

論文 断面修復材の品質と耐久性に関する一考察

槇島 修^{*1}・魚本 健人^{*2}

要旨：断面修復工法によって鉄筋コンクリート構造物を補修する場合，確立された耐久性設計方法がない。そこで，補修材料の耐久性を把握するとともに，品質の変動によって生じる耐久性への影響を把握することは，耐久性設計を行う場合の安全率の設定を可能とするものと考えた。本件では，断面修復材の代表としてポリマーセメントモルタルを対象に品質および耐久性の変動要因を整理し，変動要因が品質および耐久性に与える影響について評価試験を行った。本報告では，これらの一連の検討試験によって得られた結果について考察したものである。

キーワード：断面修復材，ポリマーセメントモルタル，耐久性，圧縮強度，品質変動

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物では，耐久性を考慮した性能規定型の設計方法が確立し，構造物の耐用年数に応じたコンクリートの配合設計が可能となっている¹⁾。また，既存の鉄筋コンクリート構造物についても同様の考え方を適用することによって劣化予測も可能となっている²⁾。

しかし，劣化が顕在化した鉄筋コンクリート構造物に補修が行われる場合には，補修後の劣化予測手法が確立されていないのが現状である。そのため，補修後に残存する耐用期間に応じた適切な補修工法の選定ができていない。また同様に，補修された構造物の劣化予測が難しいことから，補修後の LCC 評価も不確定な要素を多分に含むことになっている。

補修工法の耐久性設計が確立していない背景には，現在使用されている補修材料の多くがプレミックス材として製造された製品であり，材料種類や材料構成が既に決められているため，コンクリートのように配合設計によって性能を調整することが難しいことも要因となっているものとする。

このように，補修後の耐久性を評価するため

には，製品化された補修材料の耐久性を適切に評価し，補修後の耐用期間を予測できる方法が望まれている。そこで，補修材料の耐久性の評価を行う場合，補修材料自体の特性値として有する品質や耐久性を予測できることと，品質や耐久性の変動要因とその影響を明らかにする必要があるものとする。

これまで我々は，これらの課題を解決することを目的として，補修工法の基本となる断面修復工法を対象に，主要な材料であるポリマーセメントモルタルの耐久性についての各種の実験的検討を行ってきた^{3,4)}。

ここでは，ポリマーセメントモルタルの品質および耐久性の変動要因を整理し，個々の要因が品質や耐久性に与える影響について得られた実験的検討結果を報告する。

2. 検討概要

2.1 評価方法

補修材料の品質および耐久性の変動要因は，表－1 の検討項目に示す 4 項目が考えられる。

そこで，補修材料にはこれらの変動がどの程度生じるものであり，品質や耐久性に与える影

*1 飛島建設(株) 土木設計部 主任 (正会員)

*2 東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター教授 工博 (正会員)

響がどの程度であるかを評価することによって、補修材料の安全係数の合理的な設定が可能になるものと考えた。

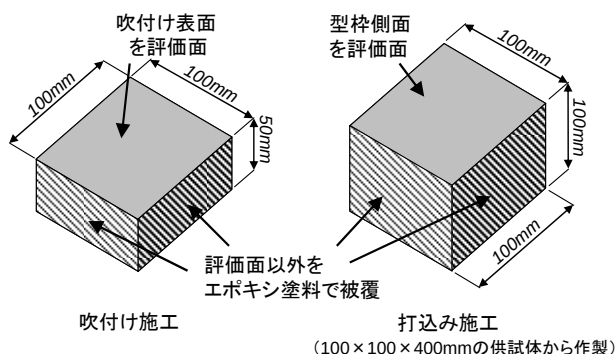
そこで、これらを確認するために、表－１に示す検討要因を設定し、評価試験を行った。なお、検討項目 1.における単位水量の変動の範囲は、評価対象としたポリマーセメントモルタルの施工可能なモルタルフローの上限と下限を設定した。検討項目 2.における施工方法は、打込みと吹付けによって行い、施工方法の違いによって生じる密度の変化を空気量に換算して評価した。検討項目 3. における製造・施工によって生じる材料構成の変動は、試験体の中で生じる密度分布によって評価した。検討項目 4.における養生条件は、理想的な養生と考えられる 20℃の封緘養生と、実際の施工に近い養生と考えられる 20℃の気中養生によって評価した。

2.2 試験概要

評価の対象とした補修材料は、表－２に示す補修材 A～F の市販のポリマーセメントモルタル 6 種類とした。なお、これらは、ポリマーの主成分やポリマー形態の異なる材料を選定した。

各種の実験には、吹付けまたは打込み⁴⁾によって作製した平板（500×500×50mm）から切り出した試験体を用いた。なお、耐久性試験における打込みによる試験体についてのみ図－１に示す試験体（100×100×100mm）とした。

品質および耐久性の評価試験は、表－３に示すように物性試験として圧縮強度、密度、細孔容積を対象とした。また、耐久性試験として促進中性化、塩水浸漬を実施した。中性化試験は、炭酸ガス濃度 5% 温度 40℃ 湿度 50% の促進試験



図－１ 耐久性試験用試験体形状

によって行った。塩水浸漬試験は、温度 40℃ の 3% 塩化ナトリウム水溶液への浸漬によって行った。

表－１ 検討概要

検討項目		検討要因	評価試験	
			物性	耐久性
1	製造上の誤差による単位水量の変動	モルタルフロー ・上限 ・下限*1	・圧縮強度 ・密度 ・細孔容積	・中性化 ・塩分浸透
2	施工方法によって生じる充填性の変化	・打込み ・吹付け	・圧縮強度 ・密度 ・細孔容積	・中性化 ・塩分浸透
3	製造・施工によって生じる材料構成の変動	・打込み ・吹付け	・密度分布	－
4	養生条件の差異による変化	・封緘養生*2 ・気中養生	・圧縮強度 ・密度 ・細孔容積	・中性化 ・塩分浸透

*1: モルタルフローによる上限を190mm、下限を160mmとなるように単位水量を調整した。

*2: 初期の養生は、材齢1日まで気中にて存置し、その後各養生方法を開始した。なお、気中養生の養生環境は、温度20℃湿度65%の恒温恒湿環境である。

表－２ 補修材料の概要

	ポリマー主成分	ポリマー形態
補修材A	SBR系	エマルジョン型
補修材B	ベオバ系	再乳化型
補修材C	アクリル系	エマルジョン型
補修材D	アクリル系	再乳化型
補修材E	酢酸ビニルベオバアクリル系	再乳化型
補修材F	SBR系	エマルジョン型

表－３ 試験項目および試験方法

試験項目		試験方法
耐久性試験	促進中性化試験	フェノールフタレインアルコール水溶液による無発色深さの測定によった。 ・養生条件: CO ₂ 濃度5%, 温度40℃, 湿度50% ・養生期間: 28日
	塩水浸漬試験	JCI-SC5硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法によった。 ・浸漬条件: NaCl 3%水溶液, 温度40℃ ・浸漬期間: 28日 ・測定位置: 表面から1cmごとに測定し塩化物イオンの見かけの拡散係数を算出した
物性試験	圧縮強度試験	JISA1108コンクリートの圧縮強度試験方法によった。コアサンプリングによる試料(50×50×50mm) 試験材齢28日
	密度試験	コアサンプリングによる試料(50×50×15mm) 密度分布は、試料数60で評価、評価材齢28日
	細孔容積試験	水銀圧入式ポロシメータによった。コアサンプリングによる試料(50×50×15mm) 評価材齢28日

注) 試験体作製方法は、参考文献4)を参照

3. 結果および考察

3.1 単位水量の変動による影響

実験結果を表－４に示す。単位水量の増加によって、いずれの補修材料も圧縮強度の低下が認められ、その程度は、 $1.0\sim 12.5\text{N/mm}^2$ の範囲にあった。また、塩化物イオン拡散係数は、補修材Bをのぞいて $0.031\sim 2.633\text{cm}^2/\text{年}$ 増加していることが認められた。また、中性化深さについては、いずれの補修材料も同程度以上に増加しており、その程度は、 $0.0\sim 3.5\text{mm}$ の範囲にあった。

いずれの材料も単位水量の増加は、水結合材比の増加につながるものであり、圧縮強度の低下とともに耐久性の低下に影響しているものと考えられる。ただし、その程度は、補修材料によって差異があり、同一のモルタルフローの変化であっても補修材料によってその影響程度は異なるものであった。

これらの結果から、施工可能な範囲で単位水量が変化した場合、上記のような品質および耐久性変化が生じるものと考え、性能の適切な割り増しを考慮する必要があるものと考えらえる。

3.2 施工条件の違いによる充填性変化

打込みおよび吹付けによって施工された試験体の試験結果を表－５に示す。打込みに比べて、吹付けによって施工された補修材料は、いずれ

も圧縮強度が増加しており、その程度は、 $0.2\sim 14.3\text{N/mm}^2$ の範囲にあった。なお、このとき測定した密度より換算した空気量を見ると、打込みに比べて相対的に空気量が減少している結果であった。両者の関係を見ると、図－２に示すように空気量の低下に伴って圧縮強度が増加している傾向にあることが確認された。

塩化物イオン拡散係数は、補修材料によって増加するもの減少するものがまちまちであり一定の傾向は見られなかった。なお、変動幅としては、 $-1.498\sim 0.905\text{cm}^2/\text{年}$ の範囲であった。図－３に示す塩化物イオン拡散係数と圧縮強度の関係からは、両者に相関が見られ、異なる補修材料であっても圧縮強度から塩化物イオン拡散

表－４ 単位水量の変動による実験結果

	目標 モルタル フロー (mm)	圧縮強度 (N/mm^2)		塩化物イオン 拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)		中性化深さ (mm)	
		測定値	*1 変化量	測定値	*1 変化量	測定値	*1 変化量
補修材A	160	41.6	—	2.795	—	2.2	—
	190	29.1	-12.5	2.871	0.076	5.1	2.9
補修材B	160	41.4	—	3.987	—	3.9	—
	190	37.1	-4.3	3.224	-0.763	4.9	1.0
補修材C	160	58.2	—	3.819	—	4.6	—
	190	56.1	-2.1	6.452	2.633	5.6	1.0
補修材D	160	35.9	—	2.395	—	3.6	—
	190	34.9	-1.0	2.426	0.031	7.1	3.5
補修材E	160	41.4	—	2.514	—	5.0	—
	190	38.1	-3.3	2.601	0.087	7.5	2.5
補修材F	160	45.5	—	3.158	—	0.8	—
	190	43.1	-2.4	3.189	0.031	0.8	0.0

*1: 目標モルタルフロー160mmに対する変化量

表－５ 施工方法の違いによる実験結果

	施工条件	密度 (g/cm^3)	換算空気量*2 (%)		圧縮強度 (N/mm^2)		塩化物イオン拡 散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)		中性化深さ (mm)	
		測定値	換算値	変化量*1	測定値	変化量*1	測定値	変化量*1	測定値	変化量*1
補修材A	打込み	2.019	6.5	—	39.5	—	2.460	—	6.2	—
	吹付け	2.019	6.5	0.0	39.7	0.2	1.394	-1.066	5.3	-0.9
補修材B	打込み	2.099	4.4	—	36.4	—	3.406	—	6.1	—
	吹付け	2.131	3.0	-1.5	48.9	12.5	4.311	0.905	4.3	-1.8
補修材C	打込み	2.024	13.0	—	54.1	—	6.607	—	4.4	—
	吹付け	2.140	8.0	-5.0	68.4	14.3	5.109	-1.498	5.2	0.8
補修材D	打込み	1.927	15.2	—	35.7	—	2.655	—	6.6	—
	吹付け	2.065	9.2	-6.1	47.4	11.7	2.987	0.332	6.3	-0.3
補修材E	打込み	1.822	10.4	—	43.7	—	2.566	—	5.7	—
	吹付け	1.862	8.5	-2.0	45.1	1.4	2.735	0.169	4.7	-1.0
補修材F	打込み	2.180	8.7	—	45.3	—	3.535	—	1.1	—
	吹付け	2.239	6.2	-2.5	50.6	5.3	3.167	-0.368	0.6	-0.5

*1: 打込みに対する変化量

*2: 打込み前に測定したフレッシュ時の空気量を打込みによる試験体の空気量と仮定し、密度の測定値から吹付けによる試験体の空気量を換算

係数の推定が出来る可能性があるものとする。

中性化深さは、打込みに比べて吹付けによって施工されたものは、減少するものがほとんどであり、その程度は-1.8～0.8mmの範囲にあった。このことから、空気量が低下すると中性化の進行が減少するものであると考える。

これらの結果から、施工方法の違いによって生じる充填性の差異から圧縮強度や塩化物イオン拡散係数、中性化深さに影響が生じることが認められ、施工による変化を考慮した性能の適切な割り増しを考慮する必要があるものと考えられる。

3.3 製造・施工によって生じる材料構成の変動

対象とした補修材料の打込みおよび吹付けによって作製した試験体（平板）の密度分布試験結果を表-6に示す。密度の変動は、主に充填状態の変化を示すものと考え、空気量に換算した結果によって評価を行うこととした。3.2に示した結果と同様に、ここでも打込みに比べて吹付けによって作製された試験体の密度は大きくなる傾向が確認された。また、密度の変化（充填状態の変化）は、圧縮強度や耐久性に影響を与えるものと考えられることから、確認された空気量の標準偏差から品質への影響がおおよそ把握できるものとする。

なお、密度分布は、いずれの補修材料も正規分布を示しており、補修材F以外の補修材料では、すべて打込みに比べて吹付けによる方が標準偏差が小さかった。なお、図-4に示すように、密度から換算した空気量と標準偏差の関係には相関が認められ、空気量が多いものほど空気量の変動が大きかった。このことは、補修材料の品質および耐久性の変動は、施工後の空気量に大きく左右されるものと考えられる。

また、図-2に示した空気量と圧縮強度の関係($y = -1.8566x + 2.321$)を基に、空気量の標準偏差の範囲(0.27～0.74%)を圧縮強度に換算すると、0.50～1.38N/mm²の範囲であると考えられる。

3.4 養生条件の違いによる影響

表-7に養生条件の違いによる各試験結果を

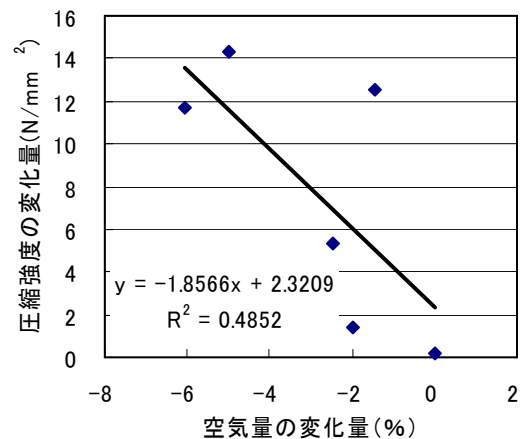


図-2 施工条件の違いによって生じた空気量の変化と圧縮強度の変化の関係

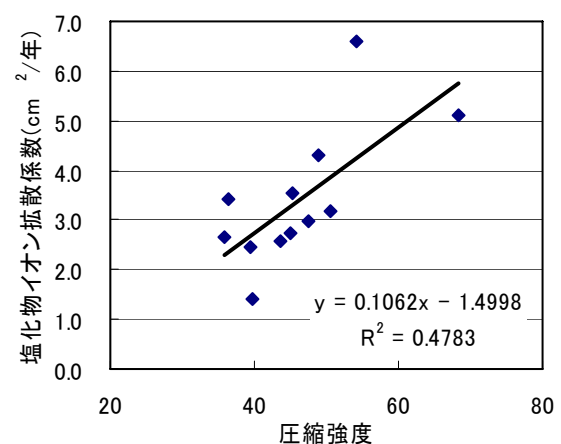


図-3 圧縮強度と塩化物イオン拡散係数の関係

表-6 密度分布試験結果

評価対象	施工方法	密度試験結果		換算空気量	
		平均密度 (g/cm³)	標準偏差 σ _n (g/cm³)	平均*1 空気量 (%)	標準偏差 σ _n (%)
補修材A	打込み	1.932	0.016	10.5	0.74
	吹付け	2.019	0.013	6.5	0.60
補修材B	打込み	2.099	0.008	4.4	0.37
	吹付け	2.132	0.006	2.9	0.29
補修材C	打込み	2.024	0.016	13.0	0.69
	吹付け	2.137	0.006	8.1	0.27
補修材D	打込み	1.932	0.021	15.0	0.92
	吹付け	2.063	0.008	9.2	0.37
補修材E	打込み	1.818	0.010	10.6	0.51
	吹付け	1.847	0.005	9.2	0.24
補修材F	打込み	2.168	0.010	9.2	0.42
	吹付け	2.227	0.012	6.7	0.49

*1: 打込み前に測定したフレッシュ時の空気量を打込みによる試験体の空気量と仮定し、密度の測定値から吹付けによる試験体の空気量を換算

示す。封緘養生に比べて気中養生の圧縮強度の変化量は、-3.7～7.1N/mm²の範囲にあり、必ず

しも封緘養生による圧縮強度が高い結果とはならなかった。

また、塩化物イオン拡散係数および中性化深さの結果も同様であり、評価の対象としたポリマーセメントモルタルの場合、乾燥によって形成されるポリマーフィルムの持つ劣化因子遮断効果の違いも影響しているものと考えられる。

塩化物イオン拡散係数は、 $-1.305 \sim 2.723 \text{ cm}^2/\text{年}$ の範囲で変動しており、乾燥による塩化物イオン拡散係数の変動を考慮する必要があるものと考えられる。なお、塩化物イオン拡散係数については、図-5に示すように、養生条件の差異によって生じる総細孔容積の変化と塩化物イオン拡散係数の変化に相関が見られ、塩化物イオン拡散係数は細孔構造が影響しているものと考えられる。

中性化深さは、封緘養生に対して気中養生が $-0.5 \sim 4.9 \text{ mm}$ 増加する傾向が見られた。このように、中性化深さは、乾燥によって低下するものがほとんどであり、実施工では乾燥による中性化抵抗性能の低下を考慮する必要がある。また、図-6に示すように、総細孔容積と中性化深さの関係には相関が見られ、養生環境によって総細孔容積が変化し、中性化の進行にも影響しているものと考えられる。

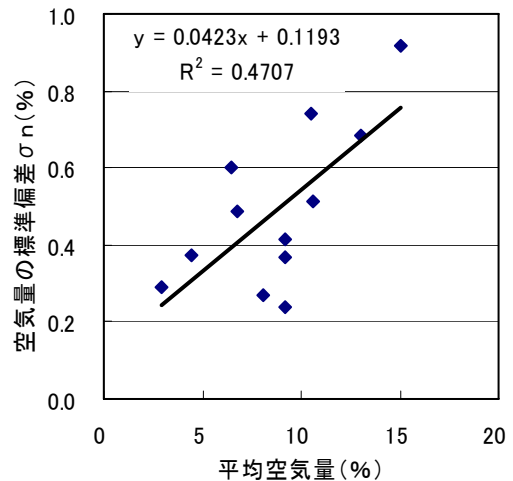


図-4 空気量と標準偏差の関係

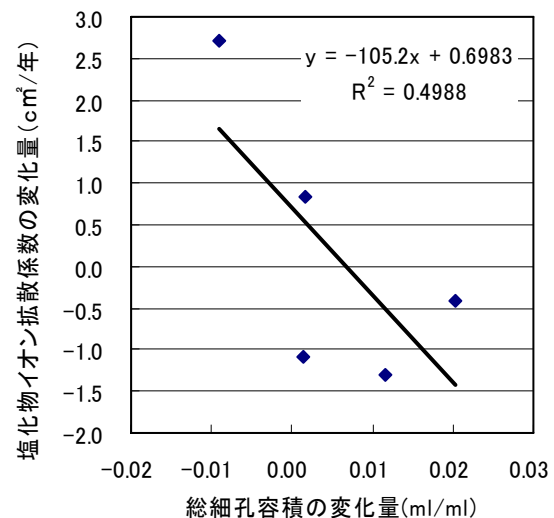


図-5 総細孔容積の変化と塩化物イオン拡散係数の変化の関係

表-7 養生条件の違いによる試験結果

	養生条件	総細孔容積 (ml/ml)		圧縮強度 (N/mm^2)		塩化物イオン拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)		中性化深さ (mm)	
		測定値	*1 変化量	測定値	*1 変化量	測定値	*1 変化量	測定値	*1 変化量
補修材A	封緘	0.2119	—	39.7	—	1.394	—	5.3	—
	気中	0.2028	-0.0091	46.0	6.3	4.117	2.723	5.9	0.6
補修材B	封緘	0.1848	—	48.9	—	4.311	—	4.3	—
	気中	0.1863	0.0015	45.2	-3.7	3.221	-1.090	9.2	4.9
補修材C	封緘	0.1830	—	54.1	—	6.607	—	4.4	—
	気中	0.1947	0.0117	54.3	0.2	5.302	-1.305	8.0	3.6
補修材D	封緘	0.2161	—	35.7	—	2.655	—	6.6	—
	気中	0.2177	0.0016	37.8	2.1	3.496	0.841	8.7	2.1
補修材E	封緘	—*2	—	43.7	—	2.566	—	5.7	—
	気中	—*2	—	40.6	-3.1	2.818	0.252	5.2	-0.5
補修材F	封緘	0.1212	—	45.3	—	3.535	—	1.1	—
	気中	0.1414	0.0202	52.4	7.1	3.133	-0.402	1.0	-0.1

*1: 封緘養生に対する気中養生の場合の変化量

*2: 測定値が得られなかったため、データ無し

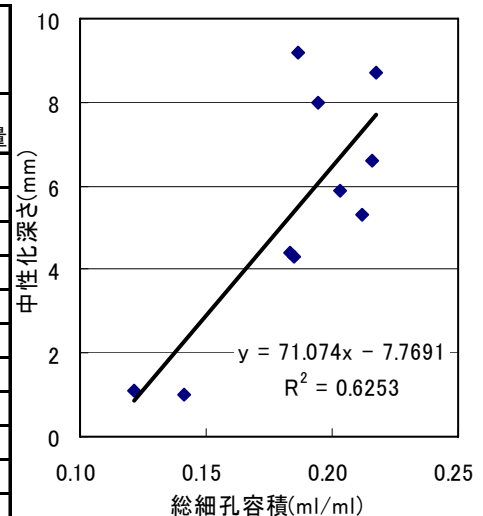


図-6 総細孔容積と中性化深さの関係

4. まとめ

表－8に、実験によって確認された変動要因ごとの圧縮強度および塩化物イオン拡散係数、中性化深さの変動程度を示す。なお、総合評価に示した変化量は、変動要因とした条件（単位水量、施工方法、養生方法）がすべて異なる場合の変化量としており、今回評価の対象とした補修材料の最大と最小を範囲として表している。

圧縮強度に与える変動要因としては、単位水量の変動と施工方法の違いによる充填状態の違いによる影響が大きかった。このことは、補修材料についても水結合材比および空気量の変化が物性値に大きく影響することが把握された。

塩化物イオン拡散係数に与える変動要因としては、単位水量の変動と養生条件の差異による影響が大きいものであった。なお、塩化物イオン拡散係数は、圧縮強度や総細孔容積の変化と相関が見られた。また、空気量の変化による影響は個々の材料によって異なる結果であった。

中性化深さに与える変動要因としては、塩化物イオン拡散係数と同様に、単位水量の変動と養生条件の差異による影響が大きいものであった。なお、中性化深さは、総細孔容積と相関が見られた。

以上から、今回検討の対象とした補修材料についていえば、単位水量が施工可能な範囲で増加し、吹付けによって施工され、養生を気中養生

生とした場合、基本条件に比べて圧縮強度は、 $-4.9 \sim +13.4 \text{ N/mm}^2$ の範囲で増加し、塩化物イオン拡散係数は、 $-0.739 \sim +1.733 \text{ cm}^2/\text{年}$ の範囲で増加し、中性化深さは、 $-0.6 \sim 5.4 \text{ mm}$ の範囲で増加するものであることが把握できた。

このように想定した変動要因は、個々に物性や耐久性に影響を与える影響程度が異なることが確認され、製造・施工・養生条件に応じた適切な安全係数を考慮することが補修材料の耐久性設計を行う上で必要であると考えられる。

謝辞

本研究にて御指導頂きました東京大学生産技術研究所岸助教授、同加藤佳孝講師および研究室の皆様へ感謝致します。

参考文献

- 1) 土木学会 コンクリート標準示方書〔施工編〕2002年制定，2002.3
- 2) 土木学会 コンクリート標準示方書〔維持管理編〕2001年制定，2001.1
- 3) 槇島修，魚本健人：吹付け施工による断面修復材の耐久性に関する研究，日本コンクリート工学年次論文集，第25巻，2003.7
- 4) 槇島修，魚本健人：断面修復材の材料特性の違いが耐久性に与える影響，日本コンクリート工学年次論文集，第26巻，2004.6

表－8 基本条件に対する変化量の総合結果

変動要因	基本条件	変動水準	基本条件に対する変化量			備考
			圧縮強度 (N/mm^2)	塩化物イオン 拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)	中性化 深さ (mm)	
1 ワーカビリティの変動に伴う水量の変動	モルタルフロー：160mm	モルタルフロー：190mm	$-12.5 \sim -1.0$	$-0.763 \sim +2.633$	$0.0 \sim +3.5$	—
2 施工方法によって生じる充填性の変化	施工方法：打込み	施工方法：吹付け	$+0.2 \sim +14.3$	$-1.498 \sim +0.905$	$-1.8 \sim +0.8$	—
3 製造・施工によって生じる材料構成の変動	施工方法：打込み	施工方法：吹付け	$+1.3 \sim +3.4$ *1	*2 —	*2 —	空気量の標準偏差 0.21～0.74%
4 養生条件の差異による変化	養生方法：封緘養生	養生方法：気中養生	$-3.7 \sim +7.1$	$-1.305 \sim +2.723$	$-0.5 \sim +4.9$	—
総合評価	モルタルフロー：160mm 施工方法：打込み 養生方法：封緘養生	モルタルフロー：190mm 施工方法：吹付け 養生方法：気中養生	$-4.9 \sim +13.4$	$-0.739 \sim +1.733$	$-0.6 \sim +5.4$	—

*1：図－1に示した空気量と圧縮強度の関係式を用いて換算した圧縮強度の標準偏差 σ_n の3倍を変動幅とした

*2：空気量の変化と塩化物イオン拡散係数と中性化深さに相関が見られなかったため、推定値は無しとした