

論文 ポリマーセメントモルタル吹付け工法に関する基礎的研究

渡辺裕一^{*1}・馬場正光^{*2}・小玉克巳^{*3}・斎藤恵二^{*4}

要旨：ポリマーセメントモルタルによる断面修復等の補修・補強工事では左官による作業が主流である。そこで本研究では一般的には左官作業で使用されることの多いポリマーセメントモルタルを改良し、この種ポリマーセメントモルタルを吹付けで使用する場合の強度性状及び吹付け性状について検討を行った。今回の研究結果では、吹付けによる場合の強度性状及び密度は、吹付け時のエア圧力、モルタル吐出量、吹付け距離により変化し、適切な吹付け圧力とモルタル吐出量で吹付けることで高密度、高付着強度かつ低ロス率になり、左官作業で使用する場合より高品質が得られることが明らかになった。

キーワード：吹付け、ポリマーセメントモルタル、断面修復、補修・補強

1. はじめに

メンテナンスフリーと考えられてきた鉄筋コンクリート構造物（以下RC構造物と表記）も塩害や中性化、あるいは道路橋床版で見られる交通荷重による疲労損傷等が生じ、多数のRC構造物で補修・補強の必要性が高まっている。そのような中で断面欠損箇所の補修や、補強を目的とした補修材料として、付着強度が高く、柔軟性に富むポリマーセメントモルタルが使用されることが多い。しかしこの材料は左官作業での使用が中心であるため、高齢化社会や熟練技術者不足や手作業による施工の長期化などの課題も残されている。上記問題に対し最近では、吹付けで断面修復等を行うことで省人化及び施工性の向上を図ることが必要となっている [1]。しかしながら、これら吹付けの大半は急結剤を併用して吹付けるため、ポリマーセメントモルタル本来が持つ柔軟性を失い、凍結融解作用や塩害または過酷な疲労環境下での使用に対しては、追従性を失い剥離等が懸念される [2]。そこで本研究では、急結剤を併用しない吹付けポリマーセメントモルタルの性状に関して、吹付け圧力（エア圧力）とモルタル吐出量等を変化させて吹付け後の密度、ロス、美観及び各強度性状等について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 吹付けシステム概要

吹付けシステム概要を図-1に示す。パッチ式ミキサとポンプが一体となった吹付け機で練混ぜを行い、スネーク式スクリューでモルタルを圧送する湿式型である。圧送されたモルタルはホース先端のスプレーガンまで送り

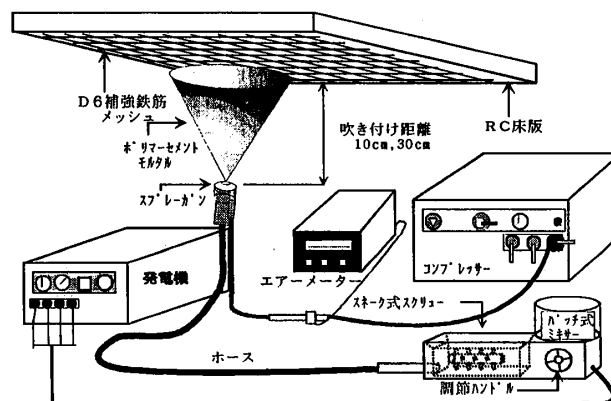


図-1 吹付けシステム概要

- * 1 奈良建設（株）技術研究所、（正会員）
- * 2 武蔵工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻
- * 3 武蔵工業大学教授 工学部土木工学、工博（正会員）
- * 4 三菱マテリアル（株）セメント研究所

出され、高圧力のエアと混合され霧状に吹付けることができる。従って急結剤の添加はない。吹付けエアの管理は、ホース途中に取り付けたタービン型エア流量計にて行い、温度及び圧力の補正を行い1atm,20℃に換算したノルマル流量 (Nm³) で管理を行った。表-1に使用した機器を示す。

2.2 使用材料

2.2-1 材料性能

表-2に使用したポリマーセメントモルタルの主要構成成分と配合を示す。表-3にはポンプから直接採取したポリマーセメントモルタルの単位容積質量、曲げ、付着などの強度特性と JIS R 5201 によるフローを示す。本材料は、急結性は示さずに天井面等へ厚付けできるように粘性が高い材料である。

2.3 実験方法

吹付け実験はエア吐出量、モルタル吐出量、吹付け距離を表-4に示す組み合わせ (27ケース) で行った。エア吐出量及びモルタル吐出量の条件は、どちらも最大能力値 (例えばエアのMax吐出量: 48Nm³/h、モルタル吐出量のMax: 140g/s)、3/4Max、1/2Max の場合として決定した。練混ぜは表-2に示す配合で行い、吐出時のモルタル温度が20℃前後になるように水温を調整して行った。

(1) 吹付け時のロス率

今回測定したロス率は、コンクリート板に対して各吹付け条件の下で上向き吹付けを行い、コンクリート板に付着しなかったものをロス率とし、リバウンドによるロス率だけを示すものではない。吹付けは乾燥状態のコンクリート板に所定時間の吹付けを行った後、モルタルの付着したコンクリート重量を計量し、所定時間内のモルタル吐出重量と比較することで検討した [3]。

(2) 吹付け後の単位容積質量

吹付け後の単位容積質量は硬化体の密実性の目安になり、かつ水密性の評価判断にもなる。試験はコンクリート板へ吹付けたモルタルの硬化後 (28日後) に10cm×3cmの形状で切出し、その試験片にて単位容積質量の測定を行った。

(3) モルタルの強度性状

表-1 使用機器性能

機 器	能 力 (表 示)
コンプレッサー	60Nm ³ /h(ホースなし), 48Nm ³ /h(ホース接続時)
ポ ン プ	4.2l/min(ポリマーセメントモルタル)
ミキサ	80l (強制型モルタルミキサ)
エア流量計	ノルマル換算(1atm,20℃)

表-2 主要構成成分と配合

主 要 成 分	構成比	w/c
普通ポルトランドセメント	38%	45%
珪 砂	54%	
高性能減水剤 特殊繊維 保 水 剤	8%	
アクリル系パウダーポリマー		

表-3 単位容積質量、強度特性

練混ぜ温度 (℃)	単位容積質量 (kg/cm ³)	曲げ強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)
20	1.91	6.30	30.6
付着強度 (N/mm ²)	ヤング率 (×10 ⁴ N/mm ²)	モルタルスランプ(cm)	JIS R 5201 フロー値
2.55	1.37	3.6	155

表-4 吹付け条件

エア吐出量 (Nm ³ /h)	Max 48	3/4Max 36	1/2Max 24
モルタル吐出量 (g/s)	Max 140	3/4Max 85	1/2Max 70
吹付け距離 (cm)	10	30	50

表-5 吹付けケース

ケースNO.	エア吐出量 (Nm ³ /h)	モルタル吐出量 (g/s)	吹付け距離 (cm)
1	48	140	10
2	48	140	30
3	48	140	50
4	48	85	10
5	48	85	30
6	48	85	50
7	48	70	10
8	48	70	30
9	48	70	50
10	36	140	10
11	36	140	30
12	36	140	50
13	36	85	10
14	36	85	30
15	36	85	50
16	36	70	10
17	36	70	30
18	36	70	50
19	24	140	10
20	24	140	30
21	24	140	50
22	24	85	10
23	24	85	30
24	24	85	50
25	24	70	10
26	24	70	30
27	24	70	50

強度供試体の作製に対しては高密度が得られる吹付けパターンの1つ(48Nm³/h、140g/s、10cm)で行った。供試体は曲げ強度、圧縮強度については3連型枠を使用して4×4×16cmの供試体を下方向の吹付けで作製し、ヤング率に関してはφ10×20cmの型枠を用いて下方向の吹付けで作製した。付着強度試験用の供試体は30×30×7cmの高強度コンクリート板をディスクサンダーケレンした後、表面乾燥状態で上向き吹付けをした。曲げ・圧縮強度はJIS R 5201に、ヤング率はASTM C 469に準じ、付着強度は建研式で行った。

3. 実験結果

3.1 ロス率について

図-2～4に各吹付け条件における、各モルタル吐出量とエアータ出量及び吹付け距離の関係を示す。図-2はモルタル吐出量が140g/s(最大)の場合の吹付け距離によるエアータ出量とロス率の関係である。本実験で使用したモルタルは表-3に示すようにフロー値は155と小さい為、エアータ出量が24Nm³/h(1/2Max)では粒子は荒く、距離が50cmと離れている場合ではコンクリート板まで届かないものもあり、ロス率は20%と最も高い。しかしエアータ出量を増加させることで粒子は細粒化し、リバウンドロスが増加するものの、コンクリート板まで到達できずに落下するモルタルは減少しロス率は12%程度まで低下する。吹付け距離が10cmと極端に近い場合では、リバウンドによるロスやエアータによるモルタルの飛散が大きくエアータ出量に比例してロス率は大きくなる。また図-2と図-3を比較すると図-2のモルタル吐出量が140g/s(Max)の場合は、図-3、4の85g/sや70g/sに比べ全体的にロス率が高く(10%～23%)になっている。このモルタル吐出量140g/sでも吹付け距離を50cmでエアータ出量を増加させることや、吹付け距離を30cmとすることでロス率を低下させることが可能と判断できる。モルタル吐出量85g/sの場合、モルタル吐出量140g/sに比べ24Nm³/hにおいても粒子は細かく、30cmの距離であればコンクリート板に到達できずに落下するモルタルは減少し、かつリバウンドも少ないためにこの時のロス率は5%程度となっている。距離を10cmとした場合は、図-2と同様にエアータ出量の増加に伴いリバウンド量や飛散も増加し、ロス率は高くなる。モルタル吐出量70g/sの場合も、他のモルタル吐出量と同様な傾向を示しているものの、吹付け距離30cmにおいては図-3では5%程度のロス率も10%程度に増加している。このことからロス率を下げるには今回のエアータ出量の範囲では、吹付け距離を30cm～50cmにする必要があることがわかる。以上の結果から本研究で使用したポリマーセメントモルタルについては、モルタル吐出量85g/s及び140g/sの場合は吹付け距離30cmの時のロス率を低下させることができ、モルタル吐出量70g/sの時は吹付け距離50cmの時のロス率を最も低く

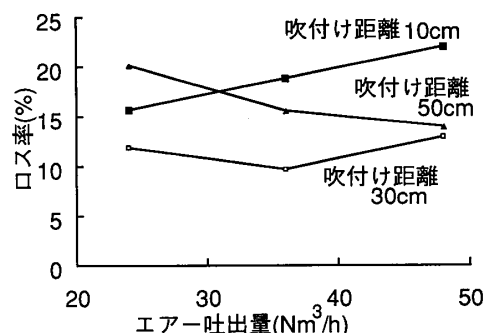


図-2 エアータ出量とロス率の関係
(モルタル吐出量 140g/s)

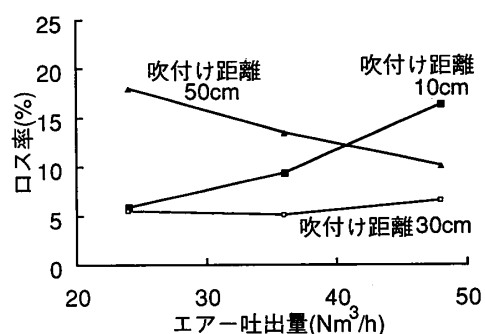


図-3 エアータ出量とロス率の関係
(モルタル吐出量 85g/s)

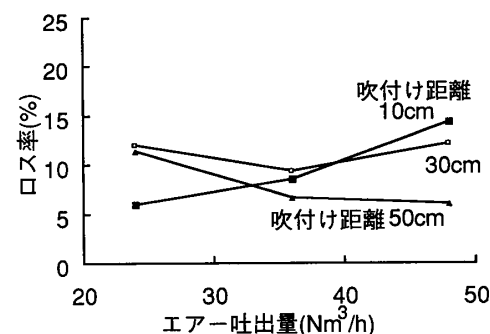


図-4 エアータ出量とロス率の関係
(モルタル吐出量 70g/s)

することが確認できた。

3.2 単位容積質量について

図-5～7に吹付け距離の違いによる各モルタル吐出量におけるエアータ出量と単位容積質量の関係を示す。各モルタル吐出量において、エアータ出量 $36\text{Nm}^3/\text{h}$ 、吹付け距離 30cm の時に単位容積質量が最大値となる。逆に各モルタル吐出量における単位容積質量の最小値はエアータ出量 $24\text{Nm}^3/\text{h}$ 、吹付け距離 10cm の場合である。全吹付けケースでの最小値は、図-6のエアータ出量 $24\text{Nm}^3/\text{h}$ で確認された $1.92\text{kg}/\text{cm}^3$ である。標準供試体の単位容積質量 $1.91\text{kg}/\text{cm}^3$ より高く密実になることがわかる。今回の吹付け条件で示された単位容積質量の範囲は $1.92\text{kg}/\text{cm}^3 \sim 2.03\text{kg}/\text{cm}^3$ と狭いことから実施工として考えるとエアータ出量、モルタル吐出量、吹付け距離による影響は小さいと言える。図-5はモルタル吐出量が $140\text{g}/\text{s}$ の場合である。距離が 30cm と 50cm で吹付けした供試体の切片の単位容積質量は、エアータ出量 $24\text{Nm}^3/\text{h}$ で $1.98\text{kg}/\text{cm}^3$ 前後を示し、 $36\text{Nm}^3/\text{h}$ では $2.03\text{kg}/\text{cm}^3$ と最大値となる。その後、吹付け圧力の増加に伴い単位容積質量は減少する。距離 10cm では異なった傾向を示し、吹付け圧力が増加するに従い単位容積質量も $1.93\text{kg}/\text{cm}^3$ から $2.02\text{kg}/\text{cm}^3$ まで増加する。このように 10cm からの吹付けだけが異なる関係を示す傾向は、モルタル吐出量の少ない $85\text{g}/\text{s}$ 、 $70\text{g}/\text{s}$ でも表われている。これは 10cm から吹付ける場合と 30cm 、 50cm から吹付ける場合とではモルタル層の形成状態が異なるためと考えられる。 30cm と 50cm から吹付ける場合は、今回のエアータ圧力の範囲であれば空気の乱れは少なくモルタルは層状に堆積し厚みを増していく。 10cm の場合は空気の乱れが著しく、モルタルは層状に形成されず飛散する。この層の形成構造の違いがモルタルの単位容積質量及びエアータ出量との関係に影響したと推定できる。この現象の解明については今後の課題と予定している。

3.3 強度特性について

表-6はポリマーセメントモルタル標準作製の強度と吹付け作製による材令7日の強度比較を示し、表-7は材令28日の強度比較を示す。材令7日と材令28日共に各強度において、吹付けによる強度が標準供試体の強度を上回ることが確認された。材令28日では平均的に各強度で吹付けによる強度が1.2倍程度高くなり、材令28日の付着強度試験結果においては母材破壊をしている。曲げ強度、圧縮強度が強度増加し、さらにヤング率も増加した理由は、単位容積質量で明らかなように高密度によるためと考えられる。付着強度が高くなった理由としては、吹付けによる方が均等で、かつ高い圧力で塗付けられるためと考えられる。

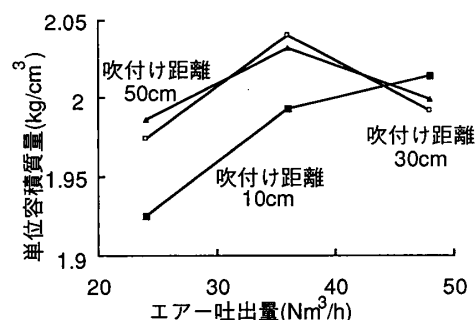


図-5 エアータ出量と単位容積質量の関係
(モルタル吐出量 $140\text{g}/\text{s}$)

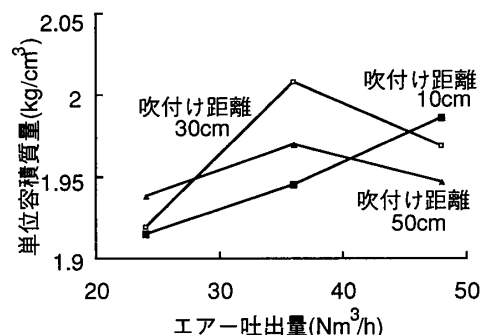


図-6 エアータ出量と単位容積質量の関係
(モルタル吐出量 $85\text{g}/\text{s}$)

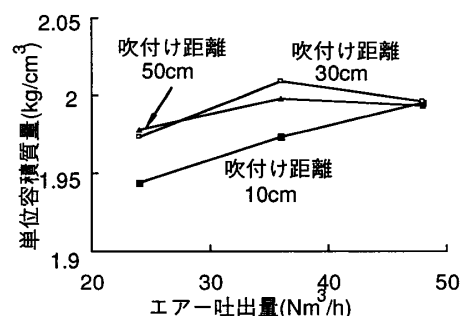


図-7 エアータ出量と単位容積質量の関係
(モルタル吐出量 $70\text{g}/\text{s}$)

表-6 標準作製と吹付作製の強度比較 (材令7日)

	曲げ強度 N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	付着強度 N/mm ²	ヤング率 ×10 ⁴ N/mm ²	単位容積質量 kg/cm ³
標準作製	5.46	18.7	2.12	8.04	1.93
吹付け作製	7.04(1.29)	25.3(1.35)	2.42(1.14)	9.94(1.23)	1.98

表-7 標準作製と吹付作製の強度比 (材令28日)

	曲げ強度 N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	付着強度 N/mm ²	ヤング率 ×10 ⁴ N/mm ²	単位容積質量 kg/cm ³
標準作製	8.42	30.0	2.29	9.41	1.91
吹付け作製	10.2(1.21)	38.6(1.29)	3.06(1.34)	11.4(1.21)	1.96

3.4 ノズル出口の噴流による力

ノズルから吹き出す噴流の力(圧力)を理論的に算出し、ロス率、単位容積質量、強度結果について検討を試みた。今回はモルタル粒子の影響を無視した空気のみによる力を検討した。

(1) ノズル出口の噴流による力

エアによる力は式(1)で表わされる[4]。

$$F = \rho Q V \quad (1)$$

ここで、Fは力[N]、 ρ は乾燥空気密度[kg/m³]、Qは1気圧20℃のエア流量[m³/s]、Vは流速[m/s]である。1気圧0℃時の乾燥空気密度は1.2932kg/m³であるから、t℃、P気圧時の乾燥空気密度 ρ は式(2)で求め、図-8に1気圧時の温度と乾燥空気密度の関係を示す。

$$\rho = 1.2932 / (1 + 0.00367t) \cdot P / 760 \quad (2)$$

ノズル出口でのエアの平均流速は式(3)で示される。

$$V = Q / A \quad (3)$$

ここで、Aはノズル出口の面積(=0.38×10⁻⁴cm²)である。図-9に1気圧20℃時のエア流速と流量の関係を示す。図-10に式(1)の関係からエア流量と力の関係を示した。

(2) ノズル出口から離れた位置の噴流による力
ノズルから放出されたエアは完全な乱流となり、周囲の空気と混合していくので乱流噴流における軸対称流として検討した。ノズル出口からxcm離れた位置で

のエア流速uを、運動量M=Q²/A、軸対称噴流の場合の渦動粘性係数 $\epsilon = 0.0161\sqrt{M}$ 、噴流の放出方向x、x軸と直交する直角座標rとして関数表示可能なGortlerの式より求める。

$$u = 3 / (8\pi) \cdot M / (\epsilon x) \cdot 1 / (1 + \zeta^2/4) \quad (4)$$

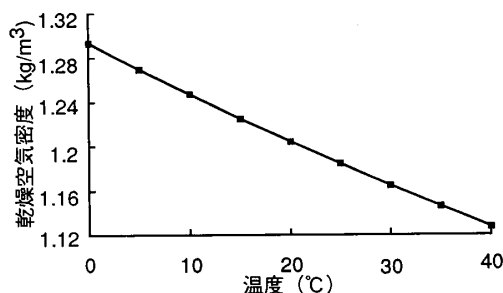


図-8 温度と乾燥空気密度

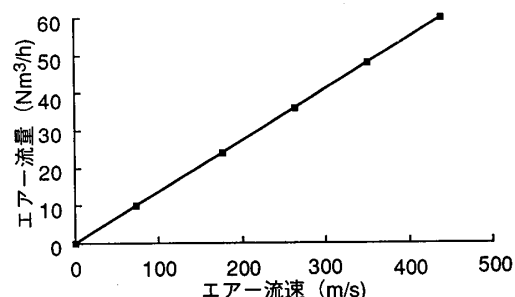


図-9 エア流速とエア流量

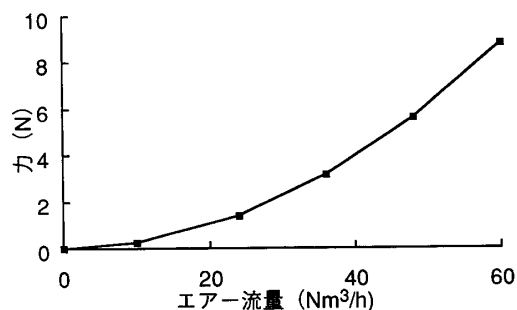


図-10 エア流量とノズル出口における力の関係

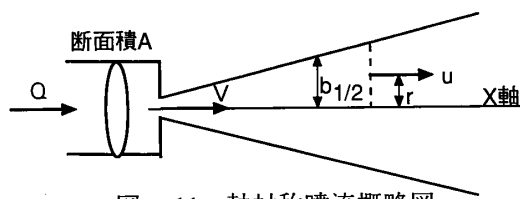


図-11 軸対称噴流概略図

$$\zeta = 1/4 \cdot \sqrt{(3M/\pi)} \cdot 1/\epsilon \cdot r/x \quad (5)$$

図-11に軸対称噴流の略図を示す。Gortlerによれば噴流幅は $b_{1/2}=0.085x$ と規定できる。図-12にはエア-流量毎のノズル出口から離れた距離 X cmとその位置での最大流速($r=0$)との関係を示す。また図-13は x 軸上におけるノズル出口からの距離 x cmと x 軸上の力との関係を示す。この図よりノズル位置10cmの時と30cmの時では、10cmの位置での力が30cm上の力の2倍程度あり、この力の差はエア-流量が多い程顕著に表われることを示している。また30cmと50cmでの力の差は小さく、エア-流量による差も小さくなることがわかる。これは単位容積質量の結果の項で、10cmでの単位容積質量の変化と30cm及び50cmにおける単位容積質量との変化が全く異なることから推察される。

3.5 表面の外観

写-1~3に表面の外観の代表を示す。写-1はロス率が最も低く、単位容積質量も $2.0\text{kg}/\text{cm}^3$ 以上であったエア-吐出量 $36\text{Nm}^3/\text{h}$ 、モルタル吐出量 $85\text{g}/\text{s}$ 、吹付け距離30cmの外観状況である。あばた及び粒子が小さく、凹凸の高低差も非常に小さくなっている。写-2はエア-吐出量を最大の $48\text{Nm}^3/\text{h}$ 、吹付け距離30cmの場合である。エア-の圧力が過大であるために付着したモルタルが押し退けられ高低差の目立つ規則正しい凹凸になり外観を損ねている。写-3はエア-吐出量 $24\text{Nm}^3/\text{h}$ 、モルタル吐出量 $140\text{g}/\text{s}$ の場合を示す。写-2と比べエア-吐出量が少ないためにモルタル粒子は大きく、かつ凹凸の大きさは不規則になっている。

4. まとめ

(1) エア-の吹付け圧とモルタル吐出量、吹付け距離のバランスをとることで、高粘性のポリマーセメントモルタルを密実で5%程度のロス率、かつ凹凸のない表面で吹付け可能であることがわかった。

参考文献

- [1] (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修事例集、PP.54~PP.58, PP.61~PP.62, PP.78~PP.80
- [2] 佐藤貢一、小玉克巳：FRPとポリマーモルタルで補修したRC梁の曲げ性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、PP.877~882、1991
- [3] (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート、PP.170~173、1996.2
- [4] 土木学会：水理公式集、PP.49~PP.52、1985

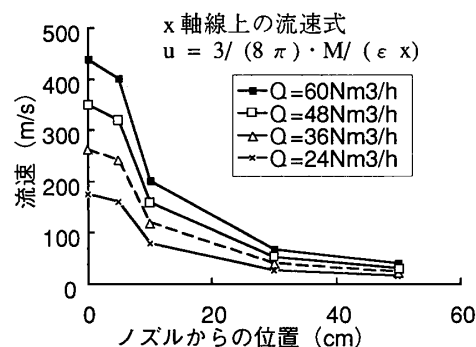


図-12 ノズル位置と流速

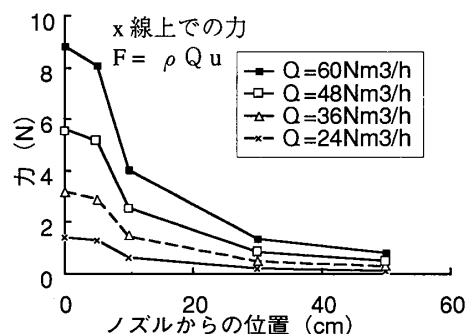
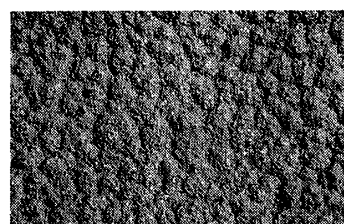


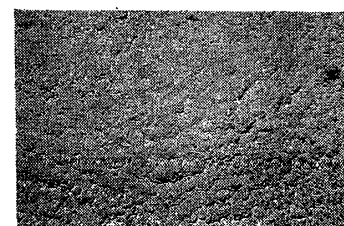
図-13 ノズル位置と力



写-1 外観状況
(エア- $36\text{Nm}^3/\text{h}$, モルタル $85\text{g}/\text{s}$, 30cm)



写-2 外観状況
(エア- $48\text{Nm}^3/\text{h}$, モルタル $140\text{g}/\text{s}$, 30cm)



写-3 外観状況
(エア- $24\text{Nm}^3/\text{h}$, モルタル $140\text{g}/\text{s}$, 30cm)