
乾式吹付け工法における施工性と品質の 評価手法研究委員会報告書

2015 年 10 月 23 日

公益社団法人 日本コンクリート工学会 九州支部

乾式吹付け工法における施工性と品質の評価委手法研究委員会

JCI 九州支部 研究専門委員会

乾式吹付け工法における施工性と品質の評価委手法研究委員会

委員名簿

委 員 長	山口 明伸	鹿児島大学大学院
幹 事	山本 誠	住友大阪セメント株式会社
委 員	加納 淳郎	株式会社ケミカル工事
	佐川 康貴	九州大学大学院
	重石 光弘	熊本大学大学院
	関野 一雄	東和耐火工業株式会社
	田中 健介	株式会社永代建設
	田中 勉	東和耐火工業株式会社
	中馬 忠司	株式会社エステック
	堤田 敏久	株式会社旭技研コンサルタント
	中野 智章	株式会社大進
	松岡 義勝	九州建設コンサルタント株式会社
	三上 光司	住友大阪セメント株式会社
	吉田 直彦	株式会社 SNC

2015 年 3 月 31 日現在

目 次

第1章	コンクリート・モルタルの吹付け工法に関して	1
1.1	吹付け工法概要	1
1.2	湿式吹付け工法の概要	2
1.3	乾式吹付け工法の概要	4
第2章	乾式吹付け工法	6
2.1	乾式吹付けシステム	6
2.1.1	吹付け機	6
2.1.2	コンプレッサー	9
2.1.3	発電機	10
2.1.4	水ポンプ	11
2.1.5	吹付ノズル	13
2.2	乾式吹付け工法用材料の性能	14
2.2.1	公的機関の要求性能の一例	14
2.2.2	乾式吹付け材料の品質に与える要因	16
	(1) 水量と粉体量の変動が圧縮強度に与える影響	17
	(2) ノズル形状の違いが圧縮強度と材料の混合性に与える影響	19
	(3) ノズル先端と対象構造物との吹付け距離が圧縮強度に与える影響	30
第3章	乾式吹付け工法における施工管理と品質検査の検討	32
3.1	施工管理と品質検査に関して	32
3.2	施工管理と品質検査提案に向けた実験結果	32
3.2.1	密度および空気量が圧縮強度に与える影響	33
3.2.2	供試体寸法が圧縮強度に与える影響	35
3.2.3	水量計種類の検討	36
3.2.4	使用ポンプの種類と安定性の検討	38
	(1) プランジャーポンプ	38
	(2) ダイヤフラム式ポンプ	39
	(3) スネーク式ポンプ	40
3.2.5	吹付け機の周波数、圧送距離、設定エア圧力と粉体吐出量	40
3.2.6	配合推定算出の試み	42
第4章	乾式吹付け工法における施工管理と品質検査の提案	46
4.1	乾式吹付け工法施工一般	46

4.2 各使用材料と混合材料の評価	47
4.2.1 使用材料	47
4.2.2 供試体採取	47
4.2.3 吹付け直後の品質確認	47
第5章 乾式吹付け工法における実施工例	48
5.1 栈橋大規模断面修復工事への適用事例	48
5.1.1 断面修復工法として乾式吹付け工法が適用された経緯	48
5.1.2 工事概要	50
5.1.3 工事内容	50
5.1.4 工事開始前事前確認試験	50
5.1.5 本施工内容	56
(1) 劣化部調査	56
(2) ハツリ・ケレン・補強筋設置	57
(3) 乾式吹付け工	59
(4) 塩害対策工	64
(5) 品質管理	66
5.1.6 施工後の考察	67
5.2 下水道施設への適用事例	68
5.2.1 下水道施設へ乾式吹付け工法が適用された経緯	68
5.2.2 補修工法の特徴	69
5.2.3 実施工の概要	70
5.2.4 補修工事を終えて	72
第6章 乾式吹付け工法の今後の展望と課題	73

第1章 コンクリート・モルタルの吹付け工法に関して

1.1 吹付け工法の概要

現在，社会資本施設における各種劣化補修対策として，各要求性能に対応した補修材料の開発がなされている。一般的に，これら補修材料は，工場でセメント，砂，各種混和剤などをプレミックスし，実施工現場では，水あるいはエマルジョン水などの混練水とプレミックス材料を混合することで各性能を確保した補修材料を製造し，施工されることが多い。これは，これら補修材料を使用する実現場では，多種の建設材料（セメント，骨材など）を現場で計量，混合することが煩雑であり，出来る限りシンプルな施工を求めるためである。また，多様な要求性能に対して，性能を満足するためには，補修材料に混合される材料の品種も多く，工場でプレミックスされることにより，材料品質を確保することが可能である。

一方で，補修箇所が多い場合や大断面の修復工事では，施工効率を向上させることが必要である。従来から土木工事・建設工事では，セメントペーストやセメントモルタルを左官で施工する手法が行われ，現在でも欠かすことのできない施工手段である。しかしながら，左官工法は，作業員が左官コテで混合された材料を少量ずつ施工個所に塗布されるため，施工能力を向上させるためには，作業員数を増加させる以外に方法はなく，作業空間や施工コストを考えた場合に対応不可能な場合も生じる。

そこで，現在では，これら施工に対応するために圧縮空気を用い補修箇所（施工箇所）に連続的に補修材料を吹付け塗布することの可能な吹付け工法が用いられ，施工能力の向上を図ることが出来るようになった。

吹付け工法は，欧米において 90 年以上前から，モルタルを用いた鉱山道の支保部材，のり面保護法，建物の外壁および仕切り材等に採用されていた。ただし，これらの使い方はいずれも仮設備あるいは非構造部材等への適用に限られていた。一方，我が国においては 大正 14 年開通した東京の地下鉄銀座線の一部にも採用されたという話や，昭和 34 年に開業し，既に取り壊されている東京国際見本市会場の建設にも採用されていたという話があるものの文献等も確認されておらず定かではない。正式には 1960 年代に始まった青函トンネル調査坑工事で初めてトンネルの地山を支保する目的に使用されたとされている。また，吹付け工法が補修・補強に適用されたのは 1979 年 7 月に東名自動車道路日本坂トンネルの下り線で発生した火災事故の復旧対策工事であるといわれている。その後 1980 年代後半になり橋梁などでかぶりコンクリートのひび割れや剥落が顕在化するようになり，その修復工法の 1 つとして補修・補強用吹付けコンクリートは独自の進化を遂げ，大断面修復工法や，過荷重に対応する補強用のコンクリートの厚増し工法に対応できるまで発展を遂げてきている[1]。

吹付け工法は，モルタルミキサーなどで混合した補修材料をポンプで吹付けホース先まで圧送し，圧縮空気を利用して吹付ける湿式吹付け工法と粉体材料と混練水をそれぞれ圧

縮空気、ポンプで送りホース先で瞬時に混合し吹付ける乾式吹付け工法に大別される。表－1.1.1には、これらの施工面からの一般的な比較を示す。

表－1.1.1 湿式・乾式吹付け工法の施工面での比較

	湿式吹付け工法	乾式吹付け工法
配合管理	現場プラントで混合するため、水量の管理が容易	別系統で送られた材料をノズル先端で混合するため、水量の管理がノズルマン技量に影響される
圧送距離	50m 以下	300m 以下
施工能力	0.5～1.0m ³ /h 程度	1.0～1.5m ³ /h 程度
吹付け厚さ	最大 30mm 程度	最大 150mm 程度
リバウンド	少ない	一般的に多い
施工後の掃除	圧送ホース内の材料を全て排出した後、ホース内の水洗い必要	圧送ホース内の材料は圧縮空気ですぐに排出可能、水洗い不要

1.2 湿式吹付け工法の概要

土木分野における湿式吹付け工法は、左官工法の施工性向上を目的として、数十年前から使用されている。左官工法では、補修材料を施工個所で運搬し混合する場合や混合した補修材料を施工個所まで運搬する作業工程が必要であり、作業スペースの狭い箇所や混合場所から離れた箇所の施工では時間を有するとともに、作業員が人力で補修材料を塗布する必要性があった。一方で、湿式吹付け工法では、施工個所からある一定距離離れた箇所に材料混合プラントを設置し、圧送ポンプを使用して施工個所まで材料を供給することが可能であるため、左官工法と比較するとはるかに施工能力が向上した。

湿式吹付け工法とは、使用するコンクリートやモルタルを所定の練混ぜ配合により、現場に設置されたミキサーで練混ぜる。その後、練混ぜられた材料をホッパー内に投入し、圧送ポンプにより、ノズル先まで圧送する。この圧送された材料は、ノズル先に送られた圧縮空気により、所定の補修個所に吹付け塗布される。吹付け完了後は、金コテ等を用いて適宜表面の仕上げを行う工法である。図－1.2.1には、湿式吹付け工法の一般的な施工システムの概念図を示す。

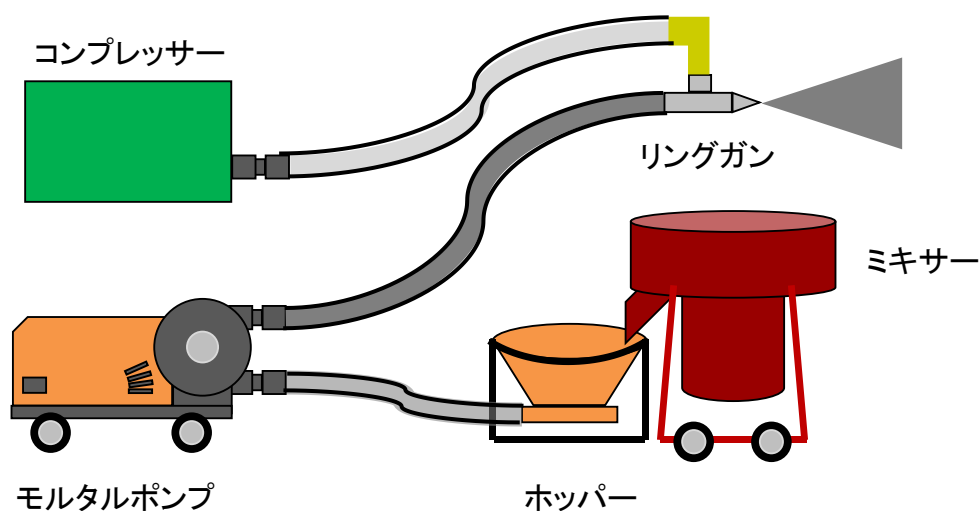
現在、コンクリート構造物の断面修復工事などの補修工事では、予め工場でセメント成分、骨材および混和材（粉末ポリマー、繊維など）をプレミックスした材料に、水やポリマーエマルジョンを添加するタイプの補修モルタルを使用することが一般的となっている。そこで、これらプレミックス材料を混練りするためにパン型ミキサーや特殊モルタルミキサーなどが使用される。特に、特殊モルタルミキサーは、パン型ミキサーと比較して、短時間で十分な混練りを可能であることから、使用される頻度が多くなっている。

なお、これらプレミックス材料を使用する場合は、使用材料メーカーによる施工要領書などを参照することが好ましい。

圧送ポンプは、スクイズポンプやスネークポンプが一般的である。スクイズポンプでは、脈動を持った材料が圧送されるが、スネークポンプはスクリューを用いて連続的に材料を送りだすため、圧送された材料に脈動が生じないという特徴がある。

吹付けノズル先の主流は、スプレーガンやリングガンであり、スプレーガンは、ガン内での圧縮空気の吹き込み口が一つであるのに対し、リングガンは、リング状に吹き込み口を持つ特徴がある。湿式材料の吹付けで最も重要となることは、ノズル（ガン）先端から排出される吹付け材料がミスト（霧）状になっていることである。

湿式吹付け工法では、先に記載したようにミキサーを用いて所定の混練配合により材料を混合するため、使用材料数量（粉体や水など）の管理が容易である。一方で、混練された材料は、粘性を持つため、圧送距離に制限があり、最大でも 50m 程度と言われている。また、一回の吹付け厚さは、10～30mm 程度であり、施工厚さが大きい補修では、数回の吹付けが必要とされる。



図－1.2.1 湿式吹付け工法の施工システムの概念図

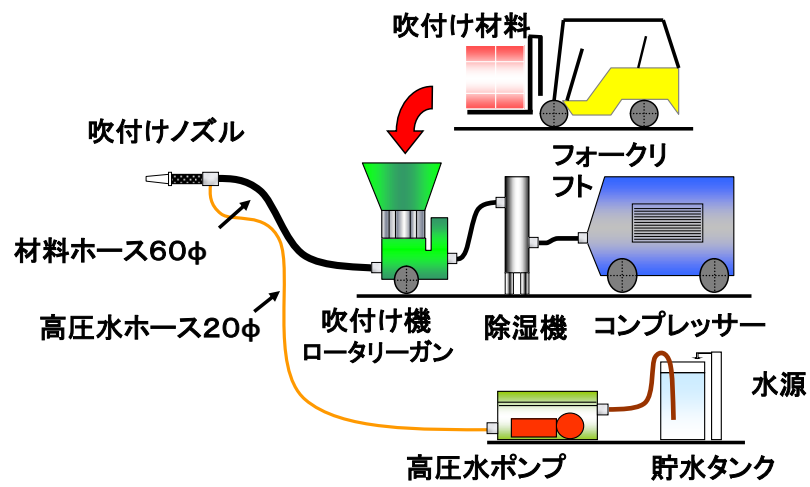
1.3 乾式吹付け工法の概要

乾式吹付け工法が、いつ頃から我国で用いられていたかは定かではないが、一説には百年前に東京駅の外壁工事の一部で使用されたとの話がある。明らかな実施は、昭和 30 年代に入り川崎市、四日市市、岩国市、新居浜市の 4 箇所に石油コンビナート建の設が決定し、欧米からの技術導入が開始され、その技術の中に耐火材を乾式吹付けする仕様があり、耐火物施工業者の中で使用されるようになった。

我国における乾式吹付け工法の使用は、耐火材の施工が多く、製鉄所（高炉、電気炉）、石油精製プラント、都市ゴミ焼却プラントなど日本経済や日常生活に重要な施設であり、建築施設での使用が主流である。

乾式吹付け工法とは、圧縮空気で粉体材料（プレミックスモルタルやセメント粉体など）を、ポンプで練混ぜ水（水単体、エマルジョン水など）を、それぞれ吹付けノズル先端まで圧送し、ノズル先端の直前で材料と練混ぜ水が混合され、吹付け箇所に混練材料を吹付ける方法である。図-1.3.1 に示すように、乾式吹付け工法では、粉体材料を供給する吹付け機、圧縮空気を供給するコンプレッサー、練り混ぜ水を供給する高圧ポンプおよび材料を混合するノズルが吹付け装置として組み合わされる。この工法の最大特徴は、長距離圧送（300m 以下）が可能であること、および吹付けられる材料の 1 回の施工厚さが 150mm 程度までと大きいことである。つまり、実現場では、材料供給プラントとして吹付け機、コンプレッサー、水ポンプおよび貯水タンクは、施工箇所から離れた場所に固定し、吹付けホースのみを施工個所に移動することで補修作業を行えるため、湿式工法と比較して材料供給プラントをこまめに移動する作業手間を省くことが可能であり、1 回の吹付け厚さが大きいため、大断面修復に威力を発揮することが出来る。さらに、乾式吹付け工法は、上述したように製造プラントの煙突などで使用される頻度が高く、垂直に材料を供給することを得意とすることなどから、近年では、土木構造物への適用が進んでいる。

一方で、粉体材料と混練水の混合がノズル部であること、および混練水の調整は施工者であるノズルマンに依存することが多いため、混合された材料の配合（水セメント比）が不明確であり、施工管理が難しいという問題点が残されている。本報告書では、この問題点を解決することをテーマとし、以降の章では、施工管理・品質管理に向けた種々検討および提案を行った。



図－1.3.1 乾式吹付け工法の施工システムの概念図

<参考文献>

- 【1】湯地輝：材料と機器の適合性を考慮した乾式吹付けコンクリートの品質管理手法に関する基礎的研究，博士学位論文，2014年3月

第2章 乾式吹付け工法

2.1 乾式吹付けシステム

一般的な乾式吹付けシステムは、乾式吹付け機、圧送ホース（マテリアルホース）、コンプレッサー、水ポンプ、貯水タンクおよび吹付けノズル（ガンと呼ばれる）を組み合わせることで適用される。これらを選定するためには、使用材料との相性を考慮して決定する必要がある。1.3 節にも示したように、乾式吹付け工法の課題として、施工管理が難しい点が挙げられるが、同時に湿式吹付け工法と比較して粉塵やリバウンドロスが多いことも従来指摘されてきた点である。これらの原因と対策を表－2.1.1 に示す。

表－2.1.1 粉塵・リバウンドロスの原因と対策

	原因	考えられる対策
1	吹付け機械と使用材料のアンバランスによる粉体材量の不安定な供給	・連続して粉体材料を供給可能な吹付け機であること。 ・粉体材料がマテリアルホース内で分離しない配合であること。
2	混合水（水やエマルジョン水等）の不安定な供給	・混合水を連続的に安定供給できる高圧ポンプを選定すること
3	ノズル先端での不十分な攪拌による吹付け材料の混練性の低下	・粉体と混合水の接触時間を長くすること。 ・粉体と混合水をノズル内で強制的に衝突・攪拌させ混合性を高めること。
4	未熟なノズルマンによる水量調整から生じる吹付け材料の水量のばらつき	・講習会などを利用したノズルマンの育成 ・ノズルマンの水量調整に頼らない吹付けシステムの構築

現在では、これら課題に対しては吹付けシステムの観点から開発・改良が行われている。本節では、現在使用されている各機材に関して、代表的なものを例にして解説することとした。

2.1.1 吹付け機

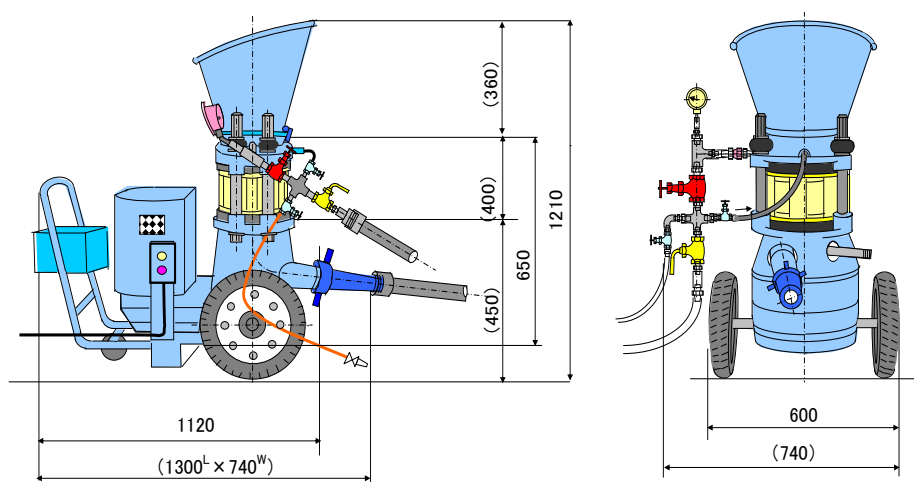
乾式吹付け機は、粉体材料を供給する重要な役目を持つ機材であり、バッチ式と連続式に大別される。

バッチ式とは、セメントガン、ロテクターなどタンク内に一定量の材料を投入しタンク内に圧力をかけタンク底部のロータリーバルブで材料を切り出しマテリアルホースへ供給する方式で、タンク内の材料を使い切ったら内圧を減圧して材料を再供給する方法である。

本形式の問題点は、タンク内の残量が不明確で、判断し難く、減圧のタイミングを計るなど熟練作業を有することが必要となる。

連続式には、ロータリーガン、リードガン、アリバなどそれぞれ特徴をもった機器が存在する。これら連続式に共通する方法は、通称ローターと呼ばれる筒状や皿状の連続した回転体で使用材料をマテリアルホースに供給することである。連続式は、バッチ式と比較して機械操作は比較的簡単で、施工時間中連続して材料を供給することが可能である。但し、機械調整が不十分な場合、機械廻りに粉塵が発生するなどの不具合が生じる可能性があるため、特にローター周りの点検整備を重要視する必要がある。

ここでは、一例として、**図－2.1.1**および**写真－2.1.1**に示すロータリーガンと呼ばれる供給装置であり、比較的コンパクトに設計された機器であるため、実現場でのハンドリングが良い。具体的にロータリーガンとは、**図－2.1.2**および**写真－2.1.1**に示すように定速回転している円筒形の筒(ローター)内に粉体材料が充填供給され、排出口よりマテリアルホース内に供給された粉体材料がコンプレッサーから送られた圧縮空気により、先端ノズル部まで勢いよく搬送される。粉体材料の種類や圧送距離により、ローターの回転数で施工量(圧送量)を調整・管理することが可能であり、圧縮空気圧と量で圧送スピードを調整・管理することが可能である。使用する材料の特性により、施工前に予め調整しておくことが重要とされる。なお、現在では、ローター形状に関して使用材料や圧送量などにより、各種改良・開発されている。



図－2.1.1 ロータリーガンの概要図



b) ロータリーガン

a) ロータの一例

写真-2.1.1 ロータリーガンとローターの全景

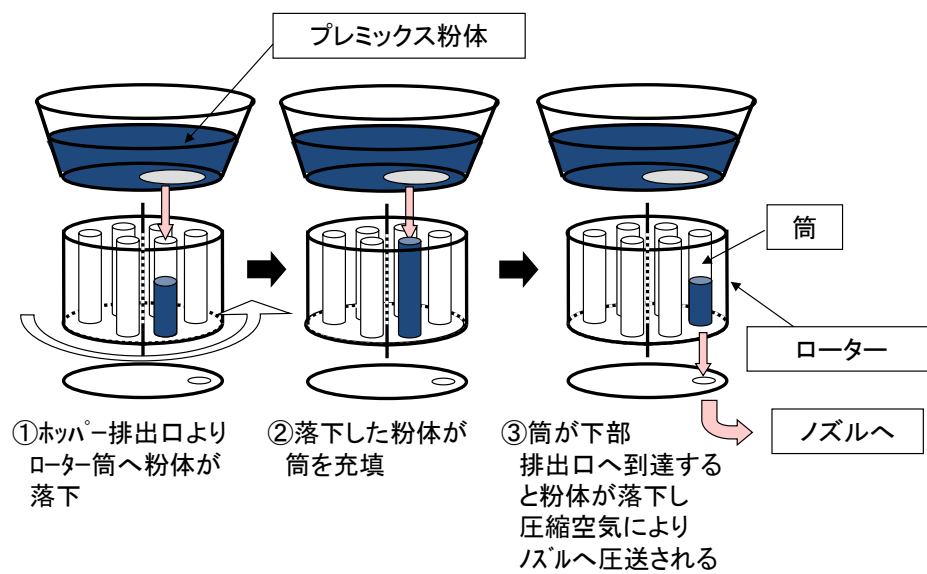


図-2.1.3 ロータリーガンの概念図

2.1.2 コンプレッサー

乾式吹付け工法では、ロータリーガンに供給された粉体材料を圧縮空気でノズル先端まで圧送する手段としてコンプレッサーが用いられる。圧送する際、粉体材料が湿気ることを避けるため、ドライタイプやアフタークーラー付コンプレッサーが使用されることが多い。一般的に、コンプレッサーの容量は、75馬力以上が必要とされる。写真-2.1.2には、75馬力以上のコンプレッサーの一例を示す。表-2.1.2は、一般的なエンジンコンプレッサーの諸元を示す。



写真-2.1.2 コンプレッサーの一例

表-2.1.2 一般的なエンジンコンプレッサーの諸元

型 式			75HP	110HP	190HP
コ ン プ レ ッ サ ー	吐出圧力	MPa(kgf/cm ²)	0.69(7.0)	0.69(7.0)	0.69(7.0)
	吐出空気量	(m ³ /min)	7.5	11.0	18.5
	吐出温度	(°C)	50~60	50~60	50~60
	潤滑油量	(ℓ)	33	50	97
	空気槽容量	(m ³)	0.069	0.098	0.19
	エアーコックサイズ数量	(サイズ×数量)	20A×4 50A×1	20A×4 50A×1	20A×2 50A×1
機 関	型式		直噴式過給器付	直噴式過給器付	直噴式過給器付
	定格出力	kw(PS)/min ⁻¹	61.2(83)/2500	84.4(115)/2200	118.6(161)/2000
	使用燃料		軽油	軽油	軽油
	燃料タンク容量	(ℓ)	115	180	294
	エンジンオイル量	(ℓ)	11	15	20.5
	バッテリー種類・数	(個)	95D31×1個	80D26R×2個	130F51×2個
寸 法 ・ 質 量	全長 L	(mm)	2400	3065	3690
	全幅 W	(mm)	1570	1415	1680
	全高 H	(mm)	1650	1870	2120
	質量(運転整備)	(kg)	1310(1450)	1900(2110)	2920(32900)

2.1.3 発電機

乾式吹付け工法に用いるロータリーガンや高圧ポンプは200Vの電源が必要である。したがって、3相200Vの電源が必要であり、施工現場では、発電機が使用されることが多い。

写真－2.1.3、表－2.1.3には、それぞれ一般的な発電機とエンジン発電機の諸元を示す。



写真－2.1.3 一般的な発電機の一例

表－2.1.3 一般的なエンジン発電機の諸元

型 式				25KVA		45KVA		60KVA	
発 電 機	周波数		Hz	50	60	50	60	50	60
	三相4線式	出力	KVA	20	25	37	45	50	60
		電圧	V	200	220	200	220	200	220
		電流	A	57.7	65.6	107	118	144	157
	単相 補助出力	出力	KVA	6.0	6.6	12.0	13.2	15.0	16.5
		電圧	V	100	110	100	110	100	110
		専用端子	KVA	6×1セット	6.6×1セット	6×2セット	6.6×2セット	7.5×2セット	8.25×2セット
		コンセント	KVA	1.5×4口	1.65×4口	1.5×4口	1.65×4口	1.5×4口	1.65×4口
	励磁方式			ブラシレス					
	極数		P	4					
力率			三相0.8(遅れ) 単相1.0						
機 関	型式			4気筒渦流室式		4気筒直噴式過給器付		4気筒直噴式過給器冷却器付	
	総排気量		ℓ	2.434		3.769		2.999	
	定格出力		KW	19.1	23.7	38.0	45.6	51.6	61.0
	定格回転速度		min ⁻¹	1500	1800	1500	1800	1500	1800
	使用燃料			軽油					
	燃料タンク容量		(ℓ)	145		325		400	
	エンジンオイル量		(ℓ)	11		15		20.5	
	バッテリー種類・数		(個)		95D31×1個		80D26R×2個		130F51×2個
寸 法 ・ 質 量	全長 L		(mm)		2400		3065		3690
	全幅 W		(mm)		1570		1415		1680
	全高 H		(mm)		1650		1870		2120
	質量(運転整備)		(kg)		1310(1450)		1900(2110)		2920(32900)

2.1.4 水ポンプ

乾式吹付け工法では、混合水の供給のため、高圧ポンプを用いる。これらポンプは、その種類により、混合水量の安定性に影響を受けるため、供給する混合水量と安定性を十分考慮することが必要である。ポンプの種類には、渦巻き式、ギア式、ピストン式（プランジャー式）、ダイヤフラム式、スネーク式などがあるため、それらの特徴を下記に示す。

渦巻き式やギア式は高圧で送ることが構造上困難であり、ピストン式は高圧供給に適しているが脈動が大きく定量性にやや劣る特徴がある。写真－2.1.3 には、プランジャーポンプの一例を示す。



写真－2.1.3 プランジャーポンプの一例

ダイヤフラム式は、隔膜式であり、インバーターによる回転数の制御が可能であるため、混合水量の調整が可能であるとともに、エマルションなどの粘性液体にも対応可能である。空運転が可能であるため、使用後少量の洗いでホース内の清掃が可能である。写真－2.1.4 には、ダイヤフラム式の一例を示す。



写真－2.1.4 ダイヤフラム式の一例

スネーク式は、一軸偏芯ネジ式で脈動がなく、定量性に優れるとともに、高粘度スラリーにも対応することが可能である。一方で、コストが他形式のポンプと比較すると非常に高くなる欠点がある。写真－2.1.5 には、スネーク式の一例を示す。



写真－2.1.5 スネーク式の一例

乾式吹き付け工法に用いる水ポンプは、これらの特徴を考慮し選定することが重要となる。

本委員会では、プランジャーポンプ、ダイヤフラムポンプおよびスネークポンプに関して、その安定性評価のため、試験を実施し第3章 3.2.3 にその結果を示している。

2.1.5 吹付けノズル

乾式吹付け工法のミキサー部分であるノズルは、ノズル長さを長くしたものやノズル内部形状を工夫することで、ノズル長さを短く保持し、施工のハンドリングをよくしたものなどが提案されている。これら、ノズル形状は、吹付けられる材料と吹付け機との整合が必要であるため、吹付け材料の種類によって選定が必要である。

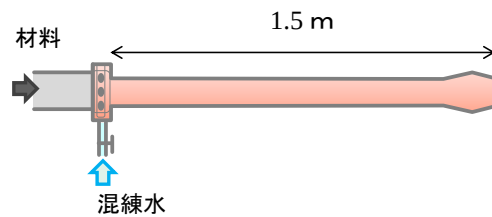


写真-2.1.6 長いノズルの一例

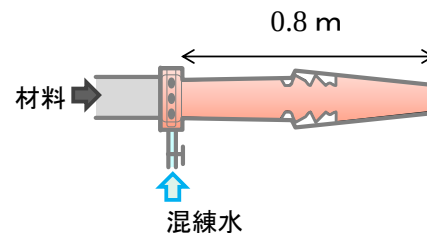


写真-2.1.7 ノズル内部構造を工夫した一例

2.2 乾式吹付け工法用材料の性能

2.2.1 公的機関の要求性能の一例

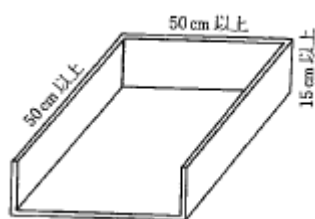
コンクリート構造物に対する塩害、中性化、凍害などの各種劣化補修対策として使用される補修材料は、劣化因子の遮蔽効果、母材コンクリートとの付着性能、収縮ひび割れに対する長さ変化率など種々の性能を有する必要がある。そこで、現在では、各機関により補修材料としての要求性能が規定されている。ここでは、その代表的な要求性能が示された東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本道路株式会社が発刊する「構造物施工管理要領」に示される「吹付け工法による断面修復の性能照査項目」[1]の試験内容を紹介する。表－2.2.1 には、性能照査項目と判定基準の一覧[1]の抜粋を示す。

表－2.2.1 性能照査項目と判定基準（構造物施工要領抜粋[1]）

要求性能	試験項目	基準値	試験方法
断面の修復に要する性能	ひび割れ抵抗性	幅 0.05mm 以上のひび割れが発生しないこと	試験法 432
	コンクリートとの付着性	コンクリートと断面修復材との付着強度は、 1.5N/mm^2 以上であること	
	鉄筋背面への充填性	有害な空隙がないこと	
	寸法安定性	0.05% 以下	
	熱膨張性	断面修復材の熱膨張係数は $2.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 以下であること	
耐久性能に関わる性能※1	中性化抵抗性	補修設計で定めた中性化速度係数と同等	
	凍結融解抵抗性	負荷後の相対動弾性係数が 60% 以上かつ負荷後のコンクリートと断面修復材との付着強度は 1.5N/mm^2 以上	
	遮塩性	補修設計で定めた塩化物イオンの拡散係数と同等	
力学的性能	圧縮強度	補修設計で定めた設計基準強度以上	試験法 432
	静弾性係数	補修設計で定めた値と同等	

※1 この項目については、環境条件等を勘案の上、必ずしも基準値を満足する必要がないものと判断される場合には、参考値として取り扱うことができるものとし、コンクリート塗装工を併用する場合は耐久性に関わる性能はコンクリート塗装工を加味して確認するものとする。

乾式吹付け工法では、圧縮強度試験用供試体を採取する方法として、土木学会コンクリート標準示方書に規定される JSCE-F 561-2005「吹付けコンクリート(モルタル)の圧縮強度試験用供試体の作り方」[2]による方法が一般的に用いられる。この方法は、図－2.2.1 に示すパネル型枠内に吹付け材料を直接吹付けた後、コア採取により得られたものを圧縮強度供試体とする方法である。この方法の特徴は、はね返った骨材が供試体内に溜まらないよう型枠の一边を開放することである。本試験方法では、型枠の大きさを使用用途ごとに最小寸法が示されており、補修・補強用途の場合、幅 300×長さ 300×厚さ 150mm の型枠(表－2.2.2 参照)が必要となる。しかしながら、実施工現場において、本方法による圧縮強度試験用供試体の採取は、型枠が大きいことやコア採取が必要であり、手間と労力が大きいという問題も指摘されている。



図－2.2.1 JSCE-F 561-2005 規定の型枠の概要[2]

表－2.2.2 JSCE-F 561-2005 規定の型枠最小寸法[2]

用 途	a	b	c
トンネル	500	500	150
のり面	300	300	200 (4)
補修・補強	300	300	150

2.2.2 乾式吹付け材料の品質に与える要因

一般的に、乾式吹付け工法では、工場でプレミックスされた粉体材料と混練水(エマルションの場合もある)がノズル先で瞬時に混合される。そこで、図-2.2.2 には、乾式吹付け工法における通常のコンクリートの計量から打設までの工程を比較した模式図を示した。コンクリートにおける材料の計量は、材料の圧送量であり、乾式吹付け工法で吹付機から空気圧送される量に規定されるとともに、ノズル先にポンプ圧送される練混ぜ水の量となる。つまり、これらの安定性が均一なモルタルの製造のカギとなる。また、コンクリートミキサーの代替がノズルの形状や内部構造であり、混合性を左右するものである。最後に、コンクリート打設は、ノズルから噴き出され対象構造物へ吹付けられる工程であり、ノズル先と対象構造物の施工距離が重要なポイントとなる。

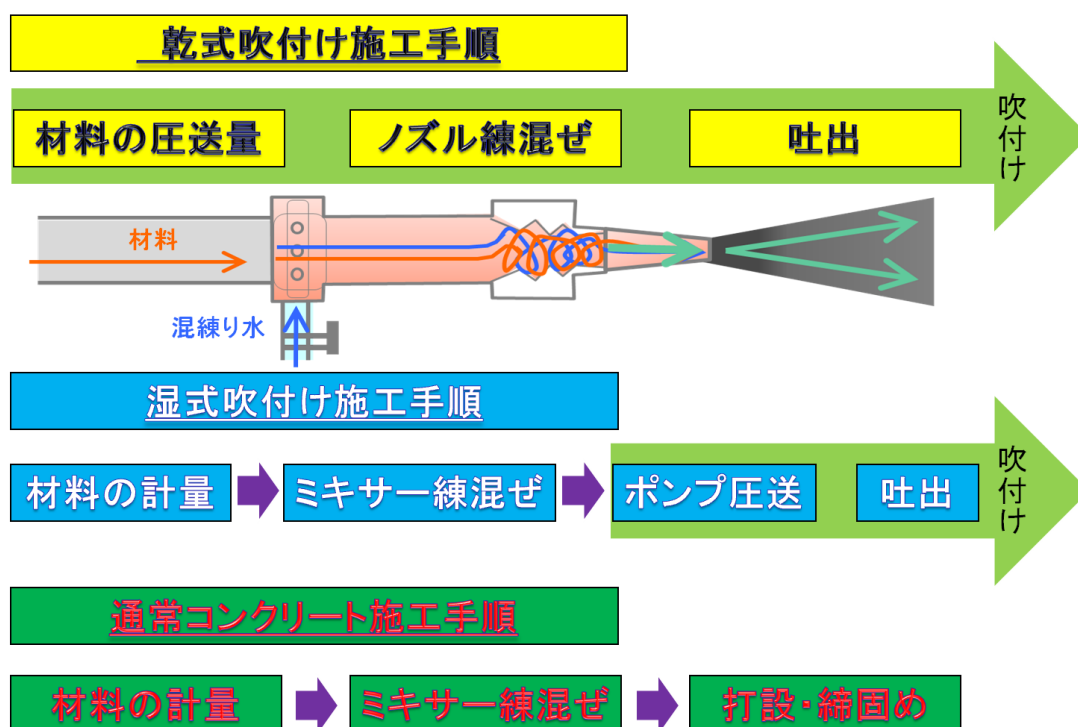
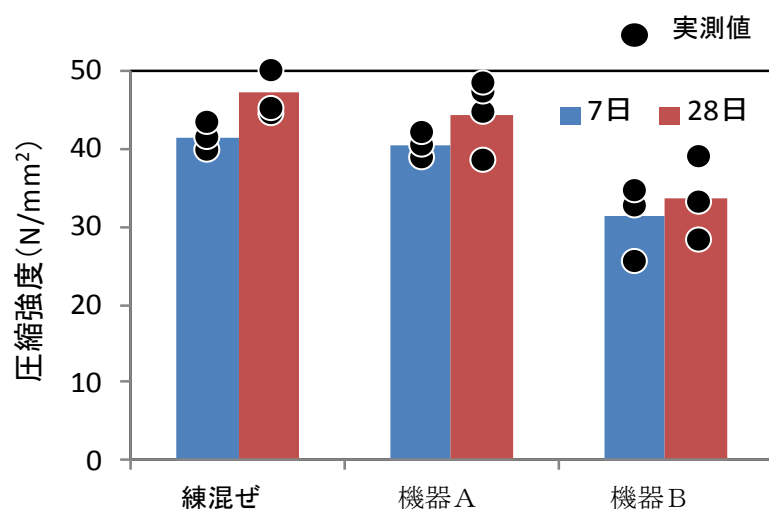


図-2.2.2 乾式吹付け工法の施工とコンクリート施工の比較概念図

また、図-2.2.3 には、同一材料を用いミキサーで混合した場合と2種類の吹付け装置を用いて採取した場合の圧縮強度を示している。この結果から特に、機器Bを用いた場合の圧縮強度は、ミキサーで混合した場合と比較して、大きく圧縮強度が低下する結果となった。この原因として、粉体材料量あるいは混合水量の変動、使用機器と使用材料のマッチングや使用機器の性能に起因することなどが考えられたため、以下の項目に関して、試験した結果を示す。

- (1) 水量と粉体量の変動が圧縮強度に与える影響
- (2) ノズル形状の違いが圧縮強度と材料の混合性に与える影響
- (3) ノズル先端と対象構造物との吹付け距離が圧縮強度に与える影響



図－2. 2. 3 圧縮強度試験結果の一例

これらの影響を確認するための試験では、市販のプレミックス品を吹付け材料として用いた。用いたプレミックス品は、セメント、細骨材、混和材が工場であらかじめプレミックスされており、粉体密度は 2.75g/cm^3 である。また、混合水は、アクリル系のポリマーエマルションを用い結合材とポリマーエマルションの比 $W/B = 31\%$ (W :ポリマーエマルション, B :結合材とする)が標準混合配合であるものとした。

(1) 水量と粉体量の変動が圧縮強度に与える影響

本試験では、吹付けによる粉体材料量と混練水量が変動した場合に圧縮強度に及ぼす影響を検討するため、標準配合をベースとして粉体材料量のみを変動させた場合と混練水量のみを変動させ、モルタルミキサーを用いて評価した。

試験に用いたモルタルミキサーは、写真－2. 2. 1 に示すものであり、寸法 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱供試体にモルタルを詰め込み、テーブルバイブレーターを用いて振動締め固め[3]を行った。



a) モルタルミキサー

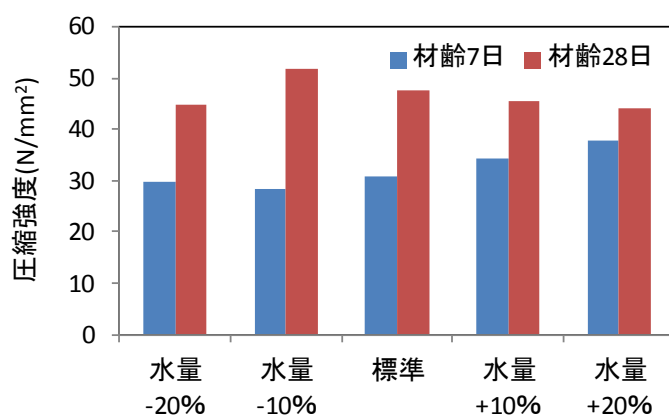


b) テーブルバイブレーター

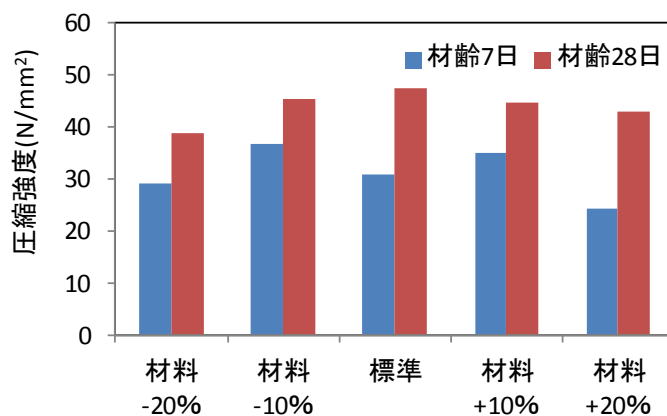
写真－2. 2. 1 使用機器

材料の練混ぜでは、標準配合の混練水量と粉体材料をそれぞれ単独で 10%および 20%増減させ、材齢 7、28 日間養生した後に圧縮強度を測定した。

図－2.2.4 および図－2.2.5 には、それぞれ水量のみを変化させた場合と粉体材料のみを変化させた場合の材齢 7 日と 28 日の圧縮強度結果を示している。粉体材料量(標準量)を一定として混練水量のみを減少させた場合、材齢 28 日の圧縮強度は、標準配合と比較して-10%で 1 割程度増加し、-20%で同等であった。通常、水量を低減させることにより圧縮強度は大きくなることが考えられるが、-20%まで低下させた場合、練り上がり材料の供試体型枠への詰め込み等の影響により、強度増加につながらなかった可能性がある。一方で、水量を増加させるほど強度低下がみられたが、+20%の増加でも約 1 割程度の低下に留められており、粉体材料量が一定であれば大きな強度低下はないものと考えられた。また、混練水量を一定(標準量)として、粉体材料量のみ変動させた場合、粉体材料の変動が±20%と大きい場合、強度低下が顕著に確認されるが、±10%では大きな強度低下は確認されなかった。したがって、今回用いたプレミックス材料は十分に混合された場合、±10%程度の材料変動による圧縮強度への影響は小さいものと考えられる。したがって、図－2.2.3 に示した実際の吹付けと試験室内のミキサーで採取した供試体の圧縮強度の差は、材料量の変動よりもその他の吹付け条件に起因する部分大きいことが示唆された。



図－2.2.4 粉体量一定で混練水量を増減



図－2.2.5 混合水量一定で粉体材料量を増減

(2) ノズル形状の違いが圧縮強度と材料の混合性に与える影響

本試験では、図-2.2.6に示す3種類のノズルを用いて JSCE-F 561-2005 (2.2.1 項参照) に準拠して圧縮強度試験体を作成し、材齢 28 日の圧縮試験を行った。なお、吹付け距離は約 1m とした。

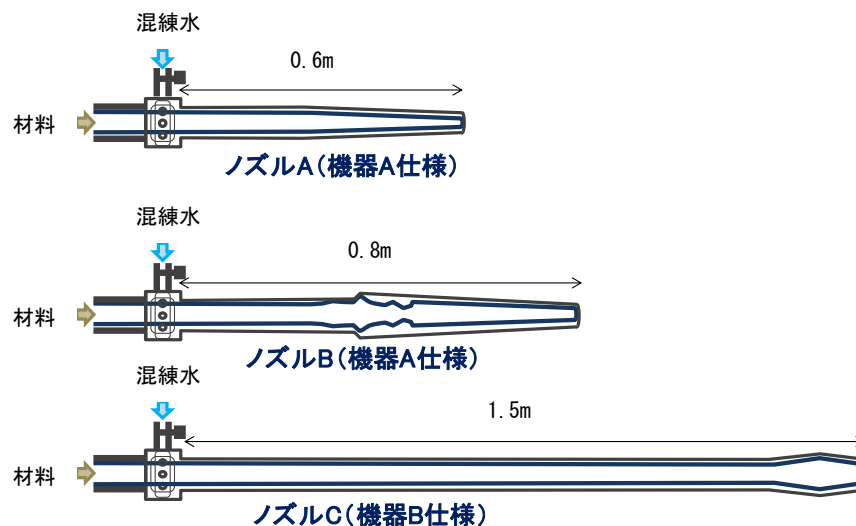


図-2.2.6 試験に使用したノズルタイプの概要

ノズル A および B は、吹付け機 A を用い、ノズル C は吹付け機 B を用いて試験を行った。その結果、ノズル B を用いた場合、ばらつきは多少あるが平均値は試験室練混ぜ供試体と同程度であることが確認された。一方で、ノズル A および C では試験室練混ぜ供試体と比較して、圧縮強度の低下が顕著に確認された。この原因として、ノズル形状の違いによる吹付けられた材料の空隙の生成量の影響が考えられたため、ノズル形状ごとに水銀圧入法を用いて細孔径空隙量を測定した。図-2.2.7 には、ノズル形状後との総細孔量を示す。この結果から、吹付けられた材料は、試験室で練混ぜられた場合と比較して細孔量が大きくなる傾向が示された。一方で、試験室練混ぜ供試体と同程度の圧縮強度を示したノズル B は、ノズル A の細孔量と比較して大きいことも確認された。

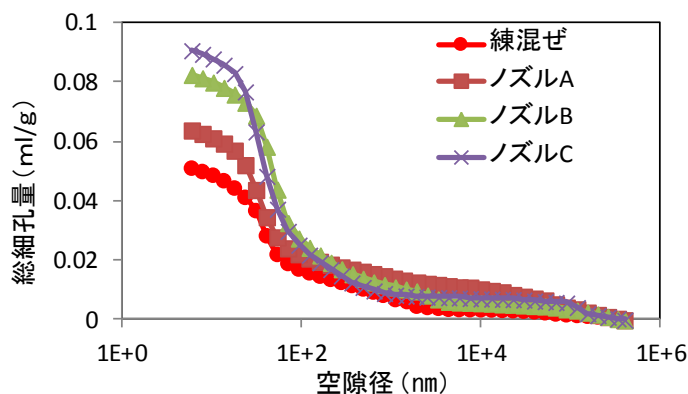


図-2.2.7 ノズル形状ごとの総細孔量

そこで、図-2.2.8 には、細孔径の分布を示す。その結果、ノズル B では、総細孔量は多いものの、 μm レベルの細孔が多く、 mm あるいは μm レベルの細孔は少ないことが確認された。したがって、ノズル A および C を使用した場合の圧縮強度の低下は、 mm レベルや μm レベルの細孔が多くあることに起因するものと考えられた。

これら結果から、粉体材料と混合水により使用するノズル形状が圧縮強度に影響を及ぼすことが示された。この原因の一つとして、ノズル内での混合性が考えられる。そこで、ノズル内部での混合状態として粉体材料と混合水の挙動を可視化するために、個別要素法を用いた解析数値解析を試みた。

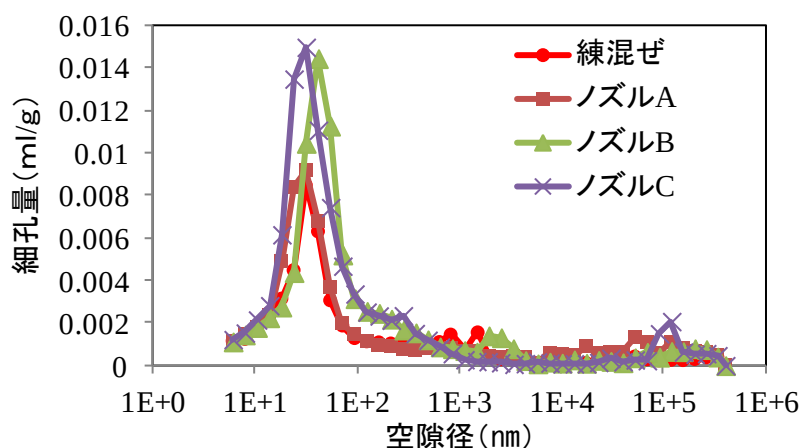
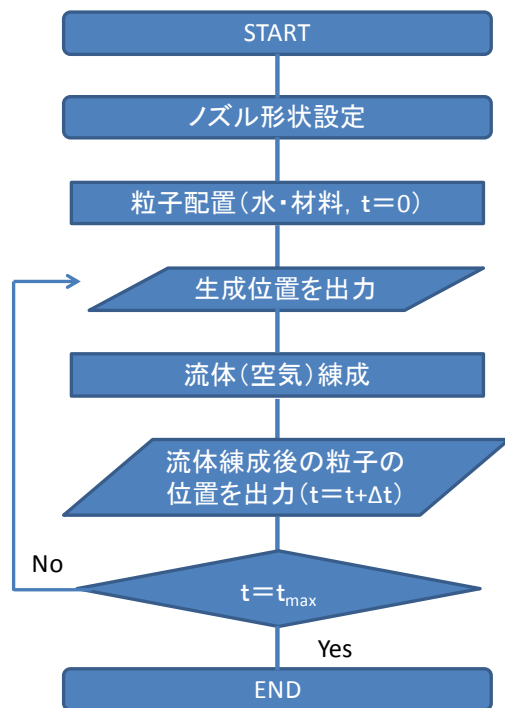


図-2.2.8 ノズル形状ごとの細孔径分布

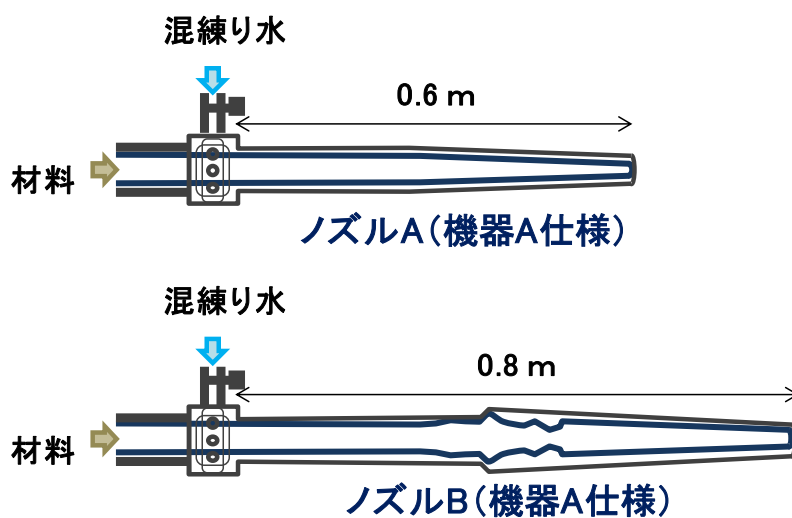
＜個別要素法の概要＞

解析では、3次元個別要素法と流体力学を組み合わせた数値解析を用いた。なお、本検討で用いた3次元DEMコードは、Itasca社が開発した3D Particle Flow Code (PFC3D, Itasca 2008)¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾および、伊藤忠テクノソリューションズ(株)製の熱流体解析ソフトウェア

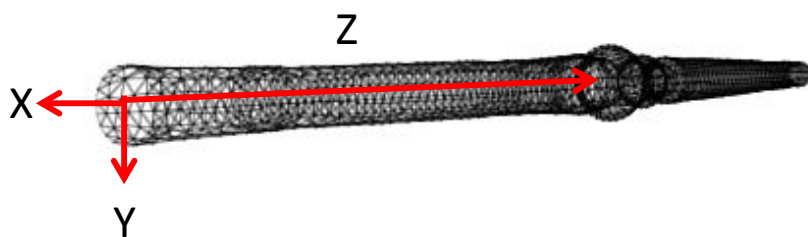
「FINAS/CFD」を用いたCCFD(Coupled Computational Fluid Dynamics)⁷⁾⁸⁾である。解析のフローチャートを図-2.2.9に示す。解析モデルとして使用したノズルの形状を図-2.2.10、座標の方向を図-2.2.11に示す。解析モデルは、筒状のノズルであるノズルAと吐出直前にノズル形状を変化させたタイプのノズルBの2種類を用いた。粒子のモデルは、水と乾式吹付け材（プレミックス粉体）の2種類とした。粒子の配置位置を図-2.2.12に示す。ノズル入口にいて、ノズル外側に水、内側にプレミックス粉体の粒子をランダム発生させた後に空気を流体として流すことにより、ノズル形状の違いによる混合効果を評価した。各パラメータを表-2.2.3、表-2.2.4に示す。なお、本検討では簡易的なモデルとして、粒径は水、プレミックス粉体ともに1mmの単一粒径とし、水およびプレミックス粉体の密度をそれぞれ $1\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $2.75\text{mg}/\text{cm}^3$ と変化させた。



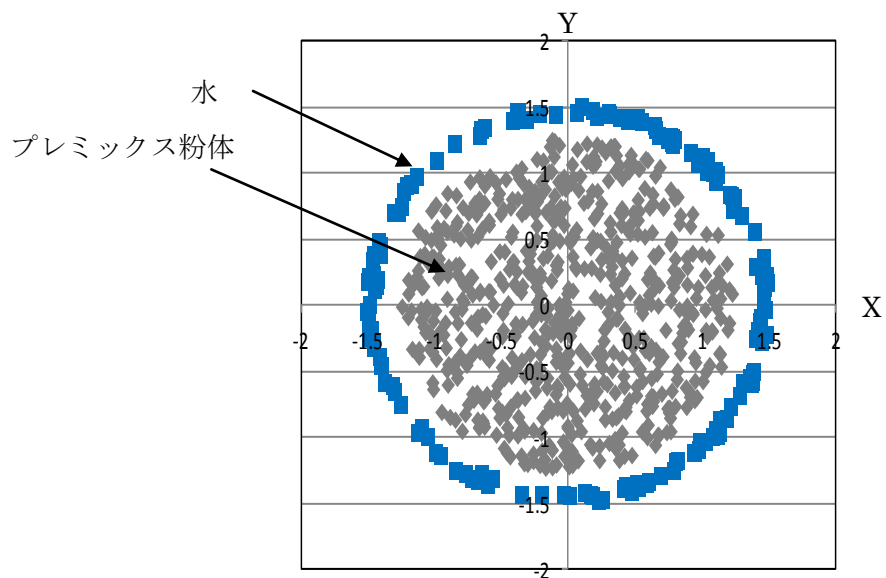
図－2. 2. 9 個別要素法の解析フロー



図－2. 2. 10 解析に用いたノズル形状



図－2. 2. 11 解析時の座標方向



図－2. 2. 12 各粒子の生成位置 (X-Y 断面)

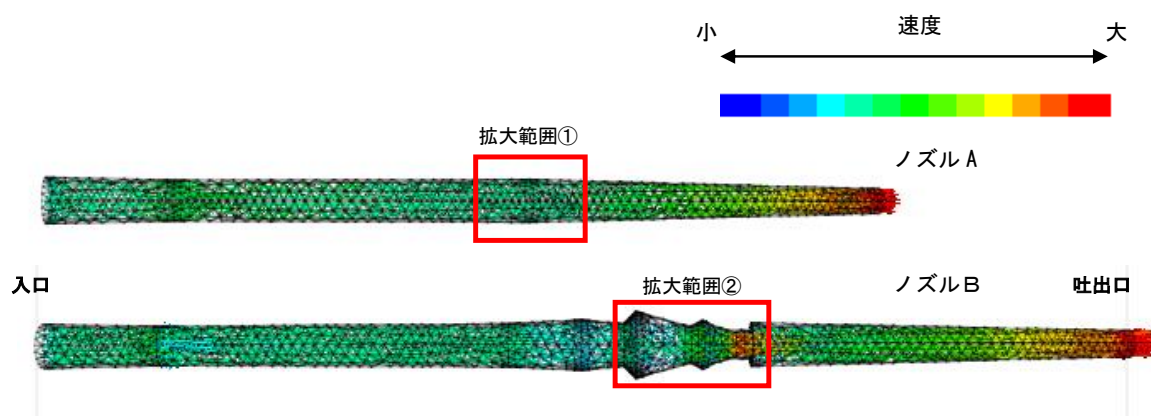
表－2. 2. 3 個別要素法のパラメータ

粒径	1mm
密度(水)	1g/cm ³
密度(材料)	2.75g/cm ³
バネ定数	1.00E+08
初速	0
減衰定数	0
ノズル直径	39mm(材料入口),22mm(吐出口)

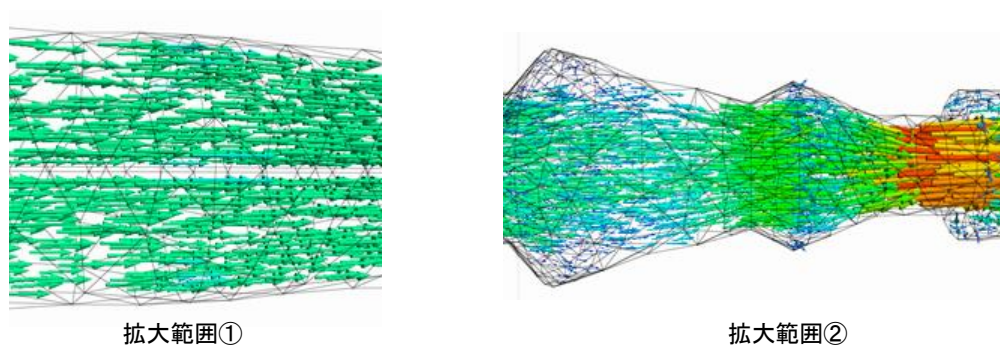
表－2. 2. 3 圧縮空気としての流体パラメータ

流速	0.05m ³ /s
密度	0.001189g/cm ³
粘性	1.86e-5Pa・s

まず、ノズル内に圧縮空気である流速のみを与えた場合のノズル内における流速の変化を検証した。図－2.2.13 および図－2.2.14 には、それぞれ流速のみを与えた場合の各ノズル全体における速度分布と各ノズルにおいて流速変化が著しい箇所の拡大図を示す。筒状形状のノズル A は、速度ベクトルが Z 方向に分布しているのに対し、内部形状を変化させたノズル B では、形状を変化させた部分で速度ベクトルが多方向に分散することおよび速度の分布に差があることが確認できた。したがって、ノズル形状を工夫することにより、各材料粒子を多方向に移動させ、混合効率の向上を期待することが出来るものと考えられる。



図－2.2.13 各ノズル形状における速度分布



図－2.2.14 各ノズル形状における速度分布
(拡大図)

図-2.2.15 には、粒子の生成範囲および解析後のデータの出力位置を示す。出力データは、図-2.2.16 に示すように、ノズルの断面を放射線状に 8 分割および同心円状に 6 分割し、各範囲内の粒子数を求めた。

ノズル A の解析結果を図-2.2.17、ノズル B の解析結果を図-2.2.18 に示す。6 分割(同心円状)でみた場合には、いずれのノズルでもノズル断面の中央部に材料および水の粒子が確認され、断面の外側に各粒子は殆ど確認されなかつた。一方、ノズル断面を 8 分割した結果、ノズル A では、重力の影響受け、粒子がノズル断面の下部に集中した。これは「吹付け」時のダレが起きる原因と考えられる。しかし、ノズル B では、上下左右位置でほぼ均一に分布されているため、ノズル内での混合性に優れることが示唆された。

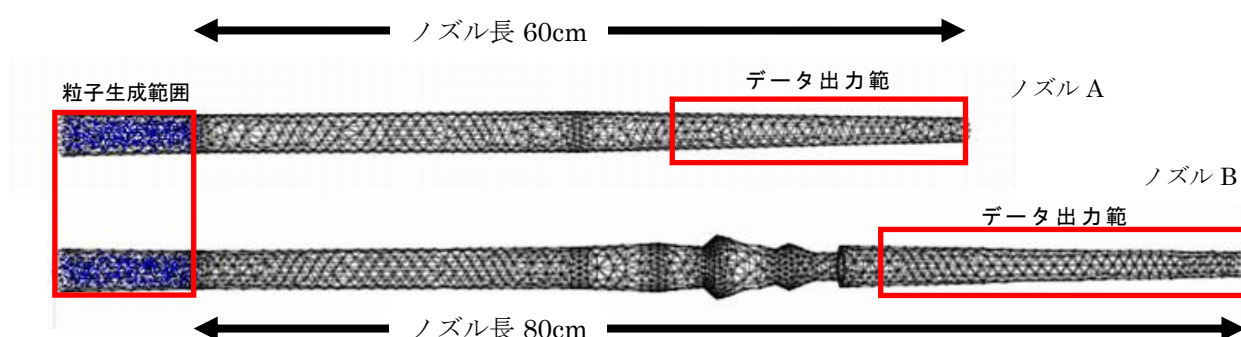


図-2.2.15 各ノズルの粒子生成範囲とデータ出力範囲

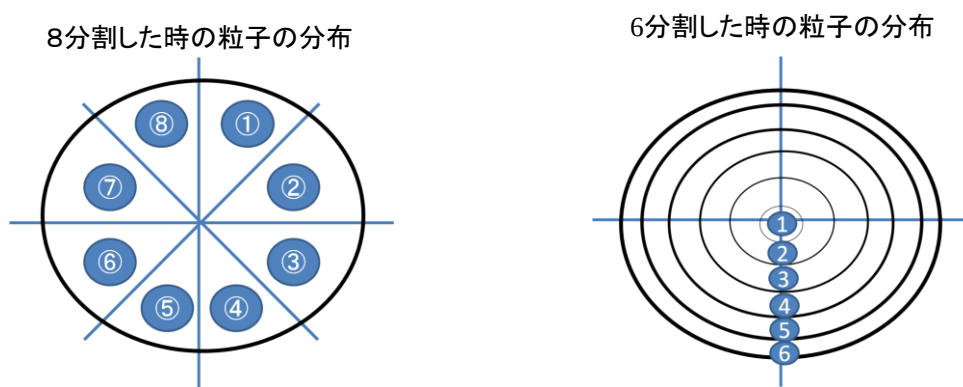


図-2.2.16 出力データの解析
(ノズル断面の分割)

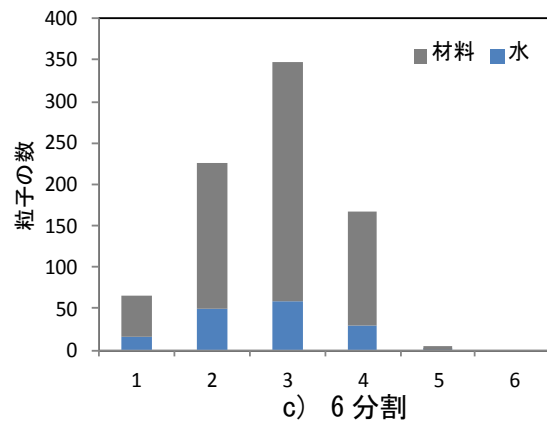
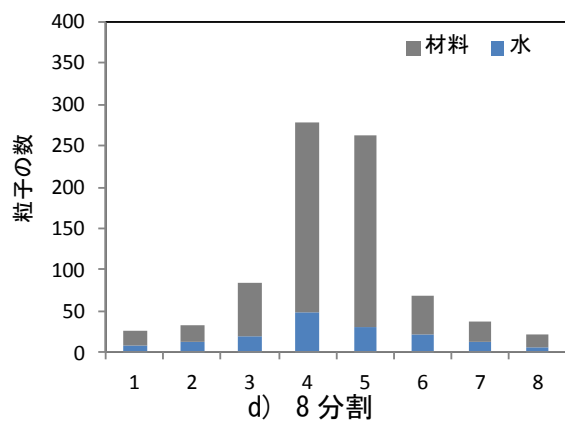


図-2.2.17 ノズル A の解析結果

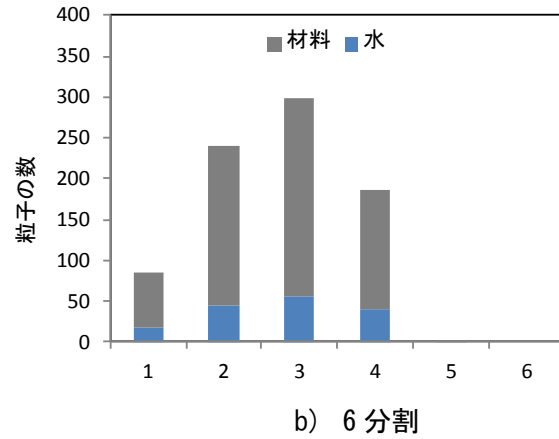
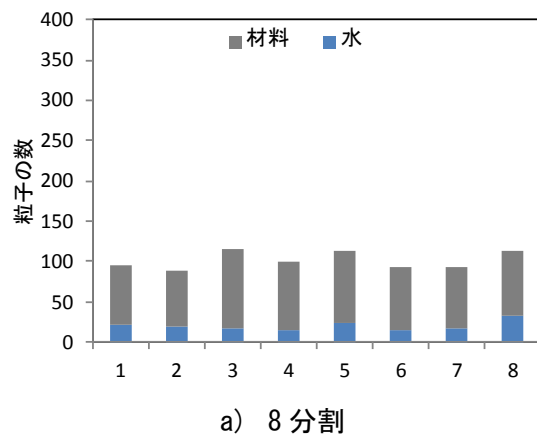


図-2.2.18 ノズル B 解析結果

図-2.2.19 と図-2.2.20 には、それぞれノズル A を用いた場合の粒子の速度ベクトルの出力範囲および速度ベクトルの分布、図-2.2.21 と図-2.2.22 には、ノズル B を用いた場合の粒子の速度ベクトルの出力範囲および速度ベクトルの分布を示す。ノズル A では、ノズル中央部(データ出力範囲①)の速度ベクトルのばらつきは小さく、吐出口近い範囲(データ出力範囲②)では若干大きくなる結果であった。一方、ノズル B では、形状が変化する直前の範囲(データ出力範囲①)で中央部分にばらつきは小さいものの、ノズル形状が変化する範囲(データ出力範囲②)および吐出口付近(データ出力範囲③)で速度ベクトルが多方向に大きくばらつくことが確認された。

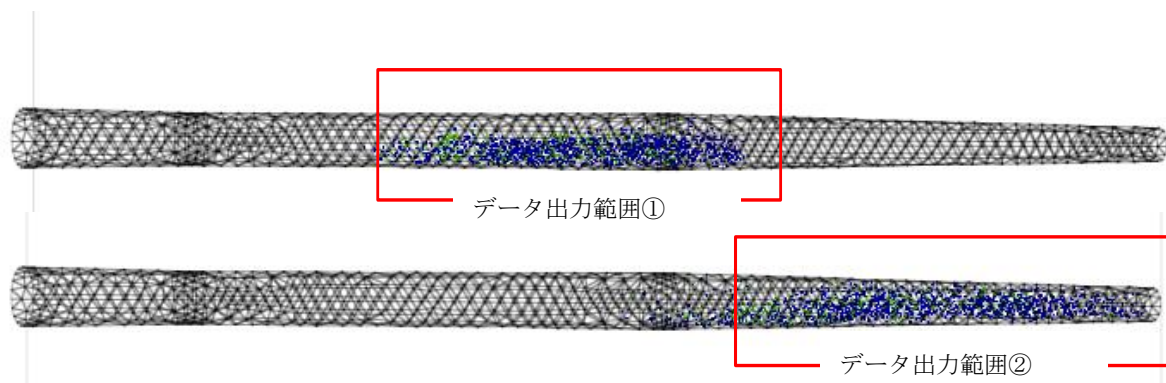


図-2.2.19 ノズル A のデータ出力範囲(速度ベクトル)

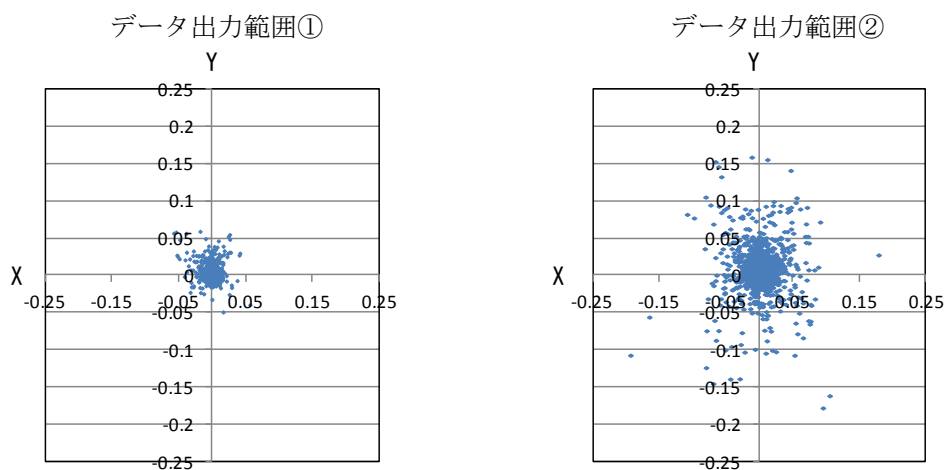


図-2.2.20 ノズル A の速度ベクトルの分布

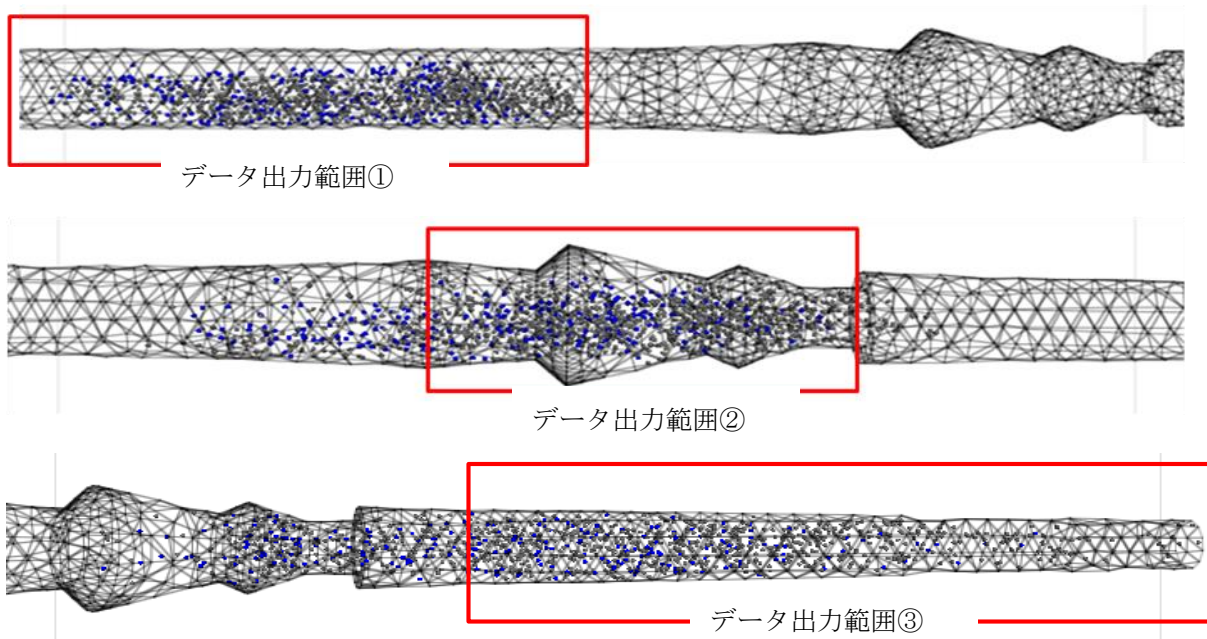


図-2.2.21 ノズル B のデータ出力範囲（速度ベクトル）

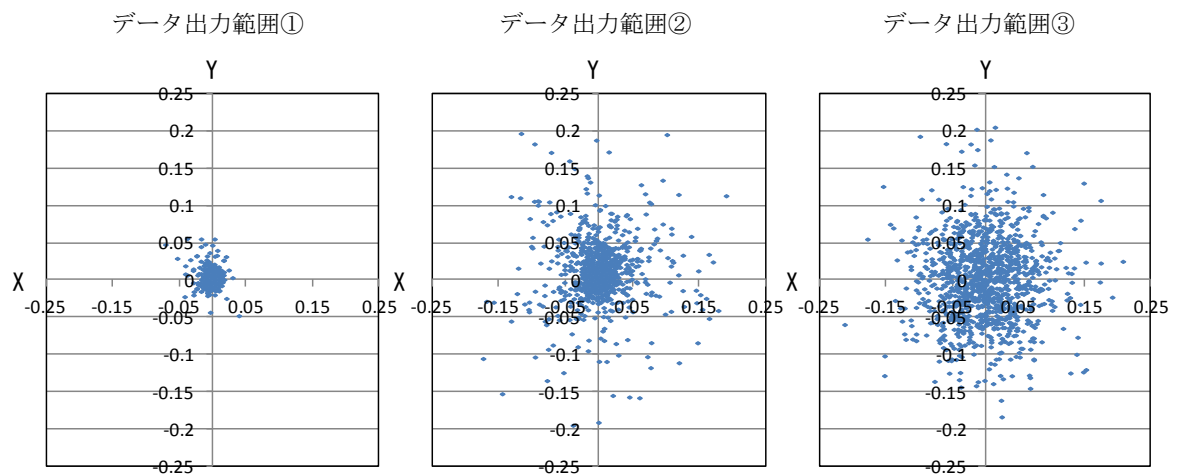


図-2.2.22 ノズル B の速度ベクトルの分布

この結果から、速度ベクトルの出力範囲を小さくし、各ノズル内の位置でどのような速度ベクトルを持つかを検証した。図-2.2.23には、速度ベクトルの出力位置を示すように、出力範囲を粒子生成位置直後の A 点、形状変化直前 B1 点、形状変化の最大部 B2 点、形状変化終了直後 B3 点、ノズル先端の C 点の計 5 点とした。図-2.2.24 に各点の速度ベクトルの分布を示す。この結果、いずれのノズルにおいても、形状変化直前の B1 までは、ノズル断面の中心部に集中しており、その挙動に大きな差は確認できなかったが、ノズル B では、ノズル A と比較して形状変化直後 B2 から速度と方向にばらつきが生じていることが分かる。さらに、ノズル吐出口に進むに従い、いずれのノズルでも速度のばらつきが大きくなる傾向にある。最終的に混合された材料が吐出される直前の C 点では、いずれのノズルでもばらつきが大きくなるが、ノズル B の方が全体的に広範囲にばらつく傾向が確認された。

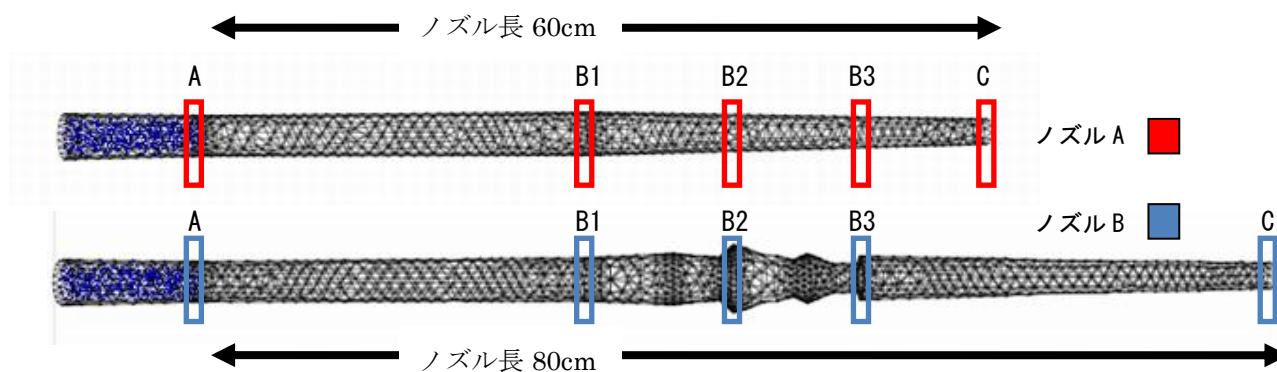


図-2.2.23 各ノズルのデータ出力範囲

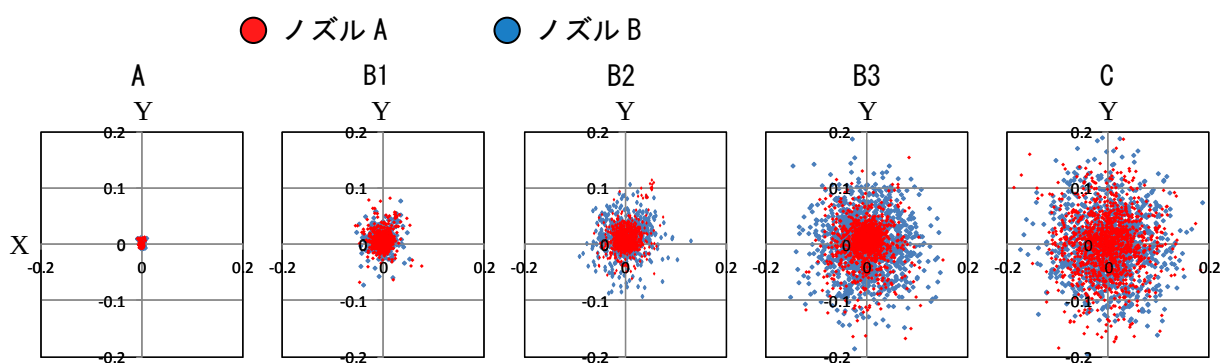


図-2.2.24 各出力範囲におけるノズル内の粒子の速度ベクトルの分布

図-2.2.25 に Z 軸方向の各点の速度ベクトルの平均値, 図-2.2.26 に Z 軸方向の各点の速度ベクトルのばらつき(標準偏差)を示す。形状変化の無いノズル A ではノズル先に近づくにつれ, 速度が大きくなる傾向を示し, 速度のばらつきも同様に, ノズル先に近づくにつれてばらつきが大きくなる結果となった。それに対し, 形状変化のあるノズル B では, 形状変化部分で速度は一旦減少傾向を示している。それに加え, 速度のばらつきでは, 形状変化部分で大きくなっていることから, ノズル内での前後の粒子の練混ざり効果が期待できることが示された。

このように, ノズル形状の変化の有無における練混ぜ効率の変化をとらえることができたことから, 本手法を用いることにより, 使用材料に併せた最適なノズル形状を判断できることが示された

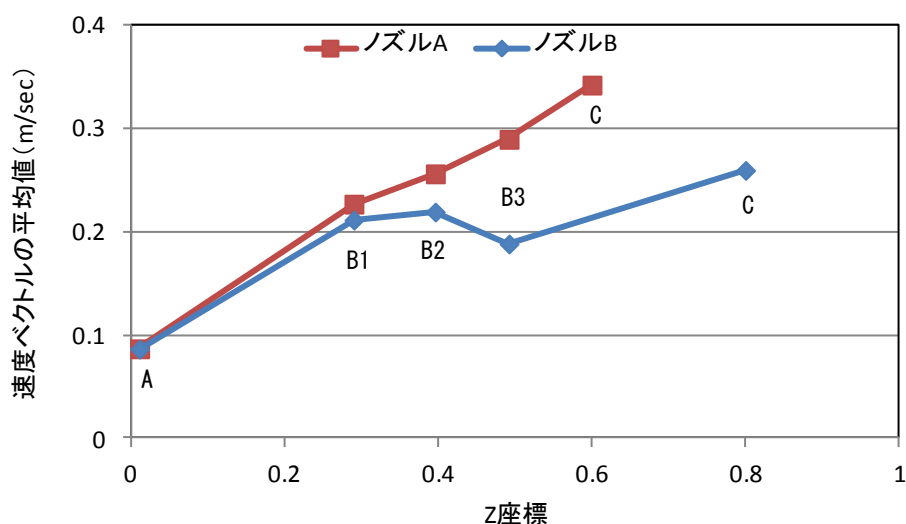


図-2.2.25 Z 軸方向の速度ベクトルの平均値

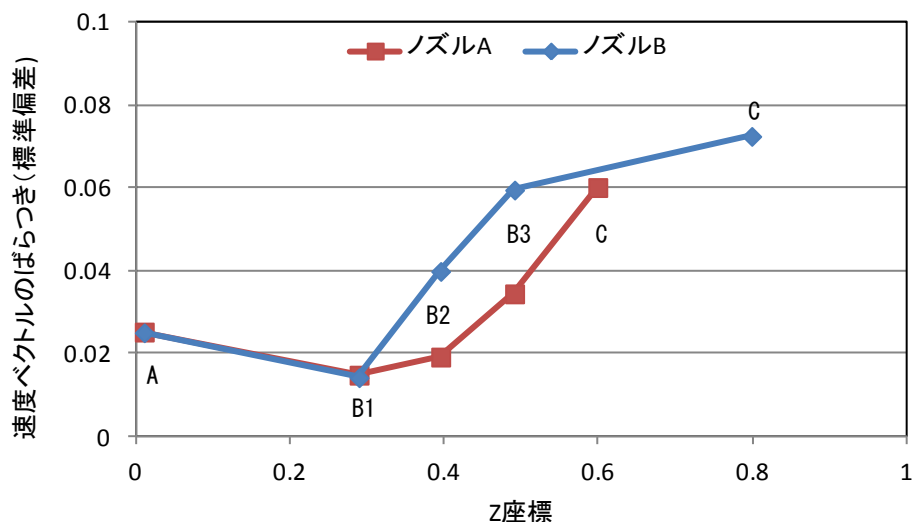


図-2.2.26 Z 軸方向の速度ベクトルのばらつき

(3) ノズル先端と対象構造物との吹付け距離が圧縮強度に与える影響

本試験では、図-2.2.6 に示したノズル B(機器 A とノズル B の組み合わせ)、ノズル C(機器 C とノズル C の組み合わせ)を用いて、ノズル先端と対象構造物との吹付け距離が圧縮強度に与える影響を確認した。吹付け距離は、ノズル B を用いた時に熟練したノズルマンが最適と判断した距離 1m を中心として、0.5m, 1.0m, 1.5m とした。

図-2.2.27 および図-2.2.28 には、ノズルごとに吹付け距離と圧縮強度の試験結果を示す。いずれのノズルを用いた場合も、吹付け距離 1m を中心として強度のばらつきが大きくなる傾向が確認された。特に、吹付け距離 0.5m では、圧縮強度の低下とばらつきが大きくなり、吹付け距離が近くなることによって、対象物への吹付け圧力が大きくなりリバウンドや空隙が大きくなることが考えられる。また、吹付け距離が遠くなると施工面への到達圧力が小さくなるとともに材料の分散が大きくなり強度のばらつきが生じ易くなるものと考えられる。

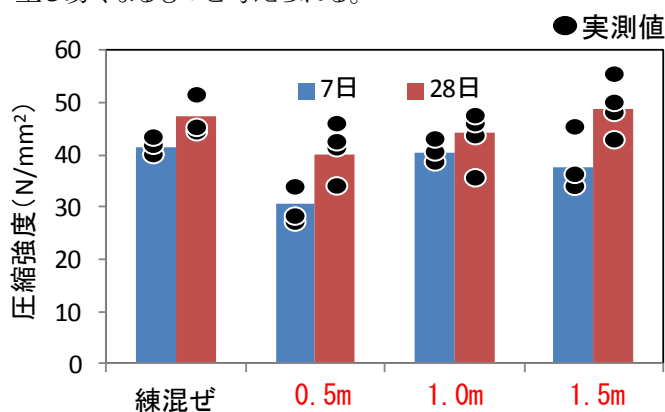


図-2.2.27 吹付け距離と圧縮強度試験の関係 (ノズル B+機器 A)

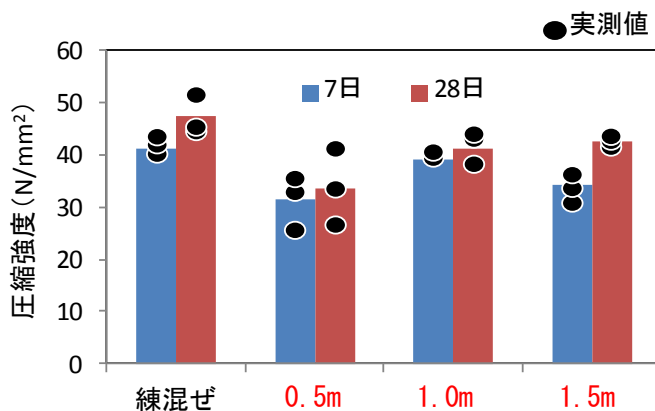


図-2.2.28 吹付け距離と圧縮強度試験の関係 (ノズル C+機器 B)

そこで、図-2.2.29 および図-2.2.30 には、土木学会に規定されるはね返り率試験方法[4]に準じて測定したリバウンド率と材齢 28 日強度試験結果を示す。ノズル B を用いた場合、ノズルマンが最適と判断した吹き付け距離 1m のリバウンド量が小さく、圧縮強度も試験室練り混ぜ時と同程

度確保されることが確認できた。一方で、ノズル C を用いた場合は、吹き付け距離が大きくなるにしたがって、リバウンド量が大きくなる傾向が確認できた。

これら結果から、使用する圧縮空気の圧力との関係も考慮することが必要であるが、熟練したノズルマンの感覚による吹き付け距離は、一つの参考となるが、ノズルマンは、吹き付け材料と吹き付けシステムに応じた最適な吹き付け距離をあらかじめ把握して施工することが重要であるものと考ええる。

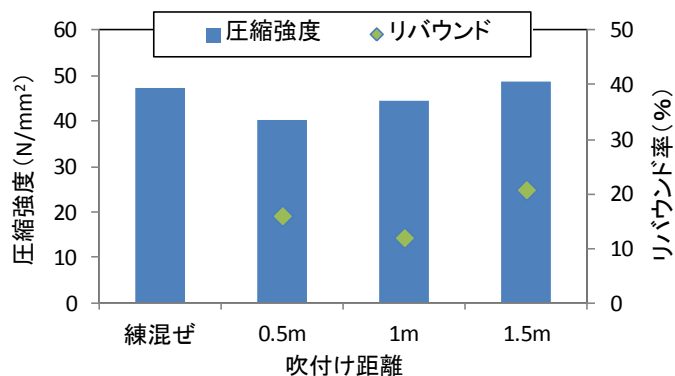


図-2.2.29 材例 28 日圧縮強度とリバウンド率の関係（ノズル B+機器 A）

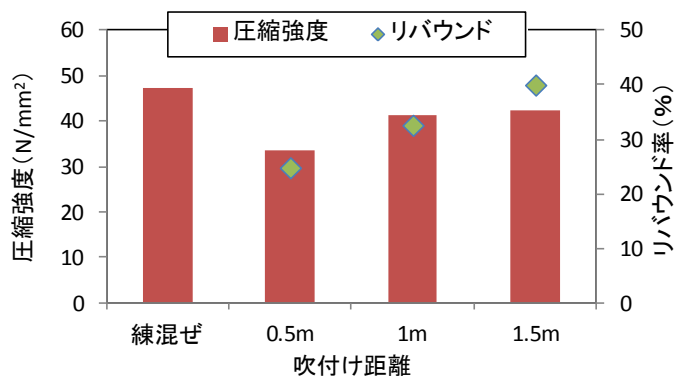


図-2.2.30 材例 28 日圧縮強度とリバウンド率の関係（ノズル C+機器 B）

＜参考文献＞

- 【1】 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本道路株式会社：構造物施工管理要領, p.3-25, 平成 24 年 7 月
- 【2】 土木学会：吹付けコンクリート(モルタル)の圧縮強度試験用供試体の作り方(JSCE-F 561-2005), コンクリート標準示方書基準編土木学会基準および関連基準, pp.265-266, 2010 年制定
- 【3】 JIS R 5201 セメントの物理試験方法(1997)
- 【4】 土木学会：吹付けコンクリート(モルタル)のはね返り率試験方法(JSCE-F 563-2005), コンクリート標準示方書基準編, 土木学会基準および関連基準, pp.269-271, 2010 年制定

第3章 乾式吹付け工法における施工管理と品質検査の検討

3.1 施工管理と品質検査に関して

土木学会コンクリート標準示方書[施工編][1]では、「品質管理」の意味を「使用の目的に合致したコンクリート構造物を経済的に構築するために、工事のあらゆる段階で行う品質確保のための行為」と定義している。また、同様に「検査」の意味を「品質が判定基準に適合しているか否かを判定する行為」と定義している。いずれも、その意味が広く定義されているが、一般的には併せて示されている図-3.1.1の通り、「品質管理」と「検査」は、いずれも「施工」に対して位置付けられることが多く、「品質管理」は「施工中」に、「品質検査」は「施工後」にそれぞれ実施されるものとして認識されていると思われる。

本報告では、広義の「品質管理」あるいは「検査」との区別を明確にするために、施工中に行われる品質管理、すなわち品質確保のために実施される行為を「施工管理」、施工後にその品質を判定する行為を「品質検査」とそれぞれ定義する。

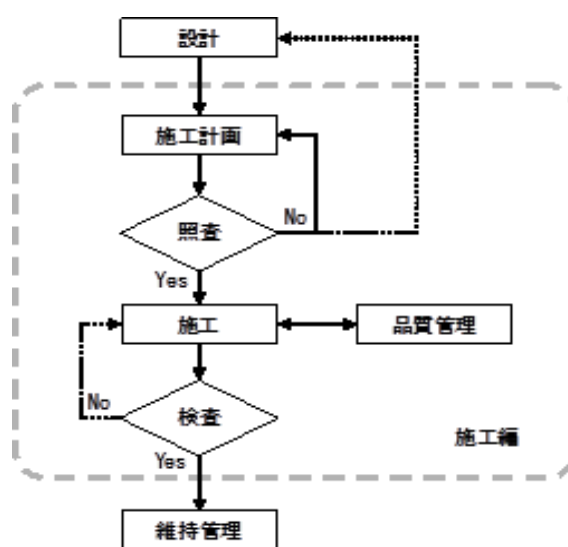


図-3.1.1 施工編の位置付けとコンクリート構造物の施工の流れ

3.2 施工管理と品質検査提案に向けた実験結果

本節では、施工管理および品質検査に関して提案するために、各種機器の能力、圧縮強度試験用供試体の寸法あるいは圧縮強度に与える影響などを検討した。なお、以下に示す試験では、市販のプレミックス品を吹付け材料として用いた。用いたプレミックス品は、セメント、細骨材、混和材が工場であらかじめプレミックスされており、粉体密度は $2.75\text{g}/\text{cm}^3$ である。また、混合水は、アクリル系のポリマーエマルションを用い結合材とポリマーエマルションの比 $W/B = 31\%$ (W : ポリマーエマルション, B : 結合材とする) が標準混合配合であるものとした。

3.2.1 密度および空気量が圧縮強度に与える影響

本試験では、図-3.2.1 に示すノズル B (機器 A とノズル B の組み合わせ) とノズル C (機器 B とノズル C の組み合わせ) を用いて、吹きつけ距離を 0.5m, 1.0m, 1.5m の 3 ケースに対して JSCE-F 561-2005 (2.2.1 項参照) の型枠に吹き付けた供試体からコアを採取し、圧縮強度の測定を行った。また、型枠に吹き付けた直後に、重量を測定し、見かけの密度とした。また、図-3.2.2 に示すように体積置換法により「空気量」の測定を行った。具体的には、メスシリンダーにあらかじめ水を入れ、「吹付け」直後の供試体からフレッシュ材料を切り出し、水中に静かに投入する。投入後、攪拌によって、フレッシュコンクリート内部の空気を除き、体積減少量をフレッシュコンクリート中の「空気量」とした。なお、空気量の測定では、ノズル B のみを使用した。

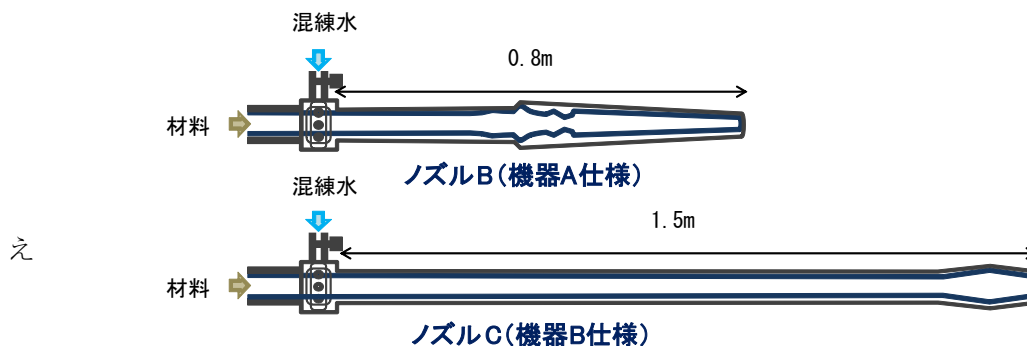


図-3.2.1 ノズル形状と使用機器

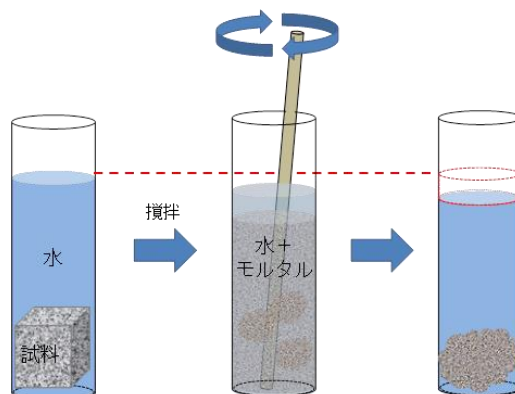


図-3.2.2 空気量の測定方法の概念

図-3.2.3 および図-3.2.4 には、ノズル B および C を用いた時の見かけの密度と圧縮強度の関係を示す。この結果より、圧縮強度と見かけの密度には、はっきりとした相関を確認出来なかった。ただし、吹付け距離毎にみた場合には、見かけ密度が大きくなるにつれて強度が増加する傾向が確認された。また、B-1 や C-0.5 のように、同じ密度の供試体でも強度が大きく異なることから、空隙径やその連続性の影響が大きいと推測される。

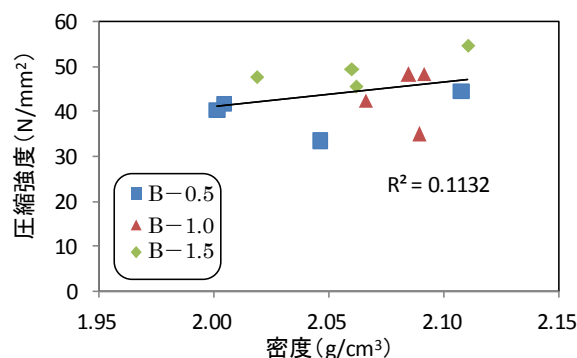


図-3.2.3 見かけの密度と圧縮強度の関係（ノズル B+機器 A）

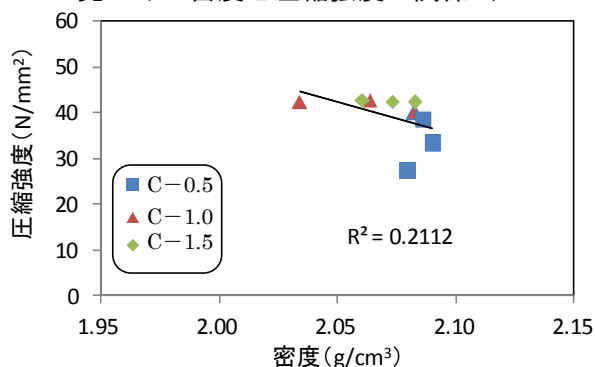


図-3.2.4 見かけの密度と圧縮強度の関係（ノズル C+機器 B）

そこで、ノズル B を用いた場合の空気量と圧縮強度の関係を図-3.2.5 に示す。この結果から、空気量が大きくなると圧縮強度が低下する傾向を認めることが出来た。データ数として少ないため、確証はできないものの、空気量を測定することによって、吹き付け材料の圧縮強度を推定する手段となる可能性はある。

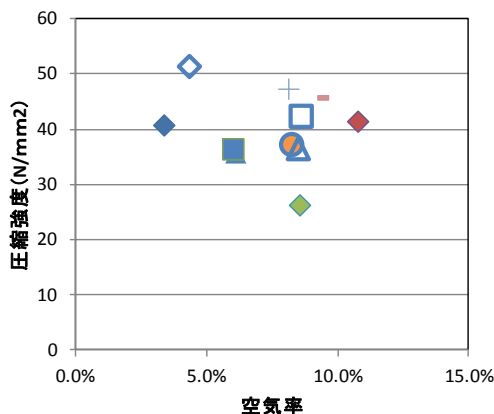


図-3.2.5 空気量と圧縮強度の関係（ノズル B+機器 A）

3.2.2 供試体寸法が圧縮強度に与える影響

本試験では、供試体寸法および採取方法が圧縮強度に与える影響に関して確認するため、**図－3.2.1**に示すノズル B（機器 A とノズル B の組み合わせ）を用いて、吹きつけ距離を 0.5m, 1.0m, 1.5m の 3 ケースに対して以下の供試体を採取し、材齢 28 日の圧縮強度の比較を行った。

- 採取方法 1 JSCE-F 561-2005 の型枠に吹き付けた供試体から $\phi 10 \times 20\text{cm}$ のコア採取
- 採取方法 2 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の低版を外した鋼製型枠
- 採取方法 3 $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ の底板を外した木製型枠



a) 採取方法 1 型枠



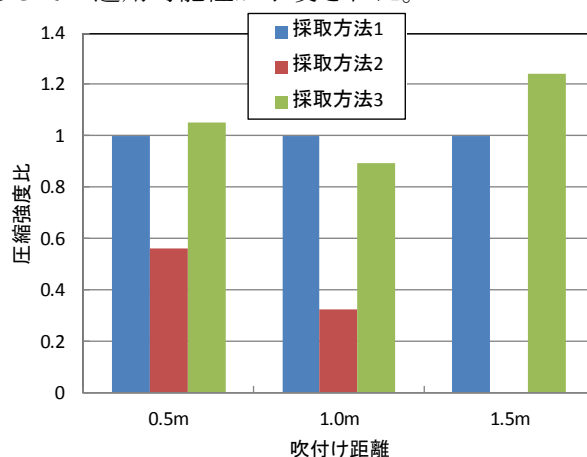
b) 採取方法 2 型枠



c) 採取方法 3 型枠

写真－3.2.1 各供試体の型枠の概要

図－3.2.6には、採取方法 1 供試体の材齢 28 日圧縮強度に対する採取方法 2, 3 供試体の圧縮強度の比を示す。この結果から、採取方法 2 供試体では、いずれの吹きつけ距離においても採取方法 1 と比較して 0～0.6 程度の強度しか得ることが出来ていない。これは、円柱の狭い空間に圧縮空気を伴った材料が吹き付けられるため、型枠内で空気の渦が出来るとともに、骨材が取り残され、十分に充填された供試体が取れなかったことにある。一方、湿式工法の断面修復材に対する圧縮強度試験に用いられる $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ 供試体の強度比は、0.9～1.2 であり、JSCE で提案されるコア供試体での試験結果に類似するものであり、実構造物の施工中の中間管理としての適用可能性が示唆された。



図－3.2.6 採取方法 1 供試体の圧縮強度に対する比（材齢 28 日）

3.2.3 水量計種類の検討

混練水を供給するポンプは、その種類により吐出量の安定性が異なることが考えられるが、これに関しては、次項 3.2.4 で検証するものとする。ここでは、混合水量の吐出安定性を確認する手段として、2 種類の流量を用い実構造物での使用可能性を検討することとした。

試験では、写真-3.2.2 に示すスネーク式ポンプを用いた。スネーク式ポンプは、その流体をスクリーを用いることで連続的に安定して排出するポンプであるため、流量を測定するための計測機である流量計の精度を把握するために適したものと判断した。



写真-3.2.2 試験に使用したスネーク式ポンプ
(兵神装備株式会社製 ヘンシンモノポンプ 12NE15PM 型)

図-3.2.7 に示すようにスネーク式ポンプの排出口にデジタル流量計、排出口から 20m の位置に電磁式流量計を設置し、排出口から 100m の位置（ポンプ先）で 1 分間排出水を採取し、その重量を測定した。その後、各デジタル流量計に表示される流量を比較することにより、流量計の計測精度を評価した。表-3.2.1 には、使用した流量計を示す。

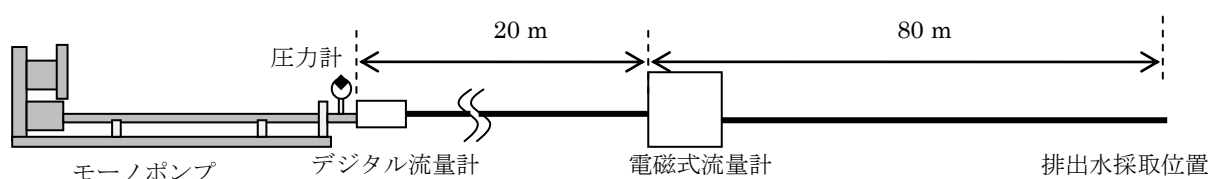


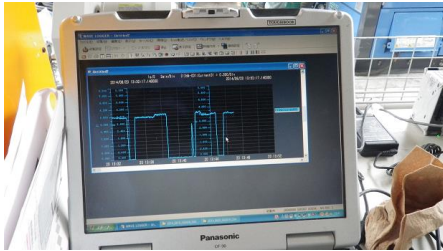
図-3.2.7 試験の概要

試験手順は、以下に示す。

<試験手順>

- ①デジタル流量計で 3.5 ～5.0 l/min となるようにモノポンプの周波数を設定
- ②電磁式流量計での測定および筒先（100m 先）から排出された水量を 1 分間測定
- ③ノズル先の水弁は開放状態にし、②が終了後モノポンプの排出圧力が 1.0MPa となるようにノズル先を絞り、②の測定を行った。

表－3.2.1 流量計の概要

流量計種類	デジタル流量計	電磁式デジタル流量計
使用計器名	東都電気工業(株)社製 TFP-4000VR	KEYENCE 社製 FD-MH10A
外観写真		
	検出機  データ表示 (パソコン)	検出機  データ表示 (紙で出力可)

表－3.2.2 には、デジタル式および電磁式流量計より測定した流量と筒先で実際に排出された排出量を示す。この結果から、いずれの流量計でも筒先での排出量が同等である。また、ノズル先では、ノズル弁を絞ることが可能であるため、全て開放した場合とポンプ元の圧力が 1Mpa となるようにノズル弁を絞った場合を比較したが、いずれも流量計に表示される値と実際の排出量が同等であることが確認出来た。

したがって、混合水の排出量を計測する手段として、いずれの流量計も使用可能であると判断できた。

表－3.2.2 流量確認試験

ノズル弁 開放状況	圧送圧力 (MPa)	デジタル流量計 (kg/min)	電磁式流量計 (kg/min)	筒先排出量 (kg/min)
開放	0.47	5.0	5.0	4.98
絞り	1.00	5.0	5.0	5.08
開放	0.22	3.6	3.6	3.59
絞り	1.00	3.5	3.5	3.48

3.2.4 使用ポンプの種類と安定性の検討

混練水は、使用するポンプの種類により、排出量の安定性が変動することが考えられる。この項では、2.1.4 項で示したプランジャーポンプ、ダイヤフラム式ポンプおよびスネーク式ポンプの排出状況を確認した。試験では、3.2.3 項で示したデジタル式流量計を用いて 1 秒ごとの流量を測定した。

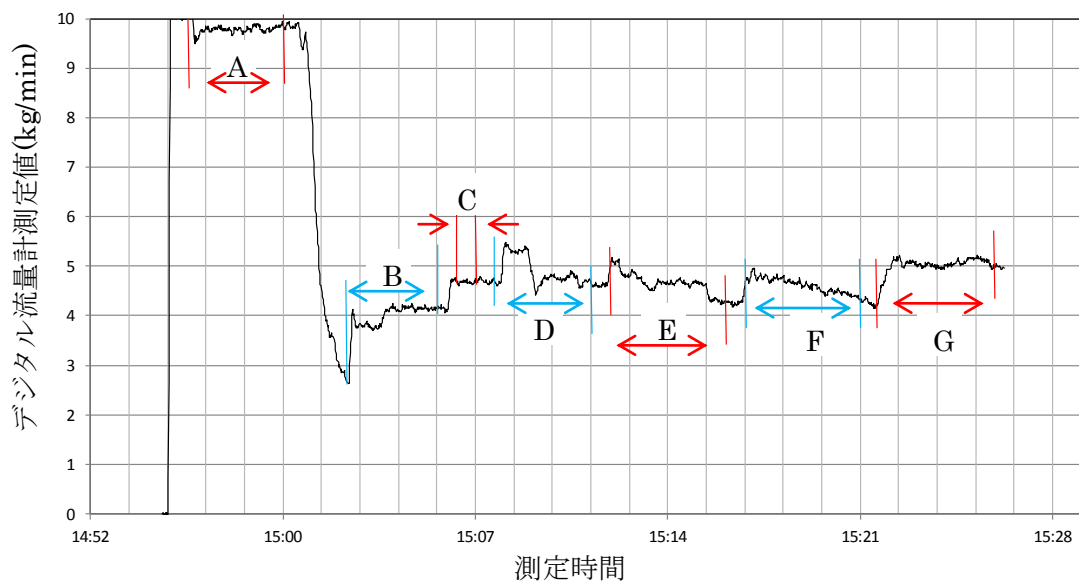
(1) プランジャーポンプ

プランジャーポンプは、圧送圧力一定の環境で混合水を送る構造であり、乾式吹付けでは、ノズル先端にある流量調整弁を開閉することで流量を調整する。そこで、本試験では、圧送圧力を 1.5～4.0 まで変化させ、各圧力時の流量をデジタル流量計で測定することでその安定性を把握した。表－3.2.3 には、試験条件と試験番号を示す。なお、試験時の圧送距離は、100m として、ノズル先端の流量調整弁を触らないものとした。

表－3.2.3 プランジャーポンプの試験条件

条件番号	バルブ状況	圧送圧 (MPa)	目標流量 (kg/min)
A	全開	1.5	9.7
B	絞った後、触らない	1.5	4.0
C	②の状態を保った状態 (バルブを触らない)	2.0	
D		2.5	
E		3.0	
F		3.5	
G		4.0	

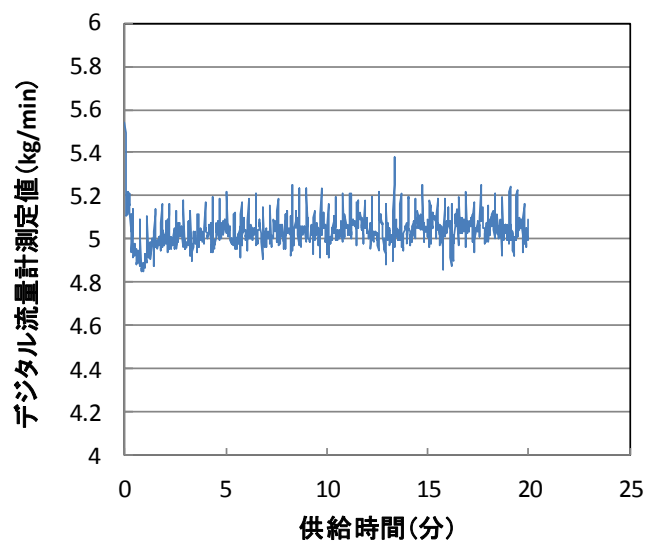
図－3.2.8 には、デジタル流量計で測定した流量を測定感覚 1 秒ごとに示す。図中の A～F は、表－3.2.3 の条件番号に対応する。条件 A でバルブを開放した後、B により目標流量 4.0kg/min に設定した。その後は、バルブの操作は実施していない。その結果、B の条件では、3.9～4.1kg/min の範囲内で安定した。次に、圧力を 2.0MPa に上昇させると流量が上昇し安定した。条件 D～F では、圧力を上げた直後は、流量が上昇するが、その後流量が減少する傾向がある。さらに 4.0MPa まで圧力を上昇させると流量は上昇するものの、吐出量は安定した。これら状況を総括するとバルブ調整後、圧力のみを増加すると流量が増加する。一方で、圧力によっては、流量が安定する領域と減少する領域があることが分かった。つまり、プランジャーポンプのように圧力一定下で混合水を供給する場合、使用するポンプによって、これらの状況を把握したノズルマンが施工することが必要であるとともに、これら不安定領域をノズルマンが手元で調整することとなる。したがって、ノズルマンの育成が非常に重要な要素となることが確認できた。



図－3.2.8 プランジャーポンプにおける流量測定結果

(2) ダイアフラム式ポンプ

ダイアフラム式は、隔膜式であり、インバーターによる回転数の制御が可能である。そこで、混合水ホースの先端のバルブを全開放した状態で1分間実際に計量し、5.0kg/minとなった周波数で20分間混合水を供給した。この時にデジタル流量計で1秒ごとに測定した結果を図－3.2.9に示す。この結果、ダイアフラム式ポンプでは、目標値5.0kg/minに対して4.9～5.2kg/minでほぼ安定していることが確認され、プランジャーポンプと比較して安定性能が保たれるものとする。つまり、ノズルマンによる混合水量の差が小さくなることが期待できるものである。



図－3.2.9 ダイアフラム式ポンプにおける流量測定結果

(3) スネーク式ポンプ

スネーク式ポンプは、イチジク偏芯ネジ式で脈動がなく、定量性に優れるものである。そこで、混合水ホースの先端のバルブを全開放した状態で1分間実際に計量し、5.0kg/minとなった周波数で20分間混合水を供給することとした。さらに、供給開始から次第にホース先端のバルブを閉じることでポンプ圧力を0.47～1.00MPaまで変動させることで、流量に変動が生じないか否かを確認した。その結果を図-3.2.10に示す。流量は、4.9～5.1kg/minの範囲内に収まり、ほぼ目標の5.0kg/minを保持した混合水の供給が可能であり、ダイヤフラム式ポンプよりも精度が向上することが確認できた。しかしながら、実際に使用する場合、購入コストが他の2方式のポンプと比較して非常に高いことが課題である。

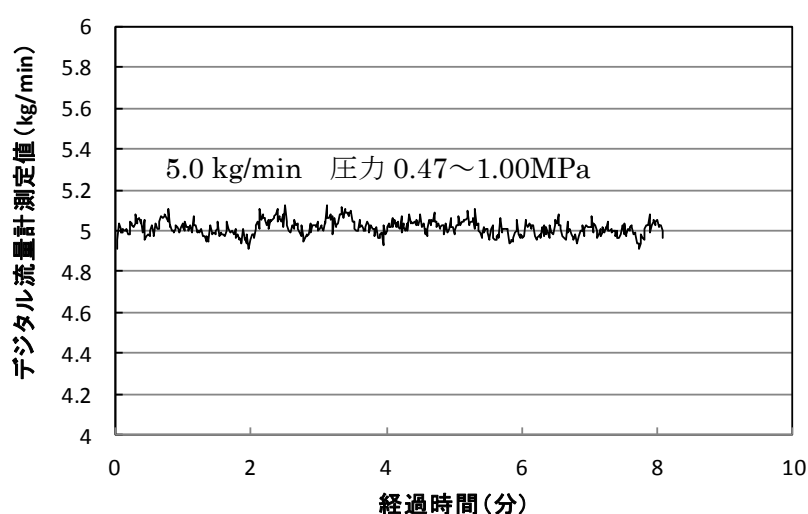


図-3.2.10 ダイヤフラム式ポンプにおける流量測定結果

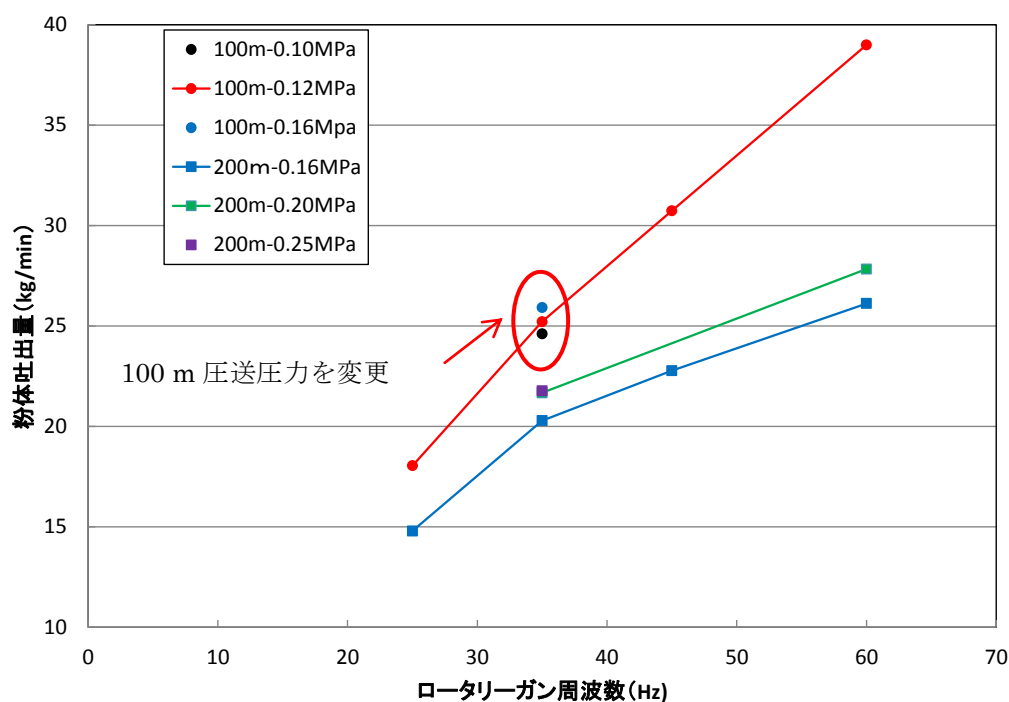
3.2.5 吹付け機の周波数、圧送距離、設定エア圧力と粉体吐出量

乾式吹付けでは、粉体材料を第2章で示したようにロータリーガンなどの吹付け機を用いて、補修対象位置まで材料を圧送する。この時、ロータリーガンの周波数、圧送距離および設定エア圧力により、ノズル先から吐出される粉体量が変動することが考えられる。そこで、本委員会では、これら要因と粉体吐出量の関係を確認した。

試験では、表-3.2.4に示す諸条件において、ノズル先から吐出される粉体をトン袋に1分間吹付け、その重量を測定した。

表－3.2.4 粉体排出量試験の要因と水準

	圧送距離(m)	100			
	周波数(Hz)	25	35	45	60
設定エア	0.10	－	○	－	－
圧力	0.12	○	○	○	○
(MPa)	0.16	－	○	－	－
	圧送距離(m)	200			
	周波数(Hz)	25	35	45	60
設定エア	0.16	○	○	○	○
圧力	0.20	－	○	－	○
(MPa)	0.25	－	○	－	－



図－3.2.11 ロータリーガン周波数，圧送距離および設定エア圧力と吐出量の関係

図－3.2.11 には，各条件での粉体吐出量を示す。圧送距離を 100m とした場合，ロータリーガン周波数を増加すると吐出量も増加し，傾向としてはリニアな傾向を示した。また，周波数を 35 Hz とした場合では，圧送圧力を変更増減させたが，吐出量に大きな変化は見られなかった。したがって，本試験で用いた粉体材料を 100m 圧送する場合は，設定エア圧力 0.12MPa 程度で粉体吐出量と圧送圧力がマッチしていると考えられる。

次に，圧送距離を 200 m とした場合，ロータリーガンの周波数が 25 ～35 Hz 領域とそれ以上の周波数領域では，粉体吐出量の増加傾きが変化する傾向にあった。また，設定エ

ア圧力を増加することにより、吐出量は 1～2 割程度増加する傾向も確認された。周波数 35Hz 以上での吐出量の傾きは、設定エア圧力 0.20～0.25MPa の範囲で同等であり、設定エア圧力が 0.16MPa では、吐出量が減少する傾向があった。したがって、本試験で用いたロータリーガンで 200m の圧送距離を賄うためには、設定エア圧力が 0.2MPa 以上必要であるものと考えられる。以上より、吐出量は、圧送距離、周波数および設定エア圧力に影響を受けるため、施工前に使用するロータリーガンの吐出量を確認することが必要であるものとする。

3.2.6 配合推定算出の試み

本試験では、3.2.4 および 3.2.5 で水量の安定供給とロータリーガンによる粉体の定量供給を確認した結果から、吹付けられた最終補修材料の配合を推定する試みを行った。本試験の目的は、実現場で吹付けられた補修材の品質を簡易に評価する確認手段を提案することにある。

(1) 推定方法の概要

図-3.2.12 には、配合推定概要を示す¹⁾。「吹付け」を行った直後の供試体からフレッシュコンクリートのサンプルを 2 つ採取し、1 つを「空気量」および「骨材量」の推定、もう一方を「混練水量」および「セメント量」の推定に用いるサンプルとした。

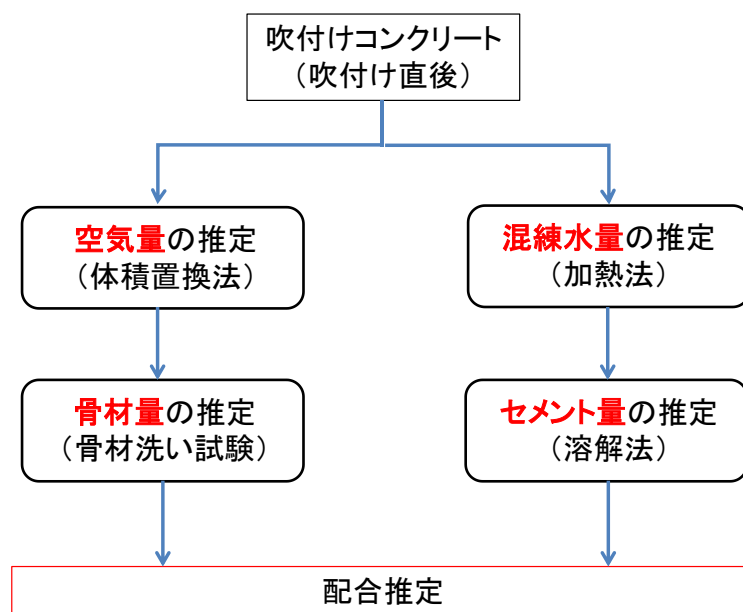


図-3.2.12 配合推定の概要

<空気量の推定方法>

空気量の推定では、3.2.1 に示したようにメスシリンダーにあらかじめ水を入れ、吹付け直後に採取した約 1kg のフレッシュな補修材料を水中に静かに投入した。その後、棒を用

いて攪拌し、水中に投入した補修材料が含む空気を大気中に取り除き、この時の体積減少量を空気量として評価した。

＜骨材量の推定方法＞

「空気量」の推定後に残った試料を 75 μm 篩でウェットスクリーニングし、骨材のみを取り出し、105℃で乾燥させ、測定した重量を「骨材量」とした。

＜練混水量の推定方法＞

吹付け直後の供試体からフレッシュコンクリートを採取し、一般的な電子レンジ(600W)を用いて、重量の変動がなくなるまで加熱し、重量の減少量から「混練水量」を算出した。なお、加熱により乾燥した試料は、「セメント量」の推定に用いることとした。

＜セメント量の推定方法＞

「混練水量」の推定後の乾燥した試料を、濃度 10%の希塩酸に浸せき、攪拌した後に、ろ過し、質量の減少量からセメント量を推定した。

＜試験時の水量の供給＞

本試験では、3.2.4 で高価ではあるが水量の安定供給に優れるとされたスネーク式ポンプを用いて混練水を供給し、配合推定を行った。図-3.2.13 には、目標水量を 3.6 $\text{L}/\text{分}$ とし、その前後の 3.8 $\text{L}/\text{分}$ 、2.8 $\text{L}/\text{分}$ にポンプを設定した時の混練水量の変動状況を示す。この結果、いずれも設定値でも目標水量からの大きな変動がなく、安定して供給されることが確認された。

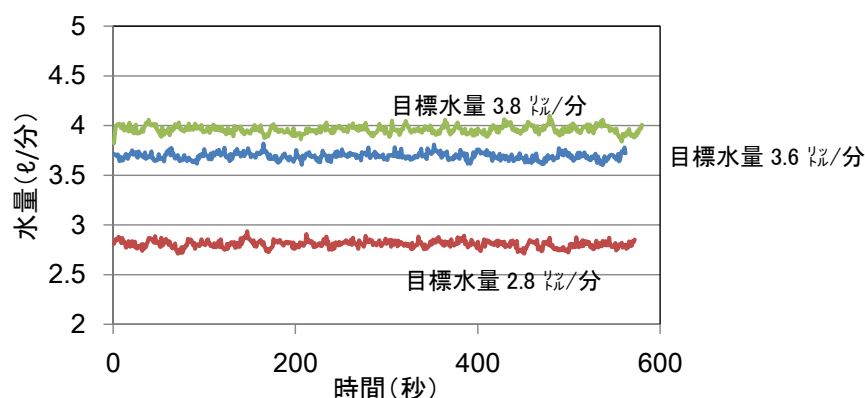


図-3.2.13 混練水量の安定性確認

＜試験結果＞

本試験結果では、「想定配合」と「実配合」の比較により評価したため、以下に各配合の定義を示す。

想定配合：吹付け前の配合であり、吹付けにより混入される空気を含まない配合

実配合：吹付け後の試料から推定した空気を含む配合

空気を除く実配合：実配合から空気量を除き、割り戻した配合

図-3.2.14には、混練水量を先に示した3水準で供給した時の「想定配合」、「空気を除く実配合」および「実配合」のを示す。この結果、「想定配合」と「空気を除く実配合」を比較した場合、両配合は、いずれの混練水量でも、ほぼ一致していることから、実際に吹付けられた補修材料の配合は、吹付け前の「想定配合」と一致するため、想定通りであると判断できる。一方で、「想定配合」と「実配合」では、各混練水量で空気量にばらつきがあることが確認できる。これらは、混練水量が変動したことにより、練上がり状態が変化したためと推測できる。

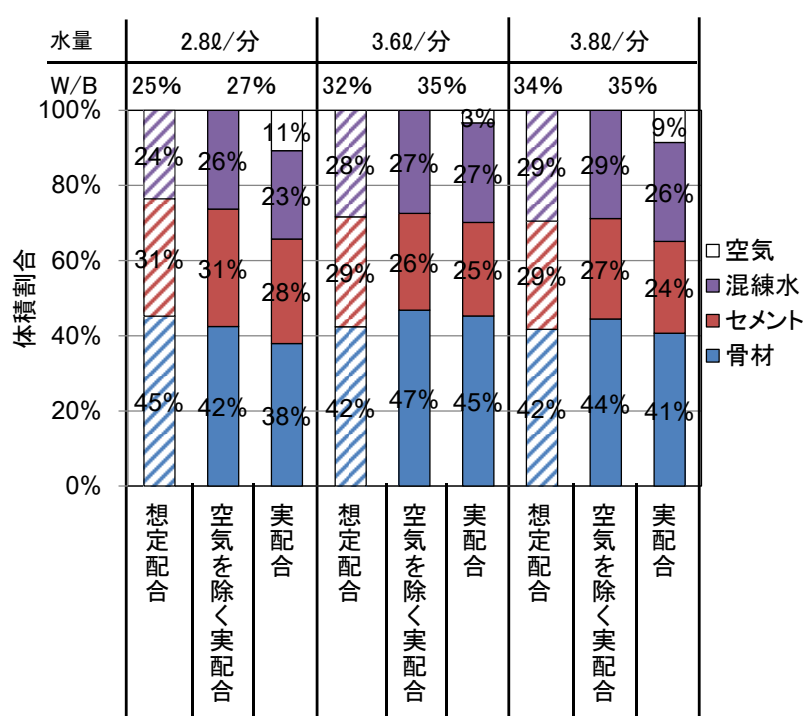


図-3.2.14 混練水量の安定性確認

図-3.2.15には各混練水量で吹付けた場合の空気量、図-3.2.16には材齢28日における圧縮強度を示す。空気量の測定結果から、標準水量である3.6l/分から混練水量が増減すると、吹付けられた補修材料の空気量が増加する傾向が確認された。そこで、混練水量ごとの圧縮強度を比較すると、3.6l/分に比べ、2.8l/分では、ほぼ同程度であり、3.8l/分では、強度低下が確認された。本来、W/Bと圧縮強度の関係は、図中の黒線の様な傾向を示すことが推測される。しかし、本結果からは、異なる傾向が確認された。この原因は、混練水量の変動が圧縮強度にあたえる影響に関し、W/Bの変動より空気量増加による影響が大きくなるものと考えられる。したがって、品質のばらつきを小さくするために、空気量を小さくすることが有効であるものと推測される。

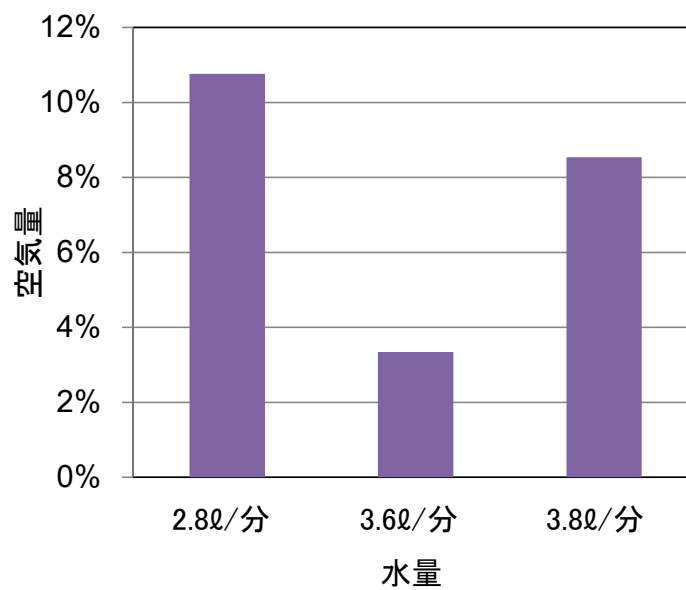


図-3.2.15 各混練水量で吹付けた場合の空気量

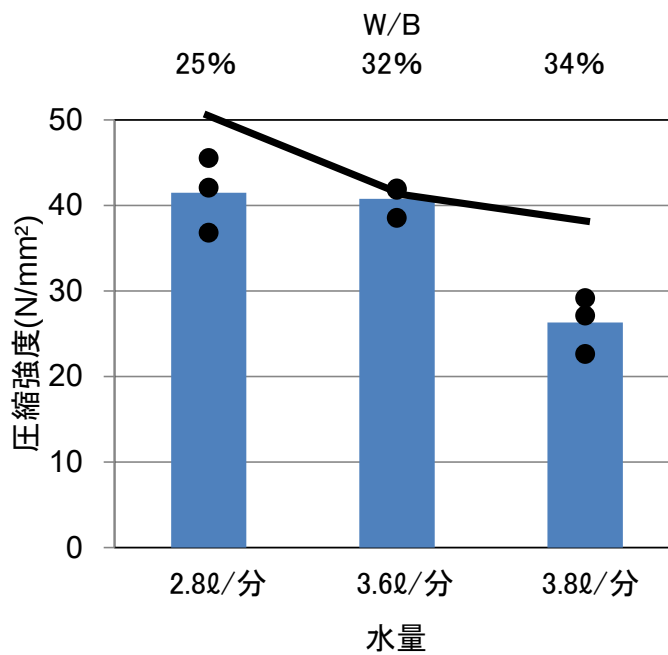


図-3.2.16 材齢 28 日圧縮強度（水量の変動）

<参考文献>

- 【1】 土木学会：2012 年度版土木学会コンクリート標準示方書 [施工編]，2012 年制定

第4章 乾式吹付け工法における施工管理と品質検査の提案

乾式吹付け工法は、粉体材料および混練水をそれぞれ圧縮空気、水ポンプを使用し、施工箇所の吹付けノズルまで別系統で供給するため、材料供給プラントから施工箇所までの距離が長い場合など施工性の向上を期待することが出来る工法である。報告書では、これら乾式吹付け工法で一般的に使用される機材（システム）とその特徴を説明した。一方で、各材料は、連続的にノズル内で混合されるため、粉体量、混練水量が不明瞭であるなどの課題もある。そこで、本委員会では、本工法が実現場で適切に管理できる手段に関して提案することを目的として、各種試験を実施した。本章では、これら試験結果から実現場における施工管理と品質検査の一助となる手法を提案することとした。

4.1 乾式吹付け工法施工一般

本工法では、予め工場でプレミックスされた粉体材料を吹付け機（例えばロータリーガンなど）で圧送し、圧送ホース先端にあるノズル内で瞬時に混合することを特長としている。したがって、本工法では、第2章で示したように、吹付け機やノズル形状とプレミックス粉体材料がマッチングすることが必要であり、これらのマッチングを事前に確認された吹付けシステムであることが望ましい。

特に、材料が混合されるノズルは、その形状により粉体と混合水の分散性に影響を与えるため、安定した混合材料を製造するための重要な要素であることに留意されることが望ましいものと考えられる。

また、混合水を供給する水ポンプは、その購入費用と性能にある程度の比例的関係があるが、出来る限り人為的影響の少ない安定して混合水を供給できる水ポンプを選定することが望ましい。ただし、使用する水ポンプの性能を十分に理解した上で使用することで、いずれの水ポンプも使用可能である。

実際に吹付けを行う場合、吹付けノズルと対象面との距離（吹付け距離）が吹付けられた材料の物性に影響を与える。吹付けを行うノズルマンは、その距離を目視によるリバウンドで判断する傾向にあり、一つの指標としては十分に有効である。しかし、ノズルマンは、使用する機器と材料の特性を十分に把握し、リバウンド量のみで判断しないように指導する必要がある。この対策の一つとして、ノズルマン教育プログラムなどを設けることなどがある。

4.2 各使用材料と混合材料の評価

第 3 章で示したように、施工管理とは、使用される混合材料が適切に使用されているかを施工途中で判断するための手段であり、品質検査の一つである。以下には、その一手段を提案するものとする。

4.2.1 使用材料

本工法における使用材料には、粉体材料と混合水があり、適切な混合材料を施工するためには、これら材料の供給量をリアルタイムで把握することが望ましい。しかしながら、粉体材料に関しては、連続してその量を確認することは困難であるため、使用する吹付け機の周波数と圧送距離、圧送圧力をファクターとし、粉体材料が排出される量を施工前に確認することで、その量を把握する手段を提案することが出来る。また、混合水量に関しては、水量計など比較的使用し易い機器を用いることで供給量を把握する手段が考えられる。

実現場では、最終的に各材料の使用数量を空袋検査等で把握することも重要である。

4.2.2 供試体採取

本工法に限らず、通常の施工現場では、定期的に圧縮強度供試体を採取し、その強度特性から品質を評価する手段がとられる。本工法では、第 2 章に示した比較的大型の型枠に吹付け材料を吹付けコアリングし、それを圧縮強度供試体として用いることが一般的である。しかしながら、本手段は、実現場においては、供試体の重量が大きいことやコアリングなど効率性に劣ることがデメリットである。したがって、第 3 章で評価したように比較的小さい型枠、例えば 40×40×160mm 型枠などで供試体を採取することで施工量の多い場合などの施工管理として有効であるものとする。ただし、実現場では、大型の型枠での供試体採取が定期的に実施されることが望ましい。

4.2.3 吹付け直後の品質確認

本工法では、練上がり直後の材料が適切な混合割合で混合されていることを確認することが困難である。その一つの手段として、4.2.1 に示したような各機器の供給状況の事前確認を提案していた。一方で、第 3 章で示した試験結果から、練上がり直後の空気量が大きいと圧縮強度に影響を与えることが確認されたため、水中置換などの方法により、練上がり直後の空気量を把握することは品質を確保するために有効な手段であるものとする。また、電子レンジなどを用いて混合水量を間接的に把握する手段もその一つであるものとする。

第5章 乾式吹付け工法における実施工例

5.1 棧橋大規模断面修復工事への適用事例

5.1.1 断面修復工法として乾式吹付け工法が適用された経緯

本施工事例は、沖縄中部に位置する石川火力発電所における揚炭棧橋上部工での施工事例である。本構造物は1986年に稼働が開始され、約30年間過酷な塩害環境下に曝された結果、2014年度に劣化損傷の激しい箇所を断面修復工法および電気防食工法で補修する計画となった。従来は、劣化損傷が大規模な部材では、断面修復工法として湿式工法を使用されるケースが多いが、本構造物の特徴として断面修復量が多いこと、施工工期が限られていることなどの課題があった。そこで、湿式吹付け工法と比較して圧倒的に圧送距離長く、材料供給プラントの移動を少なく出来ること、1回の吹付け厚さが大きく施工速度が速いことなどの特徴を有する乾式吹付け工法が採用となった。また、海上作業であるため、吹付け時の粉じん量を出来る限り低減する必要があった。そこで、従来の乾式吹付け工法で課題となっていた粉じん飛散の問題を解決した「リフレドライショット工法」が環境面から採用される要因の一つとなった。

構造物位置図を図-5.1.1に、棧橋詳細図を図-5.1.2に、揚炭棧橋全景を写真-5.1.1に示す。



図-5.1.1 構造物位置図

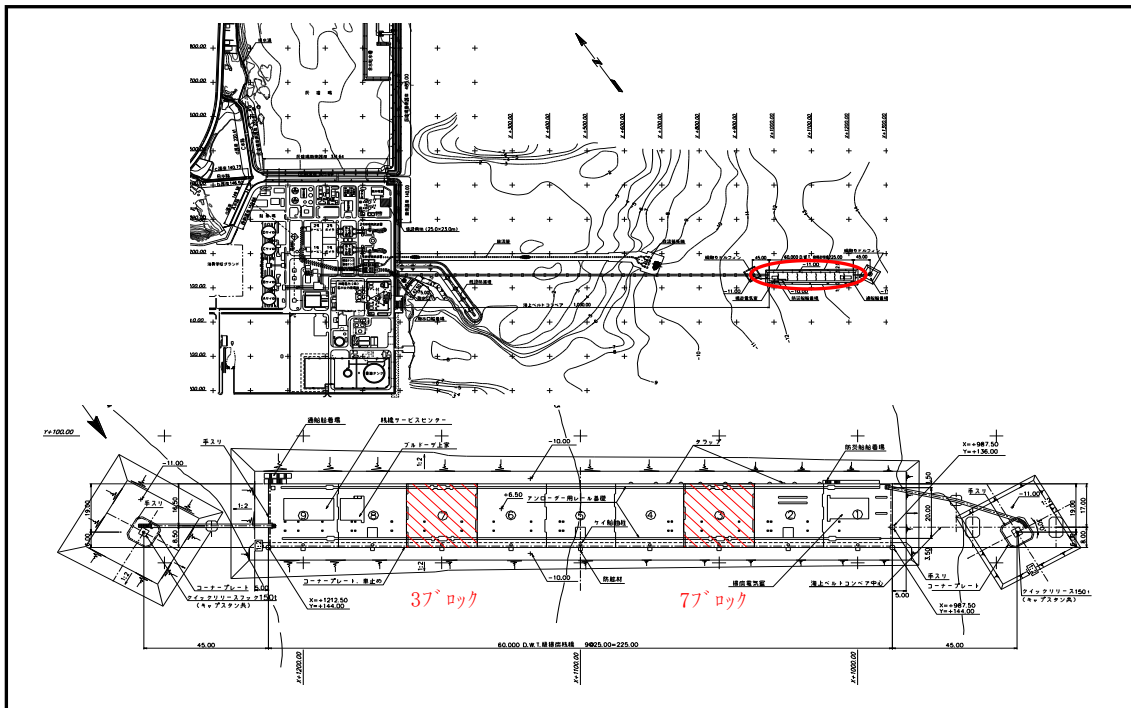


図-5.1.2 揚炭詳細図



写真-5.1.1 揚炭栈橋全景

5.1.2 工事概要

工事名：石川火力発電所 揚炭栈橋上部補修工事

施工場所：沖縄県うるま市石川赤崎 3-4-1

工 期：自)平成26年9月10日

至)平成27年8月20日

発注者：電源開発(株) 石川石炭火力発電所

請負者：東亜建設工業(株) 九州支店 沖縄営業所

専業者：(株)エステック

5.1.3 工事内容

補修箇所：3ブロック・7ブロック

調査工：1式

ハツリ：当初 110m³ 実施 130m³

鉄筋補強工 (A)：当初 100 kg 実施 193 kg (フレア溶接)

鉄筋補強工 (B)：当初 0 kg 実施 3,358 kg (セメフォースアンカー)

断面修復工：当初 110m³ 実施 130m³ (乾式吹付け工法：リフレドライショット工法)

塩害対策工：当初 0m² 実施 141m²

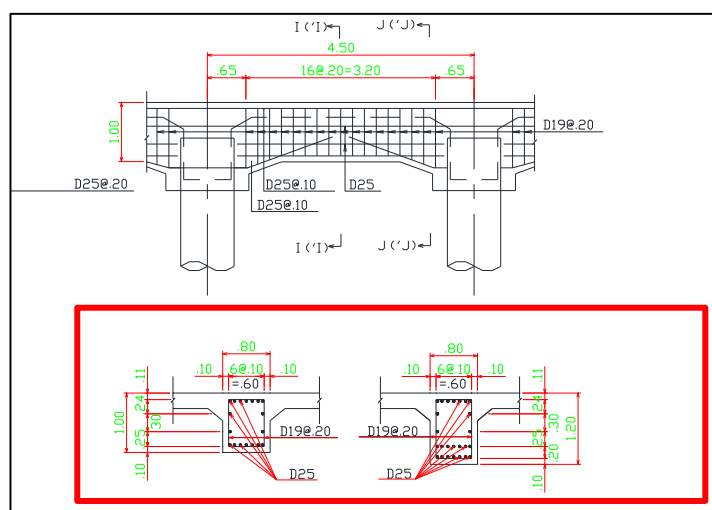
5.1.4 工事開始前事前確認試験

本工事では、工事開始前にリフレドライショット工法による施工が適切な品質、施工性等の規格を満足するか実構造物のモデル試験体型枠を作製し、実際に吹付け試験を行うことで確認した。事前確認の試験項目と試験方法を表-5.1.1に示す。

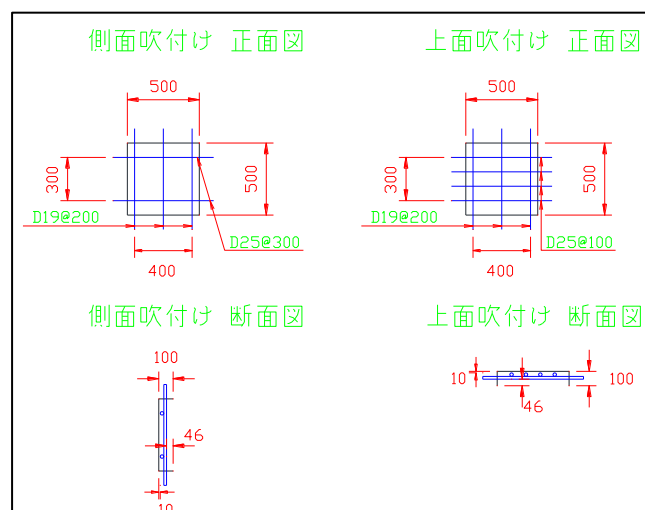
表-5.1.1 事前確認試験項目の一覧

試験項目	試 験 方 法
フレッシュ性状	吹付け材料の目視観察
モルタル圧送性	モルタル温度測定、吹付けガン先の目視観察
吹付け性	吹付け時に鉄筋裏への充填性を目視観察
仕上り性	コテ仕上げ性の評価
圧縮強度	材齢7日及び28日 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ コア採取、 40×40×160mm 供試体吹付け、100×100×400mm 供試体吹付け
曲げ強度	材齢7日及び28日 40×40×160mm 供試体吹付け
付着強度	材齢28日 40×40mm
乾燥収縮量	材齢28日 100×100×400mm
充填性	鉄筋部と無筋部から $\phi 50 \times 100\text{mm}$ コア採取

モデル試験体は、図－5.1.3 に示す実構造物の鉄筋径と配筋間隔を模擬した。具体的には、側面吹き付け型枠として $500 \times 500 \times 100\text{mm}$ の型枠内に D25 を 300mm 間隔で 2 本、D19 を 200mm 間隔で 3 本配置したもの、上面吹き付け型枠として、 $500 \times 500 \times 100\text{mm}$ の型枠内に D25 を 100mm 間隔で 4 本、D19 を 200mm 間隔で 3 本配置した型枠に吹き付けを行った。図－5.1.4 には各型枠の概要図、写真－5.2.2 および写真－5.1.3 には各型枠の外観状況を示す。使用材料は、セメント、特殊混和材、骨材があらかじめ工場で混合されたプレミックス材料であるリフレドライショットを用いた。なお、この材料は、混練水としてアクリル系のポリマーエマルジョンを用いるため、混合された補修材料はポリマーセメントモルタルとなる。表－5.1.2 に立米配合を示す。



図－5.1.3 実構造物の梁断面図



図－5.1.4 各型枠の概要図



写真－5. 1. 2 側面吹付け型枠の外観

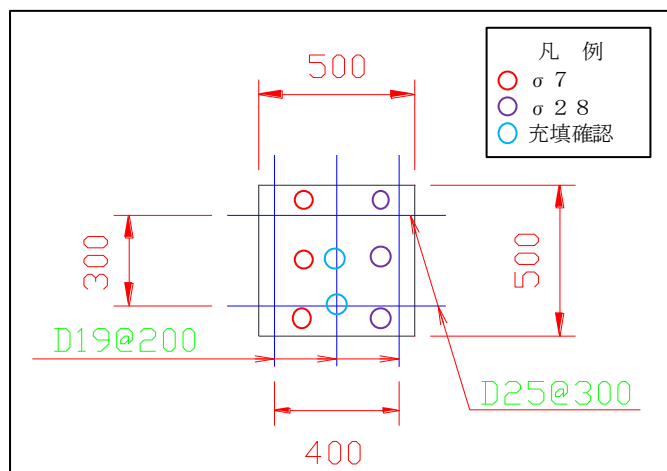


写真－5. 1. 3 上面吹付け型枠の外観

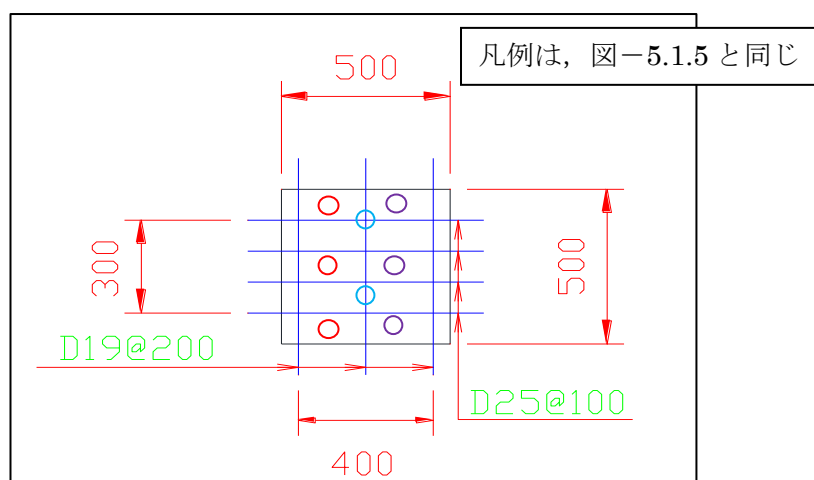
表－5. 1. 2 使用材料の立米配合

リフレドライショット (粉体)	アクリル系 ポリマーエマルジョン	水
1925kg	107kg	168kg

事前確認試験では、先に示した型枠に材料を吹付けた後、コア採取することで材齢 7, 28 日の圧縮強度試験および鉄筋裏側への充填確認試験を実施した。図－5.1.5 および図－5.1.6 には、それぞれ側面吹付け供試体と上面吹付け供試体のコア採取位置を示す。



図－5.1.5 側面吹付け供試体のコア採取位置



図－5.1.6 上面吹付け供試体のコア採取位置

また、写真－5.1.4には上面吹付け型枠への吹付け状況、写真－5.1.5には $40\times 40\times 160\text{mm}$ の圧縮強度用供試体への吹付け状況、写真－5.1.6には $100\times 100\times 400\text{mm}$ 供試体の採取状況、写真－5.1.7には上面付着試験体採取状況をそれぞれ示す。



写真－5.1.4 上面吹付け状況



写真－5.1.5 圧縮試験用型枠への吹付け
($40\times 40\times 160\text{mm}$)



写真－5.1.6 供試体採取完了
($100\times 100\times 400\text{mm}$)



写真－5.1.7 上面付着供試体採取完了

表－5.1.3には、試験結果および試験規格値を示す。本事前確認の結果、各試験項目は、試験規格値を十分に満足することが確認された。写真－5.1.8 ～ 写真－5.1.11には、コア採取により充填確認を行った結果を示す。この結果、側面および上面へ乾式吹付けされた材料が鉄筋背面および無筋部に十分に充填されていることが確認された。

表－5.1.3 試験結果および試験規格値

試験項目	試験結果	規格値
フレッシュ性状	良好	－
モルタル圧送性	良好	－
吹付け性	良好	－
仕上り性	良好	－
圧縮強度	φ 50×100mm コア 側面 7日 49.1N/mm ² 28日 59.4N/mm ² 上 面 7日 49.1N/mm ² 28日 59.6N/mm ²	30.0N/mm ² 以上
	40×40×160mm 供試体 7日 55.7N/mm ² 28日 65.3N/mm ²	
	100×100×400mm 供試体 7日 45.0N/mm ² 28日 52.4N/mm ²	
曲げ強度	40×40×160mm 供試体 7日 10.8N/mm ² 28日 12.5N/mm ²	3.0N/mm ² 以上
	100×100×400mm 供試体 7日 9.5N/mm ² 28日 11.9N/mm ²	
付着強度	40×40mm 付着強度試験 3個の平均 3.38N/mm ²	1.5N/mm ² 以上
乾燥収縮量	100×100×400mm 供試体 0.015%	0.2%以下
充填性	良好（側面・上面）	－



写真－5.1.8 上面吹付け鉄筋背面コア



写真－5.1.9 上面吹付け無筋コア



写真－5.1.10 側面吹付け鉄筋背面コア



写真－5.1.11 側面吹付け無筋コア

5.1.5 本施工内容

(1) 劣化部調査

施工前に各ブロックの全部材について目視調査及び打音調査を行い、部材毎の劣化度評価基準を設定した。補修の対象範囲は、以下のように設定した。梁・桁・杭頭部では電気防食工に支障を与える浮き・剥離・剥落等の劣化が生じている範囲、スラブでは4段階の劣化評価のうち最も劣化度が大きいa評価の部材とした。ハツリ深さの設定は、コンクリート面から最外配置鉄筋の裏側までとし、最外配置鉄筋の奥側の鉄筋に腐食が見られる場合は奥側鉄筋の裏側までのコンクリートまでハツリ取るものとした。

主桁・梁・桁・杭部の補修については、栈橋の荷重分散の為、千鳥配列でハツリ作業、断面修復作業を行った。梁・桁・杭頭部の施工順序は表-5.1.4、図-5.1.7で行うものとし、断面修復完了後に次の区画のハツリ作業を実施するものとした。

主桁の施工では、梁・桁・杭頭部の断面修復終了後にハツリ作業を開始するものとし、施工順序は、表-5.1.5および図-5.1.8で行うこととした。

表-5.1.4 梁・桁・杭部施工順序

工 種	区画 ①②③	区画 ①②③	区画 ④⑤⑥	区画 ④⑤⑥	区画 ①②③	区画 ①②③	区画 ④⑤⑥	区画 ④⑤⑥
はつり								
断面修復								

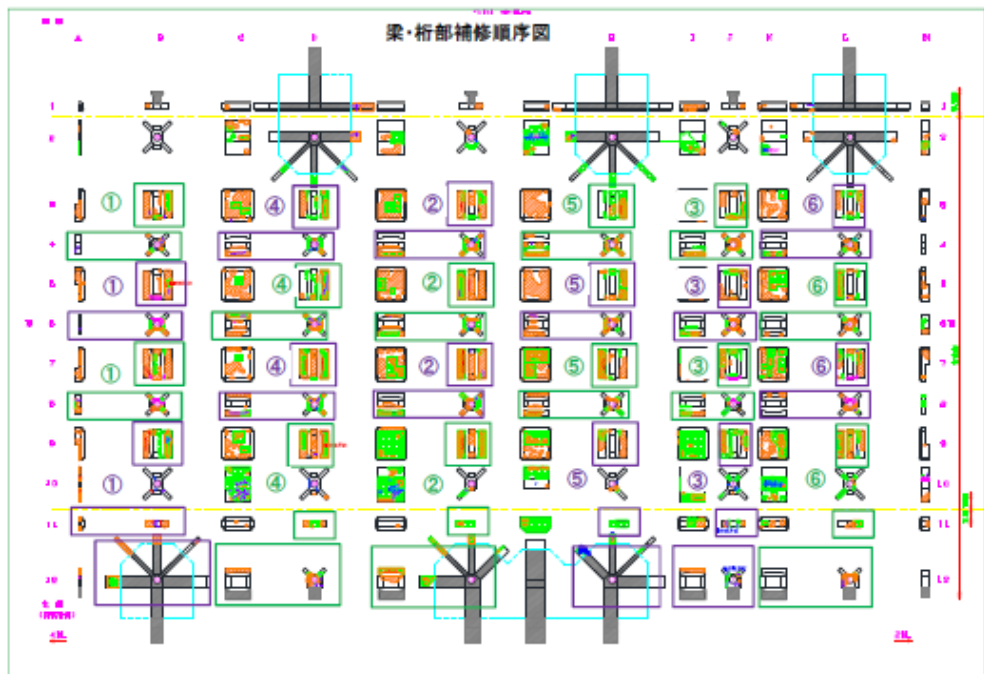
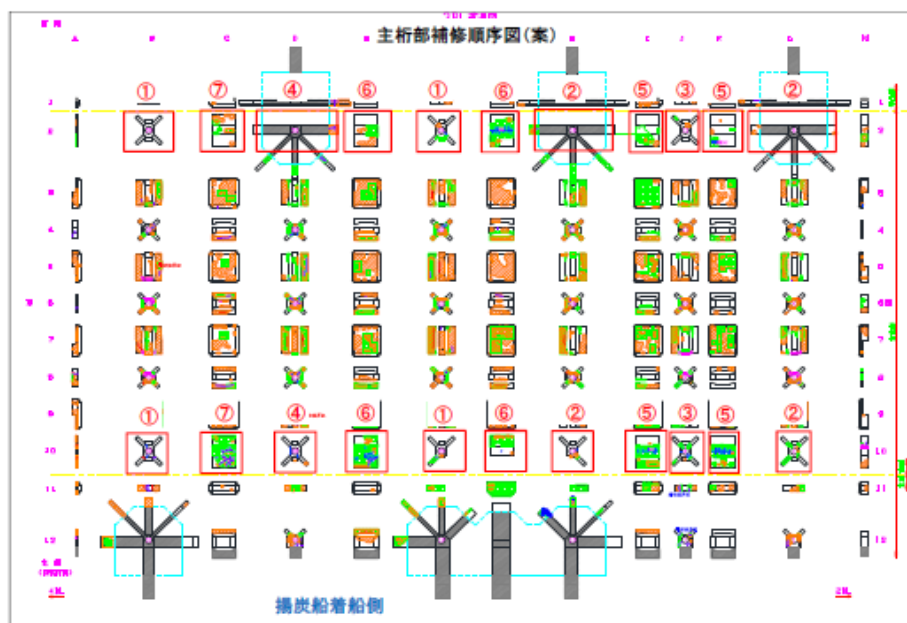


図-5.1.7 梁・桁部施工順序位置

表－5.1.5 主桁部施工順序

工 種	区画 ①	区画 ②	区画 ③	区画 ④	区画 ⑤	区画 ⑥	区画 ⑦
はつり							
断面修復							



図－5.1.8 主桁部施工順序位置

(2) ハツリ・ケレン・補強筋設置

写真－5.1.12 および写真－5.1.13 には、それぞれ梁のハツリ状況とスラブのハツリ状況を示す。施工では、露出した鉄筋に関してはサンダーおよび高速多針タガネを用いて第 3 種ケレンを行い、浮き錆を除去した。鉄筋のケレン状況を写真－5.1.14 および写真－5.1.15 に示す。



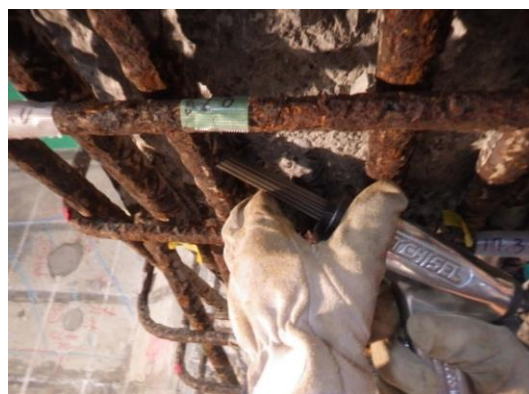
写真－5.1.12 梁部ハツリ状況



写真－5.1.13 スラブ免ハツリ状況



写真－5.1.14 サンダーによる鉄筋ケレン



写真－5.1.15 高速多針タガネによる鉄筋ケレン

鉄筋ケレン後、鉄筋径の確認を行った。鉄筋の残存面積が90%を下回る部分を確認した場合は、監督員に報告するとともに鉄筋補強工を行うものとした。鉄筋補強工として溶接による補強とあと施工アンカーによる補強を実施した。施工状況を写真－5.1.16 と写真－5.1.17 に示す。



写真－5.1.16 溶接による鉄筋補強工



写真－5.1.17 あと施工アンカー鉄筋補強工

(3) 乾式吹付け工

当初は、海上の台船にプラント及び材料を設置し施工していたが、強風等の影響により波が荒れることが予想された為、プラント及び材料を栈橋上に設置し作業が中断すること無いようにした。栈橋上のプラントを写真－5.1.18 と写真－5.1.19 に示す。

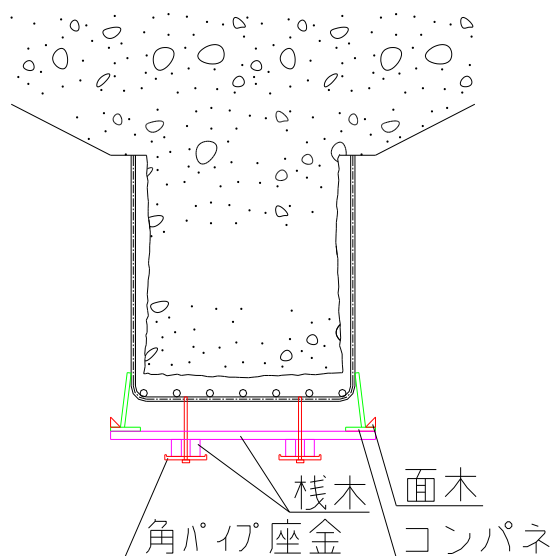


写真－5.1.18 プラントおよび材料



写真－5.1.19 プラント施工状況

また、施工開始前に、ハツリ数量及び鉄筋補強数量の大幅増が工期に影響を及ぼすことがあると予想された。そこで、乾式吹付での施工効率のさらなる向上を目的として、躯体コンクリートへ設置する型枠考案し、これを適用した。図－5.1.9、写真－5.1.20、および写真－5.1.21 には、考案した型枠の設置状況を示す。この型枠は、図－5.1.10 と図－5.1.11 に示すように、従来の型枠を用いた施工方法と比較して施工サイクルが短くなることを特徴としている。



図－5.1.10 考案した型枠の断面図



写真－5. 1. 20 考案した型枠の取付全景



写真－5. 1. 21 考案した型枠の断面

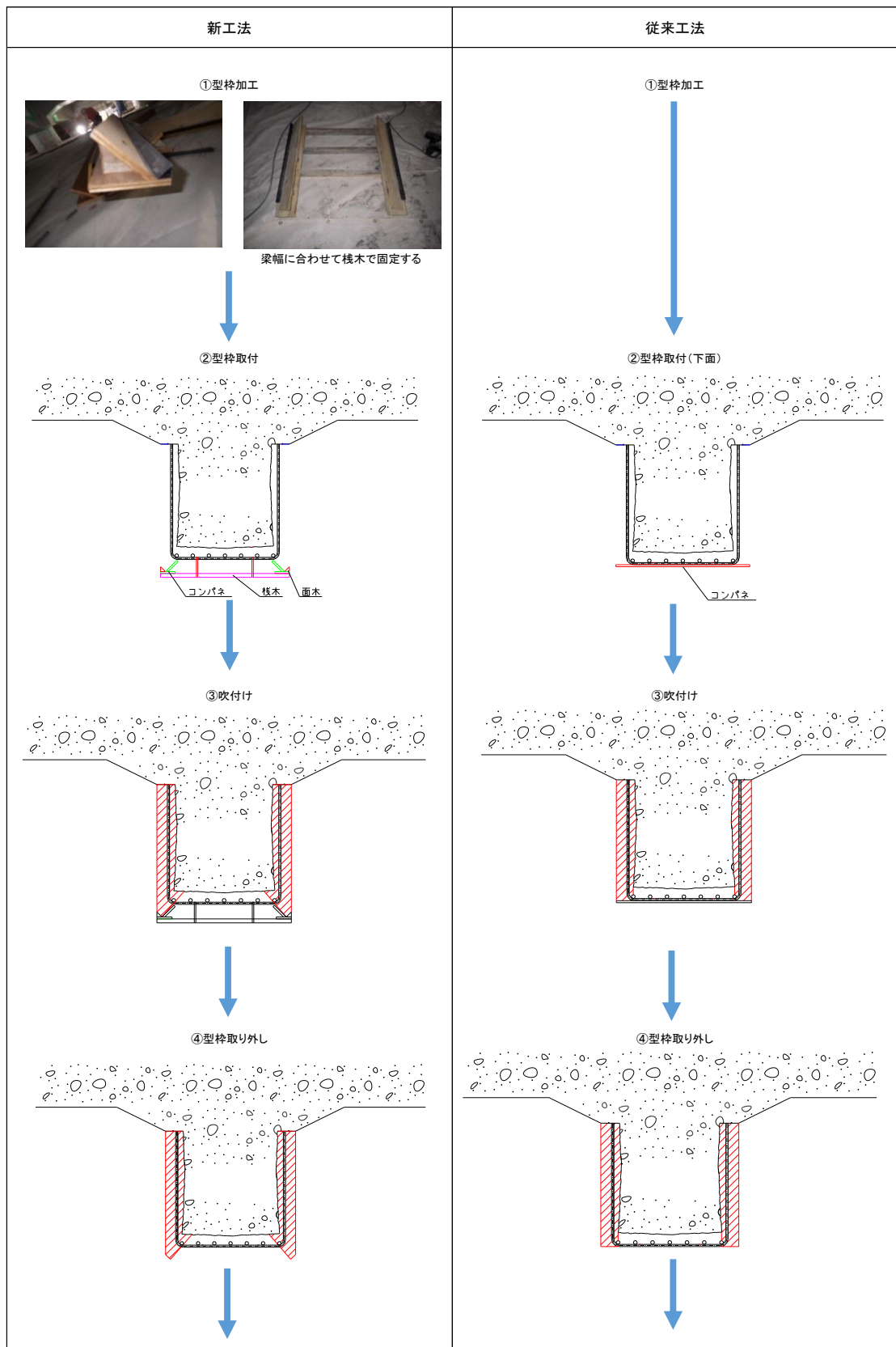
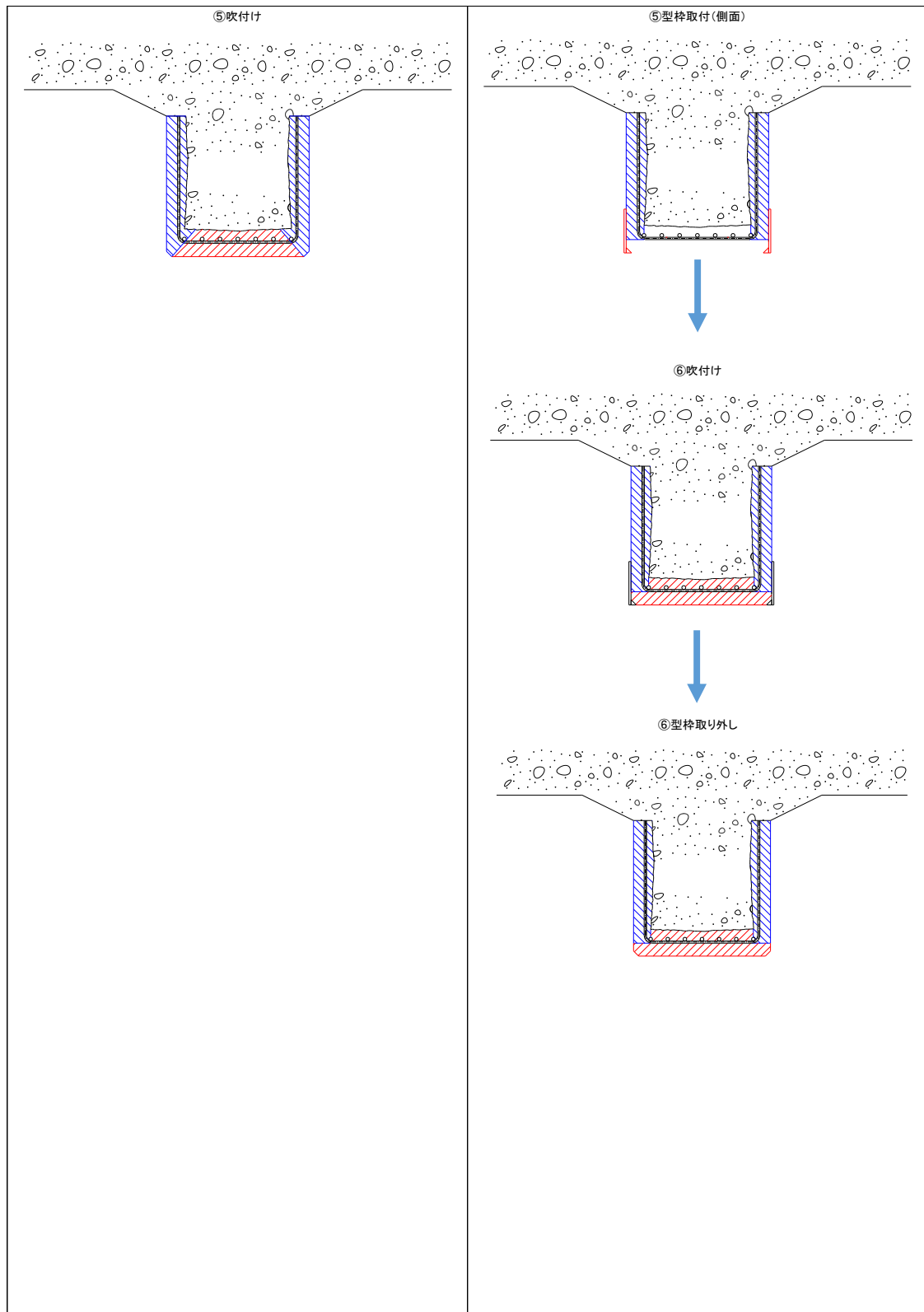


図-5.1.10 従来型枠による施工法との比較 その1



図－5.1.11 従来型枠による施工法との比較 その2

写真－5.1.22 および写真－5.1.23 には、それぞれ梁側面の吹付状況とモルタル硬化後の型枠脱型後の梁下面からの状況を示す。今回考案した型枠の最大の特徴は、梁側面の吹付けを行った後、設置した型枠を取り除くことにより、吹き付けられて硬化した側面のモルタル面が下面から吹付けする際の型枠替わりとなり、施工の効率化を図れることにある。

また、考案した型枠は、主筋を覆うように設置するため、側面の吹き付け時に吹き付けられたモルタルやリバウンド材が付着しにくい構造となる。したがって、次工程である下面からの吹付けの際は、吹付け材料が主筋裏側へスムーズに充填性することになる。写真－5.1.24 には、側面を吹きつけた後の主筋の状況を示す。

写真－5.1.25 には、梁下面の吹付状況を示す。また、写真－5.1.26 と写真－5.1.27 には、側面の吹付け完了および梁下面の仕上がり状況を示す。この結果からも、本型枠をすることで、梁側面に打継部を設ける必要がなくなるため、側面の美観が良好になる効果も得ることができた。



写真－5.1.22 梁側面の吹付け状況



写真－5.1.23 梁側面型枠除去後の梁下面



写真－5.1.24 側面吹付け後の主筋状況



写真－5.1.25 梁下面の吹付け状況



写真－5. 1. 26 側面仕上り状況



写真－5. 1. 26 梁下面仕上り状況

(4) 塩害対策工

スラブの断面修復の内部鉄筋には，既存コンクリートの鉄筋腐食抑制をするため，乾式吹付け施工による修復前に亜硝酸リチウム系の防錆剤「リフレα40」を塗布し，その後，亜硝酸リチウム混和ポリマーセメントモルタル「α防錆ペースト」を既設コンクリートハツリ面と鉄筋に塗布した。これら状況を写真－5. 1. 28 ～ 写真－5. 1. 29 に示す。なお，写真－5. 1. 30 ～ 写真－5. 1. 33 には乾式吹付け材の仕上げ状況と施工完了状況を示す。



写真－5. 1. 28 亜硝酸リチウム防錆剤塗布



写真－5. 1. 29 亜硝酸リチウム入り
セメントモルタルの塗布



写真－5. 1. 30 スラブ面への吹付け



写真－5. 1. 31 スラブ面への仕上げ



写真-5.1.32 スラブ面完了 1



写真-5.1.32 スラブ面完了 2

(5) 品質管理

今回の補修工事では、吹きつけ材料の現場品質管理として以下の項目に関して実施した。

管理項目：供試体の一軸圧縮強度試験

供試体寸法： $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ を半割して $40 \times 40 \times 80\text{mm}$

材 齢：28 日

養生方法：気中密閉（ラップ）

採取方法：1 日に 1 回 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ 供試体を 3 本現場で採取

試験数：6 個/日

管理値： 30N/mm^2 以上

供試体寸法補正：幅/高さ=1/1 のため 1/2 の換算として、0.87 を乗じた値に補正

品質管理における圧縮試験結果は、工期内で採取した 85 日分全ての供試体で管理値である 30N/mm^2 以上を満足していた。図-5.1.12 には、1 日ごとの圧縮強度の平均値をその頻度として示す。この結果から、圧縮強度は、概ね $45 \sim 49\text{N/mm}^2$ を中心として 35N/mm^2 以上の結果を有したことが確認された。

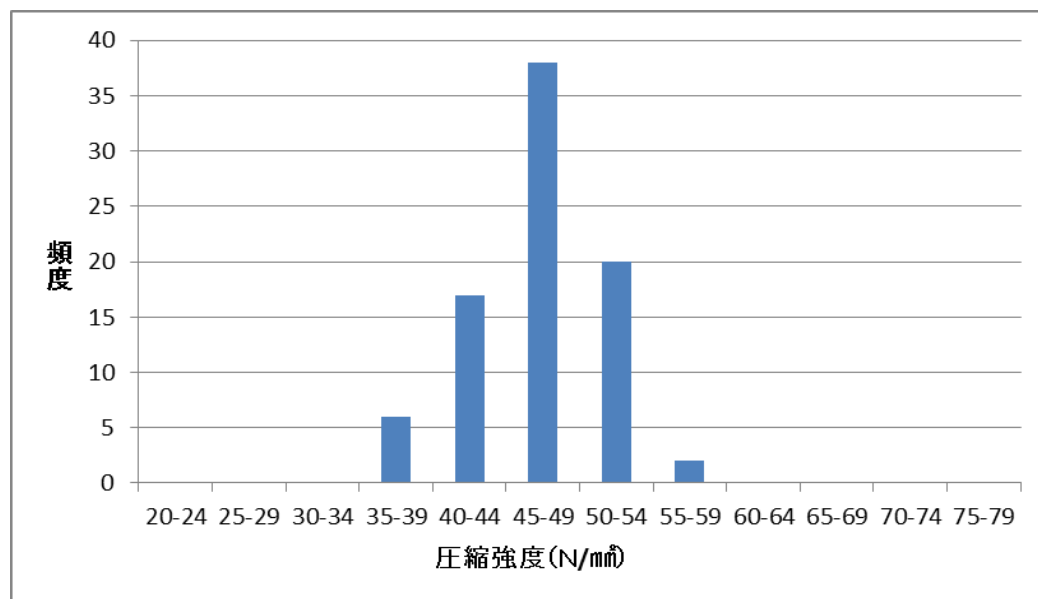


図-5.1.12 1 日ごとの圧縮強度の平均値とその頻度

5.1.6 施工後の考察

本工事ではプラント位置の固定やプラントから吹付箇所までの距離，断面修復厚さが厚い等の厳しい条件が重なったが，リフレドライショットによる乾式吹付け工法の吹付量・圧送距離・吹付厚さ等の施工能力が優れており，特に問題もなく無事工事を終了することが出来た。

多くの台風が上陸や接近する沖縄での海上施工は，工期との戦いでもある。工期を短縮できる当工法の優位性を活かせるべく，今後も様々な改善を行っていきたいと考える。

最後に，断面修復後に塩害対策として施工された電気防食工（チタンリボンメッシュ方式）の施工完了写真を写真－5.1.34 に示した。



写真－5.1.34 電気防食工法完了後の全景

5.2 下水道施設への適用事例

5.2.1 下水道施設へ乾式吹付け工法が適用された経緯

日本の下水処理場は国土交通省の資料によれば昭和 40 年代から集中的に整備され、現在は 2000 を越える施設数となっている。今後、この処理場の多くは、急速に老朽化することが懸念されている。特に、建設初期に建造された処理場では建設から 30 年以上経過しているが、当初は硫酸腐食対策が十分に取られていなかったため、硫酸腐食による天井周辺部の劣化が著しい。

本劣化補修対象構造物は、汚泥貯留槽である。一方で、当施設は予備の汚泥貯留槽がないため、極力、早期に補修工事を完了させる必要があった。通常、汚泥貯留槽の劣化状況については供用上の理由から実際の硫酸腐食状況を正確に把握することは難しい。

本構造物における劣化詳細調査の結果、天井・梁部の断面修復厚さが約 60～90mm であることが確認され、その後の検証から、本補修工事では、天井面の補修を主とすることが計画された。したがって、補修工法への要求性能は、上面への吹付け施工性に優れた材料が求められた。また、本工事の防食仕様は、汚泥貯留槽であることから下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル（平成 19 年 7 月、日本下水道事業団）の腐食環境Ⅰ類、D 種（設計腐食環境：厳しい）に相当するものであったが、下地の断面修復材についても汚泥貯留槽という過酷な条件であることから、より耐硫酸性に優れた材料が望まれていた。

これらの条件を満たす材料として、高耐硫酸性に富む補修材料を乾式吹付け工法で施工する補修工法が採用された。

5.2.1 工事概要

工事名：古利根流域処理場汚泥貯留槽改築工事

所在地：埼玉県久喜市

工期：平成 24 年 1 月 15～31 日（施工日数 14 日間）

施主：埼玉県荒川左岸北部下水道事務所

施工部：濃縮汚泥貯留槽の天井及び梁部（6 格間、ハンチ有；図－5.2.1 参照）

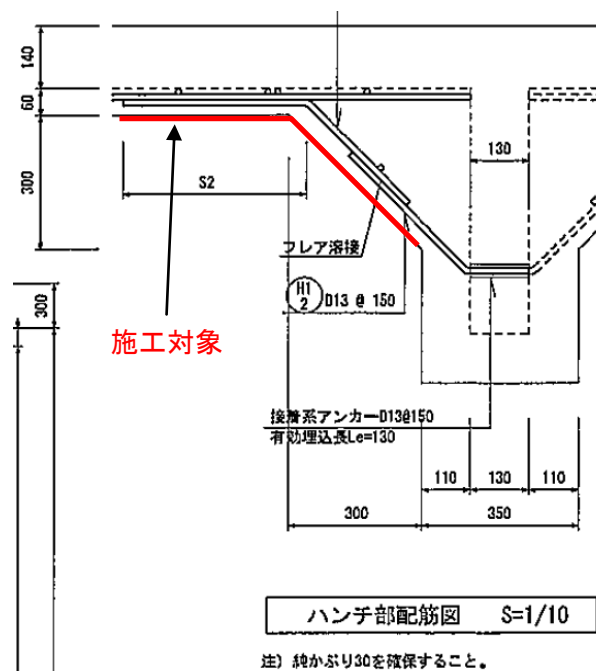
施工面積：223m²（天井 158m² 梁 65m²）

施工：株式会社星野組

使用材料：a) プライマー「リフレトリート」

b) 断面修復材「リフレドライショット（耐酸タイプ）」※1

※1 高耐硫酸性乾式吹付け工法（当工法は日本下水道事業団－東和耐火工業－住友大阪セメント(株)3 社による共同研究成果）



図ー5.2.1 施工対象部位の断面

5.2.2 補修工法の特徴

今回、適用した高耐酸性乾式吹付け工法の特徴は、以下である。

a) 厚付け性

プレミックスされたセメント粉体とポリマーエマルジョン添加の混合水からなる補修材料で、これを乾式吹付けの特長である、高圧で吹付けることによって湿式では到底実現できない

1層 100mm程度の厚付けが可能である。

b) 高耐硫酸性

使用材料は、日本下水道事業団、下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル（H24.4月）「断面修復用モルタル」及び「防食被覆層に用いる耐硫酸モルタル（C種）」、両方の規格適合品である。特に、硫酸浸漬試験では、最大 JIS モルタルの 4.5 倍程度の耐硫酸性を有した。

c) 長距離圧送性

最大 200～300mの圧送距離で施工可能

d) 低粉塵・低リバウンド

上述した各種材料とシステムのマッチングにより、従来の乾式吹付けと比較し大幅な低粉塵・低リバウンドである。

e) 安定した強度発現性

長期にわたり安定した強度発現性を有する。

5.2.3 実施工の概要

本施工では、以下の手順で施工を実施した。

a) プライマー塗布

断面修復材の吹付けに先立ち、既設コンクリート面（母材）にドライアウト防止のため、アクリル系のプライマーを $100\sim 200\text{g}/\text{m}^2$ 塗布した。

b) 乾式吹付け工

プライマーの指触乾燥後、高耐硫酸性モルタルを乾式吹付け工法により、断面修復厚さ 90mm を施工した。施工では、まず下地吹き約 $70\sim 75\text{mm}$ を実施した後、仕上げで吹き残りの $15\sim 20\text{mm}$ を吹付ける2層吹付けとした。また、吹付け状況により、翌日の打ち継ぎとなる面については、事前に a)と同様のプライマーを塗布し、層間での補修材料のドライアウト防止対策を行った。



写真-5.2.1 劣化部除去後の状況



写真-5.2.2 補強鉄筋の設置状況



写真－5. 2. 3 乾式吹付けシステム（プラント）



写真－5. 2. 4 乾式吹付け材料



写真－5. 2. 5 乾式吹付け状況

c) 養生

乾式吹付け施工完了後の表面は、初期乾燥によるひび割れの発生を防ぐためプライマーを $80\sim 100\text{g/m}^2$ 散布し被膜養生を実施した。



写真－5.2.4 補修完了状況

5.2.4 補修工事を終えて

今回、下水道施設に対する断面修復における補修工法として、乾式吹付け工法を適用した。この結果、本現場では、断面修復に必要である工期を3～4割短程度、短縮することが可能となり、乾式吹付けシステムの有効性を十分に発揮したものと考えている。乾式吹付け工法に必要とされる材料供給施設（プラント）は、比較的コンパクトであり、長距離の圧送性も有することも実施工で有効となる性能である。また、高耐硫酸性乾式吹付け材料は、通常の耐酸モルタルよりも、耐硫酸性に優れた材料であるため、本施設の長寿命化にも寄与できるものとする。

今後は、施工現場のニーズとして施工面での更なる施工効率UPおよび長寿命化を目標に劣化因子に対する浸入抵抗性の向上など、材料面からの改良も視野にしたいと考える。

第6章 乾式吹付け工法の今後の展望と課題

本委員会では、前章までに乾式吹付け工法の特徴、基本的な施工システム、使用材料、品質検査、施工管理について、これまでの資料の整理と実証試験を行い、これらをベースとし実現場での品質検査・施工管理方法の提案を行った。また、最近の乾式吹付け工法の動向として、乾式吹付け工法が適用された事例についても紹介した。本章では、これらを元にして乾式吹付け工法の今後の展望と課題に関して取りまとめることとした。まず、乾式吹付け工法の特長を整理する。

～ 特 長 ～

- ・長距離圧送性が可能である（200～300m 程度）
- ・吹付け 1 回の施工厚みが大きい（100mm 以上）
- ・吹付け機・マテリアルホース（材料圧送ホース）の清掃が容易であり洗浄水を必要としない。
- ・マテリアルホース内の材料ロスが殆どない。
- ・高温環境下の施工でもマテリアルホース内は、粉体材料が通過するのみであるため、湿式工法と比較して材料の硬化（こわばり）の影響を受けにくく、施工時のホース閉塞リスクが少ない。
- ・垂直にマテリアルホースを上げる必要のある高所補修にも適用可能である。

これら特長は、コンクリート構造物の補修・補強対策として断面修復を実施する場合の施工期間の短縮、現場作業員の労働力の低減、プラント移動工程の低減などの効果に十分な能力を発揮するものと考えられる。また、1 回の吹付けで施工厚さが大きいことから大断面修復には、最適であるものと考えられる。したがって、補修・補強を必要とされる以下のような構造物には、十分に適用可能である。

- ・山岳トンネル内の覆工コンクリート補修
- ・道路橋・鉄道橋・ボックスカルバート・水路などのコンクリート構造物
- ・栈橋下面などの港湾構造物
- ・下水道施設 など

このように、乾式吹付け工法が適用可能な構造物は、限定的なものではなく、一般的な補修対象構造物である。したがって、今後の展望としては、限られた範囲での適用ではなく、幅広い補修対策における普及である。一方で、吹付け機、ノズルなどの吹付けシステムがあれば、現在存在する全ての補修材料（湿式材料）を乾式吹付け工法として吹付けることが可能であるとは限らない。本報告でも述べたように、乾式吹付け工法では、粉体材

料を供給する装置と混合装置にあたるノズル形状が使用する粉体材料とマッチングすることが非常に重要である。言い換えると、乾式吹付け工法により吹付けられる材料は、ノズル内で十分に混合され、補修個所に吹付けられた後に要求性能を十分に発揮しなくてはならない。したがって、あらゆる構造物で乾式吹付け工法による補修が普及するためには、各種劣化機構と乾式吹付けシステムにマッチした材料の開発が重要である。

加えて、乾式吹付け工法の今後の普及にあたり、我々が考えなくてはならない課題は、以下のようなことである。

～ 課題 ～

- ・更なる精度向上を目指した管理手段の確立
 - ⇒ 本報告書では、品質検査・施工管理に関する提案を行うことが出来た。しかし、更に簡便で確実な管理手段の確立が普及に対して大きな影響を及ぼす。
- ・狭い作業空間における吹付け方法の確立
 - ⇒ ノズル先端からの吹付け距離が近すぎた場合、吹付けられた材料が後から来る圧縮空気で吹き飛ばされる。これらを如何に回避して、補修対象に吹付け材料を塗布することが出来るかが、普及範囲を大きくするものである。
- ・ノズルマンの育成
 - ⇒ 水量管理や材料の吐出管理が出来たとしても、最終的には、実際に施工を行うノズルマンの育成が重要である。これら育成では、ノズルマン検定試験など少なくとも施工システムを提供する側で十分な教育がなされるべきである。

今後は、これら課題を一つずつクリアすることで、乾式吹付け工法そのものの信頼性の向上とその普及への近道になるものと考えている。本研究成果が、乾式吹付け工法が補修・補強対策の手段として十分にその機能を発揮するための一助となれば幸いである。