

論文 劣化した鉄筋コンクリート造建築物に用いられる補修材料の耐候性能の評価に関する研究

朴 同天*1・兼松 学*2・野口 貴文*3

要旨：国内で一般に市販されている代表的な断面修復材料(CR系, SBR系, EVA系, PAE系)の耐久性を把握することを目的として, 高低温繰返し促進劣化と乾湿繰返し促進劣化を受けた補修材料の水の拡散や透気および水銀圧入空隙測定試験を行い, 力学的な強度と物質の移動, 空隙構造の関係について検討した。その結果, CR系とSBR系のポリマ-を含有するセメントモルタルはいずれの促進劣化に対しても高い耐候性を示した。現在市販されている商品を用いた今回の実験のデータを利用することで, 耐用年数の予測解析など, より正確な結果を得ることができると考えられる。

キーワード：補修材料, 透気係数, 水拡散係数, 高低温繰返し, 乾湿繰返し, 空隙量

1. はじめに

膨大な建築ストックを抱える現在の国内においては, 既存建築の維持管理・補修・改修が非常に重要であると考えられるが, 新規建築物に対する耐久設計に比べて, いまだ十分な研究がなされていないとは言えない。補修工法の性能を評価するにあたっては, 補修に用いられる材料の性能を評価することも重要であり, 特に工法の性能を解析的に検討する場合には, 適用する境界条件とパラメータとして, 補修材料の性能の定量化が不可欠となる。

また, 劣化したコンクリート造構造物を補修または補強する場合, 最も重要なことは構造物が置かれている環境条件, 劣化状況および供用期間に応じた“適材適所”の補修・補強を行なうことであるが, 補修材料の性能が把握できていない状況で, システム的に補修・補強の工法および材料の選択はまだできなく, 経験に依存している。

本研究の目的は, 劣化した鉄筋コンクリート造構造物の躯体補修に用いられる各種補修材料の耐候性を明らかにし, 適切な補修設計の確立

に資することである。即ち, 乾燥収縮, 中性化, 塩化物イオンの浸入, 凍結融解によって発生したコンクリートの剥離, 鉄筋の腐食などの劣化を補修する際, 一般的に用いられている補修材料, その中で断面修復材の乾湿繰返し, 高低温繰返し劣化促進に対する物質移動抵抗性の性能劣化を評価し, 補修後の耐用年数を的確に設定するため, そして最適補修選定システム構築のための基礎資料を得ることが本研究の目的である。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

本実験で対象とした断面修復材は, 表-1のように普通ポルトランドセメントモルタル(OPCM), 無収縮セメントモルタル, CR系, SBR系, EVA系, PAE系など計6種類である。現在, 市販されている断面修復材の中から代表的なものを各々選定した。ただし, 調合および練り混ぜ方法は各社が指定する方法に従った。

2.2 試験体の作成および促進劣化条件

表-2のように試験体を作成した後, 表-3のような促進劣化を行なった。

*1 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 工修 (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 工修 (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 工博 (正会員)

表 - 1 . 使用材料および調合

| 記号 | 補修材料 | 材料の調合(重量比) |
|----|----------------------|--|
| A | 普通ポルトランドセメントモルタル | W/C=55%, S/C=1.25 |
| B | CR系ポリマ - 含有セメントモルタル | 粉末：液体溶液=25：4，ポリマ - 含有率：10%，纖維含有率：0.5% |
| C | 高強度・無収縮セメントモルタル | 普通ポルトランドセメント，高炉スラグ粉末含有 |
| D | EVA系ポリマ - 含有セメントモルタル | 粉末：液体溶液：水=25：1.5：7.5，普通セメントモルタル，高炉スラグ，ポリマ - 含有率：2%，纖維含有率：0.05% |
| E | SBR系ポリマ - 含有セメントモルタル | 粉末：液体溶液：水=25：1.65：2.3，シリカフュム，ポリマ - 含有率：7%，纖維含有率：1% |
| F | PAE系ポリマ - 含有セメントモルタル | 粉末：液体溶液：水=25：1：3.75，特殊セメント，合成纖維含有率：1.2%，ポリマ - 含有率：4% |

表 - 2 . 試験体作成および養生

| 試験項目 | 試験体の寸法(mm) | 養生方法 |
|----------|------------|---|
| 圧縮強度 | 50×100 | 打設後 24 時間で脱型し，その後 20 ，60%(RH)の恒温恒湿室で 28 日間気乾養生を行った。 |
| 透気・水拡散係数 | 100×30 | |

表 - 3 . 促進劣化条件

| 区分 | 劣化促進条件(1 サイクル) |
|------------|---|
| 気乾養生 | 温度 20 ，80%(RH)の恒温恒湿室で養生(1 日= 1 サイクル) |
| 乾湿繰返し促進劣化 | 48 時間水(20)浸漬，96 時間乾燥を繰返し促進劣化 |
| 高低温繰返し促進劣化 | 恒温恒湿チャンバ - で 5 ，10%(RH)で 12 時間，80 ，10%(RH)で 12 時間を繰返し促進劣化 |

表 - 4 . 測定時期

| | 初期値測定 | 1 次測定 | 2 次測定 | 3 次測定 |
|------------|-----------|---------|---------|----------|
| 気乾養生 | 気乾養生 28 日 | 30 日 | 60 日 | 100 日 |
| 高低温繰返し促進劣化 | | 30 サイクル | 60 サイクル | 100 サイクル |
| 乾湿繰返し促進劣化 | | 10 サイクル | 20 サイクル | |

2.3 試験方法

(1) 圧縮試験

JIS A 1172 を従って測定を行なった。

(2) 透気係数試験

透気係数は 0.5MPa の圧力を加え，下面へ通過してくる空気の流量が一定になった後に，単位時間当たりの透気量を測定し透気係数を算出した。式(1)は算出式を，図 - 1 は実験装置概略を示す¹⁾。

$$K = \frac{2lP_2\gamma_A}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \quad (1)$$

ここで， K ：透気係数(cm/s)， Q ：透気量(cm³/s)， A ：透気面積(cm²)， l ：供試体厚さ(cm)， P_1 ：載荷圧力(N/cm²)， P_2 ：大気圧(N/cm²)， γ_A ：空気の単位体積重量(1.182 ×

10⁻⁶N/cm²)である。

(3) 水拡散係数試験

水分の拡散係数は加圧透水試験(インプット法)を通じて浸透深さを測定した後，加圧力と時間に関する補正係数を用い求めた(図 - 2)。供試体には打ち込み方法から加圧透水試験を行い，直径方向に割裂，直ちに透水境界部の浸透深さを求め，式(2)を用いて拡散係数を計算した²⁾。

$$\beta_i^2 = \alpha \cdot \frac{D_m^2}{4 \cdot t \cdot \xi^2} \quad (2)$$

ここに， β_i^2 ：拡散係数(mm²/sec)， D_m ：平均浸透深さ(mm)， t ：水圧を加えた時間(sec)， α ：水圧を加えた時間に関する係数($t^{3/7}$)， ξ ：水圧の大きさに関する係数である。

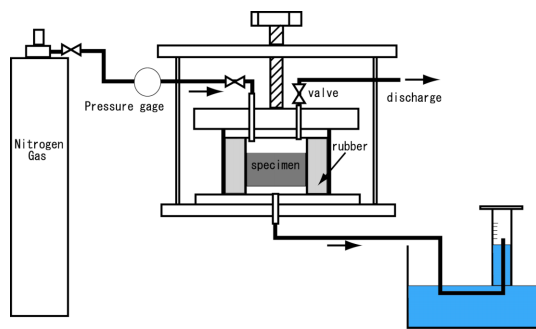


図 - 1 . 透気試験装置概略図

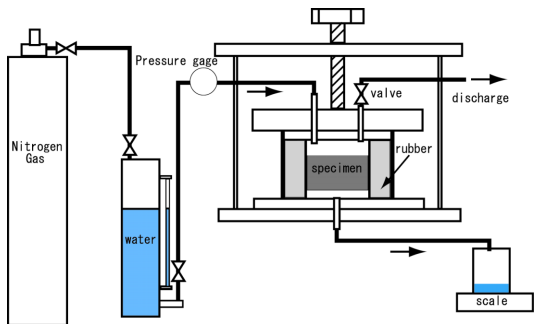


図 - 2 . 水拡散試験装置概略図

(4)水銀圧入法による空隙径の測定

細孔分布測定は、水銀圧入ポロシメータ (SHIMADZU . オートポア 9400) を用いて実施した。今回の実験で用いた材料はポリマー成分と繊維を含有しているので、ダイヤモンドカッターを用いて試料を切断すると、切断時の摩擦熱によって切断面の性状の変化が懸念されたので、あらかじめ5×5×30(mm)に成形した。測定前、7日間真空ポンプを用いて真空脱気した後、低圧と高圧水銀圧入を通じて圧力と水銀圧入量との関係から細孔径分布、全細孔量を求めた。

3. 試験結果および考察

(1) 圧縮強度

本実験では国内で市販されている断面修復材6種類と普通セメントモルタル(W/C=55%)を用いた。気乾養生や高低温繰返し劣化促進、乾湿繰返し劣化促進後、圧縮強度の変化を把握する目的で測定を行なった結果、全般的に28日の初期養生後の促進劣化にも圧縮強度の増加が起きた。セメントモルタルとポリマーの熱膨張係数。セメントモルタルとポリマーの熱膨張係数

表 - 5 . 実験結果

| 記号 | 測定 | 圧縮強度 (MPa) | 引張強度 (MPa) | 透気係数 ($\times 10^{-10}$ cm/s) | 水拡散係数 ($\times 10^{-4}$ mm ² /s) | 空隙量 (%) |
|----|----|------------|------------|--------------------------------|--|---------|
| A | F | 27.0 | 2.4 | 135.5 | 295.7 | 20.7 |
| | K1 | 32.5 | 2.7 | 158.7 | 270.6 | 18.0 |
| | K2 | 33.7 | 2.9 | 149.5 | 62.7 | 17.4 |
| | K3 | 37.6 | 2.4 | 468.8 | 193.1 | 17.9 |
| | T1 | 27.5 | 2.2 | 492.9 | 632.8 | 20.3 |
| | T2 | 28.4 | 2.0 | 522.6 | 570.0 | 18.8 |
| | T3 | 32.4 | 2.0 | 340.3 | 598.9 | 18.3 |
| | H1 | 37.3 | 2.6 | 56.6 | 24.1 | 16.8 |
| | H2 | 58.9 | 4.0 | 48.5 | 11.1 | 15.2 |
| | B | F | 44.7 | 3.3 | 1.1 | 1.2 |
| K1 | | 46.4 | 3.5 | 1.0 | 0.9 | 14.9 |
| K2 | | 55.9 | 3.1 | 1.5 | 3.8 | 16.5 |
| K3 | | 56.3 | 3.7 | 1.6 | 2.9 | 17.2 |
| T1 | | 60.6 | 5.5 | 2.7 | 11.2 | 17.9 |
| T2 | | 65.3 | 5.6 | 3.5 | 15.7 | 19.4 |
| T3 | | 70.2 | 6.2 | 4.3 | 11.7 | 17.7 |
| H1 | | 62.2 | 4.2 | 0.8 | 0.6 | 13.9 |
| H2 | | 63.9 | 4.7 | 1.9 | 0.1 | 13.8 |
| C | | F | 43.8 | 3.5 | 716.9 | 241.1 |
| | K1 | 43.1 | 3.7 | 65.3 | 165.0 | 19.4 |
| | K2 | 49.4 | 3.6 | 99.4 | 162.1 | 17.7 |
| | K3 | 54.2 | 3.5 | 219.0 | 224.2 | 17.9 |
| | T1 | 40.1 | 3.1 | 305.6 | 410.0 | 21.0 |
| | T2 | 44.2 | 3.5 | 280.6 | 431.5 | 18.7 |
| | T3 | 48.2 | 3.3 | 339.5 | 355.6 | 17.3 |
| | H1 | 62.0 | 4.4 | 6.0 | 29.1 | 16.2 |
| | H2 | 70.7 | 4.3 | 4.4 | 4.6 | 14.8 |
| | D | F | 25.6 | 2.0 | 251.6 | 26.7 |
| K1 | | 25.5 | 2.3 | 44.0 | 21.8 | 18.7 |
| K2 | | 27.4 | 2.7 | 46.6 | 39.9 | 18.4 |
| K3 | | 30.6 | 1.4 | 134.9 | 37.1 | 17.0 |
| T1 | | 22.3 | 2.0 | 139.2 | 70.7 | 18.3 |
| T2 | | 25.6 | 1.7 | 144.3 | 72.3 | 18.2 |
| T3 | | 28.4 | 1.8 | 171.2 | 69.5 | 17.0 |
| H1 | | 25.3 | 1.9 | 81.7 | 42.7 | 17.7 |
| H2 | | 32.1 | 2.6 | 59.0 | 18.4 | 17.6 |
| E | | F | 41.8 | 3.3 | 25.2 | 42.7 |
| | K1 | 44.4 | 3.3 | 6.7 | 10.9 | 19.5 |
| | K2 | 45.0 | 3.7 | 2.0 | 26.4 | 18.9 |
| | K3 | 49.5 | 4.6 | 8.5 | 7.6 | 17.2 |
| | T1 | 63.0 | 4.9 | 10.5 | 20.3 | 21.4 |
| | T2 | 64.3 | 5.5 | 13.3 | 44.6 | 18.3 |
| | T3 | 68.9 | 5.6 | 16.8 | 27.0 | 16.5 |
| | H1 | 46.4 | 3.1 | 0.6 | 1.4 | 17.4 |
| | H2 | 57.4 | 4.7 | 1.3 | 0.0 | 16.7 |
| | F | F | 28.5 | 2.7 | 240.2 | 111.0 |
| K1 | | 33.6 | 3.5 | 31.9 | 72.5 | 18.2 |
| K2 | | 37.7 | 2.3 | 30.8 | 50.3 | 17.8 |
| K3 | | 37.7 | 2.8 | 69.2 | 85.7 | 17.5 |
| T1 | | 33.5 | 4.1 | 119.2 | 134.0 | 19.3 |
| T2 | | 35.3 | 3.3 | 139.1 | 125.0 | 17.9 |
| T3 | | 39.5 | 3.0 | 134.7 | 115.6 | 18.6 |
| H1 | | 34.6 | 3.0 | 10.5 | 8.1 | 17.9 |
| H2 | | 45.1 | 3.5 | 4.3 | 1.8 | 18.3 |

F: 初期値, K: 気乾養生, H: 乾湿繰返し促進劣化, T: 高低温繰返し促進劣化, 添え字: 測定期間(例: K2は気乾養生2回目測定を表す)

が異なるため、劣化促進によって強度の低下が予想されたが、乾湿繰返し促進劣化によっては急激な、気乾養生によっては緩慢に強度が増加した。特に CR 系のポリマ - を用いた B 材と SBR 系のポリマ - を含有している E 材の場合は 100 サイクルに及ばず温度繰返しの促進劣化にもかかわらず、初期値より 56.8%, 64.9%の圧縮強度の増加を示し、他の材料より力学的に高耐候性材料として評価された(表 - 5 参考)。

(2) 水拡散係数

温度繰返し促進劣化や乾湿繰返し促進劣化に対する補修材料の物質移動抵抗性を評価するため、

水拡散係数を時間経過によって求めた結果、高低温繰返し促進劣化に対しては拡散係数の増加を、乾湿繰返し促進劣化に対しては拡散係数の低下を示した。また、気乾養生に対しては若干拡散係数が低下する傾向が出た。CR系(B材)およびSBR系(E材)の補修材料はもともと高水密性材料なので、いずれの促進劣化に対してもほとんど性能の低下が起こらなかった。一方、高低温繰返し促進劣化に対し、高い透気係数を示した普通ポルトランドセメントモルタル(A材)およびアクリル系補修材(F材)も十分な養生を施すことでCR系やSBR系の補修材料レベルまで緻密さが発揮できるという結果が得られた(表-5参考)。

(3) 透気係数

全種類の補修材料に対し高低温繰返し促進劣化に対しては透気係数の増加を、乾湿繰返し促進劣化に対しては透気係数の低下を示した。そして、気乾養生に対しては初期値測定後30日までは相当緻密になったものの、そのあとは若干透気係数の上がる傾向を示した(表-5参考)。

透気係数の場合も水拡散係数と同様にCR系のB材及びSBR系であるE材が最も低い透気係数を示し、高い気体浸透抵抗性を持っている材料として評価された。普通セメントモルタルや高強度・無収縮モルタル(C材)、アクリル系のF材も乾湿繰返し促進劣化によって、さらに緻密性が向上し、28日間の気乾養生後にも周辺の環境によって水和の進行が促されたと考えられる。透気係数の範囲は各種の促進劣化を受けても 10^{-7} から 10^{-10} (cm/s)の範囲であった。

(4) 細孔分布の変化測定

気乾養生によっては、空隙の連結率と呼ばれる初期ピークが若干減少したが、乾湿繰返し促進劣化を受けた場合は、全補修材料に対し初期ピークが初期値の空隙率から大きく減退し、中心径が小さくなる傾向が見られることから、緻密になったと考えられる³⁾。一方、高低温繰返し促進劣化を受けた場合は図-4の例のように初期ピークがより大きくなり、ピークを中心径

が大きくなる現象が見られた。これはセメントモルタルとポリマ-の熱膨張係数の差によって発生したマトリックス組織の劣化に起因すると考えられる。

(5) 圧縮強度と透気係数の関係

表-6は圧縮強度と透気係数の相関関係から導いた回帰曲線である。3次までの気乾養生でA,B材は、初期値より圧縮強度と気体浸透抵抗性、両方とも同じくらいであるか若干増加する傾向を示した。乾湿繰返し促進劣化下では、さらに緻密になったものの、高低温繰返し促進劣化を受けた場合は若干の圧縮強度の増加を示したが、気体浸透抵抗性は相当低下する傾向を示した(図-5参考)。C,D,E,F材はどんな促進劣化環境でも初期値より透気係数の低下が起きたが、それは高低温繰返し促進劣化、気乾養生、乾湿繰返し促進劣化の順に大きかった。しかし、CR系であるB材とSBR系で

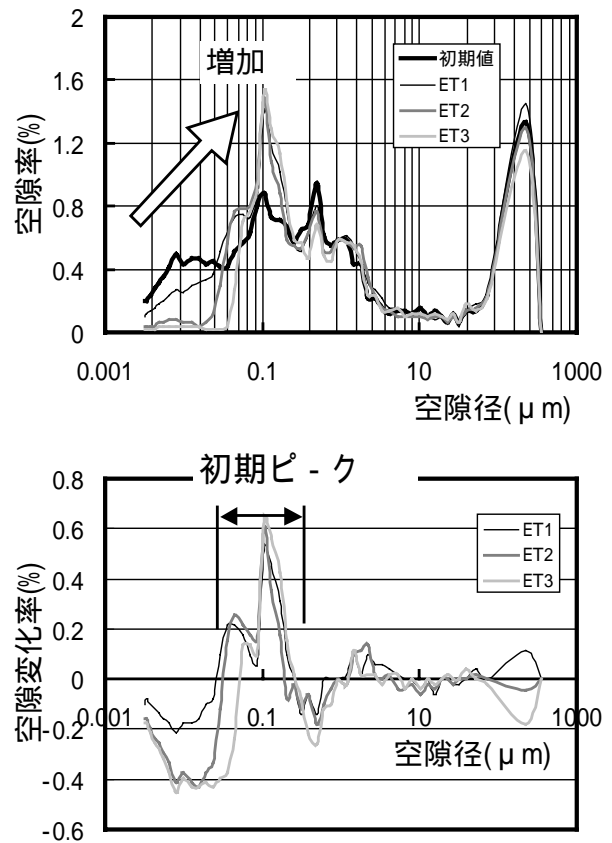


図-4. 高低温繰返し促進劣化を受けた補修材の細孔分布図の一例(E材)

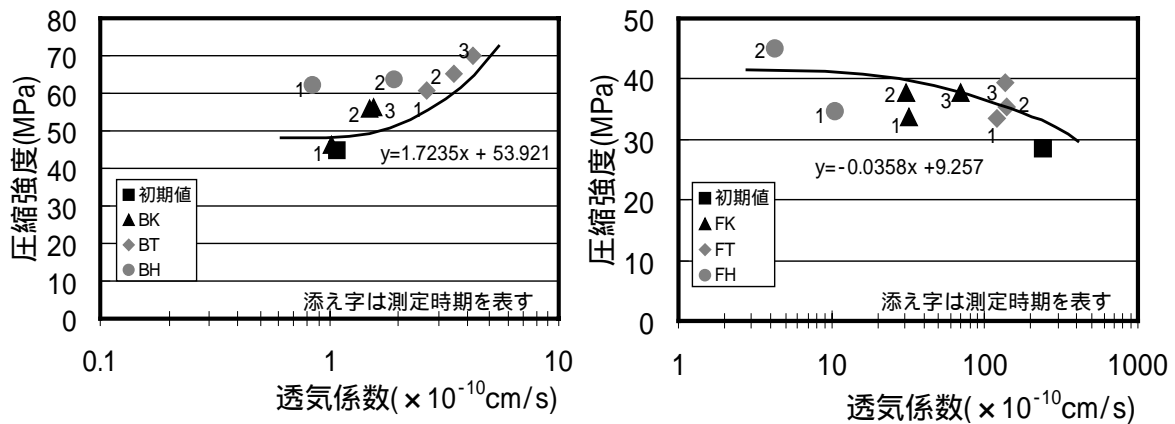


図 - 5 . 圧縮強度と透気係数の関係(B , F 材)

表 - 6 . 圧縮強度と透気係数の相関関係

| 補修材料 | 透気係数と圧縮強度の回帰線 |
|------|----------------------|
| A材 | $y = -0.24x + 41.5$ |
| B材 | $y = 1.72x + 53.9$ |
| C材 | $y = -0.24x + 56.5$ |
| D材 | $y = -0.009x + 28.1$ |
| E材 | $y = 0.196x + 51.6$ |
| F材 | $y = -0.04x + 9.25$ |

表 - 7 . 透気係数と水拡散係数の相関関係

| 補修材料 | a | b | R ² |
|------|-------|-------|----------------|
| A材 | 0.09 | 1.419 | 0.762 |
| B材 | 0.925 | 1.283 | 0.632 |
| C材 | 4.011 | 0.763 | 0.847 |
| D材 | 6.35 | 0.396 | 0.226 |
| E材 | 0.773 | 1.321 | 0.484 |
| F材 | 0.801 | 1.043 | 0.868 |

ある E 材は高低温繰返し促進劣化を受けた場合の強度増加が他の材料より卓越したため、結果として、透気しやすい状態になりながら、圧縮強度の増加を発現することになった。

(6) 透気係数と拡散係数の関係

図 - 6 は透気係数と水拡散係数の関係のグラフである。気体の浸透性を表す透気係数と液体の浸透性を表す水拡散係数は両方とも補修材料の劣化によって増加するはずであるが、本実験からは、気体の浸透と液体の浸透が必ずしも比例して増加することではないのが明らかになった。その関係は式(3)のようであったが、それは透気係数が材料内部の含水率に大きく支配されるからであると推定される。この相関関係から、促進劣化条件や養生気乾に関わらず、相互間の

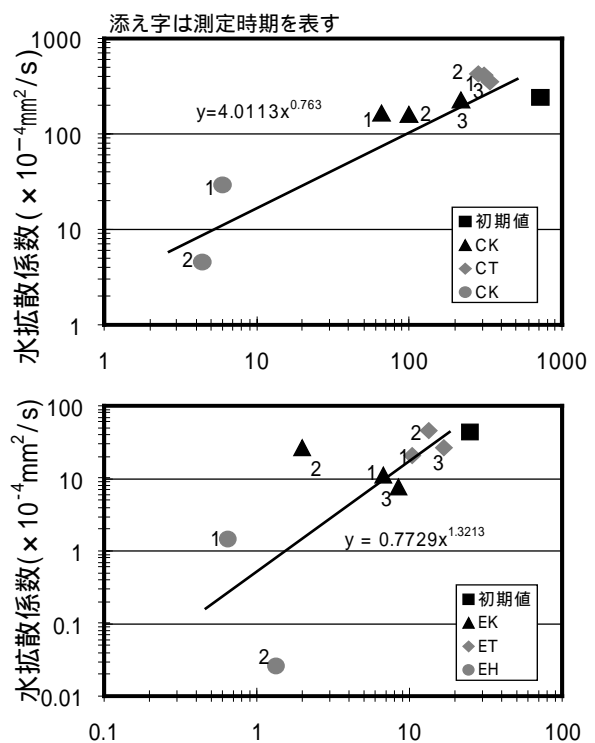


図 - 6 . 水拡散係数と透気係数の関係(C , E 材)

浸透抵抗性の予測が可能になると考えられる。

$$Y = a \cdot X^b \quad (3)$$

ここに、Y : 水拡散係数($\times 10^{-4} \text{mm}^2/\text{s}$)、X : 透気係数($\times 10^{-10} \text{cm/s}$)、a、b : 実験定数

表 - 7 は透気係数と水拡散係数の関係から求めた結果である。

(7) 初期ピ - クの空隙量の変化と水拡散係数との関係

初期ピ - クの空隙量(水銀圧入法で測定した空隙径 - 空隙量分布図で、一番空隙の連結性が高いと思われるところの空隙量)の変化と水の拡散係数の関係を定量的に評価するため、初期

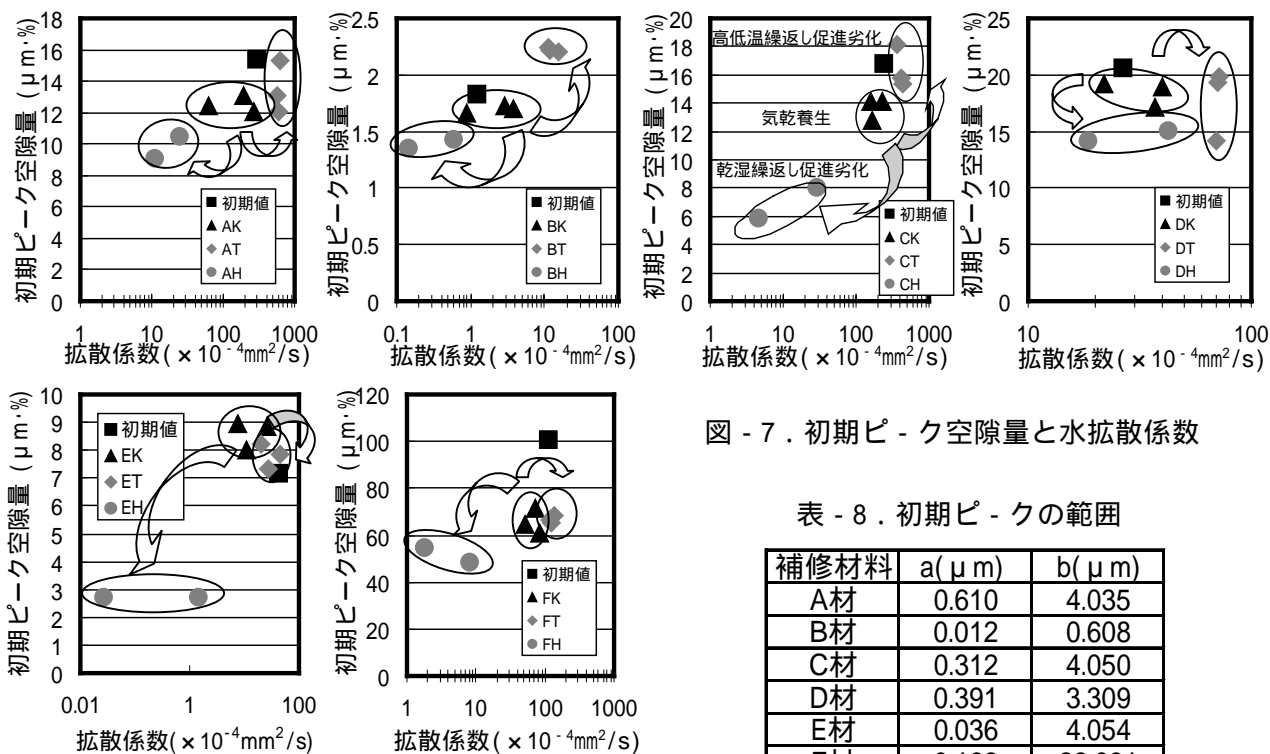


図 - 7 . 初期ピ - ク空隙量と水拡散係数

表 - 8 . 初期ピ - クの範囲

| 補修材料 | a(μm) | b(μm) |
|------|-------|--------|
| A材 | 0.610 | 4.035 |
| B材 | 0.012 | 0.608 |
| C材 | 0.312 | 4.050 |
| D材 | 0.391 | 3.309 |
| E材 | 0.036 | 4.054 |
| F材 | 0.162 | 22.631 |

ピ - クの量を式(4)で表現した。この式によると物質移動抵抗性が低い空隙径の大きいところの空隙量が多いほど初期ピ - クが高くなるので、効果的に物質移動に関する有効空隙量の表現が出来ると考えられる。しかし、水銀圧入法で補修材料の空隙を測定した結果、初期ピ - クの中心が材料別に異なったので、表 - 8 のようにその範囲を決めた。

$$\text{初期ピーク空隙量} = \sum_{N=a}^b (N \times \text{空隙量}_N) \quad (4)$$

ここで、空隙量_Nは空隙径Nでの空隙量である。図 - 7 は初期ピ - クの空気量と水拡散係数係数の関係である。気乾養生と比較して、乾湿繰返し促進劣化を受けた場合は、初期ピ - ク空隙量の減少と拡散係数の減少が起きたが、高低温繰返し促進劣化を受けた補修材は初期ピ - ク空隙量の増加と共に拡散係数の増加が測定された。これは、熱膨張係数の差に起因する内部組織の劣化の結果、空隙連結率が増加したためであると考えられる。

4. まとめ

28日の気乾養生後、気乾養生や高低温繰返し

促進劣化、乾湿繰返し促進劣化を受けた補修材料の耐候性を測定した結果、以下のようなことが明らかになった。

CR系とSBR系のポリマ - を含有している補修材料は、低温繰返し促進劣化によって圧縮強度は増加したが、外部因子浸透抵抗性能は若干低下を示した。高低温繰返し促進劣化による空隙構造の連結性の増加が劣化因子浸透抵抗性能の低下を導いたと考えられる。外部拘束条件がない状況での乾湿繰返し促進劣化からは、力学的な性能や劣化因子浸透抵抗性の低下は把握できない。

参考文献

- 1) 氏家 勲ほか：コンクリートの透気性の定量的評価に関する研究，土木学会論文集，Vol.9，No.396，pp.79-87，1988.8
- 2) 村田 二郎：コンクリートの水密性とコンクリート構造物の水密性設計，技報堂 2002
- 3) Raymond A. Cook. et al.: Mercury Prosimetry of hardened cement pastes, Concrete and Concrete Research, Vol.29,pp.933-943, 1999