

論文

[1216] シリカヒュームと鋼繊維を混入した超速硬吹付モルタルの諸性質

正会員○内田美生（住友セメント（株）技術開発センター）

正会員 増田芳久（東急建設（株）土木技術部）

正会員 田中喜樹（日本開発土木（株）技術部）

1. はじめに

近年、各種要因によるコンクリート構造物の劣化及びその対策に関しては、大きな関心が払われており、このための補修・補強工法も各種提案されている。これらの1つに、超速硬セメントを用いた鋼繊維補強モルタルの乾式吹付け工法¹⁾がある。本工法は、超速硬セメントの初期強度発現性と吹付け工法の施工性、さらに鋼繊維の混入による補強効果を兼ね備えた工法であり、鉄道高架橋を中心に既にかなりの施工実績²⁾を有している。

一方で、非晶質の超微粉であるシリカヒュームを吹付けコンクリート中に混入すると、吹付けコンクリートの性状、すなわち、施工性、耐水性、耐酸性、耐薬品性及び各種強度性状等が改善されることはよく知られている。これらは、主にシリカヒュームの粘稠効果及びマイクロフィラー効果によるものと考えられるが、このシリカヒュームを超速硬セメントを用いた鋼繊維補強モルタル吹付け工法に混入した場合にも、同様の効果が期待される。

今回、施工性及び硬化後の各種強度性状、耐久性等を改善することを目的として、超速硬セメントの一部をシリカヒュームで置換した鋼繊維補強吹付けモルタル（以下、超速硬SF吹付けモルタルと称す）について検討した。本報は、その検討結果について報告するもので、練り混ぜモルタルを用いた基礎的事項の確認試験結果、屋外での吹付け実験結果及び現時点までの耐久性試験結果について述べる。

表-1 使用材料およびシリカヒューム分析結果

セメント	超速硬セメント、 $\rho=3.04$										
水	飲料水										
細骨材	豊浦標準砂または鹿島産陸砂、 $\rho=2.62$ 、 $FM=2.70$										
鋼繊維	液型せん断品、 $0.5 \times 0.5 \times 25\text{mm}$ 、 $\sigma_t=74.5\text{kgf/mm}^2$ 、 $\rho=7.85$										
シリカヒューム	粉体および造粒タイプシリカヒューム、 $\rho=2.20$ 、 $\text{SiO}_2 \geq 90\%$										
高性能減水剤	ナフタリンスルホン酸ホルマリン高縮合物塩										
凝結遅延剤	専用凝結遅延剤										
造粒タイプシリカヒュームの化学分析結果											
見掛け 比 重	見掛け フルン値 cm^3/g	分析値 (%)									
		ig. los	SiO_2	MnO	Fe_2O_3	MgO	CaO	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	
2.22	3070	4.08	90.8	.075	1.288	.625	.294	.5669	.260	1.63	

2. 使用材料及び配合

表-1に使用材料及びシリカヒュームの分析結果を示す。基礎的事項の確認に用いた練り混ぜモルタルの水結合材比は45%、砂結合材比は1.5、細骨材は豊浦標準砂とし、更に高性能減水剤と凝結遅延剤をそれぞれ結合材重量の2%、0.3%使用した。表-2には吹付け実験時のモルタル配合例を示す。今回の試験では、砂結合材比を4（一定）とし、水結合材比は適宜設定した。なお、超速硬SF吹付けモルタルの水結合材比は、図-1に示すように練り混ぜ水の圧送管中に配置した瞬間流量計により測定した練り混ぜ水量、ドライモルタル配合及び単位時間あたりの材料吐出量より算出した。今回、吹付け実験には、造粒型のシリカヒュームを用いることとしたが、これは練り混ぜモルタルによる試験結果及び吹付け時の施工性を考慮して決定した。

3. 試験概要

試験は練り混ぜモルタルによる基礎的事項の確認、超速硬SFモルタル吹付け実験及び超速硬SF吹付け

表-2 超速硬吹付けモルタルの配合例

水結合材比 (%)	砂結合材比	Vf (%)	置換率 (%)	単位量 (kg/m^3)					
				水	セメント	細骨材	鋼繊維	シリカヒューム	
45	4	1.0	0	193	429	1717	78.5	—	
			8	192	393	1710	78.5	34.2	
			10	192	384	1708	78.5	42.7	
			12	192	375	1706	78.5	51.2	

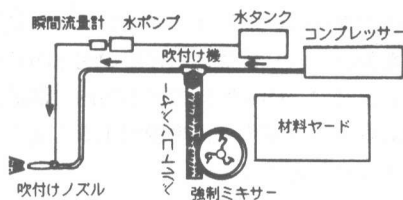


図-1 吹付けシステム

モルタルの耐久性試験に大別して実施した。また、参考のため、吹付け実験に使用した造粒型シリカヒュームの水和前の状況、飽和酸化カルシウム溶液中における水和状況及び吹付けモルタル中における水和状況を電子顕微鏡により観察した。

3. 1 練り混ぜモルタルによる基礎的事項の確認

超速硬セメントの一部を高炉スラグ微粉末などの混和材に置換した場合、超速硬セメントの最大の特長である初期強度発現性が影響を受け易い。しかしながら、シリカヒュームの水和活性は非常に大きく、高炉スラグ微粉末などを用いた場合のように、超速硬セメントの初期強度発現性が一概に低下するとは考えられない。従って、超速硬セメントの一部をシリカヒュームで置換したモルタルを練り混ぜ、置換率と強度発現性との関係について検討することとした。同時に、シリカヒュームの混入により影響を受けるモルタルの流動性及び鋼繊維とモルタルマトリックスとの付着特性についても検討した。モルタルの練り混ぜ及び試験は、JIS R 5201『セメントの物理試験方法』及びJCI-SF8『繊維の付着試験方法』に準じ、強度試験材令は、3時間から適時設定した。なお、モルタルの練り混ぜ時に際しては、巻き込みエアーの影響を排除するため、一部の配合においては消泡剤を添加して、練り上がり直後の空気量を3%程度に設定した。

3. 2 超速硬SFモルタル吹付け実験

超速硬SFモルタル吹付け実験は、シリカヒューム混入量、水結合材比が超速硬SF吹付けモルタルの諸性状、すなわち、1)圧縮及び曲げ強度発現性、2)単位体積重量、3)鋼繊維付着率、4)曲げじん性、5)打継目付着強度等に及ぼす影響を把握することを目的に実施した。一般に、吹付け材料の強度試験では、比較的大型のパネルからの切り出し供試体を用いる必要がある。しかしながら、今回は材令3時間から強度試験を実施するため、両端版をはずした15×15×53cmの鋼製型枠を約60°の角度で設置し、超速硬SFモルタルを吹付け、供試体を作成した。なお、一部の試験においては、大型のパネルから採取したφ10×20cmのコア供試体を用いて、供試体作成方法が強度試験結果に及ぼす影響について検討した。圧縮強度試験は材令3、6時間、1、7、28日で実施したが、所定材令まで20℃恒温室内で湿潤養生した。試験は、曲げ強度試験、曲げ切片を用いた圧縮強度試験の順で実施した。試験後の供試体を用いて、単位体積重量、鋼繊維混入率を求めた。打継目付着強度試験の手順を図-2に示す。打継面である旧コンクリート表面はグリッド径0.5mmのブラスト機を用い、0.4mm程度の深さに処理した。試験は材令7及び28日で実施したが、吹付け後のパネルは、屋外にて湿潤状態で保管し、コア供試体は試験3日前に採取した。

3. 3 超速硬SF吹付けモルタルの耐久性試験

シリカヒューム混入の有無が、超速硬吹付けモルタルの耐久性に及ぼす影響を把握するため、置換率0及び10%について、凍結融解抵抗性試験、促進中性化試験、乾燥収縮試験を実施した。供試体の作成は、10×10×40cmの鋼製型枠を用いて、強度試験用供試体の場合と同様の方法で実施した。凍結融解抵抗性試験は、ASTM C 290『コンクリート供試体の水中急速凍結融解抵抗性試験方法』に準じて実施し、所定サイクル数経過後の動弾性係数及び重量変化率を測定した。促進中性化試験は30℃、60%R.H.、CO₂濃度5%に保持した試験槽を用い、所定材令における中性化深さを測定した。乾燥収縮試験は20℃、60%R.H.の恒温室内に供試体を保管し、所定材令における長さ変化率、重量変化率を測定した。試験はいずれも材令7日から開始した。

4. 電子顕微鏡による観察結果

写真-1は、造粒型シリカヒュームのSEM写真で、球形粒

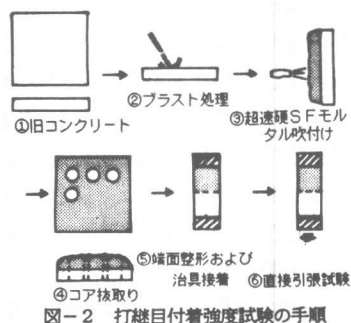


図-2 打継目付着強度試験の手順

子が塊状に凝集している状況が観察できる。これを飽和水酸化カルシウム溶液中に浸漬すると写真-2に示すようなシリカ質のゲル層を析出する。また、写真-3は吹付け作成した試料中のシリカヒューム粒子である。塊状の粒子は完全には分散していないものの、その周囲には細かな球状粒子が認められ、一部からは写真-2と類似した生成物の析出状況が観察できる。

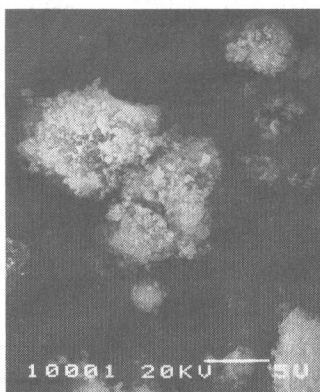


写真-1 造粒型シリカヒューム

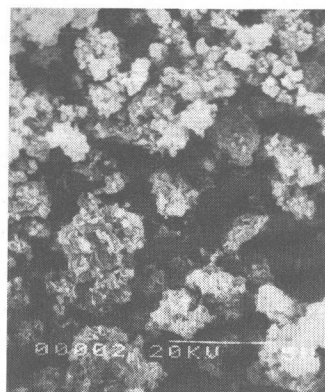


写真-2 水和状況

5. 試験結果及び考察

5. 1 練り混ぜモルタルによる基礎的事項の確認結果

図-3に、モルタルの圧縮強度と材令との関係を示す。図より、モルタルの圧縮強度はいずれも材令に伴ない増加している。しかしながら、その傾向はシリカヒューム置換率の影響を受け、特に置換率20%の場合、材令6時間～7日における圧縮強度は、置換率0%と比して明らかに低下している。このことは、シリカヒュームを用いた場合、置換率を適切に設定し、その初期強度発現性を損なわないよう留意する必要があることを示唆している。

図-4には、材令3時間、1及び28日におけるモルタルの圧縮強度とシリカヒュームの置換率との関係を示す。ここで、圧縮強度比とは、各材令においてシリカヒューム置換率0%のモルタルの圧縮強度に対する圧縮強度の比である。図より、材令3時間程度では、置換率20%の場合でも0%を上回る圧縮強度を発現しているのに対し、材令1日の圧縮強度は置換率の増加にともない低下する。しかしながら、材令28日では、置換率20%で圧縮強度比はほぼ100%となり、置換率8～12%では、0%を上回る圧縮強度を発現している。これは、凝結遅延剤及びシリカヒュームの反応速度の影響と考えられるが、現実的な置換率としては、8～12%程度が適当であると考えられる。

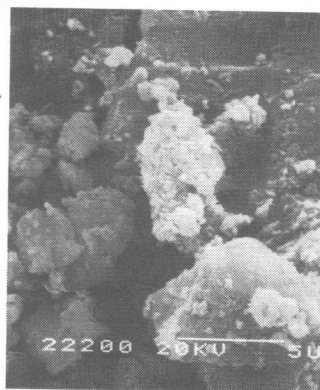


写真-3 吹付けモルタル中のシリカヒューム

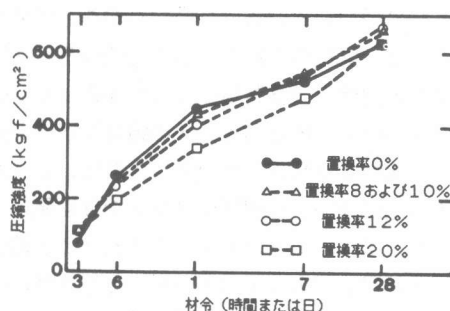


図-3 超速硬モルタルの強度発現性

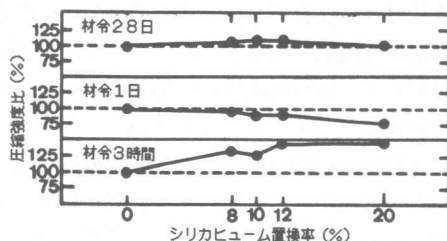


図-4 置換率と圧縮強度比の関係

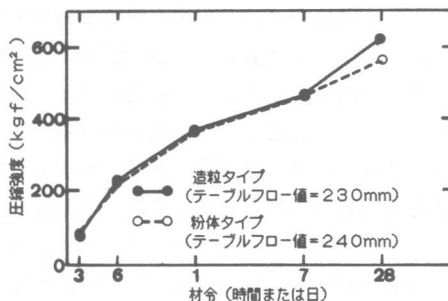


図-5 造粒措置の影響

図-5は、置換率8%における造粒型及び粉体型シリカヒュームの圧縮強度及び流動性の試験結果である。図より、モルタルの強度発現性及び流動性は、シリカヒュームの種類に拘らずほぼ同等であり、両者の分散性はほぼ同等であると推察できる。従って、吹付け施工法に用いる材料としてはいずれのシリカヒュームを用いても問題はないと思われる。

図-6に、鋼繊維の付着強度と材令の関係を示す。図より、鋼繊維とモルタルマトリックスとの付着強度は、特に初期材令において改善されている。しかしながら、材令1日以降の試験においては、繊維の引抜け荷重が破断荷重を上回ったため、シリカヒューム混入による付着強度の改善効果は判然としない。超速硬セメントと鋼繊維との付着性状は、比較的良好であること³⁾と、今回の試験結果を合わせて考えると、鋼繊維とモルタルマトリックスとの付着特性を有効に利用するためには、より高強度の鋼繊維を使用することが重要であると考えられる。

5. 2 超速硬SFモルタル吹付け実験結果

図-7に、シリカヒューム置換率0及び10%とした場合の超速硬SF吹付けモルタルの曲げ及び圧縮強度と材令との関係を示す。図より、置換率に拘らず、超速硬SF吹付けモルタルの強度は材令の経過と共に増加している。しかしながら、材令1日程度までは、置換率を10%とした超速硬SF吹付けモルタルの曲げ、圧縮強度は0%の場合よりも低く、材令7日以降ではほぼ同等、その後は0%の場合を若干上回る強度を発現している。これは、シリカヒュームの反応速度が超速硬セメントの強度発現性に追従出来ていないためと考えられる。

図-8に、シリカヒューム置換率と圧縮強度の関係を示す。図より、置換率が12%となると、材令28日までの各材令において圧縮強度は一様に低下する傾向にある。しかしながら、置換率8%と10%とでは、顕著な差は認められない。従って、超速硬SF吹付けモルタルにおけるシリカヒューム置換率は10%程度が最適であると考えられる。

図-9に、シリカヒューム置換率0及び10%の場合における結合材水比と圧縮強度との関係を示す。一般のコンクリートにおいては、両者はほぼ直線的な関係にあることが知られているが、図より、シリカヒューム混入の有無及び材令の経過に拘らず、結合材水比と圧縮強度との関係には、結合材水比 2.3程度（水結合材比で43%程度）で変曲点が存在する。これは主に、今回の供試体作成方法の影響と考えられ、水結合材比の低下に伴ない、鋼製型枠の影響で超速硬吹付けモルタルの密実性が損なわれているためと考えられる。しかしながら、一定の水結合材比以下であれば結合材水比と圧縮強度の間には、ほぼ直線的な関係があり、今後は砂セメント比の設定幅を広げて検討することにより、より広範囲にわたる両者の関係を把握することが必要であると考え

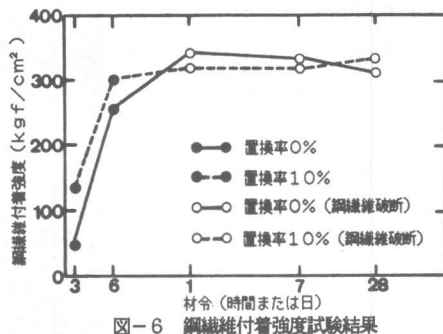


図-6 鋼繊維付着強度試験結果

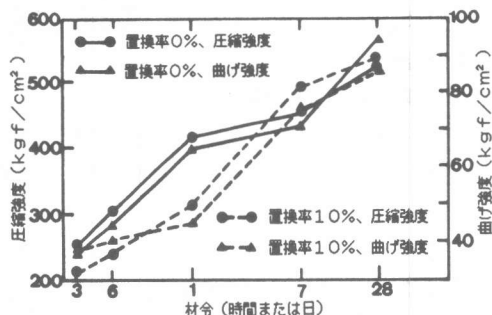


図-7 超速硬SF吹付けモルタルの強度発現性

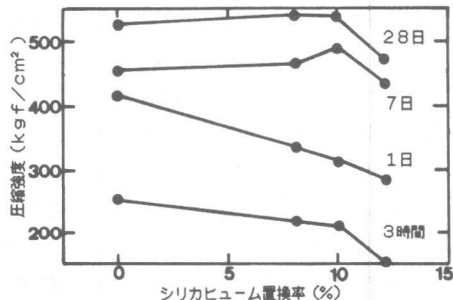


図-8 置換率と圧縮強度の関係

られる。また、材令1日ではシリカヒューム置換率10%の直線は0%の直線の下方にあり、置換率10%の強度発現性は0%の場合よりも劣っている。しかしながら、材令7日においては、両者の直線は交錯しており、置換率に拘らず、同等の強度を発現しているといえる。なお、図-9中には大型パネルにより採取したコア供試体の圧縮強度の試験結果例も併記したが、供試体の形状が円柱または立方供試体であることを勘案すれば、鋼製型枠により作成した供試体を用いても通常の方法とほぼ同等の圧縮強度試験結果を得ることが可能と思われる。

図-10に、シリカヒューム置換率0及び10%の場合の水結合材比と単位体積重量比の関係を示す。ここで、(単位体積重量比) = (気中及び水中重量の測定結果から算出した単位体積重量) / (配合から空気量を0%として算出した単位体積重量) である。図より、同一水結合材比において置換率10%の場合の単位体積重量比は、0%の単位体積重量比をわずかに上回る傾向を示している。このことから、超速硬セメントの一部をシリカヒュームで置換すれば、密実な超速硬吹付けモルタルの施工が可能となると考えられる。

図-11に、シリカヒューム置換率0及び10%の場合における水結合材比と鋼繊維付着率比の関係を示す。ここで、(鋼繊維付着率比) = (硬化後の超速硬SF吹付けモルタルの鋼繊維混入率) / (配合上の鋼繊維混入率) である。図より、置換率に拘らず、鋼繊維の付着率比に顕著な差は認められない。

図-12に、シリカヒューム置換率0及び10%の場合における曲げ強度と換算曲げ強度の関係を示す。図より、置換率に拘らず、換算曲げ強度の増加率は曲げ強度に劣っている。これは鋼繊維とマトリックスの付着が置換率に拘らず良好なため、材令の経過に従い鋼繊維の破断が発生し易くなっているためと考えられる。従って、本試験結果も鋼繊維とモルタルマトリックスとの良好な付着特性を有効に利用するためには、より高強度の繊維の使用が必要であることを示唆している。

図-13に、シリカヒューム置換率0及び10%の場合における打継目付着強度試験結果を示す。図より、置換率10%の打継目付着強度は、材令7、28日共に0%の強度を上回っている。超速硬吹付けモルタルの打継目付着特性については、ブラスト処理のバラツキの問題もあり、本試験結果のみから結論を下すことは不可

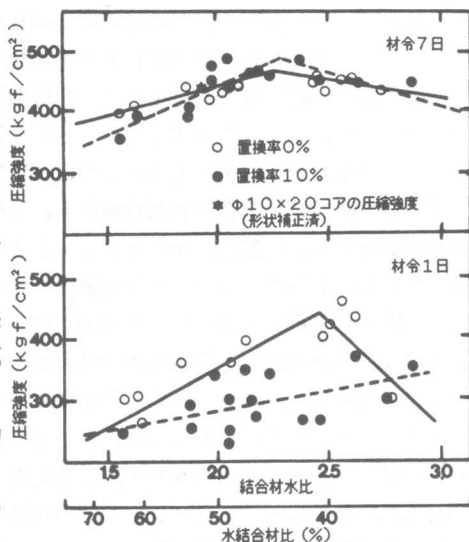


図-9 結合材水比と圧縮強度の関係

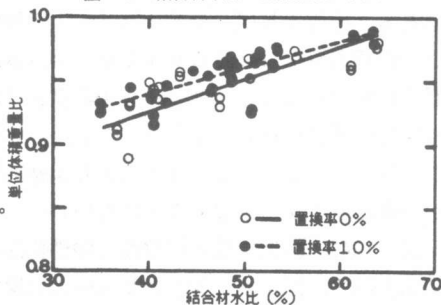


図-10 単位体積重量比と水結合材比の関係

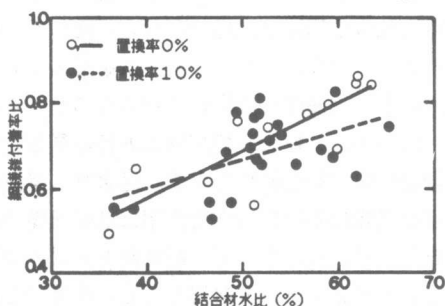


図-11 鋼繊維付着率比と水結合材比の関係

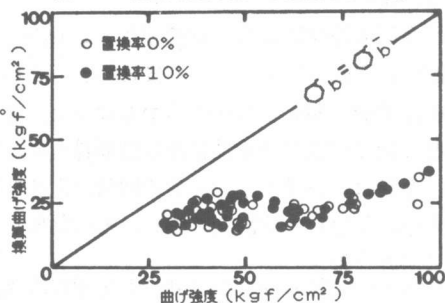


図-12 曲げ強度と換算曲げ強度の関係

能である。しかしながら、この傾向は、練り混ぜモルタルを用いた鋼繊維とマトリックスとの付着強度試験結果からも類推することができ、両試験結果を勘案すれば、超速硬吹付けモルタルの打継目付着強度は、シリカヒュームの使用により、かなり改善することが可能であると思われる。

5. 3 超速硬SF吹付けモルタルの耐久性試験結果

図-14に、凍結融解抵抗性試験時における相対動弾性係数と重量変化率の測定結果を示す。一般に、シリカヒュームの混入により、凍結融解抵抗性は向上するといわれているが、今回の試験ではこれに反する結果を得た。すなわち、図-14に示したように、置換率を10%とした場合には、重量減少率、相対動弾性係数ともに200サイクル以降の低下率が大きく、凍結融解抵抗性はシリカヒューム使用によりむしろ低下している。しかしながら、試験時の供試体を観察した結果、劣化は隅角部に存在したラミネーション部から発生しており、本試験結果のみから結論を下すことは不可能である。換言すれば、シリカヒューム置換率を10%とした超速硬吹付けモルタルでは、供試体内部に初期欠陥が存在しても200サイクル程度までは十分な凍結融解抵抗性を有しており、この点から類推するかぎりシリカヒュームの混入により凍結融解抵抗性が一概に低下するとは考えられない。

図-15に、促進中性化試験時の中性化深さの測定結果を示す。図より、シリカヒューム置換率10%の中性化深さは、0%と比較して若干大きいものの、特に顕著な相違とは思われない。従って、超速硬吹付けモルタルにシリカヒュームを混入してもモルタルの中性化速度に悪影響はないものと考えられる。

図-16に、乾燥収縮試験における長さ変化率、重量変化率の測定結果を示す。図より、置換率に拘らず重量変化率及び長さ変化率はほぼ同様の減少傾向を示している。従って、超速硬セメントの10%程度をシリカヒュームで置換しても、吹付けモルタルの乾燥収縮性状に悪影響はないと考えられる。

6. まとめ

今回の検討により、超速硬セメントの一部を造粒型のシリカヒュームで置換しても、従来の超速硬SF吹付けモルタルとほぼ同等、もしくはこれを若干上回る性状を有する吹付けモルタルが施工可能であることが明らかとなった。この場合のシリカヒュームの最適添加量は10%程度であり、特に打継目付着性状及び初期材令における鋼繊維との付着性状の改善効果に優れている。

今後は、シリカヒュームを吹付け工法に適用した場合のリバウンド量および発生粉塵量の低減効果に着目した検討を実施し、その効果を定量的に把握することとしたい。

<参考文献>

1) 峰松他：第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986、pp.437～pp.440、2) 浅野他：コンクリート工学 vol.23、No.2、1985、pp.28～pp.35、3) 峰松他：第5回コンクリート工学年次講演会論文集、1983、pp.17～pp.20

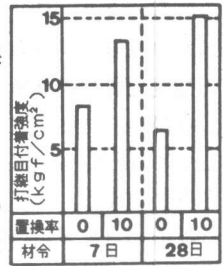


図-13 打継目付着強度試験結果

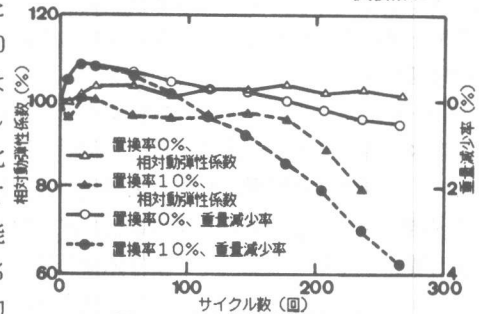


図-14 凍結融解抵抗性試験結果

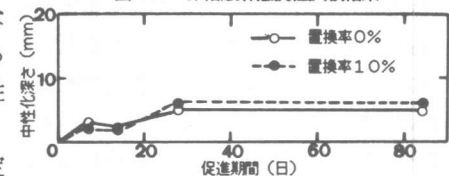


図-15 促進中性化試験結果

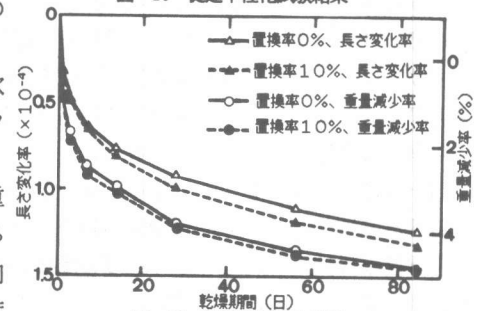


図-16 乾燥収縮試験結果