

報告

[1012] シリカフェーム超高強度コンクリートによる RC 造耐震壁付きラーメン架構の実大施工実験

岩清水隆*1・西崎隆氏*1・河野浩司*2・米澤敏男*3

1. はじめに

近年、我が国においては、超高層集合住宅を中心に $F_c=420\sim 480\text{kgf/cm}^2$ の高強度コンクリートが施工されている。しかし、そのほとんどが純ラーメン構造であり、耐震壁付きのRC造の施工例はみられない。一方、コンクリートの高強度化に伴い、コンクリートの粘性は増大する傾向を示し、特に海砂を使用する地域では、海砂の粒形が悪いため、超高強度コンクリートは極めて粘性の高いものとなり、流動性の確保が困難である。超高強度コンクリートの粘性の低減および強度の向上を目的として、シリカフェームの利用が検討され、充填形鋼管コンクリートにおいて $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ の超高強度コンクリートが圧入によりすでに施工されている^[1]。しかし、RC造においてシリカフェームを使用した事例はみられない。また、超高層RC造においては、従来施工上打ち分けが困難であることから、梁およびスラブにおいても柱部材と同一強度の高強度コンクリートが施工されていたが、梁およびスラブにおいては、高強度化の要求は柱部材と比較して小さく、逆に高強度化に伴うスラブの仕上げの困難さの増加等が問題となっている。

本報告は、RC造耐震壁付ラーメン架構における海砂を用いた設計基準強度 600kgf/cm^2 のシリカフェーム超高強度コンクリートの流動性と充填性の確保および構造体強度の把握を目的に実施した、実大施工実験の結果をまとめたものである。

2. 調査の選定実験

2.1 シリカフェームの混入率の検討

(1) 実験概要

関西地区における海砂・砕石の使用と 600kgf/cm^2 という高い設計基準強度から、流動性と強度を確保する上でシリカフェームが必要であると判断し、シリカフェームの混入率を決定することを目的に、室内における試し練り実験を実施した。

実験に用いた材料を表-1に、コンクリートの調合を表-2に示す。スラブは $24\pm 1.5\text{cm}$ 、70- $550\pm 50\text{mm}$ 、空気量 $2.0\pm 0.5\%$ を目標とした。シリカフェームの混入率はセメント重量の内割りでNo.1,3は10%、No.4~6は7.5%とし、No.2のみ、0,2.5,5.0,7.5,10,12.5%とした。

(2) 実験結果

図-1に水結合材比とL型70-試験^[2]によるL70-速度の関係を示す。L70-速度は、水結合材比が増加するほど速くなる傾向を示す。また、単位水量がL70-速度に及ぼす影響が大きい。図-2に水結合材

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント	比重 3.16
細骨材	室木産海砂	比重 2.55 FM=2.97
粗骨材	小野市産砕石(石英粗面岩)	比重 2.55
混和材	粉末シリカフェーム	比表面積 141,000 cm^2/g かさ密度 323.0 kg/m^3 比重 2.20
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤	

表-2 コンクリートの調合(室内実験)

No.	単位水量 (kg/m^3)	w/c (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)		
				結合材	細骨材	粗骨材
1	165	23	43.3	718	635	836
2		26	46.7	635	729	834
3		30	48.0	550	772	839
4	175	30	47.1	583	734	829
5		35	50.2	500	818	816
6		40	52.4	438	881	803

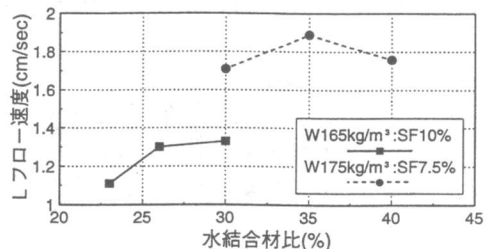


図-1 水結合材比とL70-速度の関係

*1 ㈱竹中工務店技術研究所(正会員)、*2 ㈱竹中工務店神戸支店技術課(正会員)

*3 ㈱竹中工務店技術研究所主任研究員、Ph.D(正会員)

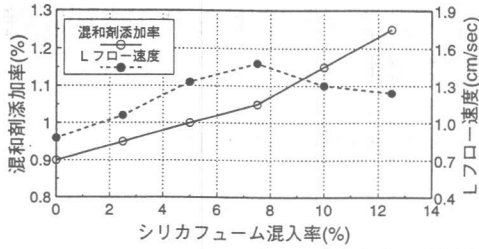


図-2 シリカフェーム混入率とL70-速度の関係

比26%の場合のシリカフェーム混入率と混和剤添加率・L70-速度の関係を示す。L70-速度は、シリカフェームの混入により増大し、シリカフェームによるコンクリートの粘性の低減効果が確認できる。L70-速度は、混入率が7.5%の場合に最も大きな値を示した。また、同じスランプを得るのに必要な混和剤の量は、シリカフェーム混入率が大きくなるほど増加する傾向が認められた。

図-3に圧縮強度と結合材水比の関係を示す。普通コンクリートの場合と同様に、圧縮強度と結合材水比の間には線形関係が成立している。図-4にw/c=26%の場合の圧縮強度とシリカフェーム混入率との関係を示す。1週強度はシリカフェームを混入しても増加しないが、4週強度では混入率の増大に伴い強度も上昇する傾向を示し、シリカフェームによる強度改善効果が認められた。7.5%のシリカフェームの混入により、約100kgf/cm²の圧縮強度の増加が認められる。

以上の実験結果より、海砂を用いた高強度コンクリートにおいても、シリカフェームの混入が粘性低減および強度の向上に有効であり、その混入率は、7.5%が最適であると判断した。

2.2 構造体強度の検討

(1) 実験の概要

シリカフェームを用いた超高強度コンクリートの構造体強度を確認し、実大施工実験に用いるコンクリートの水結合材比を決定することを目的として、実機による試し練り実験を実施した。柱を想定した模擬部材を製作し、中央部および端部でコアを採取して構造体強度の確認を行った。実験は気温による影響を把握するため、平均気温20℃前後の標準期と夏期の2度に分けて行った。使用材料は表-1と同一である。コンクリートの調合を表-3に示す。試験体の形状、温度測定位置およびコア採取位置を図-5に示す。

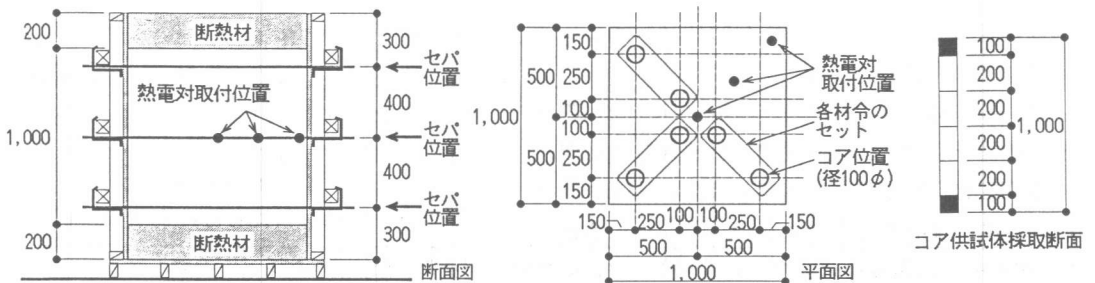


図-5 柱模擬部材の形状とコア採取位置・温度測定位置

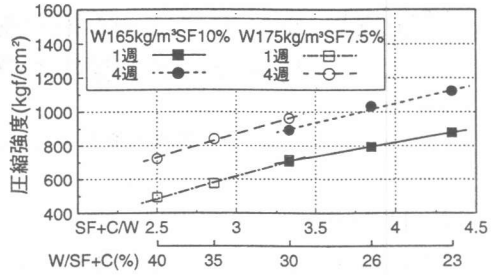


図-3 結合材水比と圧縮強度の関係

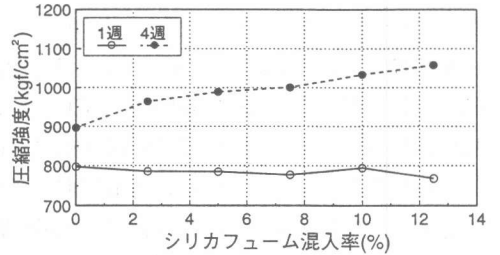


図-4 シリカフェーム混入率と圧縮強度の関係

表-3 コンクリートの調合 (実機実験)

No	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	S/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位量 (kg/m ³)			
						結合材	細骨材	粗骨材	
標準1	30	24	2.0	48.0	165	509	41	775	839
標準2	26	24	2.0	46.7	165	587	48	722	824
期3	23	24	2.0	43.3	165	664	54	638	836
夏1	35	24	2.0	50.1	165	436	35	844	839
期2	30	24	2.0	48.0	165	509	41	775	839

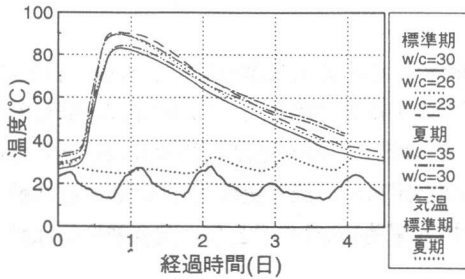


図-6 コンクリートの内部温度（中心部）

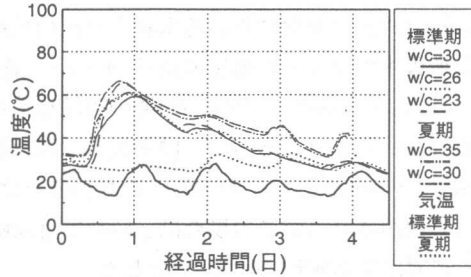


図-7 コンクリートの内部温度（端部）

(2) 実験結果

試験体中心部および端部のコンクリートの温度履歴を図-6、図-7に示す。また、結合材水比と中央部および端部の σ の平均圧縮強度の関係を図-8に示す。図-9には、比較のため使用材料・試験体形状は同一で、シリカフュームを使用していない高強度コンクリートの実験結果を示した。シリカフュームの有無にかかわらず、結合材水比に比例して、圧縮強度が増大している。 σ 強度は、夏期実験における $W/C+SF=35\%$ 、材令4週で 813kgf/cm^2 、13週で 851kgf/cm^2 であり、水結合材比 35% で設計基準強度 600kgf/cm^2 の確保が十分可能であると考えられる。コンクリート内部温度は、試験体中心部で標準期が $83.2^\circ\text{C}\sim 90.6^\circ\text{C}$ 、夏期が $84.5^\circ\text{C}\sim 89.6^\circ\text{C}$ まで上昇した。端部では、最高温度が $25.7^\circ\text{C}\sim 36.1^\circ\text{C}$ 中心部より低い値となったが、両者の σ 強度の差は、平均で 22kgf/cm^2 、最大で 66kgf/cm^2 と小さいものであった。

図-10に材令4週の水養生供試体の圧縮強度と各材令の平均 σ 強度の差を示す。材令4週においては、 $36\sim 73\text{kgf/cm}^2$ の σ 強度の方が標準水中養生供試体よりも低い強度を示したが、水結合材比、外気温の違いによる明確な差は認められなかった。材令13週においては、水結合材比が小さいほど、また外気温が高いほど差は大きくなる傾向を示したが、その差は小さく、最大で 47kgf/cm^2 であった。また、図-11に示したシリカフューム無混入の高強度コンクリートでは、標準水中養生供試体と σ 強度の差は、4週で $22\sim 176\text{kgf/cm}^2$ 、8週で $38\sim 158\text{kgf/cm}^2$ であり、シリカフュームを混入したコンクリートと比べて相当に大きな値を示した。シリカフュームの利用は構造体強度の向上にも有効であると考えられる。

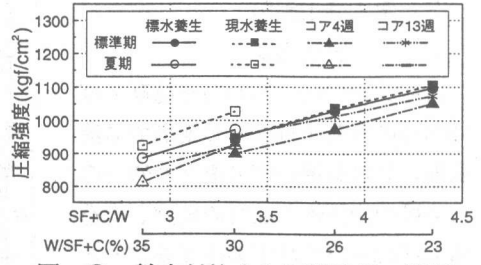


図-8 結合材水比と圧縮強度の関係（シリカフュームコンクリート）

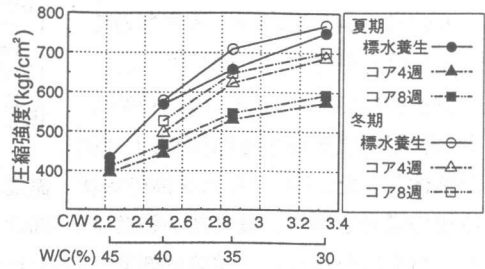


図-9 結合材水比と圧縮強度の関係（普通コンクリート）

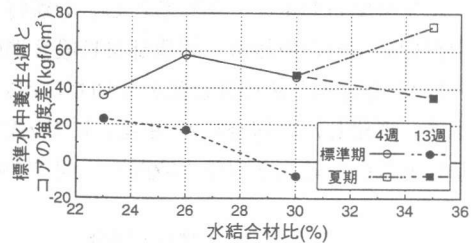


図-10 標準養生供試体と σ の強度差（シリカフュームコンクリート）

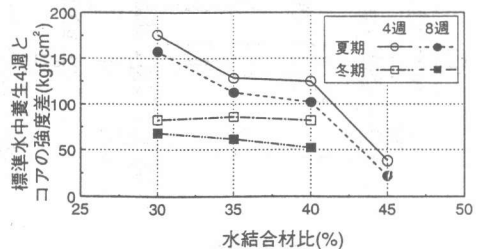


図-11 標準養生供試体と σ の強度差（普通コンクリート）

(3) 実大施工実験に用いる水結合材比の検討

標準養生供試体と σ_7 強度の差(S)を用い、総 ρ New RCの考え方に基づいて、水結合材比の選定を行った。Sの値は、 σ_7 強度の4週の実験結果に若干の余裕を考慮して、 $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ に対して 100kgf/cm^2 とした。さらに、標準偏差は 60kgf/cm^2 と設定し、調合強度を 880kgf/cm^2 とした。この結果、 $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ のコンクリートの水結合材比を35%と定めた。施工実験では $F_c=450\text{kgf/cm}^2$ のコンクリートも使用されるがこの場合は、 $S=170\text{kgf/cm}^2$ 、標準偏差 45kgf/cm^2 とし、調合強度 685kgf/cm^2 、これに対応する水セメント比を35%とした。

3. 実大施工実験

3.1 実験概要

$F_c=600\text{kgf/cm}^2$ のシカフォーム超高強度コンクリートの耐震壁付きラーメン架構での流動性、設計基準強度の違うコンクリートの打分けの施工性と品質の確認、構造物強度の発現性状等の確認を目的として実大施工実験を行った。

コンクリートの調合を表-4に示すもので、使用した材料は表-1と同じである。

試験体は1スパン×1スパンのラーメン架構および耐震壁を有する1層の実大寸法試験体とした。図-12に試験体の形状、温度測定位置、 σ_7 採取位置の概要を示す。設計基準強度は、600および 450kgf/cm^2 とし、打分けを行った。試験体部位とコンクリートの設計基準強度、打設運搬方法をまとめて表-5に示す。コンクリートの打設方法は、鉛直・水平分離打および一体打ちとし、分離打ちの水平部・一体打部材のコンクリートの打設は、鉛直部材打設2週間後にを行った。コンクリートの打分けのために柱と梁の仕切りに用いたPCa板を図-13に示す。使用したコンクリートポンプ車は、ピストン式ポンプ車(最大吐出量 $100\text{m}^3/\text{hr}$ 、最大吐出圧力 5MPa)、配管の径は5インチであり水平換算距離は 130m であった。

表-4 コンクリートの調合(施工実験)

設計基準強度(kgf/cm ²)	W/C (%)	スランパ (cm)	スランパ・フー (mm)	Air (%)	s/a (%)	SF C+SF (%)	単体量(kg/m ³)				
							W	C	SF	S	G
Fc450	35	21	—	3.5	41.8	—	180	515	—	663	923
Fc600	35	24	550	2.0	50.2	7.5	175	587	38	818	816

表-5 試験体部位と設計基準強度、運搬打設方法

部材	Fc	運搬方法	打設方法	高さ	コンクリートの打込み・締め固め方法	打設日
柱	A1	600	バケット 分離打	1.0m	4層に分けて打込み、棒形振動機	11/26
	A2	600	バケット 分離打	2.1m	台で締固め、梁下まで打ち上げた。	
	B1	600	ポンプ 1体打	2.9m	分離打の柱・梁接合部は、梁部材	12/11
	B2	600	バケット 分離打	2.1m	の打設日にバケットにより行った。	11/26
梁	G1	450	ポンプ 分離打	—	梁筋の上から落とし込む要領で打設し棒形振動機を60cm間隔で挿入し締固めた。	12/11
	G2	600	バケット 分離打	—		
	GA	450	ポンプ 分離打	—		
	GB	600	ポンプ 1体打	—		
床	S1	600	ポンプ 1体打	—	スラブ下までの梁の打込み完了後、	12/11
	S2	450	ポンプ 分離打	—	スラブ先を移動させ連続して打設	
壁	—	600	バケット 分離打	2.1m	両側の柱から4層に分け交互に打設	11/26

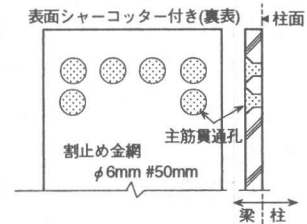
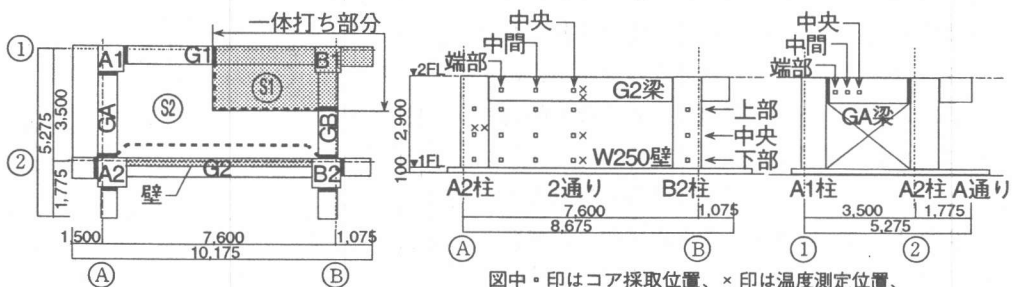


図-13 打分け仕切用PCa板



図中・印はコア採取位置、×印は温度測定位置、—は打ち分けPCパネルを、.....は打ち分け用リブラスを示す。

(a)平面図 (b)2通り立面図 (c)A通り立面図

図-12 試験体の形状と内部温度測定および σ_7 採取位置

コンクリートの流動性状を観察するために、壁型枠にアクリルのスリットを設置し、一定時間ごとに打設コンクリートの天端位置の記録を行った。スラブの上面の仕上げは、コンクリート打設後定規ずりを行ったのち、初期散水、中間散水、金ゴテ押さえにより仕上げた。

3.2 実験結果

図-14に柱から打設したコンクリートの壁内の流動性状を示す。締め固め前の平均流動勾配は、1層目9/100、2層目10/100、3層目12/100と小さく、極めて良好な流動性を示した。また、壁の型枠面近傍や柱フープ筋周辺においても、コンクリートの分離は認め

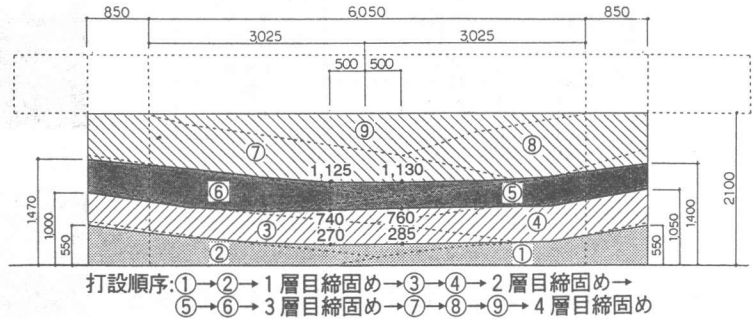


図-14 壁のコンクリートの流動性状

られず、良好な充填性が確認された。梁の打設時に上端筋上にコンクリートが滞留することもなかった。シカუმ超強度コンクリートはRC耐震壁付きラーメン架構へ、効率よく打設が可能であることがわかった。また、梁筋の上から落とし込んだ一体打ちの場合でもコンクリートの流動性はよく、材料分離は見られなかった。

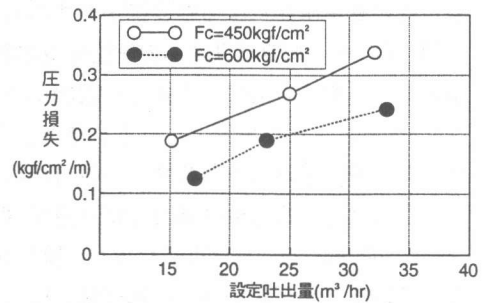


図-15 ホンヅ打設時の圧力損失

ホンヅ打設時の圧力損失を図-15に示す。Fc=600kgf/cm²のシカუმコンクリートの方がFc=450kgf/cm²よりも小さな圧力損失を示し、シカუმの利用がホンヅ圧送性の改善にも効果があることが判った。また、Fc=450および600kgf/cm²共に床コンクリート上面の仕上げは、金ゴテ押さえも可能であり、通常の床面精度の確保が可能であることが判った。各部材ともにジャカ、豆板、ひびわれ等はみられなかった。図-16にコンクリートの内部温度と外気温を示す。冬期であったため、コンクリート内部の最高温度は、柱で50.3℃、梁で37.2℃、壁で30.8℃と標準期、夏期に比べて相当低い値であった。壁において、鉛直方向の最高温度の分布をみると、上部19.8℃、中部30.8℃、下部21.5℃とかなりの差がみられた。

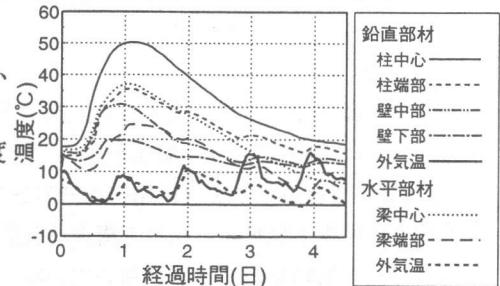


図-16 コンクリートの内部温度

表-6 圧縮強度試験結果 (材令4週)

(表中、圧縮強度の単位はkgf/cm²)

Fc	打設区分	部材	標準強度	平均現水温度 (°C)	現水強度	コア強度				標準差	標準水-77平均
						平均温度 (°C)	中心	端部	平均		
600	鉛直	柱壁	839	7.0	714	12.5	688	713	704	135	137
		柱梁	945	5.3	753	10.3	689	701	702	38.4	263
450	水平	梁	679	5.3	592	7.9	670	675	673	25.9	159
		梁	679	5.3	592	-	505	527	520	n=9	159

材令4週の圧縮強度の試験結果を表-6に示す。77供試体による構造体強度は、柱部材が平均699kgf/cm²、梁部材のFc600kgf/cm²が平均で673kgf/cm²、Fc450kgf/cm²が平均で520kgf/cm²であり十分設計基準強度を満足する値が得られた。標準水中養生供試体の4週強度と材令4週の77強度の差は135~272kgf/cm²であり、標準期および夏期の

実験結果と比較し大きな値となった。これは、部材内部最高温度、平均養生温度共に低く、標準期・夏期の水和熱による強度低下に対して、低い養生温度による、水和の遅れが大きく影響した

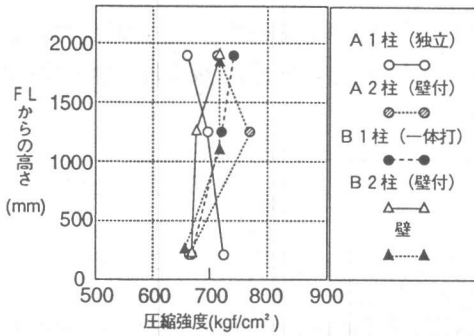


図-17 コア強度試験結果

ことよると考えられる。冬期において、材令4週で構造体強度を確保するためには、水和熱による強度補正よりも、低い養生温度による強度補正をする必要がある。

図-17に柱・壁のコア供試体の圧縮強度の鉛直方向の分布を示す。鉛直方向の強度差は比較的小さく、均質な

コンクリートが打設されたと考えられる。また、分離打と一体打および異なる自由落下高さによるコア強度にも明確な違いはみられず、一体打の施工も可能であると考えられる。

写真-1は柱・梁打分け部で仕切り用PCa板を含んで採取したコアを示す。写真上部がPCa板で、下部が $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ のコンクリートである。境界面の凹凸はPCaに設けられたシャコッターであり、良く充填されていることがわかる。写真-2は、仕切用PCa板の鉄筋貫通孔を含んで採取したコアを示している。鉄筋貫通孔への充填性も良好であった。

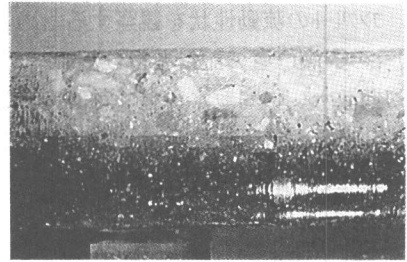


写真-1 打分けPCa板シャコッター部

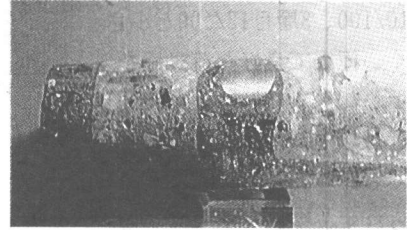


写真-2 打分けPCa板鉄筋貫通孔

4. まとめ

シカუმ超高強度コンクリートに関する実大施工実験を通して以下のことが結論される。

- (1)シカუმの利用により、海砂を用いた超高強度コンクリートの粘性を低減し良好な流動性を確保することができる。本実験に用いたシカუმの混入率は7.5%が最適であった。
- (2)標準水中養生供試体と比べて構造体強度は、標準期、夏期には水和熱のために低下するが、シカუმを用いたコンクリートは、用いていないコンクリートに比べてこの低下が少ない。
- (3)シカუმを用いることにより、海砂を使用した $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ のコンクリートでも良好な流動性と充填性を確保することができ、耐震壁付きラーメン架構を効率的に施工することができる。
- (4)PCa[®] 糸を用いた柱と梁の打ち分け部においてもコンクリートは良く充填され、本方法によるコンクリートの打ち分け施工が可能である。
- (5)実大施工実験における構造体強度は $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ を満足する値が得られた。また、分離打・一体打共に鉛直方向の強度差は比較的小さく、均質なコンクリートの打設が可能である。
- (6)構造体強度は、標準期・夏期の水和熱による強度低下に対して、冬期においては低い気温による水和の遅れも問題であり、材令4週で構造体強度を確保するためには、低い養生温度による強度補正をする必要がある。

「参考文献」 [1] 奥野 亨ほか：シカუმ超高強度コンクリートによる鋼管柱圧入施工、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No. 1, 1993 投稿中、[2] 米澤 敏男ほか：高強度コンクリートのワーカビリティに関するL型コア試験法による研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11, No. 1, pp. 171-176, 1989