

論文 断面修復用吹付けモルタルの性能評価に関する実験的研究

横山 和昭*¹・鹿野 善則*²・設楽 和久*³・三浦 康治*⁴

要旨：コンクリート構造物の断面修復材として吹付けモルタルを用いる補修事例が増えてきているが、吹付けモルタルの性能評価試験方法が確立されていないのが現状である。本研究では、吹付けモルタルに要求される基本的な性能として、ひび割れ抵抗性および鉄筋背面への充填性に着目し、性能評価試験方法を提案して検証実験を行った。実験の結果、ひび割れ抵抗性に関しては、提案した試験方法によって実構造物に近いひび割れの発生を再現できることを確認した。また、鉄筋背面への充填性に関しては、鉄筋の格子状配筋や鉄筋背面の隙間が吹付けモルタルの充填性に及ぼす影響について定量的な検証を試みた。

キーワード：断面修復，吹付けモルタル，性能評価，ひび割れ抵抗性，鉄筋背面への充填性

1. はじめに

コンクリート構造物の中で鉄筋かぶりの小さい壁高欄部や劣化因子の浸透を受けやすい床版下面部では、中性化や塩害に起因する鉄筋の腐食に伴い、コンクリートのひび割れ、はく離等の変状が見られ、補修が行われる事例が多い。壁高欄部の補修工法としては、劣化部を人力で部分的に除去し、鉄筋防錆および左官工法による断面修復を行った後、コンクリート塗装材で表面を被覆する工法（ライニング工法）が用いられ、品質特性を基にした規格が定められている¹⁾。

一方、塩害に伴う床版下面の大規模な補修工法としては、ウォータージェット工法（以下、WJ工法と称す）で劣化部を除去した後、施工性に優れる乾式吹付け工法²⁾や湿式吹付け工法³⁾で施工された吹付けモルタルを用いて断面修復を行う事例が増えてきている。

しかし、断面修復用吹付けモルタルの品質管理や施工管理に関する基準が整備されていないため、吹付け工法を採用する補修現場では、本施工前に施工試験を実施し、品質や施工性を確

認した後に本施工に着手しているのが現状である。また、近年では、コンクリート構造物の補修・補強用の吹付けモルタルに関する現状の調査や、所要の品質の吹付けモルタルを適切に施工するための指針を作成する取り組みが産官学において積極的に実施されている⁴⁾。

断面修復材には、既設コンクリートとの材齢差が顕著なため、自己収縮、乾燥収縮、荷重作用等の影響で断面修復材に有害なひび割れが発生する可能性があることから、ひび割れ抵抗性が要求される。また、既設コンクリートの劣化状態に応じて鉄筋の裏側までは取り取って断面修復する場合があるため、断面修復材が鉄筋背面に充填される性能が要求される。

本研究は、吹付けモルタルに要求される基本的な性能として、ひび割れ抵抗性および鉄筋背面への充填性に着目し、性能評価試験方法を提案し、その検証実験を行った結果を定量的に取りまとめ、考察を加えたものである。

2. 使用材料および配合条件

実験に使用した断面修復材は、ひび割れ発生

*1 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 橋梁研究室 工修 (正会員)

*2 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 橋梁研究室 主任 (正会員)

*3 (社)日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 研究第二部 主任研究員

*4 (社)日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 研究第二部 研究員 工修 (正会員)

を再現する目的で、水セメント比が調節可能な普通ポルトランドセメントと細骨材の比が 1:3 のモルタル（以下、1:3 モルタルと称す）およびプレミックスタイプで一材型のポリマーセメントモルタル（以下、PCM と称す）とした。PCM および 1:3 モルタルの配合を表-1 に示し、それらの基本的な性状を表-2 に示す。なお、PCM には、有害なひび割れが生じないように膨張材を添加している。

表-1 断面修復材の配合

断面修復材	水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
		水 W	粉末 D.M.P ^{*)}	セメント C	細骨材 S
PCM	40	235	1800 (588)**	—	—
	60	312	1600 (520)**	—	—
1:3 モルタル	50	253	—	506	1518
	60	289	—	482	1444
	70	321	—	459	1377

*) Dry Mixed Powder

**) 粉末中のセメント量は () で示す

表-2 断面修復材の基本的な性状

断面修復材	水セメント比 W/C (%)	単位容積 質量 (g/cm ³)	圧縮 ^{*)} 強度 (N/mm ²)	静弾性 ^{*)} 係数 (kN/mm ²)
PCM	40	2.1	37	17
	60	2.0	23	13
1:3 モルタル	50	2.2	54	24
	60	2.2	44	21
	70	2.2	38	19

*) 材齢 28 日

3. ひび割れ抵抗性試験

3.1 試験方法

(1) 硬化収縮率試験

断面修復材の硬化収縮率を把握する目的で、40×40×160mm の鋼製型枠に断面修復材を吹付けもしくは打込んだ後、温度 20±2℃、相対湿度 60±10% の恒温恒湿養生を行い、2 日後に脱型し、その後、気中養生（温度 20±2℃、相対湿度 60±10%）を行い、材齢 2 日～30 日まで

の硬化収縮率をダイヤルゲージ法で測定した。

(2) ひび割れ抵抗性評価試験

断面修復用のモルタルには施工後に有害なひび割れ・はく離が発生しないことが要求される。ひび割れ・はく離の発生メカニズムについては十分に解明されていないが、自己収縮、乾燥収縮、打継目付着強度および弾性係数が相互に関連しているため、それらを総合的かつ直接的に試験できる方法でひび割れ抵抗性を確認することが望ましい。このため、ひび割れ抵抗性を直接的に評価するための試験体として、図-1 に示すような鋼製三角形型枠⁵⁾を考案した。試験体型枠の底面には、断面修復材の拘束力を上げて実構造物と同様なひび割れを発生させるため、長さ 1m の D13 鉄筋を長手方向に溶接した。この型枠にモルタルを施工した後、温度 20±2℃、相対湿度 60±10% の室内で恒温恒湿養生し、型枠による拘束によって発生するひび割れに着目し、養生中におけるひび割れ発生の有無、ひび割れ数、最大および平均ひび割れ幅、発生時期、浮き面積等を観察した。表-3 に試験体一覧を示す。試験に用いた断面修復用のモルタルは、表-3 に示すように、横向きもしくは下向きに吹付け施工した PCM および下向きに打込み施工した 1:3 モルタルであり、硬化収縮率が大きくなるケースを再現するため、水セメント比を 40%～70% まで変化させた。

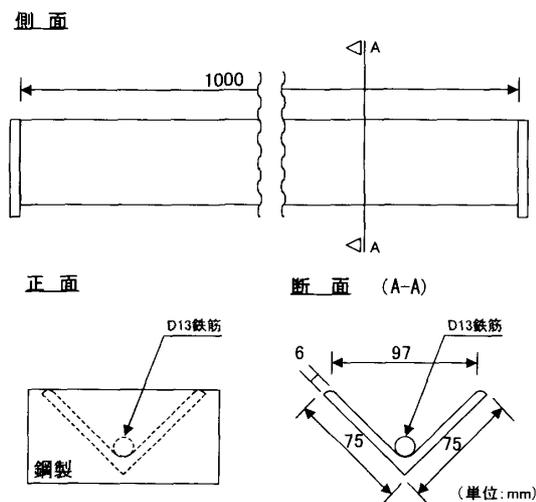


図-1 ひび割れ抵抗性試験用型枠

表-3 ひび割れ抵抗性試験体一覧

断面修復材	施工方法	水セメント比 (%)	拘束金物
PCM	横向き吹付け	40	鉄筋
	下向き吹付け	60	
1:3 モルタル	下向き打込み	50	鉄筋
		50~70	なし

(3) 実構造物の模擬試験

実際のコンクリート構造物でのひび割れ抵抗性を確認し、鋼製三角形型枠によるひび割れ抵抗性評価試験でのひび割れ発生形態と対比する目的で、図-2に示すようにJIS平板を用いた試験体により実構造物を模擬した試験を行った。JIS平板の表面は、実際の補修現場での施工を再現し、WJ工法による表面処理を行って接合面の付着強度が十分とれるようにした。

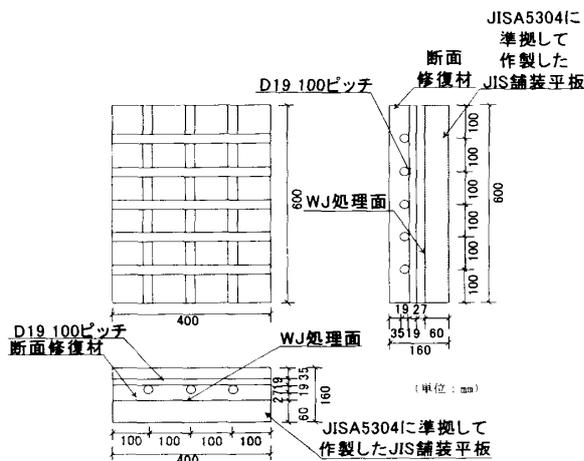


図-2 JIS平板を用いた実構造物の模擬試験体

3.2 試験結果

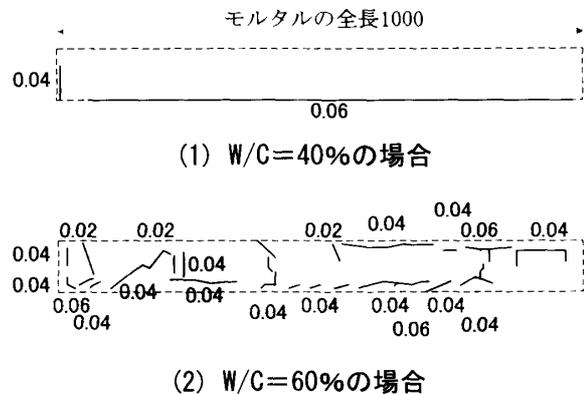
(1) 硬化収縮率試験

PCMの材齢2日~30日までの硬化収縮率は、水セメント比を40%とした場合で 475×10^{-6} 、60%とした場合で 656×10^{-6} となった。既往の研究¹⁾より、硬化収縮率が 500×10^{-6} を超えると既設コンクリートとの一体性やひび割れ抵抗性に問題があることが確認されており、水セメント比を60%と高く設定した試験体は、ひび割れ抵抗性に問題があることを再現できている。

(2) ひび割れ抵抗性評価試験

水セメント比が40%および60%のPCMを用いて、鋼製三角形型枠に吹付け施工を行い、91日間気中養生した後のひび割れ発生状況を図-3に示す。図-3より、水セメント比が40%のPCMはほとんどひび割れが発生していないのに対し、水セメント比を60%とし硬化収縮率が 500×10^{-6} を超えたPCMは、横断方向に0.04mmのひび割れが250~500mm間隔で観察された。このことから、硬化収縮率が大きく有害なひび割れが生じやすい断面修復材のひび割れ抵抗性を鋼製三角形型枠で評価できることが確認できた。

なお、図-4にPCMの材齢30日における硬化収縮率と横断方向のひび割れ本数の関係を示す。図-4では、型枠とモルタルとの境界面に生じた微小なはく離については、現時点ではひび割れとは考えず許容することとし、型枠の横断方向に生じたひび割れの本数で評価を行っているが、硬化収縮率が大きいとひび割れ本数が多くなる傾向が確認できた。



図中の実線がひび割れ。数値はひび割れ幅 [mm] を示す。

図-3 ひび割れ発生状況 (PCM)

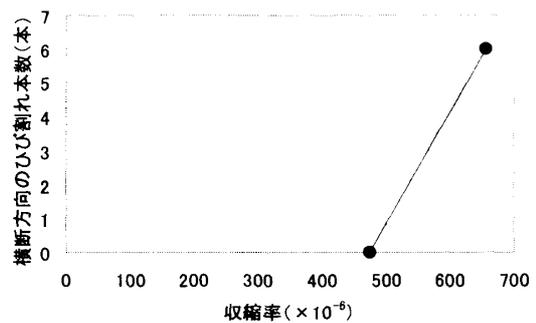
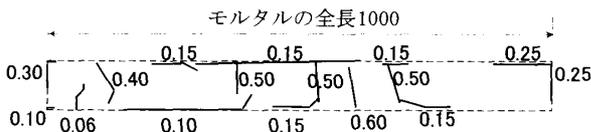


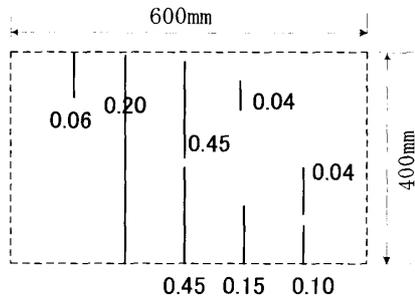
図-4 収縮率とひび割れ本数 (PCM)

(3) 実構造物を模擬した試験体との比較

図-5(1)(2)(3)に 1:3 モルタルの材齢 28 日におけるひび割れ発生状況を示す。図-5(3)より、鋼製三角形型枠と JIS 平板のひび割れ発生状況（ひび割れ幅×ひび割れ長さ）と水セメント比の関係には相関が見られ、実構造物に近いひび割れが鋼製三角形型枠においても再現できることが示唆された。

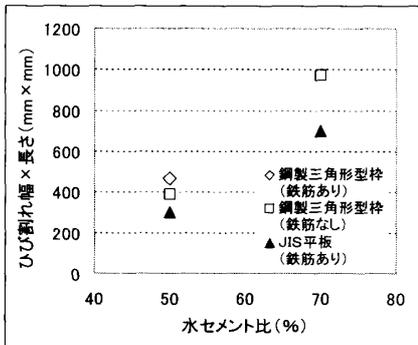


(1) 鋼製三角形型枠 (W/C=50%) の例



(2) JIS 平板 (W/C=50%) の例

図中の実線がひび割れ。数値はひび割れ幅 [mm] を示す。



(3) ひび割れと水セメント比の関係

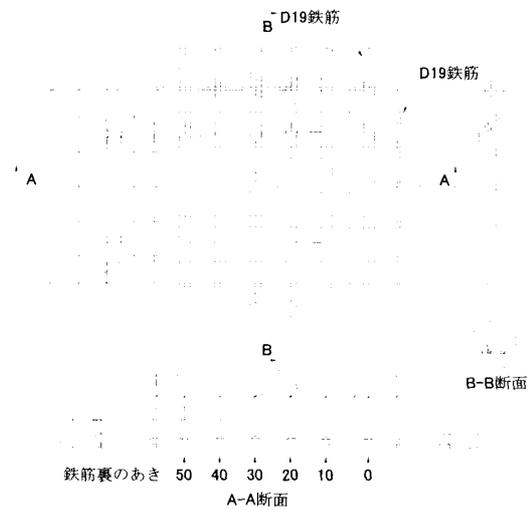
図-5 ひび割れ発生状況 (1:3 モルタル)

4. 鉄筋背面への充填性試験

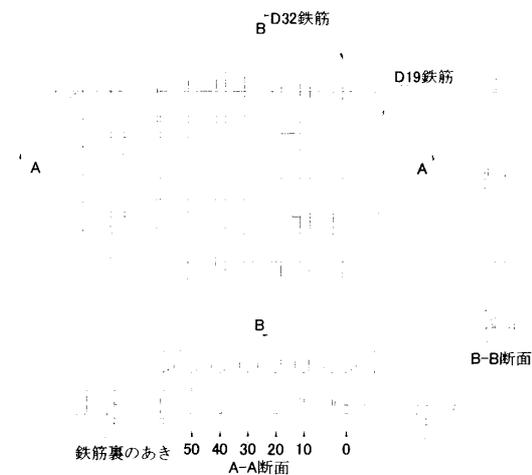
4.1 試験方法

吹付けモルタルが適用される補修現場では、既設構造物の鉄筋背面まで劣化したコンクリートを除去する場合が多い。しかし、断面修復材が鉄筋背面に十分に充填されずに大きな空隙が存在すると鉄筋の付着が確保されないだけでな

く、中性化や塩害等に伴う鉄筋の腐食が一段と増幅されることが懸念される。よって、断面修復の際には鉄筋背面までモルタルが充填されることが必要条件となる。このため、鉄筋径や鉄筋背面への空き（隙間）が吹付けモルタルの充填性に及ぼす影響について定量的に検証する目的で、図-6 に示すような、(1) D19 鉄筋の重ね継手部の格子状配筋、(2) RC 中空床版の主筋 D32 と配力筋 D19 の格子状配筋、を想定したものを用意し、双方とも鉄筋背面の空きを 0~50mm に変化させた型枠を作製して、PCM の吹付け施工を実施した。



(1) D19 の重ね継手部の格子状配筋



(2) D32 と D19 の格子状配筋

図-6 鉄筋背面への充填性試験体

4.2 試験結果

試験結果の例として、図-6(1)の型枠に対して上向きで吹付け施工し、その後に脱型して鉄筋背面への充填状況を観察したスケッチ図を図-7に示す。また、図-8に図-7の試験体を①～⑧断面で切断して鉄筋背面への充填状況を観察した状況を示す。図-7、図-8ともに黒く塗り潰した範囲がモルタル未充填箇所である。図-7、図-8より、重ね継手部の格子状配筋箇所(a, b, d, f, g, h断面)に未充填箇所が確認された。また、鉄筋背面の空きが大きいと未充填箇所も多くなる傾向が確認された。

さらに、鉄筋背面の空きと未充填箇所の空隙率の関係を図-9に示す。空隙率は、切断面の鉄筋径の合計長に対する空隙径の合計長の割合(%)を算出した。図-9より、天井面に上向きに吹付けた場合では、鉄筋背面の空きが大きいと未充填箇所が多くなる傾向が確認でき、鉄筋の交差位置は鉄筋間に比べて、幾何学的な関係からも吹付けモルタルが入り難い傾向があり、壁面に横向きに吹付けるよりも天井面に上向きに吹付ける方が空隙率は多い傾向が確認された。

これらの結果を踏まえて、試験体のハンドリングを良くする目的で、図-10に示す大きさの試験体⁵⁾を用いて、経験豊富なノズルマンが吹付け施工を行った結果、最初はある程度の空隙が生じたが、数日の練習の結果、ほとんど空隙を生じないレベルでの施工が可能となった。

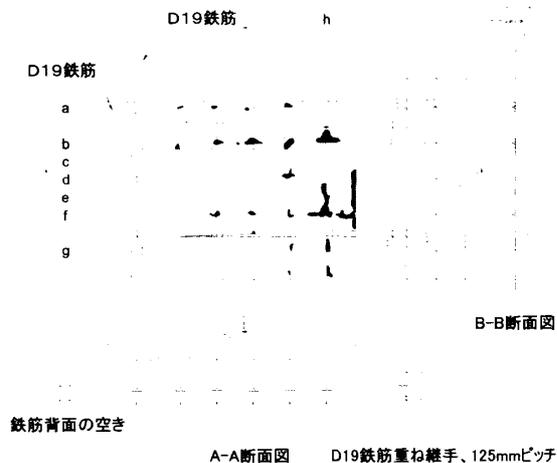


図-7 脱型面の充填状況例（上向き吹付け）

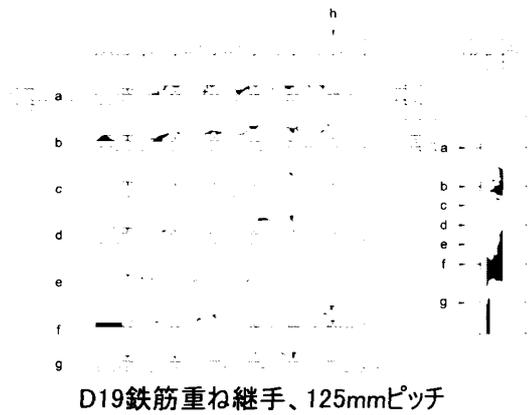
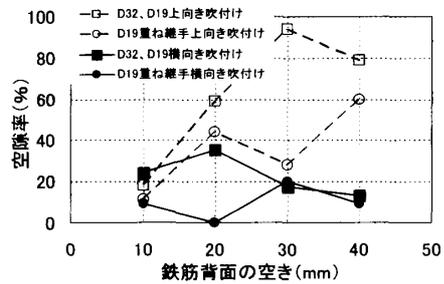
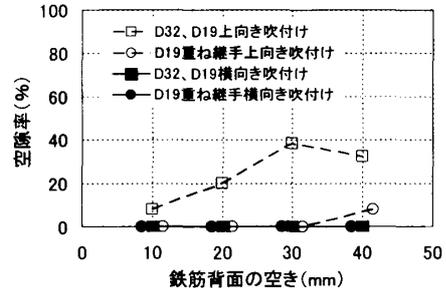


図-8 切断面の充填状況例（上向き吹付け）



(1) 鉄筋交差位置 (b, d, f 断面)



(2) 鉄筋と鉄筋の間 (c, e 断面)

図-9 鉄筋裏の空きと空隙率の関係

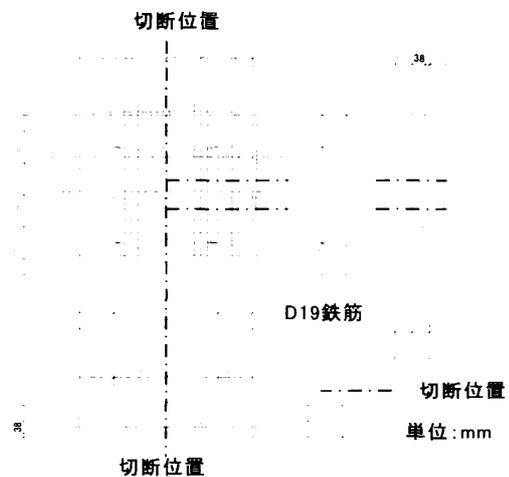


図-10 鉄筋背面の充填性試験体

5. まとめ

本研究は、コンクリート構造物の断面修復用の吹付けモルタルに要求される基本的な性能として、ひび割れ抵抗性および鉄筋背面への充填性に着目し、それぞれの性能評価試験を実施したものであり、本研究で得られた知見は以下のとおりである。

(1) ひび割れ抵抗性試験

鋼製三角形型枠を用いたひび割れ抵抗性評価試験では、水セメント比が大きく硬化収縮率が大きい断面修復材はひび割れ本数が多くなる傾向が確認できた。また、鋼製三角形型枠と JIS 平板のひび割れ発生と水セメント比の関係には相関が見られ、実構造物に近いひび割れが鋼製三角形型枠で再現できた。

鋼製三角形型枠を用いた試験は、既製の鋼製アングルを用いた簡易な試験方法で直接的にひび割れを評価できるので、有害なひび割れを生じ難い良質な断面修復材を選定する性能評価試験方法として有効であると考えられる。

(2) 鉄筋背面への充填性試験

天井面に上向きに吹付け施工した場合には、鉄筋背面の空きが大きいと未充填箇所が多くなる傾向が見られ、鉄筋の格子状配筋や鉄筋背面の空き（隙間）が吹付けモルタルの充填性に影響することが確認できた。よって、これらの要因を考慮して鉄筋背面への充填性に関する施工試験を実施する必要がある。また、鉄筋背面への充填性は吹付け先端ノズルを操作するノズルマンの技能の影響を受けるため、今回のような試験体を用いてノズルマンの技能向上を図る必要がある。さらに、補修現場において実施する施工試験においても、充填性を確認する際、鉄筋背面の空きを考慮して実施すべきであると考えられる。

なお、断面修復工法を採用する補修工事の計画および設計段階では、個々の現場条件を十分

調査し、鉄筋背面の未充填箇所を極力少なくすることを考慮して、適切なはつり深さを決定する必要がある。

謝辞

本研究は「吹付け工法によるコンクリート構造物の補修検討会」（座長：関東学院大学・出雲淳一教授）の委員各位に多大なご協力を賜りました。また、試験の実施にあたっては、「RC 構造物のポリマーセメントモルタル吹付け補修・補強工法協会」および「乾・湿吹付け工法協会」に協力していただいた。ここに、関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 豊福俊泰, 吉岡博幸, 用害比呂之: コンクリート補修材の品質特性—コンクリート塗装材・断面修復材・鉄筋防錆材—, 日本道路公団試験所報告, Vol.25, pp.73- pp.86, 1988.
- 2) 本荘清司ほか: 塩害を受けた RC 中空床版橋の床版下面に対する断面修復工法の検討, コンクリート構造物の補修,補強,アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 1 巻, pp.15-20, 2001.10
- 3) 藤原博ほか: 塩害を受けたコンクリート桁端狭隘部の補修工法—ウォータージェットによるコンクリートはつりと湿式吹付けによる断面修復—, 橋梁と基礎, Vol.38, No.12, pp.33-39, 2004.12
- 4) 武若耕司, 紫桃孝一郎, 北後征雄, 峰松敏和: 補修・補強用吹付けコンクリートの現状と課題, コンクリート工学, Vol.42, No.5, pp.80-85, 2004.5
- 5) German Committee on Reinforced Concrete : Guidelines for the Protection and Repair of Concrete Components, 1990.