性能照査試験項目一覧  
Table2 List of Verification Tests on the Filler

検証性能	試験項目	引用規格	基準値	試験体の寸法
施工性能	硬化時間	試験法439/JIS A 1147	(PCM用)30分以上	φ150×高さ150mm 500mL プラスチック製容器
		温度上昇法/JIS A 6024	(ERM用)30分以上	
	初期強度	試験法439 JIS A 1108	(時間制約がない場合) 24N/mm <sup>2</sup> 以上 (時間制約がある場合) 2時間: 10N/mm <sup>2</sup> 以上 4時間: 24N/mm <sup>2</sup> 以上	φ100×H200mm
継手性能	充填性	オリジナル	空隙等の充填不良部がないこと	オリジナル試験体①
	ひびわれ抵抗性	オリジナル	2面拘束試験 でひびわれを発生させないこと	オリジナル試験体②
	沈下抵抗性	オリジナル	充填材の不陸が1mm以下	オリジナル試験体②
耐久性	コンクリートとの付着性	JIS A 1106	コンクリート/充填材界面で破断せず、コンクリート側の破断で終了すること	オリジナル試験体③ □-100×100×400mm
	温冷繰り返し抵抗性	JIS A 1171/JIS A 1106	コンクリート/充填材界面で破断せず、コンクリート側の破断で終了すること	オリジナル試験体③ □-100×100×400mm
	凍結融解抵抗性	試験法439/JIS A 1106	コンクリート/充填材界面で破断せず、コンクリート側の破断で終了すること	オリジナル試験体③ □-100×100×400mm
	凍結融解抵抗性	試験法439/JIS A 1148	負荷後の相対弾性係数が60%以上	□-100×100×400mm
	中性化抵抗性	試験法439/JIS A 1153 JSCE-G574-2013	床板コンクリートと同等以上	□-100×100×400mm
	遮塩性	試験法439/JSCE G 572 JSCE-G574-2013	床板コンクリートと同等以上	φ100×H200mm

※      : 構造物施工管理要領の性能照査と異なる事項

が開始する時間を測定した。ERMは発熱反応で硬化が進む材料であり、コンクリートの凝結時間で硬化時間を評価できないため、JIS A 6024で規定された、「温度上昇法」<sup>4)</sup>で計測した。

結果は表3の通りであり、いずれも硬化時間が30分以上あることを確認した。

表3 硬化時間  
Table3 Initial Setting Time

材料名	環境温度	硬化時間
PCM	23°C	43分
ERM		30分

### 3.1.2 初期圧縮強度

初期圧縮強度の検証には、φ100×H200mmの試験体を使用した。試験結果を図2に示す。PCM、ERMいずれにおいても材齢7日以内に24N/mm<sup>2</sup>以上の強度を発現することが確認できた。しかし時間制約がある場合における圧縮強度の閾値(2時間で10N/mm<sup>2</sup>以上、4時間で24N/mm<sup>2</sup>以上)には達していない。これについて、PCMの場合は混入している遅延剤の量を調整することで、強度を早期に発現させることができる。またERMについても配合設計の変更により速硬性の向上を検討しているところである。

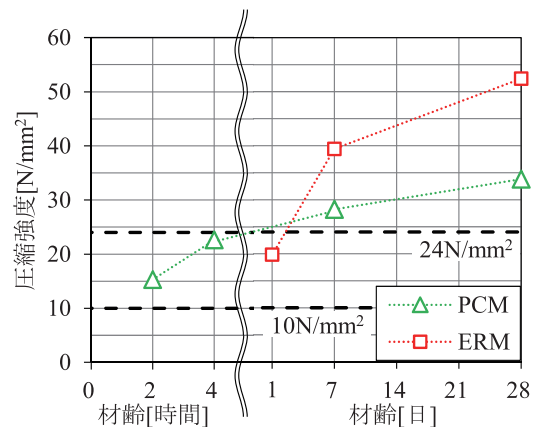


図2 初期圧縮強度  
Fig.2 History Curve of Initial Compressive Strength

### 3.1.3 充填性

構造物施工管理要領にはない試験項目である。コンクリート/充填材界面に充填不良部が発生した場合、所定の疲労耐久性が確保されないため、提案構造を用いたプレキャスト床板継手を模擬した試験体(オリジナル試験体①(図3))を用いて、充填性能を照査した。継手幅の設計管理値は表4に示す通りであり、施工時の誤差や材料ごとの充填性やコストを想定している。充填性試験では継手幅が管理値の範囲で小さい側に変動した場合においても充填可能であることを確認するために、PCMは継手幅を20mm、ERMは10mmとして実施した。図4は充填性確認のために、継手部底面に相当する箇所を示し

たものであり、ERMにおいてはほぼ全長に渡って充填不良が確認された。ERMは従来のひび割れ補修材に対してフィラーを多く配合したことから、充填不良が発生したと考えられ、フィラー量を見直すとともに、設計管理値をPCMと同等の30mm +/- 10mmへ緩和した。

### 3.2 継手性能に関する試験

#### 3.2.1 ひび割れ抵抗性

構造物施工管理要領にある試験項目であるが、試験体形状を変更した。本試験で評価する充填材は、修復すべき断面の形状や使用状況が様々な断面修復



図3 オリジナル試験体①組立状況  
Fig. 3 Appearance of the Original Specimen No. 1

表4 充填性確認試験での継手幅  
Table 4 Applied Joint Width of Fillability Test

材料名	設計管理値	試験における継手幅
PCM	30mm +/- 10mm	20mm
ERM	20mm +/- 10mm	10mm

PCMを充填した試験体(下面)



ERMを充填した試験体(下面)



図4 オリジナル試験体①における充填状況の例  
Fig. 4 Result of Fillability Test with the Original Specimen No. 1

材とは異なり使用条件が決まっている。そこで提案構造を用いたプレキャスト床板継手を模擬した試験体(オリジナル試験体②(図5))を用いて、2面拘束で試験を実施した。

継手部に充填材を施工して、材齢28日時点での継手部および周辺コンクリートにひび割れが発生していないかを検証した。なお、継手幅は充填材にとってより不利となるように、設計管理値の最大値を採用した(表5)。確認の際には水噴霧による目視確認を行ったが、いずれの試験体においても、継手部およびその周辺にはひび割れは見られなかった(表6)。

#### 3.2.2 沈下抵抗性

構造物施工管理要領にはない試験項目である。充填材の自己収縮に伴い継手部に沈下が発生しないかを確認するために追加した。計測には図6に示すデプスゲージを使用して、基準値は床版防水システムに規定されている基準値<sup>5)</sup>を採用した。検証にはひび割れ抵抗性試験と同じ試験体を用いた。

結果は表6の通りであり、いずれの試験体におい

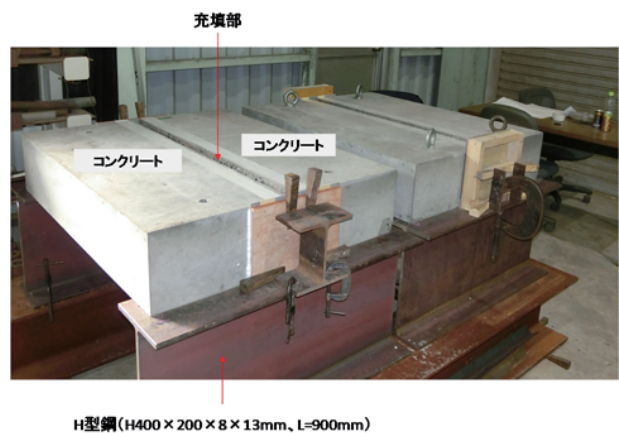


図5 オリジナル試験体②組立状況  
Fig. 5 Appearance of the Original Specimen No. 2

表5 オリジナル試験体②における継手幅  
Table 5 Applied Joint Width with the Original Specimen No. 2

材料名	設計管理値	試験における継手幅
PCM	30mm +/- 10mm	40mm
ERM	20mm +/- 10mm	30mm

表6 ひび割れ抵抗性試験・沈下抵抗性試験の結果  
Table 6 Results of Crack Resistance Test and Joint Settlement Test

材料名	ひび割れの有無	沈下量
PCM	なし	0.02mm (< 1mm)
ERM	なし	0.05mm (< 1mm)

ても沈下量が1 mm 以下であることを確認した。



図6 沈下量測定状況  
Fig. 6 Appearance of Measuring Settlement

### 3.2.3 コンクリートとの付着性

構造物施工管理要領にある試験項目であるが、引用規格および試験体形状を変更した。試験体は提案構造を用いたプレキャスト床板継手を模擬した試験体(オリジナル試験体③(図7))を用いた。試験はJIS A 1106に準拠した曲げ試験にて、図8に示す載荷装置を用いて、コンクリートと充填材界面の付着性を照査した。合格基準は、コンクリート/充填材界面で破断せず、かつコンクリート側で破断するこ

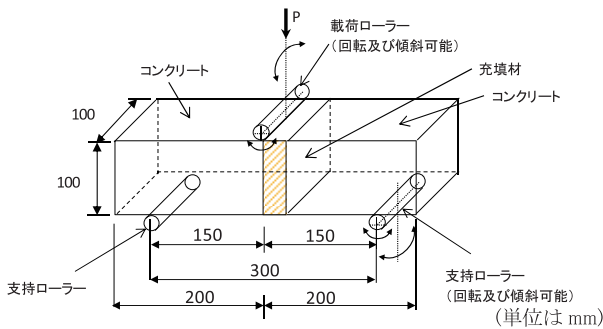


図7 オリジナル試験体③の例  
Fig. 7 Sample of the Original Specimen No. 3

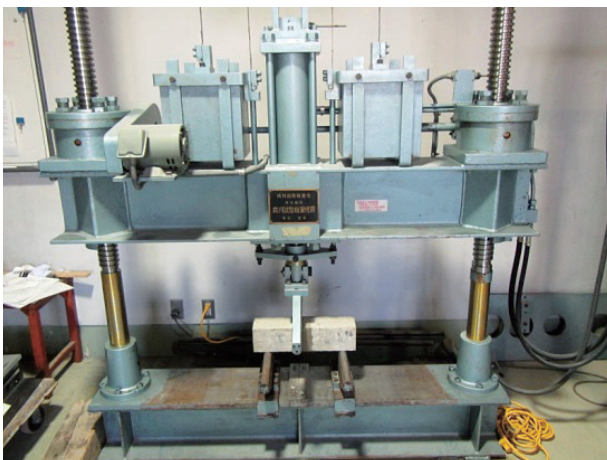


図8 試験に使用した中央点載荷装置  
Fig. 8 Machinery for Three-Point Bending Flexural Test

ととした。実大床版と同様にコンクリート側の継手部界面は目粗しを行い、付着性の向上を図った。また継手幅は設計管理値における中央値を採用した。試験は充填材の材齢が7日の時点で実施した。試験結果を表7に示す。PCM, ERM いずれの試験体についても曲げ引張強度(継手部下端)で $5.00\text{N/mm}^2$ 以上の強度を示した。破断面は、PCM はいずれの試験体もコンクリート側であった。ERM は一部界面で破壊する試験体が見られた。これはERM の強度発現の遅いことが原因の一つと考えられる。

表7 充填材とコンクリートとの付着性試験結果  
Table 7 Results of Three-Point Flexural Test (No Environmental Load)

材料名	PCM	ERM
継手幅(mm)	30	20
平均曲げ引張強度(n=3) (N/mm <sup>2</sup> )	6.75	5.28
破断面におけるコンクリート・充填材の割合	A (100%)	A (72.5~75%), AB (25%~27.5%)
破断面の例		

\* ) A : コンクリート側で破壊, B : 充填材側で破壊, AB : 界面で破壊

### 3.3 耐久性能

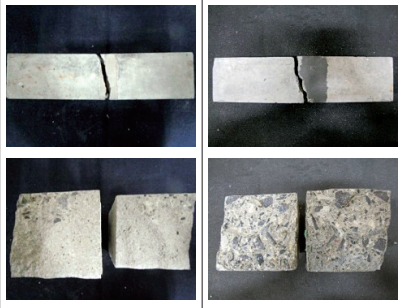
#### 3.3.1 温冷繰返し作用後の付着性

構造物施工管理要領にはない試験項目である。コンクリート/充填材界面の付着性能について、実橋に作用する最大・最小温度を適用した際に、継手部の性能が低下しないかを検証する試験である。温冷繰返し抵抗性試験はJIS A 1171(ポリマーセメントモルタルの試験方法)に準拠した。試験体形状、温冷繰返し抵抗性試験後の付着性試験および基準値は「コンクリートとの付着性」と同じである。温冷繰返し作用では、20℃の水中に18時間浸漬した後、-20℃の恒温器で3時間冷却、50℃の恒温器で3時間加温するサイクルを10回繰返した(試験期間:10日)。その後、曲げ試験により強度の確認と破断面の観察を行った。

試験結果を表8に示す。PCM について、表7と比較すると曲げ引張強度には変化がないが、破断面

において充填材が占める割合は増加している。そのため、PCMは温冷繰返し作用により変質して、強度が低下する恐れがあると考えられる。

表8 温冷繰返し作用後の付着性試験結果  
Table 8 Results of Three-Point Flexural Test (After Hot and Cold Cycling Load)

材料名	PCM	ERM
継手幅(mm)	30	20
温冷繰返し作用後平均曲げ引張強度(n=3)(N/mm <sup>2</sup> )	6.77	7.08
破断面におけるコンクリート・充填材の割合	A(20%~50%) B(50%~80%)	A(90%~95%), AB(5%~10%)
破断面の例		

\*)A: コンクリート側で破壊, B: 充填材側で破壊, AB: 界面で破壊

ERMについては、曲げ引張強度は温冷繰返し作用後にむしろ大きくなっている。これはERMの強度発現が材齢7日以降も継続していたためと考えられる。また、破断面において充填材が占める割合は表7に比べて減少している。これらのことから、ERMについては温冷繰返し作用後も、継手部において十分な曲げ引張強度を有していると言える。

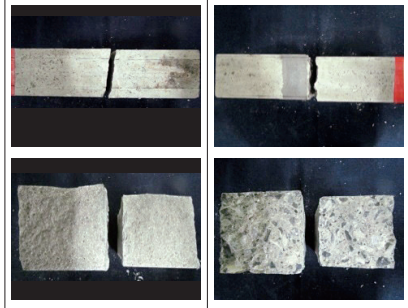
### 3.3.2 凍結融解作用後の付着性

構造物施工管理要領にある試験項目であるが、試験体形状、凍結融解後の付着性試験法および基準値を変更したコンクリートおよび充填材内部の水分が凍結と融解を繰り返すことで、ひび割れや劣化が生じて継手部の性能が低下しないかを検証する試験である。試験体形状、凍結融解試験後の付着性試験および基準値は「コンクリートとの付着性」と同じである。凍結融解作用では、試験体中心部の温度を5℃から-18℃とした後、-18℃から5℃とするサイクルを、1サイクルあたり3時間から4時間となるようにして300サイクル繰返した(試験期間:50日)。その後、曲げ試験により強度の確認と破断面の観察を行った。

試験結果を表9に示す。PCMについて、表7と比較すると曲げ引張強度は低下しており、破断面に

における充填材が占める割合が増加している。そのため、PCMは凍結融解作用により変質して、強度が低下したと考えられる。

表9 凍結融解作用後の付着性試験結果  
Table 9 Results of Three-Point Flexural Test (After freezing and thawing Cycling Load)

材料名	PCM	ERM
継手幅(mm)	30	20
凍結融解作用後平均曲げ引張強度(n=3)(N/mm <sup>2</sup> )	4.05	5.48
破断面におけるコンクリート・充填材の割合	A(0%~40%) B(60%~100%)	A(100%)
破断面の例		

\*)A: コンクリート側で破壊, B: 充填材側で破壊, AB: 界面で破壊

ERMについては、表7と比較すると曲げ引張強度は同等程度であり、破断面には充填材が見られない。そのため、ERMについては凍結融解作用後も、継手部において十分な曲げ引張強度を有していると言える。

### 3.3.3 凍結融解抵抗性(相対動弾性係数)

単体の材料で作成した□-100×100×400mmの角柱試験体を用いて、凍結融解抵抗性における評価指標である相対動弾性係数と質量変化率の経時変化を計測した。各試験体の相対動弾性係数と重量変化率を図9に示す。いずれの試験体も負荷後の相対動弾性係数が60%以上であることを確認した。

一方で、凍結融解作用後の重量変化率について、PCMは約100.7%であり、吸水にともなう若干の重量増がみられた他、表面にやスケーリングが生じており、凍結融解の影響が見られた。ERMは約100.1%であり、重量の変化はPCMより小さく、スケーリングは観られなかった。

これらから、PCMは凍結融解作用の影響を受けて、コンクリートと同等以上の凍結融解抵抗性があるとは言えないことがわかった。

### 3.3.4 中性化抵抗性

中性化抵抗性は、試験体に対する空気中の二酸化

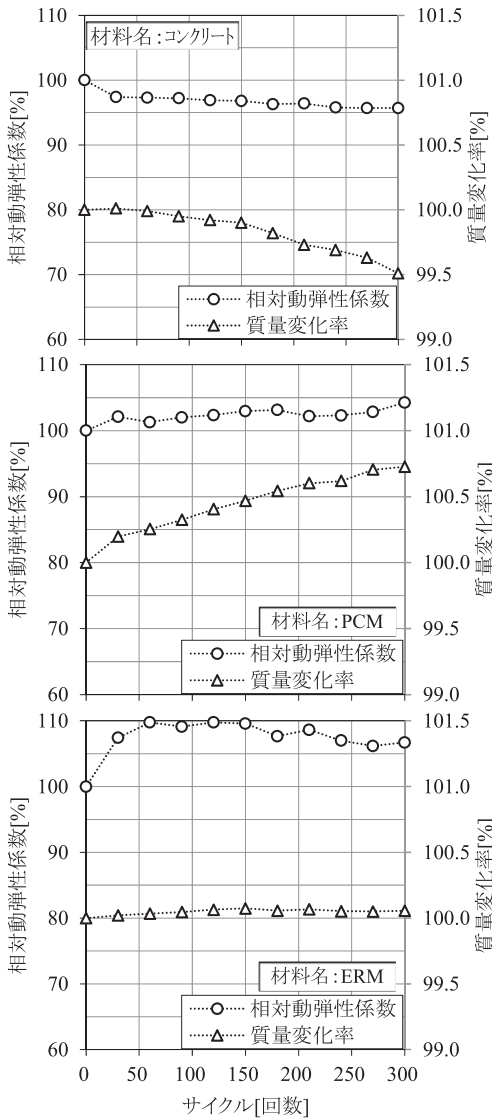


図9 相対動弾性係数・質量変化率の経時変化  
Fig. 9 History Curve of the Relative Dynamic Modulus of Elasticity and the Weight Loss

炭素の侵入しづらさを指す。試験法439では材料がアルカリ性であることを前提に、フェノールフタレイン溶液による中性化深さの計測が標準とされている。ところがERMは中性であることから標準の計測方法が適用できないため、JSCE-G574-2013に準拠した電子線マイクロアナライザー(EPMA)による面分析から、C濃度のマッピングにより二酸化炭素の浸透有無を確認した。□-100×100×400mmの角柱試験体を製作して、温度：20℃、相対湿度：60%、二酸化炭素濃度：5%の環境に設置して、促進試験を行った。

試験結果は表10に示す通りであり、PCM、ERMいずれにおいてもコンクリートと同等以上であるこ

とを確認した。

表10 中性化抵抗性試験の結果  
Table10 Results of Neutralization Resistance Test

材料名	コンクリート	PCM	ERM
促進期間	26週間		
中性化深さ、または二酸化炭素侵入深さ(mm)	0.5	0.5	0
中性化速度係数(mm/√週)	0.1	0.1	26週では浸透なし

### 3.3.5 遮塩性

構造物施工管理要領にある試験項目であるが、計測方法を変更した。本研究では試験法439に準拠した電位差滴定法ではなく、より精度が高く、視覚的に判断しやすいことから、電子線マイクロアナライザー(EPMA)による面分析を用いて、見かけの拡散係数を求めた。□-100×100×400mmの角柱試験体を製作して、試験体を温度20±2℃、濃度10%の塩化ナトリウム水溶液中に3か月間浸漬して、見かけの拡散係数と塩化物イオンの浸透深さを算出した。

EPMAによる面分析の結果を図10に、拡散係数と浸透深さを表11に示す。PCM、ERMいずれの材料も、コンクリートより遮塩性に優れていることを確認した。

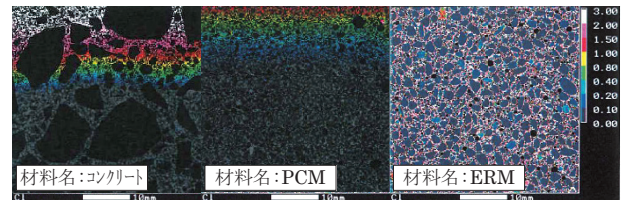


図10 分析面の写真と面分析結果  
Fig. 10 Results of Salt Resistance Test with EPMA

表11 EPMAによる塩化物イオンの見掛けの拡散係数と浸透深さ  
Table11 Results of Chloride Diffusion Coefficient and Chloride Depth Analyzed with EPMA

種類	見掛けの拡散係数 Dap(cm <sup>2</sup> /y)	塩化物イオンの浸透深さ(mm)
コンクリート	1.50	18
PCM	0.372	13
ERM	浸透していないため算出不可	0

## 4 PCMの改良と再試験

PCMについては、従来の断面修復材から静弾性係数を小さくするために、配合変更していた。その結果、単位水量が多くなっており、このことが温冷

繰返し作用や凍結融解作用に対して耐久性が低下した原因であると考えた。

そこで再度配合を見直して、ポリマー量を増加することで相対的に単位水量を低減させて、凍結融解作用に対する耐久性の検証を再度実施した。改良したPCMの材料特性を表12に示す。なお、ポリマー量の増加は他の性能に影響を与えないと考えて、他の試験については検証を省略した。

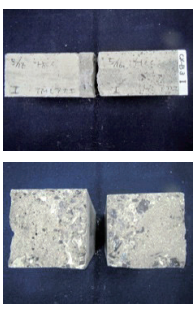
表12 改良したPCMの材料の特性(材齢28日)  
Table12 Properties of Improved PCM Mix (Age : 28days)

材料名	環境温度	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	備考
PCM	23℃	9.5	32.6	改良前
		9.6	31.1	改良後

#### 4.1 凍結融解作用後の付着性(再試験)

試験結果を表13に示す。曲げ引張強度は改良前と比較すると、約1.6倍に改善されている。また、破断面における充填材が占める面積の割合も増加しており、改善されている。

表13 凍結融解作用後の付着性試験結果  
Table13 Results of Three-Point Flexural Test with Improved PCMMix (After freezing and thawing Cycling Load)

材料名	PCM
継手幅(mm)	30
凍結融解作用後平均曲げ引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	6.40
破断面におけるコンクリート・充填材の割合	A (60%~100%) B (40%~0%)
破断面の例	

\*)A: コンクリート側で破壊, B: 充填材側で破壊, AB: 界面で破壊

#### 4.2 凍結融解抵抗性(相対動弾性係数)(再試験)

試験結果を図11に示す。負荷後の相対動弾性係数は改良前と同様に60%以上であることを確認した。また、凍結融解作用後の重量変化率は約100.4%と、改良前と比較して低下しており、スケーリングも見られなかった。これらの再試験結果から、配合改良後のPCMは凍結融解抵抗性が改善されており、材料耐久性を満足する材料であると判断した。

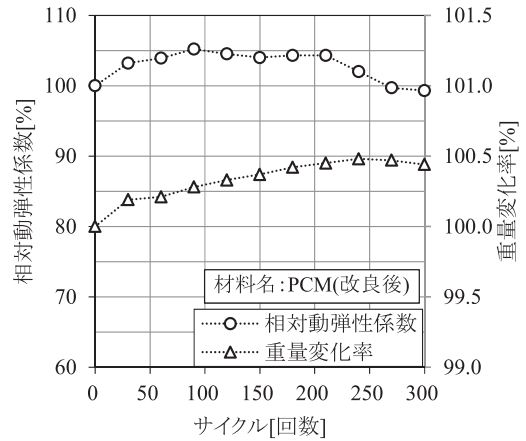


図11 改良したPCMの相対動弾性係数・質量変化率の経時変化  
Fig. 11 History Curve of the Relative Dynamic Modulus of Elasticity and the Weight Loss with Improved PCM Mix

## 5 結言

提案構造に適用するにあたって配合を見直したことから、改めて材料試験を行った。また、断面修復やひび割れ注入材と異なった使用方法をしているので、沈下抵抗性など独自の品質管理方法を定めて試験を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- ① エポキシ樹脂モルタルは、交通の制約により急速施工性が要求される一部の床版取替工事で配合の見直しが必要であるが、十分な使用性や耐久性を有する。
- ② 提案構造に適用するエポキシ樹脂モルタルはフィラー量が多いことから、ひび割れ注入材より充填性が低下している。そのため、継手幅の設計管理値はポリマーセメントモルタルと同じ30mm+/-10mmとする。
- ③ 静弾性係数を従来のポリマーセメントモルタルより小さくする際には、凍結融解抵抗性が保持できるように、単位水量を適切に管理して、ポリマー量の増加により対応すると良い。

## 謝辞

最後に、本研究を行うにあたりご指導頂いた大阪大学松井繁之名誉教授、NEXCO 東・中・西日本、NEXCO 総研に対し、ここに記して深く感謝の意を表します。



参考文献

- 1) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会 報告書, 2014. 1. 22
- 2) 櫻井信彰, 前川宏一, 松井繁之: プレキャストPC床版用半剛接合継手, 橋梁と基礎, 2018. 9
- 3) 東・中・西日本高速道路株式会社: NEXCO 試験方法 第4編 構造関係試験方法
- 4) JIS A 6024: 2015. 建築補修用及び建築補強用エポキシ樹脂.
- 5) 東・中・西日本高速道路株式会社: 構造物施工管理要領