

論文 ラテックス改質速硬コンクリートの基礎物性と耐久性能に関する基礎的検討

郭 度連^{*1}・森山 守^{*2}・菊池 徹^{*3}・李 春鶴^{*4}

要旨: レディーミクストコンクリートに速硬性混和材を添加することで速硬コンクリートが製造できるシステムと、ラテックスによる改質効果を融合したラテックス改質速硬コンクリートを検討した。速硬性混和材による速硬化効果とラテックスによる改質効果が融合されてもそれぞれの効果は阻害されることなく発揮され、速硬コンクリート同様のフレッシュ性状、硬化性状の他に優れた曲げ性状と付着強度の増進が確認できた。また、ラテックスの改質効果によって塩化物、二酸化炭素、水等の劣化因子に対する物質透過抵抗性が大幅に改善され、耐久性の向上が期待できることを実験的に明らかにした。

キーワード: ラテックス改質速硬コンクリート, 速硬性混和材, ラテックス, 物質透過抵抗性

1. はじめに

交通規制を伴う道路工事や時間的制約のある緊急工事等の場合は、速硬性を有する材料が使われている。速硬性の材料は、製造面、品質面の制約から主にプレミックス化されたもの、あるいは専用のセメント、専用の特装车が必要であった。そこで筆者らはレディーミクストコンクリートに速硬性混和材を添加することで速硬コンクリートがどこでも簡便に大量に製造できるシステムを開発し、報告している¹⁾。

一方、補修補強材料に求められる要求性能は非常に高く、速硬性以外に、曲げ強度・付着強度が高い、収縮が少ない、材料的耐久性等が求められており、その要求性能を満足するための材料としてポリマーは有効である。ポリマーは主にプレミックス化されたポリマーセメントモルタルの形で、ポピュラーな建設材料として普及しているが、ポリマーセメントコンクリートについては、その性能と経済性のバランスからほとんど使用されていない状況である。その反面、海外では1950年代にすでにアメリカからLMC (Latex Modified Concrete) の形で道路橋床板の橋面舗装材料として研究を始めており、50年以上の実績とともに、材料規格や施工指針等の整備もされている²⁾。国内でも超速硬セメントとポリマーの組合せによる超速硬ポリマーセメントコンクリートに関する研究が一部でなされているが³⁾、実用化までには至っていない。

既報のレディーミクストコンクリートを用いた速硬化技術は、低コストで効率よく速硬コンクリートが製造できる技術であり、本研究ではこの速硬化技術とラテックスによる改質効果を融合することで、橋面舗装材料、あ

るいは補修補強材料としてのラテックス改質速硬コンクリートの可能性を検討した。一般的に速硬系のコンクリートは初期材齢の圧縮強度の発現性には優れているものの、圧縮/曲げ強度比から考えると、圧縮強度ほどの曲げ強度の発現は期待できない面もある。一方、補修・補強材料としては耐久性の面からは、ラテックス改質コンクリートによる塩化物、二酸化炭素、水分等の劣化因子の不透過化は非常に有効であると考えられる。また、道路橋床板の補修・補強材料に求められる性能の中、最も重要と思われる付着特性についてもポリマーセメントコンクリートは優れる。したがって、速硬性コンクリートとラテックスとの融合は相乗効果が期待できる有効な技術になり得ると考えられる。

本研究では、ラテックスおよび速硬性混和材の混和によるコンクリート性能の改質効果を評価するため、フレッシュ性状および強度特性、体積変化、基礎耐久性を実験的に検討し、報告するものである。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの使用材料

表-1 に本研究で使用した材料を示す。速硬性混和材は、特殊カルシウムアルミネートと特殊硫酸塩を主成分とし、結合材の30%程度になるようベースコンクリートに添加する。その速硬性(初期強度発現性)は、エトリンサイト等に代表されるカルシウムアルミネート系水和物の早期生成によって得られ、硬化時間の調整は所定量のオキシカルボン酸系の硬化調整剤(セッター)の添加量によってコントロールされる⁴⁾。

ラテックスはポリマーディスパージョンの中で SBR

*1 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 博士(工学) (正会員)

*2 中日本高速道路(株) 金沢支社 博士(工学) (正会員)

*3 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株), 金沢支店 (正会員)

*4 宮崎大学 社会環境システム工学科 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの使用材料

材料名	記号	種類	備考
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³
水	W	水道水	佐倉市
細骨材	S	砕砂	掛川産、表乾密度:2.61g/cm ³
粗骨材	G	砕石	桜川産、表乾密度:2.64g/cm ³
減水剤	Ad	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
速硬性混和材	F	速硬性混和材	密度:2.93g/cm ³
セッター	Re	硬化調整剤	オキシカルボン酸系粉体
ラテックス	L	SBR系	固形分45%、平均粒子径0.2μ m

表-2 試験水準およびコンクリートの配合

	W/C (W/B)	P/C (P/B)	単位量 (kg/m ³)							外割添加 (kg/m ³)			フレッシュ性状			
			W	L	C	S	G	Ad	AE助剤	F	W	Re	スランプ (フロー) (cm)	空気量 (%)		
PL	51.9	—	174	—	335	830	926	C×0.7%	適量	—	—	—	17.5	4.7		
LMC	35.8	16.1	54	120				—	—	—	—	—	—	—	24.5 (64×64)	2.3
FC	51.9 (36.4)	—	174	—				C×0.7%	適量	143	10	3.35	21.0	1.2		
LMFC	35.8 (25.1)	16.1 (11.3)	54	120				—	—	143	—	3.35	20.0	1.9		

表-3 試験項目および概要

試験項目	概要
フレッシュ性状	スランプ、空気量、コンクリート温度、スランプの経時変化
凝結試験	JIS A 1147に準拠し、油圧式の貫入針抵抗試験
圧縮強度	JIS A 1108に準拠、24hまでの試験はアンボンドキャッピング
静弾性係数	JIS A 1149に準拠、材齢1日、7日、28日測定
曲げ強度	JIS A 1106に準拠、10×10×40cmの角柱試験体
付着試験	付着面積φ 100mm、深さ100mmの直接一軸引張試験
乾燥収縮	JIS A 1129-2に準拠し、収縮および質量変化率測定
透水試験	JIS A 6909に準拠、口径75mmの漏斗による透水量試験
塩分浸透試験	JSCE-G572-2007に準拠し、浸漬4、13、26週で硝酸銀噴霧法で浸透深さ測定、浸漬26週でEPMA測定
中性化促進試験	JIS A 1153に準拠し、促進1、4、13、26週で測定
凍結融解試験	JIS A 1148 A法に準拠し、水中凍結融解試験

(スチレン・ブタジエンゴム) ラテックスを用いた。SBR ラテックスは最も多く生産、使用されているセメント混和用ポリマーであり、海外を含めた使用実績、既往の研究からも最もコンクリート用ポリマー混和材として適していると考えられる⁵⁾。

2.2 試験水準およびコンクリートの配合

表-2 に試験水準および使用コンクリートの配合を示す。基準のベースコンクリート（以下 PL）は、水セメント比 52%、単位水量 174kg/m³ を用いている。ベースコンクリートに速硬性混和材を外割添加し、速硬化した速硬コンクリート（以下 FC）、ベースコンクリートの単位水量の 120 kg/m³ をラテックスに置換したラテックス改質コンクリート（以下 LMC）、ベースコンクリートにラテックスを 120 kg/m³ 置換し速硬化したラテックス改質速硬コンクリート（以下 LMFC）をそれぞれの試験水準とした。

ラテックスのコンクリートでの混和量については既往の研究や海外の事例を参考にした²⁾。混和量については国内の実績はほとんどなく、適正の混和量および混和量の変化によるコンクリート物性の変化等については今

後検討の余地があると考えられる。

速硬性コンクリートである FC および LMFC は、20℃ の環境温度で可使用時間が 90 分以上になるように硬化調整剤量を設定しており、本研究では結合材の 0.7% を使用した。

ラテックス改質コンクリートである LMC および LMFC は、ラテックスの効果により十分なフレッシュ性状が得られることから、減水剤は一切使用していない。

2.3 試験方法

表-3 に試験項目および試験方法の概要を示す。コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状を把握するために、速硬性コンクリートは経時に伴うスランプの測定およびプロクター貫入による凝結試験を行った。コンクリートの力学的特性は、圧縮強度、曲げ強度、付着強度および静弾性係数測定を行った。コンクリートの体積変化については、乾燥収縮試験により収縮ひずみおよび質量変化率を測定した。耐久性については透水量試験、塩分浸透試験、中性化促進試験、凍結融解抵抗性試験により評価した。

3. 実験結果

3.1 コンクリートのフレッシュおよび硬化性状

表-2 にコンクリートの練り上がり直後のフレッシュ性状を示す。本研究の最終目標である LMFC は、ワーカビリティを確保するため、スランプ $18\pm 2.5\text{cm}$ を目標にした。そのためのベースコンクリートである PL も $18\pm 2.5\text{cm}$ を目標にし、目標スランプを満足している。LMC はスランプフロー 64cm の柔らかいコンクリートが得られた。ポリマー粒子のボールベアリング作用と界面活性剤の分散効果のため、ワーカビリティが良好になり、所定のコンシステンシーを得るのに必要な単位水量は大幅に減らすことが可能である⁶⁾。FC に用いた速硬性混和材はアジテータ車での練混ぜを想定し、混合攪拌性の向上を図るために、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤が内添されている。したがって、ベースコンクリートよりスランプは増加する傾向にあり、本研究でも FC は PL より約 3.5cm のスランプが増加している。LMFC では目標範囲内の 20cm のスランプが得られた。

一方、空気量は PL 以外は $2\pm 1\%$ の範囲である。速硬性混和材およびラテックスは現場のアジテータ車添加も想定されており、エントラップトエアのコントロールの面から消泡剤が内添されている。その影響によりベースコンクリートの空気量は減少する傾向にある。

図-1 に速硬系コンクリートのスランプの経時変化を示す。FC の可使用時間は温度による硬化調整剤の添加量でコントロールされており⁴⁾、本研究では 20°C 環境下の可使用時間 90 分設定の硬化調整剤量を使用している。90 分後のスランプでも 15cm 以上を保持していることから、90 分以上の作業時間は確保できることがわかる。また、LMFC でもほぼ同等の結果が得られており、ラテックス混和が可使用時間に及ぼす影響はほとんどないといえる。

図-2 に凝結試験結果を示す。既往の研究からポリマーディスパージョンの種類によって差はあるが、凝結は概ね遅れることが知られており⁷⁾、本研

究でも PL と LMC の比較からラテックスを混和することで凝結の始発は 5 時間以上大幅に遅れることがわかる。その反面、速硬系コンクリートである FC および LMFC はほぼ同等の始発・終結になっており、ラテックスの混和が凝結に及ぼす影響は認められず、速硬コンクリートとして成り立つことがわかる。

3.2 コンクリートの力学的特性

図-3 に圧縮強度の試験結果を示す。FC および LMFC は時間材齢も合わせて示している。FC は凝結の試験結果からも予想されるように、4 時間から圧縮強度は発現しており、6 時間では 24N/mm^2 以上になっている。LMFC は FC よりも圧縮強度の発現が若干早くなっており、5 時間で 24N/mm^2 以上になっている。このことから LMFC のラテックスは速硬性混和材の水和を阻害することなく、むしろラテックスによる単位水量の低減効果が時間材齢の圧縮強度の早期発現に寄与していると考えられる。一方、LMC は凝結の大幅な遅れにもかかわらず、材齢 28 日の圧縮強度は PL 同等であり、前述のように水和を阻害することはないようである。

図-4 にコンクリートの圧縮強度と弾性係数の関係を示す。図中の点線は土木学会コンクリート標準示方書で材料の設計値として示されている値である⁸⁾。FC および LMFC とともに設計値よりは若干低い傾向を示している。ラテックスを混和した LMFC では FC よりもさらに低い傾向を示しており、ラテックスによる弾性係数の低減効果が認められるが、本実験の範囲ではそれほど大きい低減までは至っていない。コンクリートの弾性係数は骨材

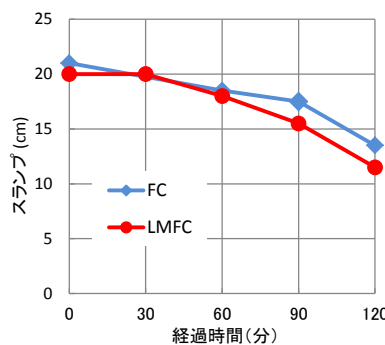


図-1 スランプの経時変化

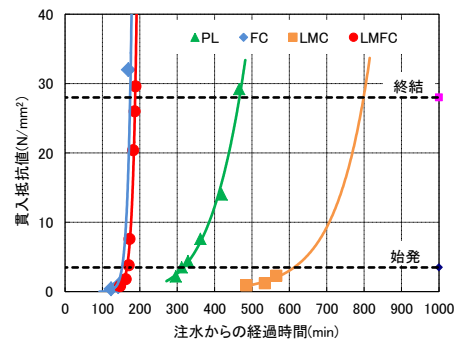


図-2 凝結時間

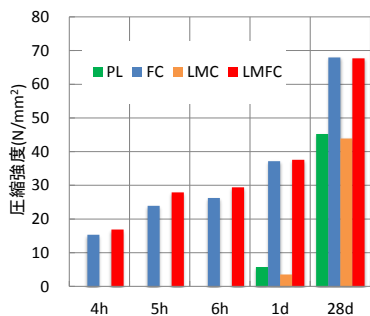


図-3 圧縮強度

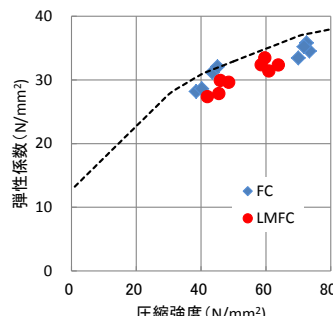


図-4 弾性係数

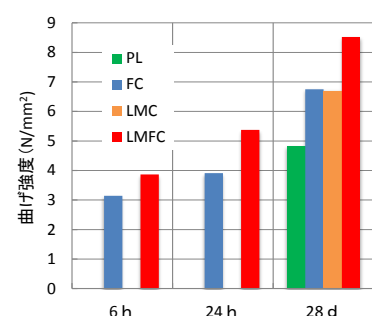


図-5 曲げ強度



写真-1 付着試験体の破壊形状



写真-2 水浸試験体の乾燥状況

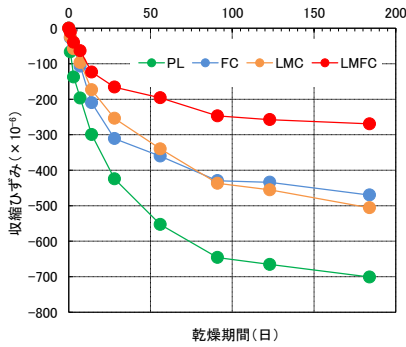


図-6 乾燥収縮

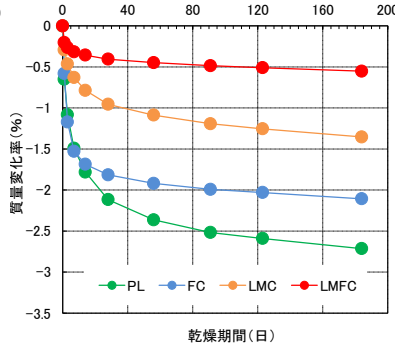


図-7 水分逸散量

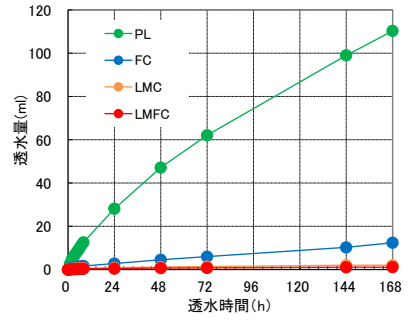


図-8 透水量試験

の種類と品質の程度によって、また産地によって大きく変動すること、使用ラテックスの性質によっても変動することから、ラテックス混和による弾性係数の低減を図る場合はさらなる検討が必要であると考えられる。

図-5 に曲げ強度の試験結果を示す。圧縮強度の試験結果同様にLMFCはFCより初期強度の発現は若干早く、6h で目標交通開放曲げ強度 3.5N/mm^2 を満足している^{9),10)}。図-3 に示した24h および28日のFCとLMFCの圧縮強度はほぼ同等の値であるが、曲げ強度ではLMFCがFCより大幅に大きくなっており、顕著な差が生じている。PLとLMCの関係からも同様の傾向であり、ラテックスの混和による大幅な曲げ強度の増進効果が確認できる。

付着強度を確認するために、PLを用いて50×50×10cmの底板コンクリートを打設し、翌日ワイヤブラシによる目荒らし、3か月経過後に50×50×10cmのLMFCをPLの上面に打設した。4週間後にφ10cmのコアドリルを用いて底板のPLコンクリートとの縁が切れるように深さ12cmまで削孔した。付着面積φ10cm、深さ10cmの直接一軸引張試験の6ヶ所の平均値は 2.98N/mm^2 である。写真-1に示すように、6本中の5本が底板コンクリート破壊であり、その破壊深さは2~3cm程度である。すなわち、底盤コンクリートの引張強度を上回る付着強度が想定でき、ばらつきもなく、非常に高い付着強度が確認できた。これはラテックスによる下地コンクリートとの投錨効果に起因すると考えられる。

一方、試験体を1分間水浸した直後および10分間乾燥した後の状況が写真-2である。水分を吸水する底板のPLコンクリートに比べ、LMFCコンクリートは10分

後にはほぼ乾燥している。

LMFCは水分を吸水せず、表面の濡れのみで止まっていると推測され、物質透過に対する抵抗性の高さが間接的に確認できる。

3.3 コンクリートの収縮特性

図-6に材齢182日までのコンクリートの収縮ひずみを、図-7に質量変化率を示す。PLに比べてFCの乾燥収縮は大幅に低減されている。LMCも200μ程度少なくなっており、ラテックス混和による効果が認められる。一方、LMFCは最も収縮量が少なくなっており、その量もFCおよびLMCによる低減量を重ね合わせた量に等しい。すなわち、FCおよびLMCによる乾燥収縮の低減効果が阻害されることなく発揮しているといえる。この傾向は質量変化率の結果からも同様であり、ラテックスを混和したLMC、LMFCの水分の逸散量は大幅に低減されている。これはラテックスの混和により物質透過の経路である空隙構造が緻密化している、あるいはラテックスによるフィルム膜の形成により空隙構造の連続性が寸断されていることに起因すると推察される。

3.4 コンクリートの耐久性

図-8に透水試験の結果を示す。透水面積75mmの漏斗を用いた材齢7日の透水量の3ヶ所の平均値である。PL以外の透水量は非常に少なく、表層品質は優れており、

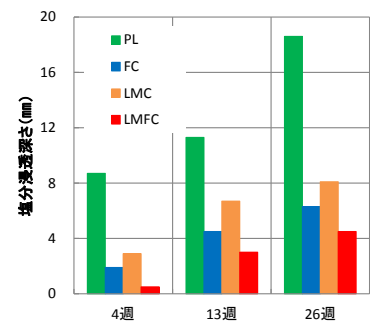


図-9 塩分浸透の経時変化

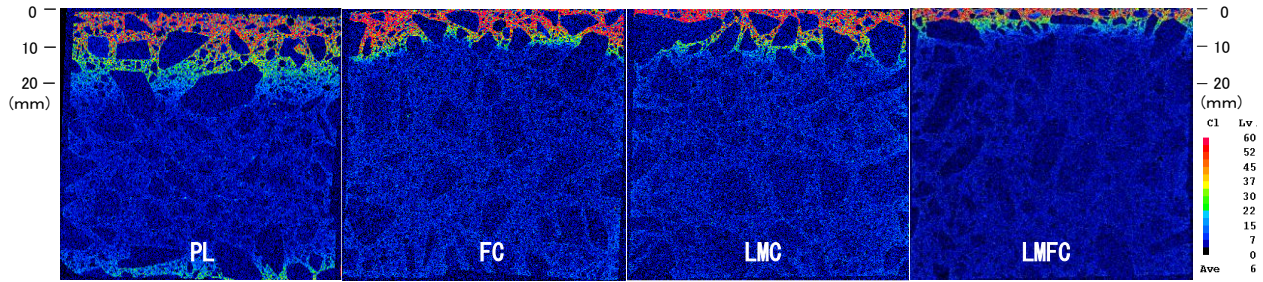


写真-3 塩水浸漬 26 週における EPMA 面分析

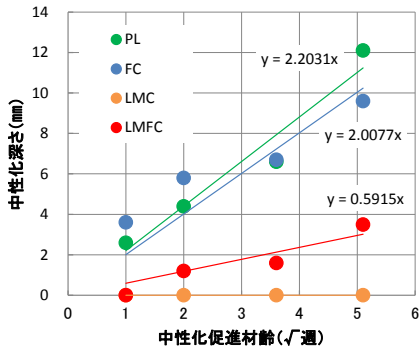


図-10 中性化速度

物質透過に対する抵抗性が高いことが予想される。特に LMC および LMFC はほとんど透水せず、ラテックスによる効果が十分発揮されていると推察される。

図-9 に浸漬材齢による塩分浸透深さの経時変化を、写真-3 には浸漬材齢 26 週の EPMA 面分析結果を示す。透水試験同様に PL に比べて FC, LMC, LMFC で大幅に低減されている。特に LMFC では PL の浸透深さの 1/4 程度に止まっており、塩分浸透に対する抵抗性の高さが認められる。

図-10 に中性化促進試験結果を、写真-4 に促進材齢 26 週の中性化深さを示す。FC は PL 同等以下ではあるが、強度レベルや他の物質透過性の結果から考えると、中性化進行速度が若干早い傾向である。一方、LMC は LMFC よりも中性化が進んでおらず、中性化に対する抵抗性が最も高い結果になった。質量変化率、透水試験、塩分浸透試験の傾向とは異なる結果であり、LMC の中性化に対する抵抗性は物質透過性の観点からだけでなく、水和生成物の二酸化炭素との化学的反応量の両面の検討を行うことで明らかになるものと考えられる。

図-11 には凍結融解試験の結果を示す。表-2 に示したように空気量は PL の 4.7% より少なくなり、FC で 1.2%、LMC で 2.3%、LMFC で 1.9% である。空気量から凍結融解に対する抵抗性が懸念されるが、FC で相対動弾性係数や質量変化率の若干の低下は認められるものの、300 サイクルで 60% 以上の相対動弾性係数が保持できて

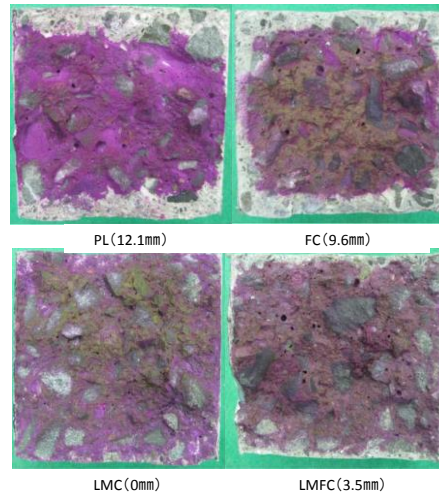


写真-4 中性化深さ (促進 26 週)

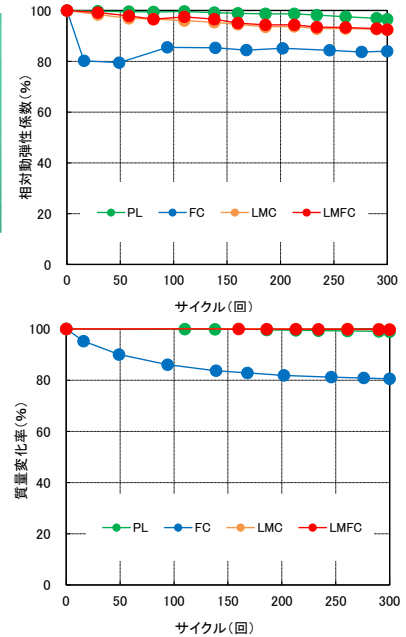


図-11 凍結融解試験結果

いる。既往の研究から超速硬コンクリートの凍結融解

に対する抵抗性は、空気量が少なくても圧縮強度で担保できるとされており¹¹⁾、本研究でも同様の結果が確認できた。一方、LMC および LMFC ではラテックスの改質による水分移動の抑制が凍結融解に対する抵抗性に寄与していると考えられる。

3.5 ラテックスによる改質の効果

乾燥収縮試験の質量変化率から LMC, LMFC の水分は逸散しにくく、初期材齢の逸散できない水分は内部の水和に使われると想定される。また、透水試験からは劣化因子の媒介である水分が入りにくいことが確認できた。すなわち、ラテックス改質コンクリートは供用下の環境条件との水分のやりとりが非常に少なく、初期材齢の水分保持による養生効果とラテックスによる空隙の充填効果で空隙構造が緻密化している、あるいはラテックスのフィルム膜の形成により空隙構造の連続性が寸断されていると推察される。この緻密化や寸断効果によって塩化物イオン、炭酸ガス、水等の劣化因子に対する物質透過抵抗性が大幅に改善されていると考えられる。このことは今後の微細構造の観察によって明らかになるものと考えられる。

4. まとめ

本研究ではラテックス改質速硬コンクリートの基礎物性および耐久性能を実験的に検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) ラテックス改質速硬コンクリートは単位水量の一部を置換することによって、通常の速硬コンクリートの性能を阻害することなく、同様のフレッシュ性状、可使時間、凝結、初期圧縮強度が得られる。
- (2) ラテックス改質速硬コンクリートの曲げ強度、付着強度は大幅な増進が認められる。弾性係数は、速硬コンクリートの弾性係数より低くなる傾向にある。
- (3) ラテックス混和による水分逸散の抑制および乾燥収縮の大幅な低減効果が認められる。
- (4) ラテックスによる改質効果は初期材齢の養生効果、空隙の充填効果、空隙構造の連続性の寸断効果と推察され、この効果によって物質透過抵抗性が大幅に改善されていると考えられる。

本研究では基礎的な物性の確認を行っており、今後の課題としては、微細構造の検討による推論の検証とともに、ラテックス混和量による物性や耐久性能の変化を検討することで、ラテックスによる改質効果を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 郭度連, 長塩靖祐, 浜中昭徳, 高橋洋昭: 速硬性混和材を用いた速硬コンクリートの製造および基礎物性, プレストレストコンクリート工学会第 21 回シンポジウム論文集, pp.545-548, 2012
- 2) ACI : Standard Specification for Latex-Modified

Concrete (LMC) Overlays (ACI 548.4-93), 1998

- 3) 大塩明, 岡田光芳, 関野一男: ポリマー超速硬セメントコンクリートの諸特性とその利用, 小野田研究報告, Vol.39, No.2, 第 117 号, pp.78-92, 1987
- 4) 郭度連, 松田信, 森山守, 西岡幹雄: 速硬性混和材を用いた速硬コンクリートの温度依存性に関する実験的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 13 巻, pp.305-308, 2013
- 5) FHWA : Styrene-Butadiene Latex Modifiers for Bridge Deck Overlay Concrete (FHWA-RD-78-35), 1978
- 6) よくわかる「ポリマーセメントコンクリート/ポリマーコンクリート」の基本と応用, 大濱嘉彦監修, pp.17, 2007
- 7) 大濱嘉彦, 三宅豊久, 西村正: まだ固まらないポリマーセメントコンクリートの性状に及ぼすポリマーセメント比の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.239-240, 1980
- 8) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書設計編, pp.39, 2013
- 9) 社団法人セメント協会: 舗装技術専門委員会報告 R-27, 2010.3
- 10) 日本道路協会: セメント・コンクリート舗装要綱, 1984 年 2 月
- 11) 中嶋清美, 吉田弥智: 超速硬セメントコンクリートの低温時の強度発現特性と耐久性に関する研究, 土木学会論文集, No.466, V-19, pp.21-30, 1993
- 12) 関野一男: ゴムラテックス混入超速硬セメントモルタルの研究, コンクリート工学論文集, Vol.4, No.1, pp.103-112, 1993