

論文 膨張モルタルを用いた鉄筋コンクリートの静的破砕に関する基礎的研究

鈴木 直^{*1}・大塚 秀三^{*2}・中田 善久^{*3}・櫻村 啓^{*1}

要旨: 本研究は、コンクリート用膨張材を多量に混入した膨張モルタルの静的破砕剤としての適用性を確認するために、その基礎的性状および鉄筋コンクリート試験体に充填した際の破砕性状について検討を行った。その結果、低熱ポルトランドセメントを用いた際に長さ変化率が大きくなり、温度上昇量は作業性に支障のない範囲に留まった。鉄筋コンクリート試験体に膨張材の混入量が 120kg/m³ の膨張モルタルを充填した際は、膨張モルタルの水結合材比に関わらずひび割れの発生が確認できた。以上より、膨張モルタルが静的破砕剤の代替として、安全かつ静的に鉄筋コンクリートを破砕できる可能性が示唆された。

キーワード: 静的破砕剤, コンクリート用膨張材, 膨張モルタル, 低熱ポルトランドセメント, ひび割れ

1. はじめに

昨今の鉄筋コンクリート構造物の解体では、周辺環境の過密化¹⁾により高度な解体技術が求められる状況にある。鉄筋コンクリート構造物の解体工法には、圧砕工法をはじめとした転倒工法およびブレーカ工法などの大型の重機を用いることが一般的である。しかし、これらの工法は、解体作業で発生する騒音、振動および粉塵といった周辺環境への影響が多岐である。

これに対して、静的な解体工法として膨張性を有する破砕材のスラリーを穿孔箇所に充填し、主成分である生石灰が水和反応することによる膨張圧により破砕する静的破砕剤工法²⁾が普及している。しかしながら、破砕剤として一般的に用いられる生石灰は、水和反応が迅速に行われるため水和熱が著しく高くなり、充填位置の温度が 100℃以上となる場合がある。そのため、スラリー内の自由水が急激に気化し、発生した水蒸気により充填したスラリーが噴出する、いわゆる鉄砲現象を引き起こす危険性³⁾がある。

そこで、本研究では、より安全性が高く、かつ静的に鉄筋コンクリート構造物を破砕できる解体工法として、生石灰を主原料とした静的破砕剤の代替に、コンクリート用膨張材(以下、膨張材とする)を多量に混入したモルタル(以下、膨張モルタルとする)の静的破砕剤としての適用性を確認することを目的とした。

ここでは、膨張モルタルの使用材料および調合の相違による基礎的性状を明らかにするため、フロー値、温度変化、圧縮強さ、曲げ強さおよび長さ変化率について検討を行った。さらには、小型の鉄筋コンクリート試験体に膨張モルタルを充填した際の破砕性状について検討を

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
セメントの種類	普通ポルトランドセメント(N) 低熱ポルトランドセメント(L)
膨張材の混入量(kg/m ³)	60, 120

表-2 膨張モルタルの使用材料

使用材料	名称	品質
水 (W)	上水道水	—
結合材 (B)	セメント (C)	普通ポルトランドセメント(N) 密度: 3.16g/cm ³ 低熱ポルトランドセメント(L) 密度: 3.22g/cm ³
	膨張材 (E)	石灰系低添加型 密度: 3.16g/cm ³
細骨材 (S)	栃木県栃木市尻内町産陸砂	表乾密度: 2.61g/cm ³

行った。

2. 膨張モルタルのセメント種類の違いが長さ変化率に及ぼす影響

膨張材を用いたコンクリートの長さ変化率は、使用するセメントの種類により、大きく異なるとした報告⁴⁾がある。ここでは、普通ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントを対象として、セメントの種類が膨張モルタルの長さ変化率に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2.1 実験概要

(1) 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表-1 に示す。本実験では、セメントの種類および膨張材の混入量を変化要因とし、膨張モルタルの長さ変化率について検討した。

(2) 膨張モルタルの使用材料および調合

膨張モルタルの使用材料を表-2、膨張モルタルの調

*1 ものつくり大学大学院 ものつくり学研究科 ものつくり学専攻 (学生会員)

*2 ものつくり大学 技能工芸学部 建設学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 理工学部 建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

表-3 膨張モルタルの調合

セメントの種類	W/B (%)	B	単位量(kg/m ³)				C : E	Ad (B×%)
			C	E	W	S		
N	50	632	572	60	316	1264	9.5:1	-
			512	120	316	1264	4.3:1	
634		574	60	318	1268	9.6:1		
		514	120			4.3:1		

合を表-3 に示す。セメントには、普通ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントを用い、膨張材には JIS A 6202 : 2008 「コンクリート用膨張材」に準拠した石灰系の低添加型を用いた。膨張モルタルは、水結合材比(以下、W/B とする)を 50%，膨張材の混入量を 60kg/m³ および 120kg/m³ とした。使用した膨張材は標準混入量が 20kg/m³，最大混入量が 30kg/m³ の製品である。また、結合材(膨張材およびセメント)と細骨材の質量比は、すべての水準において 1:2 とした。

(3) 膨張モルタルの長さ変化試験および試験方法

膨張モルタルの長さ変化試験は、40×40×160mm の寸法の供試体を対象とした。長さ変化率は、膨張モルタルの膨張量が数 mm 程度と過大であるため、電子ノギス(最小読取値 0.01mm)を用いて供試体の長辺方向の長さ変化を mm 単位で測定するものとした。長さ変化率は、(1)式によって算出した。

$$\varepsilon = \frac{X_n - X_0}{X_0} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 ε : 長さ変化率(%), X_0 : 型枠の取外しの直後の長さ(mm), X_n : 型枠の取外しから n 時間後の長さ(mm)

膨張モルタルの練混ぜにはモルタルミキサを用い、型枠の取外しは打込み後、材齢 2 日に行った。長さ変化率は、型枠を取外した直後から材齢 9 日まで、12 時間毎に測定し、1 水準につき 3 体の供試体の平均を用いた。また、膨張モルタルの練混ぜ、打込みおよび長さ変化率の測定は、室温 20±2℃、相対湿度 60±5% の恒温恒湿室内で行った。

2.2 結果および考察

経過時間と長さ変化率の関係を図-1 に示す。膨張モルタルの長さ変化率は、いずれのセメントとも膨張材の混入量が多いほど大きくなる傾向を示した。

セメントの種類による長さ変化率は、膨張材の混入量が 60kg/m³ の場合は差異がわずかであった。一方、膨張材の混入量が 120kg/m³ の場合は、測定開始後 48 時間以降の長さ変化率に顕著な差異が認められ、普通ポルトランドセメントと比較して低熱ポルトランドセメントの方が大きくなる傾向を示した。これは、膨張材が水和反応して膨張する際に、これを拘束するセメントマトリックスの初期強度の発現性が低熱ポルトランドセメントの方が小さいため⁵⁾と推察される。

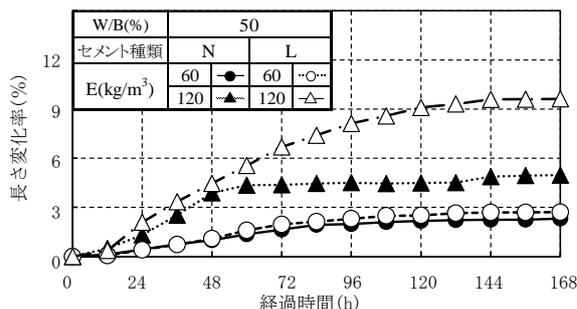


図-1 経過時間と長さ変化率の関係

表-4 実験の要因と水準

要因	水準
水結合材比(W/B)(%)	20, 35, 50, 65
膨張材の混入量(kg/m ³)	60, 90, 120
化学混和剤の添加量(B×%)	0.5, 1.75, 3.0

3. 膨張モルタルの調合要因の違いが各種性状に及ぼす影響

前章の結果から、膨張モルタルの長さ変化率は、普通ポルトランドセメントに比べ低熱ポルトランドセメントが大きくなる傾向を示した。そのため、以降の検討では、セメントに低熱ポルトランドセメントを用いた膨張モルタルを対象に検討を行った。

3.1 実験概要

(1) 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表-4 に示す。本実験では、水結合材比、膨張材の混入量および化学混和剤の添加量を変化要因とし、膨張モルタルのフロー値、温度変化、圧縮強さ、曲げ強さおよび長さ変化率に及ぼす影響について検討した。

(2) 膨張モルタルの使用材料および調合

膨張モルタルの調合を表-5 に示す。セメントには低熱ポルトランドセメントを用い、W/B を 20%, 35%, 50% および 65%, 膨張材の混入量を 60kg/m³, 90kg/m³ および 120kg/m³ とした。また、化学混和剤は、高性能 AE 減水剤を用い、添加量を結合材の質量に対して 0.5%, 1.75% および 3% とした。なお、水結合材比 50% および 60% には添加しなかった。

(3) 試験項目および試験方法

試験項目は、膨張モルタルのフロー値、温度変化、圧縮強さ、曲げ強さおよび長さ変化率の 5 項目とした。

膨張モルタルのフロー値の測定は、JIS R 5201 : 1997 「セメントの物理試験方法」に準拠した。温度変化の測定は、φ100mm×200mm の円柱供試体の中心部に T 型熱電対を埋め込み、膨張モルタルの充填後、12 時間毎に測定を行った。なお、膨張モルタルの充填は、練混ぜ後、1 分以内に行い、充填が完了した直後から測定を開始した。圧縮強さおよび曲げ強さは、JIS R 5201 : 1997 「セメントの物

表-5 膨張モルタルの調合

セメントの種類	W/B (%)	B	単位量(kg/m ³)				C : E	Ad* (B×%)
			C	E	W	S		
L	20	782	722	60	157	1566	12:1	0.5
								1.75
								3.0
			692	90			5.5:1	0.5
								1.75
								3.0
	662	120	11:0	0.5				
				1.75				
				3.0				
	35	700	640	60	246	1402	6.8:1	0.5
								1.75
								3.0
610			90	4.8:1			0.5	
							1.75	
							3.0	
580	120	9.6:1	0.5					
			1.75					
			3.0					
50	634	574	60	318	1268	6:1	0.5	
							1.75	
							3.0	
		514	90			8.6:1	0.5	
							1.75	
							3.0	
65	578	518	60	377	1159	5.4:1	0.5	
							1.75	
							3.0	
		488	90			3.8:1	0.5	
							1.75	
							3.0	
458	120	-	0.5					
			1.75					
			3.0					

理試験方法」に準拠し、材齢9日における長さ変化率の測定後に行った。長さ変化率は、型枠の取外しの直後から電子ノギスを用い、前章と同様の方法により7日間、12時間毎に測定を行った。

3.2 結果および考察

(1) フロー値

水結合材比とフロー値の関係を図-2に示す。膨張モルタルのフロー値は、高性能 AE 減水剤を添加した水準において添加量に比例して概ね大きくなる傾向を示した。また、同一の添加量の場合には、W/B が小さいほどフロー値が小さくなる傾向を示した。一方、膨張材の混入量の違いによる差異はわずかであった。

(2) 温度変化

経過時間と温度変化の関係を図-3に示す。膨張モルタルの温度は、充填直後から上昇し、測定開始から12時間後に最高温度となった。膨張モルタルの最高温度は、すべての水準においておよそ24℃程度であり、W/B および膨張材の混入量の違いによる差異はわずかであった。また、測定開始から12時間後以降の膨張モルタルの温度は時間経過とともに低下し、測定開始から72時間以降に外気温に追従する傾向を示した。これにより、本実験で使用した膨張モルタルは、生石灰を主原料とした静的破砕剤のように急激な温度変化が少なく、作業性に支障のない範囲の温度変化であることが分かる。

(3) 圧縮強さおよび曲げ強さ

膨張材の混入量と圧縮強さおよび曲げ強さの関係を図-4に示す。膨張モルタルの圧縮強さは、既往の研究

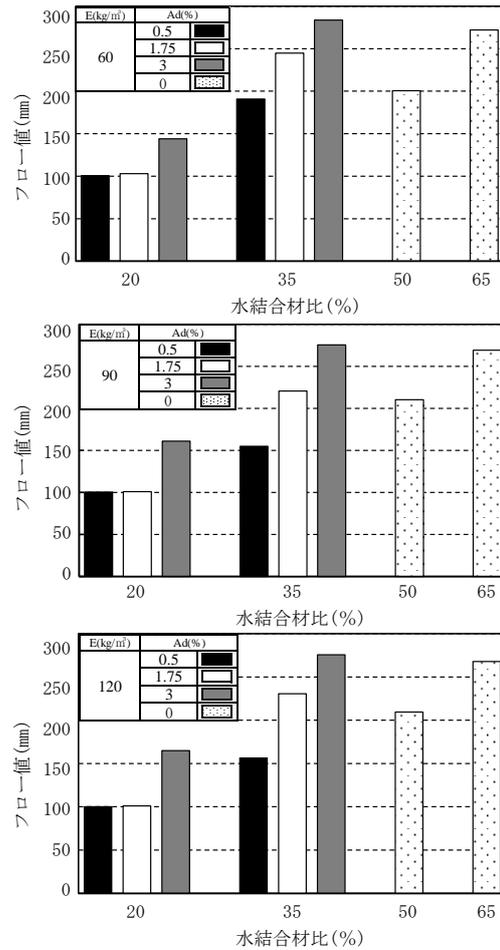


図-2 膨張モルタルの水結合材比とフロー値の関係

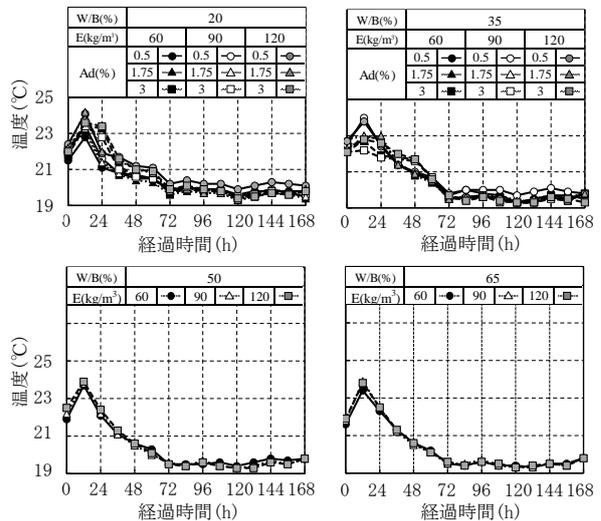


図-3 膨張モルタルの膨張材の混入量における経過時間と温度変化の関係

と同様に、膨張材の混入量が多いほど小さくなる傾向を示した。これは、曲げ強さに関しても同様の傾向を示しており、膨張材の混入量に比例して長さ変化率が大きくなることにより、セメント粒子間の結合力が低下したためと推察される。なお、膨張材の混入量を120kg/m³とした供試体は、表面に目視で確認できるひび割れが生

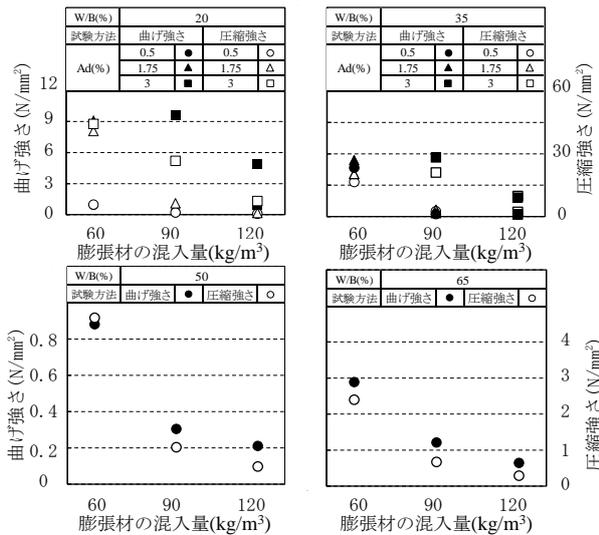


図-4 膨張材の混入量と圧縮強さおよび曲げ強さの関係

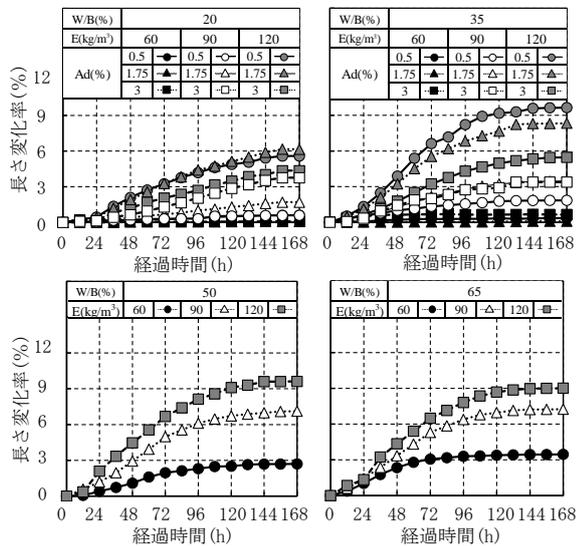


図-5 膨張モルタルの膨張材の混入量における経過時間と長さ変化率の関係

じ、表面が剥離することが確認された。W/B20%および35%の圧縮強さおよび曲げ強さは、高性能 AE 減水剤の添加量が多いほど大きくなる傾向を示した。これは、高性能 AE 減水剤の添加量が多くなるにつれて、フロー値が大きくなり、密実に打込めたためと推察される。

(4) 長さ変化率

経過時間と長さ変化率の関係を図-5 示す。膨張モルタルの長さ変化率は、同一の W/B であれば膨張材の混入量が多いほど大きくなる傾向を示した。

W/B の違いによる長さ変化率は、膨張材の混入量が 60kg/m^3 では、W/B に比例して大きくなる傾向を示した。一方で、膨張材の混入量が 120kg/m^3 の長さ変化率は、W/B20%を除いて W/B の相違によらず概ね同等となる傾向を示した。W/B20%の膨張モルタルに関しては、粘性が高く、均一に練混ぜることができず、膨張材の水和反応

表-6 実験の要因と水準

要因	水準
セメントの種類	低熱ポルトランドセメント(L)
水結合材比(%)	20, 35, 50, 65
膨張材の混入量(kg/m^3)	120

表-7 膨張モルタルの調査

セメントの種類	W/B (%)	B	単位量(kg/m^3)				C : E	Ad* (B×%)
			C	E	W	S		
L	20	782	662	120	157	1566	5.5:1	0.5
	35	700	610	120	246	1402	4.8:1	1.75
	50	634	514	120	318	1268	4.3:1	-
	65	578	458	120	377	1159	3.8:1	-

表-8 鉄筋コンクリート試験体に用いたコンクリートの調査

セメントの種類	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				圧縮強度 (N/mm^2)	割裂引張強度 (N/mm^2)
				W	C	S	G		
N	4.5	40	40	184	460	705	920	49.6	4.2

量が 60kg/m^3 および 120kg/m^3 については、膨張材が同一の混入量で W/B を変化させても膨張量に変化はないとする既往の研究⁴⁾と異なる結果を示しており、今後更なる検討が必要である。

高性能 AE 減水剤の添加量による長さ変化率は、高性能 AE 減水剤の添加量に応じてセメント粒子および膨張材の分散性が向上し、長さ変化率が大きくなると予想されたが、必ずしも一定の傾向を示さなかった。

4. 低熱ポルトランドセメント膨張モルタルを充填した鉄筋コンクリート試験体の破砕性状

前章の結果から、膨張材の混入量が多くなるほど膨張モルタルの長さ変化率が大きくなる傾向が分かった。これを踏まえて、ここでは最も長さ変化率の大きかった膨張材の混入量が 120kg/m^3 の調査を対象とし、小型の鉄筋コンクリート試験体に膨張モルタルを充填して破砕できるか検討を行った。

4.1 実験概要

(1) 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表-6 に示す。本実験では、水結合材比を変化要因とし、鉄筋を配筋したコンクリート試験体の中心に膨張モルタルを充填した場合の破砕状況に及ぼす影響について検討した。

(2) 膨張モルタルの使用材料および調査

膨張モルタルの調査を表-7 に示す。セメントには低熱ポルトランドセメントを用い、W/B を 20%、35%、50% および 65%、膨張材の混入量を 120kg/m^3 とした。化学混和剤には高性能 AE 減水剤を用い、添加量を結合材の質量に対して 0.5% および 1.75% とした。

(3) 鉄筋コンクリート試験体の概要

鉄筋コンクリート試験体に用いたコンクリートの調査を表-8 示す。セメントには、普通ポルトランドセメ

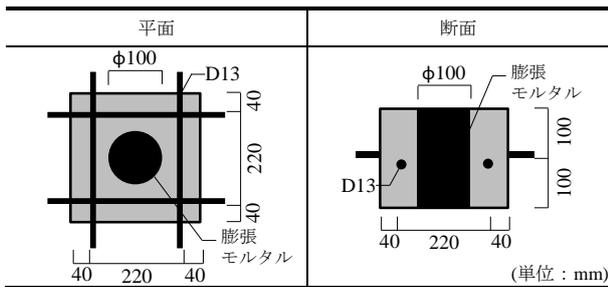


図-6 鉄筋コンクリート試験体の概要

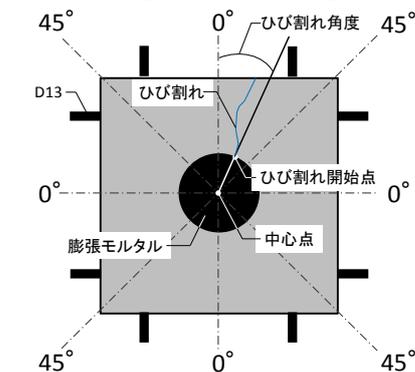


図-7 鉄筋コンクリート試験体のひび割れ発生角度の測定方法

ントを用い W/C を 40% とした。なお、材齢 28 日の圧縮強度は 49.6N/mm^2 、割裂引張り強度は 4.2N/mm^2 であった。

鉄筋コンクリート試験体の概要を図-6 に示す。鉄筋コンクリート試験体の寸法は、 $W300 \times L300 \times H200\text{mm}$ とし、配筋方法は D13 を用いたシングル配筋、鉄筋のかぶり厚を 40mm とした。また、膨張モルタルは、鉄筋コンクリート試験体の中心部を貫通させた高さ 200mm、 $\phi 100\text{mm}$ の円筒状に充填した。

(4) 試験項目および試験方法

鉄筋コンクリート試験体に用いたコンクリートの練混ぜおよび打込みは室温 20°C の恒温室内で行った。型枠の取外しは、コンクリートの打込み後材齢 2 日に行い、材齢 28 日に膨張モルタルを充填した。膨張モルタルの充填孔は、膨張モルタルを充填する 2 日前に削孔した。充填後、鉄筋コンクリート試験体および充填孔の上面は、暴露させ、底面は、コンクリート用型枠合板を用い塗装面が膨張モルタルと接するよう配置し、鉄筋コンクリート試験体以外の拘束は無いものとした。

ひび割れ幅の測定は、NDIS 3418 : 2012「コンクリート構造物の目視試験方法」に準拠し、クラックスケールを用いて行い、測定期間は膨張モルタルを充填してから 7 日間 12 時間毎に行った。測定項目は、ひび割れの本数と発生順序、ひび割れの幅、発生時間および発生角度とした。

鉄筋コンクリート試験体のひび割れ発生角度の測定方法を図-7 に示す。ひび割れの発生角度は、膨張モル

膨張モルタルの W/B (%)	ひび割れの発生本数(本)	破砕状況 ※図中の番号はひび割れが発生した順番を示す。
20	6	
35	5	
50	4	
65	1	

図-8 膨張モルタルの水結合材比の違いによる破砕状況

タルの充填位置の円周に接するひび割れの端点をひび割れ開始点とし、これと充填位置の中心とを直線で結んだ角度とした。また、基準となる角度は、最も異形鉄筋と充填した膨張モルタルの距離が近い角度を 0° 、最も遠い角度を 45° と定め、 0° から 45° の範囲で測定を行った。測定期間中は、室温 20°C の恒温室内で気中養生を行った。

4.2 結果および考察

(1) 膨張モルタルの水結合材比の違いによる破砕状況

膨張モルタルの水結合材比の違いによる破砕状況を図-8 に示す。図中の番号は、ひび割れが発生した順序を示したものである。なお、測定を 12 時間毎としたため、測定時間間隔の 12 時間以内に複数発生したひび割れについては同順の番号とした。

鉄筋コンクリート試験体のひび割れは、膨張モルタルの水結合材比が小さいほど、発生本数は増加する傾向を示し、膨張モルタルの W/B が 20% では 6 本のひび割れを観察した。また、測定開始から 7 日目に各水準で最大となったひび割れ幅(以下、最大終局ひび割れ幅とする)は、膨張モルタルの W/B が 20% および 35% では、2 本目、50% および 65% では 1 本目となった。

(2) 膨張モルタルの水結合材比とひび割れ発生角度および発生角度の関係

膨張モルタルの水結合材比とひび割れ発生時間およ

ひび割れ発生角度の関係を図-9に示す。1本目のひび割れ発生時間は、膨張モルタルの水結合材比が小さいほど早くなる傾向を示したが、静的破碎剤のような急激なひび割れ^{*)}は確認できなかった。また、1本目のひび割れ発生角度は、すべての水準で15°を下回り、鉄筋との距離が近い部分からひび割れが発生することが分かる。

(3) 膨張モルタルの水結合材比とひび割れ幅の関係

最大終局ひび割れ幅となったひび割れにおける経過時間とひび割れ幅の関係を図-10に示す。同図は、W/Bごとの最大終局ひび割れ幅となったひび割れの経時変化を示したものである。ひび割れ幅は、W/B20%の膨張モルタルを除いて、水結合材比が小さくなると大きくなる傾向を示し、最大で2mmのひび割れ幅となった。W/B20%の膨張モルタルについては、前述した図-2からも見て取れるようにフロー値が小さく、十分な充填性が確保できたとは言いがたい。これにより、充填時に鉄筋コンクリート試験体との間に空隙が生じ、膨張モルタルの膨張圧の伝達が阻害されたと推察される。

5. まとめ

本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) セメント種類の違いが長さ変化率に及ぼす影響は、単位膨張量が増えるにつれて、低熱ポルトランドセメントの長さ変化率が大きくなる傾向を示した。
- (2) フロー値は、高性能AE減水剤の添加量に比例して大きくなる傾向を示した。また、膨張材の混入量の違いによる差異はわずかであった。
- (3) 膨張モルタルの長さ変化率は、同一のW/Bであれば膨張材の混入量が多いほど大きくなる傾向を示した。
- (4) 温度変化は、W/Bおよび膨張材の混入量の違いによる差異はわずかであり、静的破碎剤のような急激な温度変化が少なく作業性に支障のない範囲であった。
- (5) 鉄筋コンクリート試験体に膨張モルタルを充填した場合は、水結合材比が小さいほどひび割れ発生時間が早くなる傾向を示したが、静的破碎剤のような急激なひび割れ^{*)}は確認できなかった。また、1本目のひび割れは、鉄筋の近傍から発生する傾向を示した。
- (6) 最大終局ひび割れ幅は、W/B20%の膨張モルタルを除いて、水結合材比が小さくなると大きくなる傾向を示した。

謝辞

本研究は、「平成26年度公益社団法人全国解体工事業団体連合会・解体工事に係る研究助成金」を受け実施した。また、ものづくり大学技能工芸学部建設学科大塚研究室の学生より多大な助力を得た。ここに、記して謝意を表す。

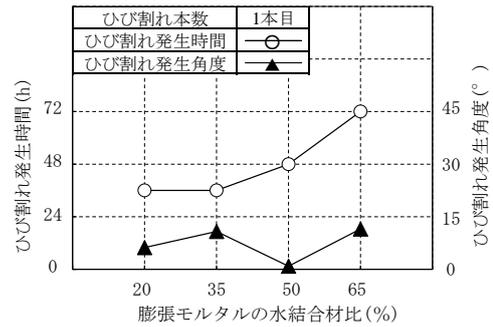


図-9 膨張モルタルの水結合材比とひび割れ発生時間およびひび割れ発生角度の関係

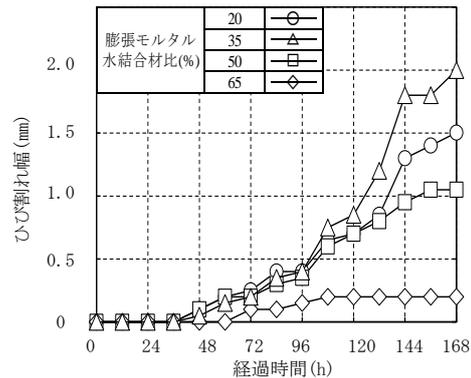


図-10 最大終局ひび割れ幅となったひび割れにおける経過時間とひび割れ幅の関係

参考文献

- 1) 南谷崇文, 青木孝義, 藤本郷史: 127 階上解体工事における建築物の安全性に関する研究, 日本建築学会東海支部研究報告書, 第 51 号, pp.105-108, 2013.2
- 2) 山崎之典: 静的破碎剤, 石膏と石灰, No.208, pp.175-183, 1987
- 3) 河野俊夫: 非爆性破碎剤, 石膏と石灰, No. 176, pp.41-48, 1982
- 4) 土木学会編: コンクリートライブラリー75 膨張コンクリート設計施工指針, pp.93-110, 1993
- 5) 狩野周, 細田暁, 八巻大介: 低熱セメント系膨張コンクリートの膨張性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.221-226, 2006
- 6) 小川晴果, 小柳光生, 堀長生: ひび割れ低減左官モルタルの開発その 1 収縮低減剤及び膨張材の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 分冊, pp.253-254, 2005.9
- 7) 五味秀明: コンクリート用膨張材, Journal of Society of the Inorganic Materials Japan, Vol.12, No.314, pp.54-61, 2005
- 8) 花崎紘一, 堀川晋彦: 静的破碎剤の有効利用に関する一考察, 福井工業大学研究紀要, 第 41 号, pp.234-237, 2011