

論文 吹付けモルタルの付着強度に関する研究

後藤充志*¹・魚本健人*²

要旨：吹付けコンクリートの付着強度を求めるための基礎的研究として、吹付けモルタルが壁面に吹き付けられるとき、その壁面の粗さによって付着強度がどのように影響されるかを実験と解析から求めた。実験では直接引張試験治具を考案し、付着強度を測定した。また、壁面の粗さを定量化し、付着強度との関係を求めた。解析では個別要素法を用いて、付着部での空隙率を求めた。その結果、壁面の平均深さが大きいほど、付着部での空隙率が大きいことがわかった。また実験から、壁面の凸部分の頂点の角度、凹凸の表面積の増加率にも付着強度が影響されると明らかになった。

キーワード：付着強度、吹付けモルタル、直接引張試験、個別要素法

1. はじめに

吹付けコンクリートの利点としては、型枠が不要であること、自由な曲面に打設することができること、施工に要する時間が短いこと、瞬結性を有することなどが挙げられる。しかし、吹付けコンクリートの配合・品質・施工性は、非常に大きなばらつきを有し、はね返りによるロス、吹付け作業中に生じる粉塵、普通コンクリートに比して長期強度が低いことなど、改善すべき問題も多々ある。

それらの一つに、吹付けコンクリートと吹き付けられた壁面との付着強度の把握が挙げられる。吹付けコンクリートがトンネルに作用する効果に関して、1)ゆるんだ岩塊の安定効果、2)掘削面全体の安定効果、の2つの観点から見ることができる[1]。それらの観点から、地山との付着力の把握は大変重要である。しかし、既往の研究は数少なく、付着強度が設計基準に定められるには至っていない。

本研究では吹付けコンクリートの付着強度

に関する基礎的研究として、吹付けモルタルと吹き付けられた壁面との付着強度・性状が、壁面の表面形状の変化に伴ってどのように変化するかを、実験と解析を行い、両面から検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料、配合

実験に用いた使用材料を表-1に、実験を行った配合を表-2に示す。吹付け施工方法は後述するが、この方法の場合、吹き付ける以前にモルタルがノズル内で急速に硬化するため、急結剤を標準使用量(7~8% 対セメント重量)用いることはできなかった。そこで、本実験では急結剤添加量を、吹付け施工実験が可能である4%と定めた。

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻、(正会員)

*2 東京大学教授 東京大学生産技術研究所 工博、(正会員)

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 比重：3.15、比表面積：3290[cm ² /g]
細骨材	富士川産川砂 比重：2.63、粗粒率：2.98、吸水率：1.92
急結剤	セメント鉱物系粉末急結剤 比重：2.68、標準使用量：7~8%（対セメント重量）

表-2 配合表

W/C (重量%)	s/c (体積比)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	急結剤添加率(C×%)
50	3	282.7	565.5	1414.2	4
55	3	302.4	549.7	1374.8	4
60	3	321.1	535.2	1338.4	4

2. 2 実験方法

2. 2. 1 練混ぜ










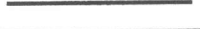
練混ぜは、容量30リットルのモルタル練りミキサを用いて、表-2の配合で20リットル練り混ぜた。練混ぜ方法は、骨材の2分の1、セメント、急結剤、残りの骨材、の順で材料をミキサに投入し、60秒間空練りし、十分掻き落としをした後、水を投入し、さらに60秒間練り混ぜた。

2. 2. 2 吹付け壁面作製

表-3は吹付け壁面の製作方法と断面略図である。壁面寸法は500×500×60mmである。表-3の③は、表-2におけるW/C50%の配合のモルタルを吹き付け、壁面を作製した。その他のケースは、急結剤だけを除いた同じ配合のモルタルを、木製型枠に打設し作製した。

木製型枠の底面に、表-3に示す凹凸を施し、壁表面にも同型の凹凸を設けた。24時間経過した後に脱型し、材齢7日まで水中養生した。表-3の⑤⑥⑨は斜辺（底辺）でない辺を下にして並べ、その上にモルタルを打設して作製した。⑤と⑥は対称ではないので、その違いを比較するため上下を逆にして試験した。

表-3 吹付け壁面

No	名前	作製方法	断面略図
①	セロ50%吹付け	平滑なセロハン面上に打設した	
②	グラインダー溝	①にグラインダーを用いて、10mm間隔に幅5mm深さ1mmの溝を付けた	
③	2層吹き	W/C50%の配合を吹付けた	
④	三角小1	斜辺10mmの直角三角形の断面を持つ目地棒を斜辺を下にして並べ、その上に打設	
⑤	三角小2	斜辺10mmの直角三角形の断面を持つ目地棒を並べ、その上に打設した	
⑥	三角小3	斜辺10mmの直角三角形の断面を持つ目地棒を並べ、その上に打設した	
⑦	トタン波	波長32mm振幅8mmの波をもつトタン板の上に打設した	
⑧	三角大1	底辺20mm頂角100度の2等辺三角形の断面を持つ目地棒を底辺を下にして並べ、その上に打設した	
⑨	三角大2	底辺20mm頂角100度の2等辺三角形の断面を持つ目地棒を並べ、その上に打設した	
⑩	角凹凸	1辺18mmの正方形の断面を持つ角材を18mm間隔に並べ、その上に打設した	
⑪	セロ55%吹付け	平滑なセロハン面上に打設した	
⑫	セロ60%吹付け	平滑なセロハン面上に打設した	
⑬	セロ50%打設	平滑なセロハン面上に打設した	

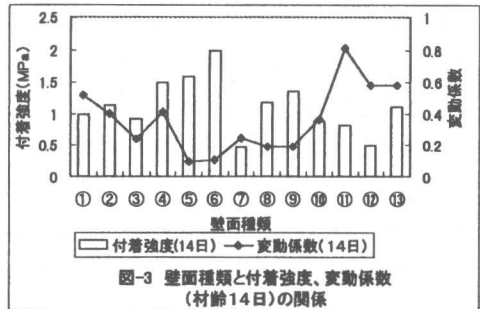
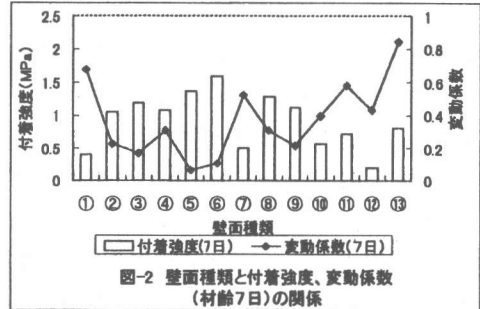
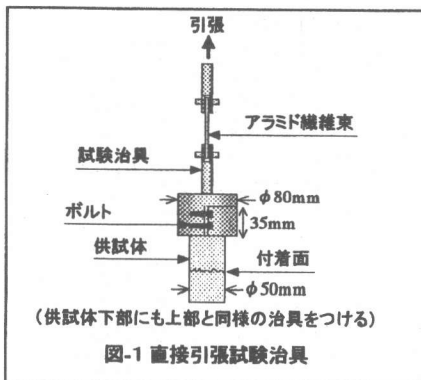
2. 2. 3 吹付け施工

吹付け施工機械は、吐出し空気量 310L/min のエアコンプレッサーを圧力 0.8 MPa に設定して使用し、エアコンプレッサーと連結した吹付け用ノズルに、練混ぜ直後のモルタルを投入し、吹き付けた。前述の吹付け壁面を、吹付け開始直前まで表面を湿らせた布で覆っておき、壁面上に施した凹凸の溝が地面と平行になる向きに、また水平から 45 度の角度に傾けて設置し、壁面に対して垂直に吹き付けた。表-3 中の①～⑩は、表-2 の W/C 50% の配合で吹き付け、⑪は W/C 55% の配合で、⑫は W/C 60% の配合でそれぞれ吹き付けた。⑬は表-2 の W/C 50% の配合のモルタルを水平におかれた壁面に対し、パイプレータを用いて鉛直に打設した。

吹付けモルタルの材齢 6 日に、コア抜き機を使用して $\phi 50\text{mm}$ の供試体を 1 つの壁面につき約 20 本採取し、コンクリートカッターで整形した。供試体高さは約 100mm 前後であるが、吹付け施工の性質上 80mm など、100mm に満たない供試体も存在した。

2. 2. 3 直接引張試験

材齢 7 日、14 日に直接引張試験を行い、吹付けコンクリートと壁面との付着強度を求めた。直接引張試験は著者らが考案した治具を用いた。治具の略図を図-1 に示す。偏心に



よる曲げ荷重を除くため、剛性が小さいアラミド繊維束を使用した。吹付け施工による付着面が治具上下間のほぼ中心にくるよう供試体を挟み、ボルトで固定した。引張荷重は変位制御で操作し、1分あたり 2mm の変位を与えた。ただし、アラミド繊維束の伸長により、供試体には 1分あたりおよそ 0.5 MPa の荷重がかかった。

3. 実験結果と考察

実験結果を図-2、図-3 に示す。壁面の各ケース 1 材齢につき、供試体本数は 7 本から 9 本あり、図の付着強度はそれらの平均を表す。変動係数は標準偏差を平均値で除した値である。材齢 7 日、14 日ともに大きなばらつきを含むケースもあった。特に、①、⑪、⑫、⑬のケースでは、変動係数が非常に大きな値となった。

3. 1 W/C、施工方法の違いでの比較

W/C 50、55、60% で吹き付けたケース①、⑪、⑫を比較すると、材齢 7 日では

W/C 55%の付着強度が最も大きくなったが、14日では50%が最も大きくなり、W/Cと付着強度の相関はほとんど見られなかった。しかし、付着強度の変動係数が大きいことから、この実験データだけでW/Cと付着強度の相関を判断するには不十分である。すなわち変動係数が小さかった、凹凸部を施した壁面にW/Cを変化させて吹き付け、付着強度試験を実施する必要があると考えられる。ただ、平らな鋼板など平面に吹き付ける場合には、付着強度が大きくばらつく、ということがわかった。次に、施工方法の違いについて調べるため、図-2,3中の①と③、すなわち、同配合で、吹き付けた場合と直接打設した場合を比較した。材齢7日では、打設した方が吹き付けたときの付着強度の約2倍と大きかったが、材齢14日では差はほとんどみられなかった。しかしこの場合も変動係数が大きく、この実験だけからの判断は難しいと考えられる。また、ケース⑤⑥⑨の断面は対称ではないが、⑤⑥による付着強度に、大きい差違は見られない。

3.2 表面の粗さの違いによる比較

表面粗さの定量化方法は多数提案されているが[2]、ここでは平均深さ、表面積の増加率、頂点角度の3手法を用いた。計測方法は、吹付け壁の断面を写真(幅約5cm)に撮影

し、コンピュータ上で画像処理(面積比法)を行って

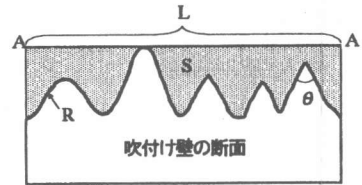


図-4 平均深さ、表面積増加率、頂点角度

計測した。図-4にA-A線で示したように、最も高い山の頂部を通る水平線(A-A)を描き、この線と凹凸線とによって囲まれた部分の面積Sと水平距離L、凹凸線の長さR、頂点の角度 θ を計測した。平均深さdについては、面積Sを水平距離Lで除した値($d = S/L$)とした。x表面積の増加率rについては、凹凸線の長さRを水平距離Lで除した($r = R/L$)。頂点角度 θ は、写真内全ての凸部の角度を計測し、その平均をとった。平均深さは凹凸の高低差、表面積増加率は凹凸の複雑さ、頂点角度は凹凸のなめらかさを表すと考えた。その定量化と付着強度試験の結果を表-4、図-5,6,7に示す。図-5より、平均深さが5mm以下では付着強度にはっきりとした関係はみられないが、5mmより大きくなると付着強度は低くなった。最も平均深さが大きいのは⑩(角凹凸 平均深さ10.7mm)で、次に大きいのが⑦(トタン波 平均深さ5.37mm)であった。そこで壁面に付着した吹付けモルタルを、付着部の断面が

表-4 吹付け壁面の粗さと付着強度

No.	名前	平均深さ (mm)	表面積増加率	頂点角度 (rad)	7日付着強度 (MPa)	14日付着強度 (MPa)
①	セロ50%	0	1.00	3.14	0.524	0.898
②	グラインダー溝	0.43	1.13	1.87	1.048	1.125
③	2層吹き	2.53	2.19	1.66	1.180	0.921
④	三角小1	1.86	1.32	1.79	1.084	1.484
⑤	三角小2	2.51	1.94	1.05	1.369	1.585
⑥	三角小3	2.51	1.94	1.05	1.592	1.983
⑦	トタン波	5.37	1.16	2.57	0.491	0.465
⑧	三角大1	3.20	1.24	1.91	1.279	1.168
⑨	三角大2	3.99	2.03	0.82	1.121	1.354
⑩	角凹凸	10.70	1.81	1.87	0.564	0.874

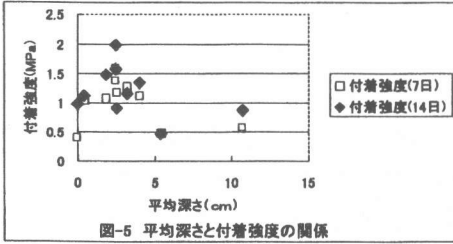


図-5 平均深さと付着強度の関係

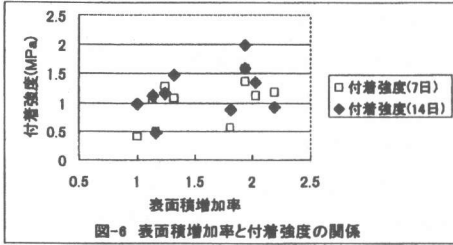


図-6 表面積増加率と付着強度の関係

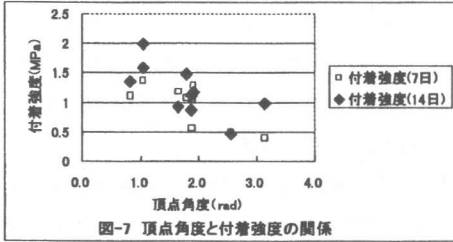


図-7 頂点角度と付着強度の関係

観察できるように切断した。その断面を写真に撮り、図-8のように壁面の凹部の面積 A_i とその中に存在する空隙が占める面積 S_i を画像解析により計測した。その結果を表-5、図-9に示す。これらの結果より、平均深さと

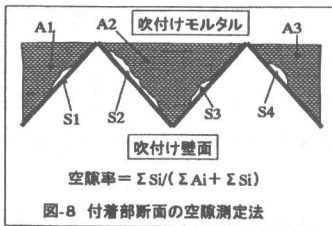


図-8 付着部断面の空隙測定法

実験においては付着部の断面に8.25%の空隙があれば、付着強度に影響を与えるといえる。しかし、表および図には掲載されていないケース①②③⑦においては、付着部近くにほとんど空隙がなく、測定を省略した。これらの結果から、⑩(角凹凸)は平均深さが大きいことによって、吹付けモルタルが入り込むこ

表-5 付着断面からみた凹部の空隙率

No	名前	空隙率 (%)
④	三角小1	0.14
⑤	三角小2	2.84
⑥	三角小3	2.44
⑧	三角大1	0.76
⑨	三角大2	3.47
⑩	角凹凸	8.25

とのできない領域が生じ、その部分が空隙となるために付着強度が低下したと考えられる。しかし、⑦(トタン波)の場合、付着部断面

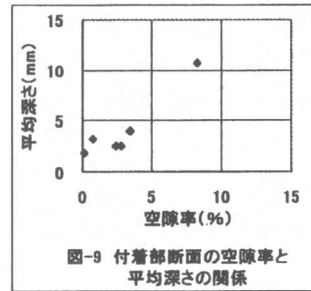


図-9 付着部断面の空隙率と平均深さの関係

にほとんど空隙が見られなかったことから、この説明が当てはまらない場合があることも

わかる。そこで、図-7より頂点角度と付着強度の関係に着目すると、頂点角度が大きくなるにつれ、付着強度は小さくなるという傾向が見られる。特に頂点角度の大きい①(セロ50% 頂点角度3.14rad)と⑦(トタン波 頂点角度2.57rad)の付着強度が低い結果となった。よって、この実験から、凸部の広がる角度が大きい場合、付着強度は低くなる傾向にあると結論づけられる。また、図-6より表面積の増加率が高いほど付着強度は高い、つまりこの実験での壁面の粗さでは、その凹凸が複雑なほど付着強度は高いということがわかった。

4. 解析による考察

前節の実験による考察をふまえ、解析を行って検討する。牧ら[3]によって開発された、「個別要素法」を使って吹付け施工をシュミレートする解析プログラムを使用した。解析

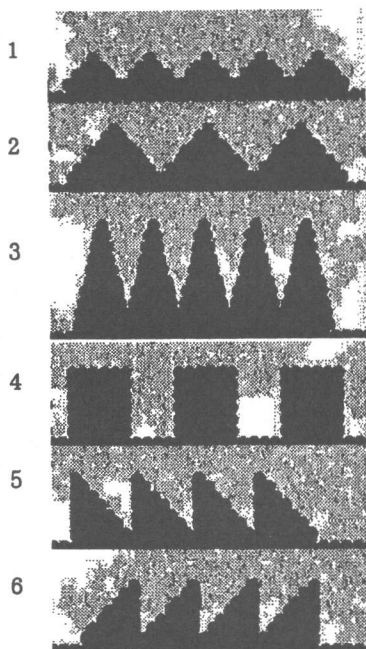


図-10 壁面の凹凸を変化させたときの解析ケース

モデル、材料特性値はすべて既往の研究[3]にならった。実験と同種類の形状(図-10)の壁面6通りに対し、図-8と同じ方法で付着部断面の空隙比を測定した。吹付けモルタル、

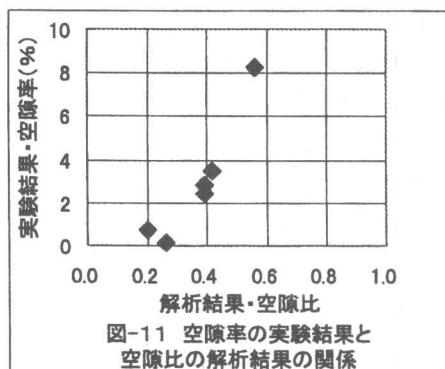


図-11 空隙率の実験結果と空隙比の解析結果の関係

壁面とも非常に簡単にモデル化したにもかかわらず、解析結果が実験結果とおおよそ比例関係にあるという相関が得られた(図-11)。これら実験と解析の結果から、深さの大きな凹凸面に吹付けコンクリートを吹くとき、凹部に陰の部分が生じて密実に詰まらず、空隙が

生じる傾向があるということがわかった。

5. まとめ

吹付けモルタルの付着強度を測定するため、直接引張試験治具を考案し、実験を行った。また個別要素法を用いて付着部の空隙を模擬した。その結果、

(1) 吹付けられる壁面が平滑な場合、凹凸部がある壁面に比べ、付着強度は大きくばらつく傾向にあった。

(2) 平均深さが5mm以上のとき付着強度は低下した。1つの理由として深さの大きい凹凸部に吹き付けられたモルタルは奥まで密実に詰まらず、空隙を含むからと考えられた。

(3) 実験をモデル化した解析からも(2)と同様のことがいえた。

(4) 付着強度は、吹付けられる壁面の凸部の頂点の角度の平均が大きいほど小さい。また、凹凸形状が複雑なほど付着強度が増加する傾向が伺えた。

謝辞：本研究を進めるに当たり、芝浦工業大学卒論生の白根勇二君をはじめ関係者各位に多大なる協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

[1] 水谷、ほか：吹付けコンクリート薄肉覆工の強度に関する試験 土木技術資料 25-4、1983

[2] 例えば、足立一郎、ほか：ショットブラストを利用した新旧コンクリートの打継ぎ工法に関する研究、土木学会論文集 第373号 VI-5 1986年9月

[3] 牧 剛史：2次元個別要素法を用いた吹付けコンクリートの吹付けメカニズムに関する基礎的研究、東京大学修士論文、1997.3