

コンクリート構造物のはつり処理と断面修復

中日本高速道路（株） 中央研究所⁽¹⁾ 横山 和昭
(社) 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所⁽²⁾ 設楽 和久*
(社) 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所⁽²⁾ 谷倉 泉

Study on repair methods of concrete structures by water jet and shotcrete application

Key Words : concrete structure , repair , durability , evaluation method, water jet, shotcrete

1. はじめに

コンクリート構造物は永久構造物として十分な耐久性があると考えられていたが、近年において、塩害、中性化、凍害、アルカリ骨材反応等により変状が生じ、コンクリート片のはく落やコールドジョイント、ひび割れの発生などが一部のメディアでも報じられるようになってきた。

このうち、塩害のように塩化物イオンが鉄筋位置まで侵入して鉄筋腐食を生じ、それに伴うひび割れが著しい場合や、かぶり厚以上に中性化が進んで同様の変状が生じている場合には、ひび割れ補修を行っても十分な耐力の回復は望めないため、最近では、鉄筋背面までウォータージェット工法でコンクリートをはつり取った後、吹付け工法（ショットクリート）等により断面修復する方法が採られるようになってきた。

ウォータージェット工法は我が国においても長大橋の基礎掘削、地下連壁の切断など 200～400MPa の超高压で利用されてきた実績がある。しかし、これを鉄筋が密に配筋されたコンクリート構造物に適用するには、水压、水量、施工システムなど適切な条件設定を行う必要がある。10 年近く前に研究を開始した当初、鉄筋間の中間部が壺掘り状態となって鉄筋裏のコンクリートが除去できない技術レベルであり、欧州の技術をそのまま利用しても然りであったが、現在では鉄筋の背面まできれいにはつれるレベルに至っている。

ショットクリートについては NATM に代表されるようにトンネルの覆工技術として 30 年以上も前から利用されていたが、橋梁等の構造物の補修へ適用するためには、付着力や弾性係数などの力学的特性、耐久性等に求められる性能を満足しなければならない。しかしながら、近年において、ショットクリートによる断面修復工法は、ウォータージェットによる確実なはずりと合わせて、コンクリートの補修工法として重要な役割を果たすようになりつつある。

このようなことから、本論文は劣化コンクリートに対する耐久性の高い補修技術を確立することを目的として実施した、① ウォータージェット工法による適切なコンクリートのはつり技術の開発とその評価手法、② はつり後の断面修復に使用する吹付け材料および吹付けシステムの性能評価手法に関する調査、試験、研究成果について概説し、コンクリートの補修工法としての断面修復におけるウォータージェット技術の意義について述べる。

2. コンクリート構造物の劣化・損傷実態

最近では、コンクリート構造物に発生する塩害や中性化、疲労等による変状がコンクリートにひび割れを発生させ、構造物の強度や耐久性、美観に影響を及ぼすケースが増加している。これらの変状は、場合によってはコンクリート片をはく離、落下させ、一般の人々や車両等に被害を生じさせる恐れがあり、構造物を管理する機関にとっては対策が急がれている。

(1) Kazuaki Yokoyama (Expressway Research Institute of Central Nippon Expressway Company Limited, Machida 194-8508, Japan)

(2) Kazuhisa Shidara and Izumi Tanikura (Japan Construction Method and Machinery Research Institute, Japan Construction Mechanization Association, Fuji 417-0801, Japan)

我が国の山間部や寒冷地では凍結防止剤が冬季に散布され、これがコンクリートに生じたひび割れなどに染み込んで内部の鉄筋を腐食、膨張することがある。その結果、コンクリートのひび割れ、強度低下、はく落を招くことになる。海岸沿いのコンクリート構造物でも、飛来塩分により同様な変状が見られる。

また、中性化については、大気中に含まれる二酸化炭素がコンクリート表面から侵入し、強アルカリ性のコンクリートが中性化し、鉄筋の不動態被膜が破壊され、鉄筋に錆が生じやすくなる。鉄筋が錆びると体積膨張を起し、この膨張圧がコンクリート表面のひび割れやはく離の原因となる。

これらの対策としては、塩害の場合、塩分を取除く（脱塩）、化学的反応を抑えるための電気防食を行う等の方法があり、中性化の場合、再アルカリ化を行う等の方法があるが、既に、劣化因子が深くまで入り込み、ひび割れが著しい場合には、鉄筋の背面までコンクリートを確実に除去し、ショットクリート等により断面修復することが重要であり、表面のみの被覆処理だけでは効果が期待できず、再損傷の可能性がある。

3. ウォータージェットによるはつり技術

3.1 概要

塩害や中性化、疲労等によって変状を生じているコンクリート構造物を補修する上では、脆弱化したコンクリートや塩化物イオンなどの劣化因子を含んだコンクリートの除去（ここではこれを「はつり処理」という）が必要となることが多い。

また、耐震補強や拡張など既設コンクリートに新たなコンクリートを打継ぎ、新旧コンクリートを一体化させるためには、確実な打継ぎ面の処理（ここではこれを「表面処理」という）によってレイタンス等を取除き、表面を清浄にすることが最も重要である。

ウォータージェットは、はつり、研掃（表面処理）、削孔、切断など多くの用途に対し、鉄筋やコンクリートをほとんど傷めずに施工できる特徴を有しているが、目的に応じてノズルやシステムを選定するとともに、条件設定を適切に行わなければ期待する成果は得られない。さらに、ノズルを直接動かすロボットの条件設定やオペレータの操作技能によっても結果が異なってくる。

本章では、このようなウォータージェットの特徴を生かして改良、開発を行ったはつり技術およびその性能の評価手法について述べる。

3.2 はつり処理の概要

コンクリートをブレーカーではつり処理した場合の損傷事例を写真1、2に示す。コンクリート表面に大小様々なひび割れを生じるだけでなく、その位置が不明であるために鉄筋にも5～10cm 間隔で大きな穴を生じている。前述したように、ウォータージェットではこのような損傷を生じさせることが全くないので、構造物に優しく耐久性の高い補修が可能とする。既設のコンクリートに新しいコンクリートを打継いで断面修復を行う上で、既設コンクリート表面の清浄性は高い付着力を確保する上で欠かせない要素である。界面がはく離すれば断面の剛性が低下するだけでなく、再損傷を生じる可能性が極めて高くなる。清浄性だけでなく、ブレーカーを使用した際のようなコンクリート表面にひび割れが散在する状況も、同様の再損傷を生じる可能性を高める。



写真1 ブレーカー処理面に生じたひび割れ

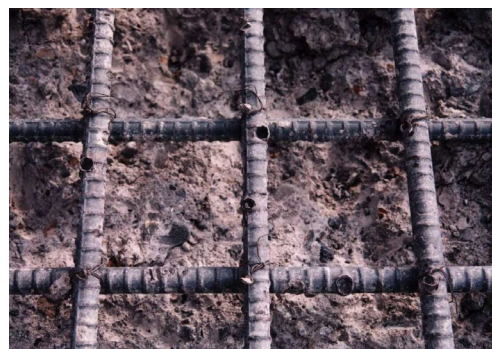


写真2 ブレーカーによる鉄筋の損傷

研究当初、ウォータージェットを利用した従来のはつり技術では、鉄筋裏まできれいにはつれなかったため、ノズルの制御方法（振り幅や角度）、水量、水圧、スタンドオフなど諸条件を変えてその可能性を探ることとした。はつり処理で必要とされるのは、高濃度の塩化物イオンを含む鉄筋裏側のコンクリートまで均一に除去する性能（平坦度）と、脆弱な部分ははつり取って健全な部分ははつり取らずに残すことのできる性能（セレクトビティ）である。

標準的な配筋、コンクリート強度の模擬試験体による多くのはつり試験の結果、揺動式はつりロボットを用いてこのような性能を満足するはつりが可能であることを実証できた。しかし、ノズルにはその種類の多さだけでなく、制御方法にも回転式、揺動式、交差式など各種の手法があり、これらのはつりシステムにおいても十分なはつり性能が確保できるかどうか確認する必要があった。

欧州で用いられている既存の研究調査結果を踏まえ¹⁾、本節では我が国の構造物の実状に合わせた試験体の作製およびこれを用いたはつり試験による性能評価について以下に述べる。

3.3 我が国におけるはつり技術の開発

ウォータージェット工法をコンクリート構造物のはつりに適用するに当たっては、目的とする補修が可能な技術レベルにあるかどうか確認する必要がある。しかし、前述したようにはつりシステムやはつり条件が多様であるため、すべてのパラメータについて試験することは難しい。

そこで、欧州において最も多く利用されている揺動式ノズルを備えたはつりロボットを代表として、その標準仕様におけるはつり性能を確認することとした。この時使用した試験体は、床版などの標準的な諸元として、鉄筋径 D19mm、配筋ピッチ 125mm、かぶり 30mm とした。この試験体に対し、一定の投射エネルギーで下向きのはつりを行った結果、写真3に示すように鉄筋背面が全くはつれず、壺堀り状態のはつりしかできなかった。その理由として、ウォータージェットは水噴流の動圧や衝撃、くさび作用でコンクリートをはつるものであるが、ノズルを揺動させる振り角や、ノズルが取り付くランスの傾斜角を適切に設定しなければ鉄筋裏まで水噴流のエネルギーが伝わらなかったからである。さらに、エネルギーの大きさを左右する水量や水圧、ならびにスタンドオフ（ノズル先端とコンクリート表面の距離）もはつり性能に大きく影響するため、これらの条件設定についても多くの実験を繰返した。

一方、コンクリート構造物の補修では劣化部をきれいに除去する必要がある。この際、健全部はなるべくはつらず、劣化部のみ除去できることが望ましい。このようなことから、図1に示すような配筋およびコンクリート強度で構成される試験体を考案し、はつり深さの確保と劣化部の除去の2つの要求性能を満足するはつり技術について試験・検討を行うこととした。その結果、上述したようなパラメータの組合せを変えることにより、写真4のように鉄筋背面までの良好なはつりを行うことができた。

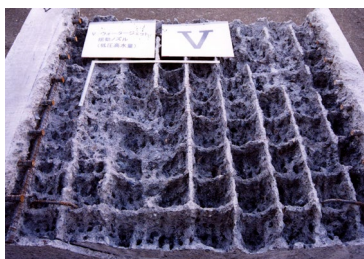


写真3 揺動式ノズルによるはつり状態



写真4 はつり後の試験体

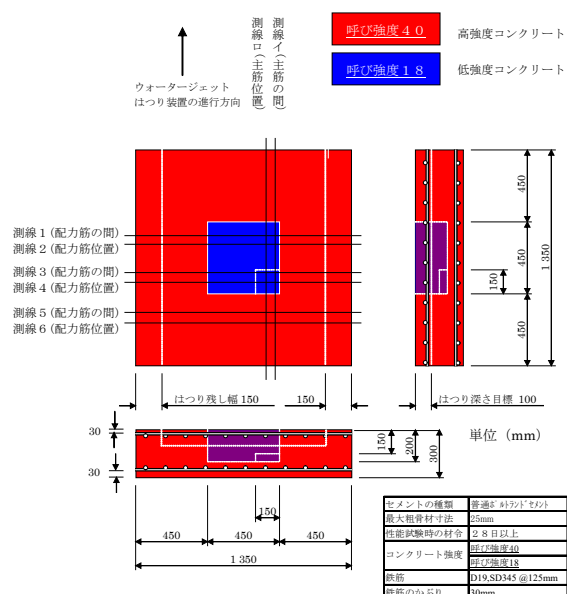


図1 試験体

さらにウォータージェットではつったコンクリート表面に新しいコンクリートを打継ぎ、コアを削孔して打継ぎ界面の付着強度を確認した結果、従来のショットブラストやソフトブラスト、ブレーカーなどのはつり工具に比べ、最も高い付着力を確保できることが明らかとなった²⁾。

このようなことから、旧日本道路公団では「ウォータージェット施工マニュアル：平成12年6月」³⁾をとりまとめ、施工技術総合研究所はこの基準に沿う形で「ウォータージェットによるはつり処理性能試験 実施要領：平成13年2月」を定めた⁴⁾。この性能試験における評価基準は表1のとおりである。現在では、36社、53名のオペレータが、ウォータージェットの基礎知識、安全教育等の講習会の受講後、はつり試験に合格し、徐々に活躍の場を広げるようになってきている。また、開発当初に比べて性能・技術的にもアップし、深く選択的にはつれて実施工で使える技術となっており、施工実績も増えている。

表1 はつり処理面の評価基準

評価項目		評価基準
要求性能Ⅰ (セレクトイビティ)	端部のはつり残し	両端部は150mm程度はつり残す(150±25mm)
	適正度	選択的除去率が 低強度部60%以上 高強度部30%以下
	ピット	ピットの数3個まで可 ピットの定義： $d < d_{max} = 32mm$ 、 $h > 1.5 \times d$
要求性能Ⅱ (平坦度)	鉄筋裏のはつり残し	鉄筋に到達するような鉄筋裏側のはつり残しはあってはならない
	うね	うねの長さ $h_i > 35mm$ の部分が $\sum L_i < 900mm$
	表面粗さ	62.5mmピッチで±7mm以上の差
	はつり深さ	目標はつり深さ100mmに 対して±20mm

本研究において、ウォータージェット工法を用いたはつり処理に関し、次のようなことが明らかになった。

- (1) コンクリート構造物の表面処理およびはつり処理をウォータージェット工法により行くと、打継面の付着力など新旧コンクリートの一体化性状は最も良好となった。
- (2) ブレーカーなど、処理面に打撃力を与える従来の処理方法では、コンクリート表面にひび割れを生じ、打継ぎ面の付着力は低下する。また、ブレーカー先端の打撃によって孔があくなど、鉄筋も著しく損傷させる。すなわち、疲労が問題となるような部材へのブレーカーの適用には問題が大きい。
- (3) ウォータージェット工法を用いたはつり処理では、施工機械の仕様や制御方法、はつりの設定条件に応じて、得られるはつり深さや凹凸などの処理面の形状が大きく異なる。また、機械を操作するオペレータの知識や経験によっても、その結果は大きく左右される。
- (4) 一連の調査、試験、研究により、ウォータージェット工法によるはつり処理性能の定量的な評価が可能となった。

4. 吹付け工法による断面修復技術

4.1 概要

コンクリート構造物の断面修復工法は、コンクリートの劣化部分を除去した後の断面や、既にかぶりコンクリートのはく離やはく落によって生じている欠損断面に対し、コンクリートやポリマーセメントモルタル等の断面修復材によって従前の断面に修復する工法であり、ひび割れ注入、表面塗装と同様にコンクリート構造物の基本的な補修工法のひとつである。

従来の断面修復は壁高欄補修等の小規模断面に適用されていたが、最近では塩害で劣化したRC中空床版やPC橋、橋台、橋脚等の断面修復に代表されるように施工規模が大規模化してきている。施工の効率を高め確実に施工を行うため、劣化部分の除去は従来のブレーカーによる施工からウォータージェット工法が主体となり、断面修復の施工方法においても従来の左官工法や打込み工法に加えて、吹付け工法による施工が採用されてきている。しかし、多種多様の材料や工法の組合せによって構成される断面修復工法の評価については、断面修復材の品質規格が仕様として規定されているのみで、その要求性能や性能評価手法は確立されていないのが現状である。

本章では、吹付けによる断面修復工法を採用するにあたって、良質の材料を選定して確実に施工を行うために実施した吹付け材料および吹付けシステムの性能評価手法についての試験研究成果を述べる。

4.2 断面修復の現状と課題

塩害等の断面修復は、大規模で上向きや横向きの施工が多くなることが予想される。この場合には、図2に示すように、従来の左官や打込みによる施工と比較して、型枠が不要で、上向き・横向きの急速施工が可能な吹付け工法が適しており、今後採用例が増加するものと考えられる。湿式および乾式による吹付け工法の特徴を表2に、湿式吹付けの状況を写真5に示す。

劣化部を除去した後の断面修復工法には、上向き、横向きに施工された場合でも、有害なひび割れやはく離を生じることなく、長期にわたって既設コンクリートと一体化し、外部劣化因子の侵入や外力に対して抵抗することが求められる。このように断面修復工法には高い耐久性が求められ、しかも既に多くの現場で適用されているにも拘わらず、その性能、特に施工状況を勘案した性能評価に関する検討は現在までのところ、ほとんどなされていない。

そこで、吹付けによる断面修復工法を採用するに当たって、良質の材料を選定して耐久性の高い確実な施工を行うため、断面修復材の要求性能と性能評価方法を定めることとした。

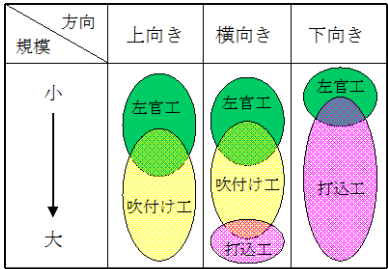


図2 断面修復工法の分類図



写真5 吹付け状況

表2 吹付け工法の特徴

項目	NATM	コンクリート構造物の補修・補強	
方式	湿式が主	湿式	乾式
吹付け材料	コンクリート	ポリマーセメントモルタル	超速硬セメントモルタル
吐出力	10～20m ³ /h程度	0.5m ³ /h程度	1.0m ³ /h程度
1層の施工厚さ	50～250mm	20～50mm	20～100mm
積層間隔	—	3時間～1日程度	数分～1日程度
圧送可能距離	100m程度（湿式）	50m程度	500m程度
圧送ホース径	3インチ程度まで	1.0～1.5インチ	1.5インチ
水量管理	湿式は練混ぜ時	練混ぜ時	ノズル手元
粉塵・リバウンド	少ない	少ない	多い
左官仕上げ	—	可能	ほとんど不可能

4.3 断面修復材の要求性能と性能評価方法

断面修復材の要求性能は、

- ① 力学的性能（圧縮強度、弾性係数など）、
- ② 断面の修復に特有な性能（付着強度、ひび割れ抵抗性、鉄筋背面への充填性など）、
- ③ 耐久性能（遮塩性、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性など）

の3つに整理できる⁵⁾。力学的性能や耐久性能は、通常のコンクリート構造物と同様の性能として断面修復材に要求されるが、断面修復に特有な性能は以下の理由により規定した。

付着強度は、断面修復材と既設コンクリートとの確実な一体化のために必要である。また、断面修復材は、既設部材との材齢差が大きいことから、乾燥収縮、自己収縮、強度発現等の影響で、有害なひび割れやはく離を生じる可能性があり、ひび割れ抵抗性が要求される。さらに、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つき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まで確実に充填される性能が要求される。

断面修復材の性能評価にあたっては、断面の修復に特有な要求性能に対する評価方法を定める必要があり、上向きや横向きなどの施工方向や供用下での振動の影響など実際の施工条件も考慮する必要がある⁶⁾。

基本的な力学的性能としての圧縮強度や静弾性係数は、設計基準値以上の値を有しているかどうか評価し、耐久性能

については、設計耐用期間中の塩害や中性化等の劣化要因に対する抵抗性を評価することとした。これらの性能を評価する試験は現行基準類に網羅されているが、試験体の作製方法は、吹付け施工した後のコア抜きなど、材料特性を考慮することとした。

断面修復材に特有な性能である付着強度やひび割れ抵抗性、鉄筋背面への充填性については、性能評価方法として現行の試験方法で準用できるものはない。したがって、これらについては、ドイツの基準等^{7), 8)}も参考にして新しい試験方法を調査・研究した。

空隙が多く密実ではないコンクリートの耐久性は小さいことが一般に知られている。補修においても鉄筋腐食を助長する空隙の存在は好ましくないことから、交差する鉄筋背面にも十分ショットクリートが充填するかどうか確認、評価する手法として、写真6に示すような鉄筋背面への充填性試験（施工後に切断して観察）を行うこととした⁹⁾。

また、写真7に示す振動下での吹付け試験は、供用中の橋梁に対して浮きやはく落を生じないで吹付け施工が可能であるかどうか評価するもので、施工中および施工後のはく離やひび割れ発生の有無、硬化後の既設部材との付着強度を確認するものとして位置付けた¹⁰⁾。



写真6 鉄筋背面への充填性試験



写真7 振動下での吹付け試験
(たわみ全振幅 0.5mm, 振動数 5Hz, 24 時間加振)

実施工に則したこれらの性能を評価することにより、現場での施工性や品質確保の面において、より確実性が増すものと考えられる。

断面修復工法が耐久性の高い確実な補修・補強工法として確立するためには、ウォータージェット工法等によって、清浄な打継面を確保することはもちろんのこと、品質の良い材料・工法の選定、技能の高いノズルマンによる施工が不可欠である。吹付けによる断面修復工法に関する課題としては以下の点が挙げられる。

①良質の材料の確保

- ・リバウンドや粉塵が少ない
- ・より耐久性の高い材料（耐候性、高付着力）

②施工品質の確保

- ・ノズルマンの育成、講習会の開催
- ・施工実績の蓄積

③コスト削減

- ・施工能率の向上に向けたシステム、機器の開発
- ・材料の開発

5. おわりに

本研究は、コンクリート構造物に生じる各種の劣化・損傷に対し、補修現場で適用できる合理的な補修方法としての断面修復工法について各種の試験・研究を行ったものである。特に下記の2つの手法については、我が国だけでなく欧米の技術調査も踏まえ、確実に耐久性の高い補修工法を確立するための評価手法について試験、研究を行った。

- ① ウォータージェット工法を用いたコンクリート劣化部のはつり技術
- ② ①の後に実施される吹付け工法による断面修復技術

地震の多い我が国では欧米に比べて配筋量が多いため、鉄筋背面までフラットにはつるのは非常に難しいが、ウォータージェット工法によるコンクリート劣化部のはつり技術に関しては、鉄筋背面まで平坦にはつる技術、劣化により強度が低下した部分を選択的にはつり取る技術が確立できた。これらの点を踏まえ、旧日本道路公団では、より安全で確実な施工を行うためにウォータージェットロボットおよびオペレータの認定制度を制定した。新旧コンクリートの一体化を図って耐久性を高めるとともに再損傷の恐れを軽減する下地処理工法としてもウォータージェットの果たす意義は大きいと考えられる。今後は、はつり深さの管理や、コスト縮減に向けた施工の合理化、安全環境対策の観点からの技術開発が望まれる。

断面修復工法の性能評価試験については、概ね使用される材料や施工方法に関する性能評価が網羅された内容がまとめられたと思われる。ただし、まだ耐久性評価試験の一部は継続されている段階であり、試験方法とその結果の評価基準については若干検討の余地が残されている¹¹⁾。断面修復が耐久性の高い補修工法として確立されるためには、材料の品質だけでなく吹付けを行うノズルマンの技能も非常に重要と考えている。今後はコスト縮減等に向けた技術開発と合わせて、人材の育成も念頭に置いて取り組んでいきたい。

謝辞： 本研究は、「新旧コンクリート構造物の一体化に関する検討会（座長 日本大学理工学部土木工学科 山崎 淳教授）」および「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 関東学院大学工学部社会環境システム学科 出雲淳一教授）」を設置し、その検討内容を反映しながら進めたものであり、座長はじめ検討会メンバーより貴重なご指導、ご助言をいただいた。また、実験にあたっては、日本ウォータージェット施工協会、乾・湿吹付け工法協会、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、（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会に協力していただいた。ここで関係者の皆様には誌面を借り、深謝の意を表したい。

〔参考文献〕

- 1) 欧州土木構造物補修・補強調査 報告書，社団法人 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所，1998, 1999, 2000, 2001., 2004
- 2) 紫桃孝一郎・上東 泰・野島昭二・吉田 敦：ウォータージェット技術を利用した新旧コンクリート構造物の一体化処理，コンクリート工学，Vol38, No. 8，pp. 40～54 (2000. 8)
- 3) ウォータージェット施工マニュアル，日本道路公団 技術部構造技術課，平成 12 年 6 月
- 4) 谷倉 泉・設楽和久・上東 泰・野島昭二：ウォータージェット工法を用いたコンクリート構造物のはつり処理性能試験，日本ウォータージェット学会，第 16 回研究発表講演会 論文集，pp. 53～62 (2002. 1)
- 5) Muroi, Shito, Yokoyama, Tanikura, Takuwa, Izumo: Study on required performance and its verification of repair materials for concrete structures, ICPIC'04, 11th International Congress on Polymers in Concrete 2nd-4th June, 2004 at BAM, Berlin, Germany
- 6) Shito, Kamihigashi, Yokoyama, Shidara, Miura, Uchida: Experimental study on test condition of performance test for sprayed mortar, ICPIC'04, 11th International Congress on Polymers in Concrete 2nd-4th June, 2004 at BAM, Berlin, Germany
- 7) German Committee on Reinforced Concrete : Guidelines for the Protection and Repair of Concrete Components, 1990.
- 8) 米国土木構造物補修・補強調査 報告書，社団法人 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所，2002
- 9) 横山和昭・鹿野喜則・設楽和久・三浦康治：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，コンクリート工学年次論文集，Vol27, pp. 1603～1608 (2005. 6)
- 10) 横山和昭，上東 泰，設楽和久，内田美生：吹付けモルタルの性能評価に関する実験的研究，第 3 回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，（社）日本材料学会，2003. 10.
- 11) 横山和昭・鹿野喜則・設楽和久・三浦康治：補修用吹付けモルタルの付着強度に及ぼす凍結融解作用の影響に関する実験的研究，土木学会第 60 回年次学術講演会，部門 V，pp. 129～130 (2005. 9)