

論文 強さ 32.5 クラスのセメントを用いたモルタルにおける初期ひび割れの強度回復特性

清崎 里恵*1・松下 博通*2・陶 佳宏*3

要旨：欧州規格の強さ 32.5 クラスに相当するセメント 2 種類と JIS の普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント、高炉セメント B 種を使用して、初期ひび割れ強度回復特性を比較した。その結果、強さ 32.5 クラスセメントに関しても、JIS セメントと同様に初期ひび割れ近傍に残存する未水和セメントの水和により初期ひび割れ部分が閉塞し、強度が回復することが分かった。また、高炉スラグ微粉末を混入した BL セメントでは高炉スラグの潜在水硬性が影響し、長期材齢において JIS のセメントよりも優れた強度回復を示した。

キーワード：強さ 32.5 クラスセメント、初期ひび割れ、3 点曲げ試験、強度回復率

1. はじめに

近年、土木技術の進展に伴い、長大橋、超高層ビル、大深度地下構造物、大規模海中構造物等の建設が進み、コンクリートに要求される強度は大きくなっている。同時に、セメントに対する施工側のニーズも、施工期間の短縮化や、必要強度を得るためのセメント量低下によるコスト削減を目的として、強度発現性が重要視されてきた。また、そのような施工側の要求に呼応するかのように、セメントの品質も JIS にて強度下限値を定められ、高い早期強度発現が得られるようにセメントの細粒化が進められた。しかし、コンクリート構造物の剥落事故やひび割れ等の劣化現象が明らかとなったことで、コンクリート構造物は耐荷性に加え、高耐久であることが要求されるようになった¹⁾。

一方、欧州規格(EN197-1:2000)では、セメントは強さの上限値及び下限値の違いにより、32.5, 42.5, 52.5 クラスの 3 水準に分類され、安定した強さと共に耐久性能を保持した規準を設定している。そこで、JIS のセメントを欧州規格に区分すると普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントは 52.5 クラスセメントに、混合セメントは、42.5 または 52.5 クラスに

分類され、JIS のセメントは強さを重視していることが分かる。現在、この欧州規格が ISO 規格の原案となり²⁾、今後 JIS の ISO 規格との整合化が検討されている。

そこで本研究では、JIS の普通ポルトランドセメントを基材として試作した強さ 32.5 クラスに相当するセメントを用い、初期ひび割れに関する検討を行った。コンクリートに発生した初期ひび割れは、耐荷性能を低下させる上、中性化や塩害の進行を助長し、耐久性能を低下させる。土木学会コンクリート標準示方書は 2002 年に性能照査型へ移行したが、初期ひび割れによるコンクリートの破壊機構は未解明な部分が多く、示方書には初期ひび割れが強度及び耐久性に及ぼす影響について、詳細な項目が設定されていない。著者らは既往の研究³⁾において、JIS のセメントを用いた供試体が初期ひび割れ発生後、水中養生を十分行うことで、内部に残存する未水和セメントが初期ひび割れ近傍で水和し強度回復することを報告している。本研究では、強さ 32.5 クラスに相当するセメントを用いた場合の初期ひび割れの強度回復特性を明らかにし、JIS セメントを用いた場合と比較した。

* 1 九州大学大学院生 工学府 建設システム工学専攻 (正会員)

* 2 九州大学教授 大学院工学研究院 建設デザイン部門 (正会員)

* 3 九州大学助手 大学院工学研究院 建設デザイン部門 (正会員)

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用したセメントは、強さ 32.3 クラスの LS、BL セメントおよび JIS の普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント、高炉セメント B 種である。表-1 に使用セメントの物性を示す。

表-1 使用セメントの物性

セメントの種類	密度 (g/cm ³)	圧縮強度(N/mm ²)			強さクラス
		3d	7d	28d	
普通ポルトランド	3.16	29.2	43.6	62.7	52.5
低熱ポルトランド	3.24	8.1	11.4	52.8	—
高炉スラグB種	3.04	23.8	35.8	61.8	52.5
LS	3.00	20.3	31.6	41.0	32.5
BL	3.02	19.6	31.8	46.8	32.5

LS セメントは、セメント質量に対し石灰石微粉末 28.6%を置換し、流動性に優れた石灰石ファイラーセメントとした⁴⁾。BL セメントは高炉スラグ微粉末 14.3%、石灰石微粉末 21.4%を基材と置換した3成分系混合セメントとした。なお、表-1 では欧州規格における強度のクラス分けを行ったが、低熱ポルトランドセメントは、初期強度が小さく、欧州規格に該当しなかった。

2.2 実験方法

供試体は JIS R 5201 に準じ、W/C=50%、S/C=3 のモルタル供試体を作製した。この供試体を脱型後、第一載荷試験時の材齢まで 20℃の水中で養生を行った(初期養生)。所定材齢に達した時点で、ひび割れ箇所を限定するために、図-1に示すように供試体中央部に深さ 1cmの切欠きを湿式コンクリートカッターで導入し、初期ひび割れ導入のための3点曲げ試験(第一載荷試験)を行った。本研究では、3点曲げ試験において荷重と供試体底面部に取り付けたクリップ型変位計を用いてひび割れ開口変位(CMOD)を測定した。なお、第一載荷試験では、荷重が最大荷重を迎えた後、CMOD が最大荷重時の

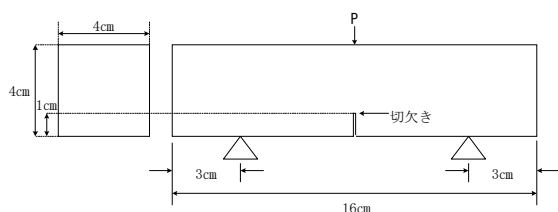


図-1 供試体の形状・寸法および載荷方法

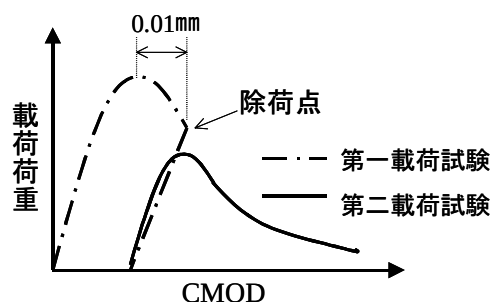


図-2 各試験の荷重-CMOD の概要

CMOD よりも 0.01 mm大きくなった時点で除荷した(図-2)。

第一載荷試験を終えた供試体は、再度 20℃の水中で所定の期間、養生(第二養生)を行った後、2回目の3点曲げ試験(第二載荷試験)で完全に破壊させた。

表-2 に各載荷試験材齢の組合せを示す。ここで、各試験材齢は打設日からの材齢とした。表中において、(1-1)、(3-3)のように各試験材齢が同一日とした組合せは、初期ひび割れ修復のための第二養生期間を設けず直ちに第二載荷試験を行う繰返し載荷試験とした。

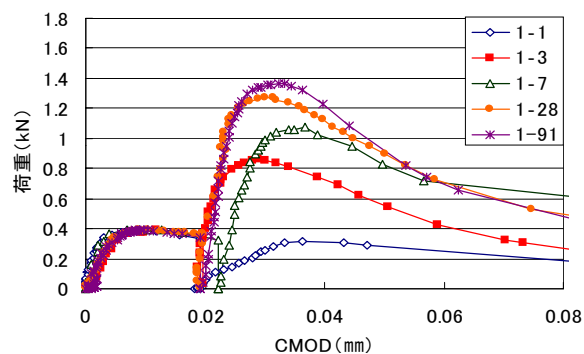
表-2 各試験材齢の組合せ

		第一載荷材齢(初期養生)				
		1日	3日	7日	28日	91日
第二載荷材齢	1日	1-1				
	3日	1-3	3-3			
	7日	1-7	3-7	7-7		
	28日	1-28	3-28	7-28	28-28	
	91日	1-91	3-91	7-91	28-91	91-91

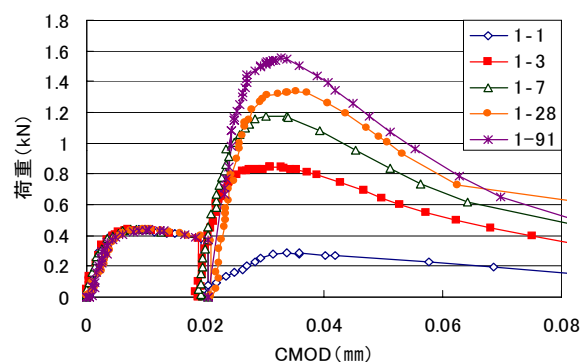
3. 実験結果および考察

3.1 強さ 32.5 クラスセメントの強度回復

まず、強さ 32.5 クラスのセメントが JIS のセメントと同様に、強度回復性能を有するか否かを確認した。図-3 に第一載荷材齢を 1 日とした場合、図-4 に第二載荷材齢 91 日とした場合の荷重-CMOD 関係を示す。ここで、本実験結果ではグラフを見やすくするために、除荷により回復される CMOD を省略している。この結果より、第二養生期間が長くなるにつれて、第二載荷時最大荷重も大きくなることが確認できる。また、LS、BL セメントの両方において、第二養生期間を設けていない (1-1)、(91-91)に関



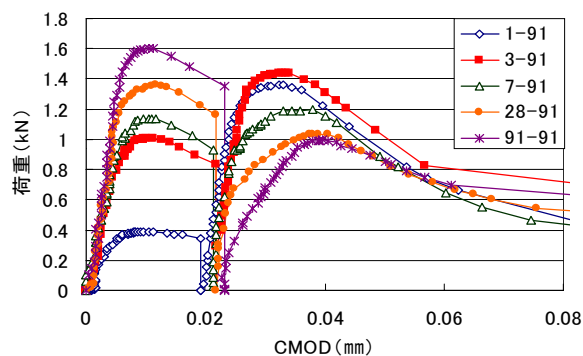
(a) LS セメント



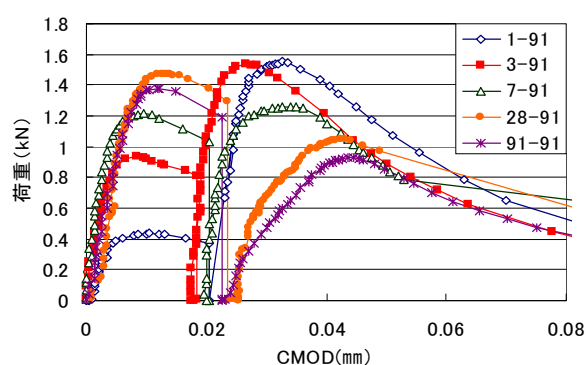
(b) BL セメント

図-3 第一載荷材齢 1 日の場合の
荷重-CMOD 関係

しては、第二載荷時の最大荷重が第一載荷時の最大荷重および除荷時の荷重を下回り、ひび割れを有したモルタルの強度低下が認められる。この現象、は破壊力学の観点⁵⁾から、第一載荷試験において最大荷重を迎えた後に荷重が低下する際、供試体の最終的な破断面となる部分で微細ひび割れが集中し始め、破壊進行領域が形成されると説明される。したがって、(91-91)のように繰返し載荷試験を行うと、第二載荷試験では破壊進行領域の形成に伴い応力伝達能力が低下するため、最大荷重が除荷時の荷重を下回ったと推測される。その一方、第二養生期間を設けた場合、第二載荷試験時における最大荷重は全て (1-1) や (91-91) の第二載荷試験時の最大荷重を上回っている。また、それらの値は第一載荷試験時における除荷時の荷重よりも増加した。よって、初期ひび割れ発生後に第二養生を行うことで、応力伝達能力の著しい低下を防ぐことができたものと考えられる。



(a) LS セメント



(b) BL セメント

図-4 第二載荷材齢 91 日の場合の
荷重-CMOD 関係

以上の結果より、強さ 32.5 クラスセメントにおいても JIS のセメントと同様、初期ひび割れが発生しても、初期ひび割れ発生後に養生期間を設けることで、強度が回復することが分かった。また、初期ひび割れ発生時期が早く、第二養生期間が長いほど、強度回復が大きいことが明らかとなった。

3.2 初期ひび割れ修復に伴う強度回復量

次に、セメントの種類、初期ひび割れ発生時期が初期ひび割れ修復に伴う強度回復量に及ぼす影響を調べるために、強度上昇率を用いて比

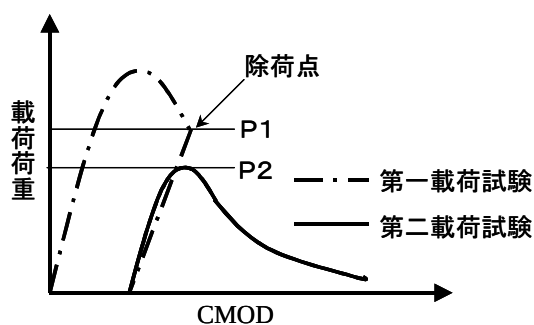


図-5 強度上昇率算定の方法に用いる
荷重-CMOD の関係

較を行った。強度上昇率とは、図-5 に示すように第二載荷試験時最大荷重(P2)を第一載荷試験における除荷荷重(P1)で除した値であり、供試体破断面におけるセメントの水和反応に伴う強度増加量を比較するものである。

各セメントの強度上昇率と第二載荷材齢の関係を図-6 に示す。図より、強さ 32.5 クラスのセメントは特に第一載荷材齢 1 日に関して強度上昇率が高く、その他の組合せは普通ポルトランド、高炉セメントの強度上昇率と同等の値となっていることが分かる。また、低熱ポルトランドセメントの強度上昇率は他のセメントよりも高い値を示した。一方、いずれのセメントに関しても繰返し載荷試験および(28-91)の強度上昇率が 1 以下となり、セメントの水和反応が収束したと考えられる。

以上より、初期ひび割れ修復に伴う強度増加は初期ひび割れ発生時期が早いほど、また強度発現が遅いセメントほど大きくなり、強さ 32.5 クラスのセメントは、低熱ポルトランドセメントには劣るが、初期ひび割れ発生時期が早いほど JIS のセメント以上に強度回復が有効となることが確認された。

3.3 未水和セメントの水和による影響

3.2 の強度上昇率では、同一供試体について第二養生の前後で強度増加量を比較したため、初期ひび割れ部分の修復作用に伴う強度増加と初期ひび割れ上方部における材齢に伴う強度増加の 2 つの要因が影響したと考えられる。したがって、ここでは以下に示す強度回復率を算定することで、初期ひび割れ閉塞による強度増加のみに注目した。ここで、強度回復率とは第二養生期間を設けた供試体の第二載荷時の最大荷重

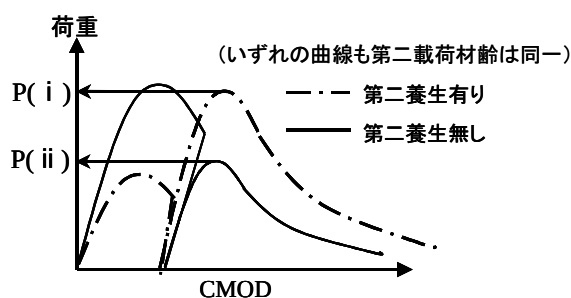
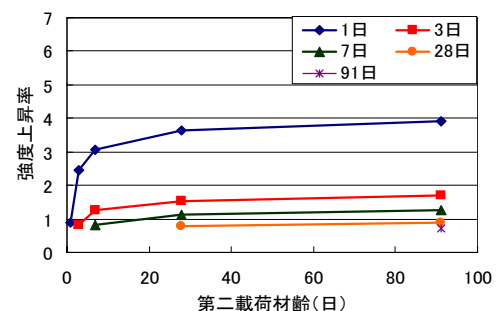
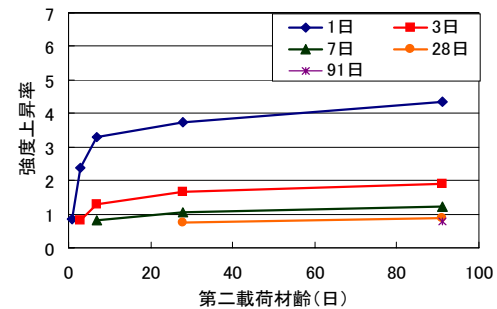


図-7 強度回復率算定の概略図

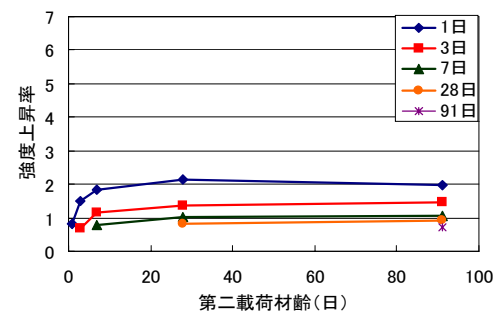
($P(i)$)を $P(ii)$ の第二載荷材齢と同一材齢に繰



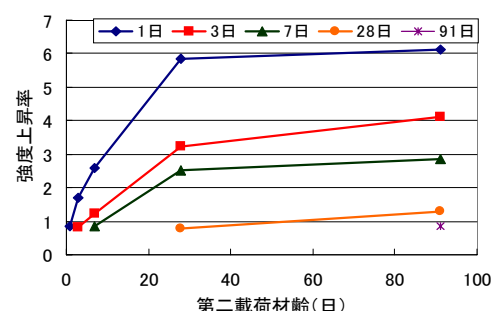
(a) LS セメント



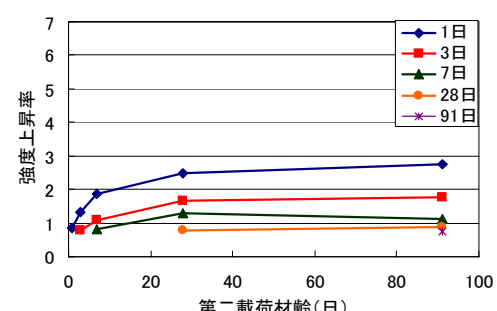
(b) BL セメント



(c) 普通ポルトランドセメント



(d) 低熱ポルトランドセメント



(e) 高炉セメント B 種

図-6 強度上昇率と第二載荷材齢の関係

返し載荷試験を行った供試体の第二載荷時最大荷重(P(ii))で除した値であり、図-7に強度回復率算定の概略図を示す。この強度回復率の値が1以上であれば、第二載荷試験時の強度増加が初期ひび割れ近傍に残存した未水和セメントの水和により初期ひび割れ部分が閉塞したと考えた。

各セメントの強度回復率と第二載荷材齢の関係を図-8に示す。いずれのセメントに関しても全ての載荷材齢の組合せで強度回復率が1以上の値を示した。この結果より、第二載荷試験における最大荷重の増加には、未水和セメントの水和により初期ひび割れ閉塞が関与していることが確認された。

まず、強さ32.5クラスのセメントと普通ポルトランドセメントを比較すると、強度回復率の値はほぼ同等であり、第二載荷材齢が長くなると強さ32.5クラスのセメントの方が高い強度回復率を示している。したがって、強さ32.5クラスのセメントはJISのセメント以上に、未水和セメントの水和による初期ひび割れ閉塞が促進されることが確認された。

また、低熱ポルトランドセメントは、第二載荷材齢28日において最も高い強度回復率を示している。これは、セメントの強度発現が遅いことから、初期ひび割れ近傍に残存する未水和セメント量が多く、初期ひび割れの修復が十分に行われたためと考えられる。第二載荷材齢91日の値が低下した原因は、強度上昇率の結果を踏まえると、材齢に伴う強度発現量が初期ひび割れ修復に伴う強度回復量を上回ったためと推測される。

一方、BLセメントは第二載荷材齢91日に関して、高い強度回復率となっている。これは、BLセメントには高炉スラグ微粉末が混入されていることから、スラグの潜在水硬性により硬化体組織が緻密化し、強度が増加したと考えられる。しかし、高炉セメントB種では、BLセメントの強度回復率ほど高くない結果となった。したがって、セメントを強さ32.5クラスに調整

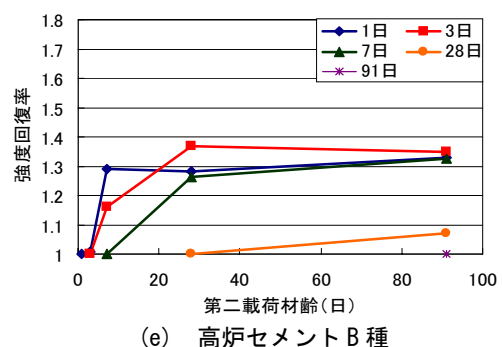
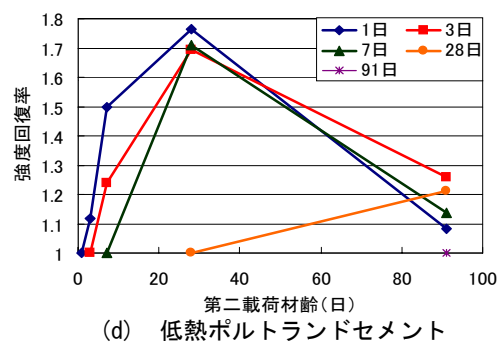
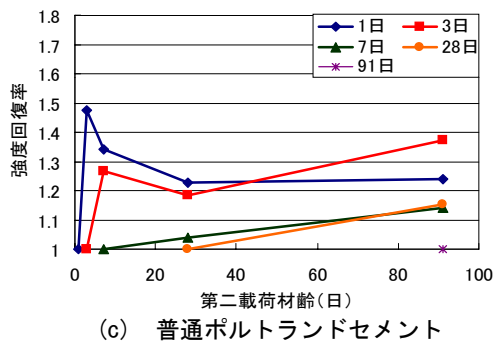
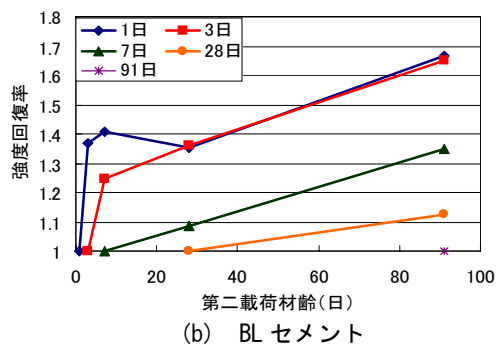
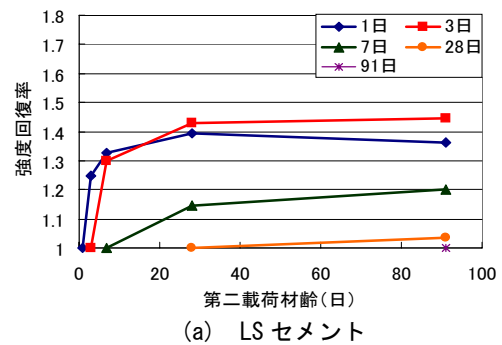


図-8 強度回復率と第二載荷材齢の関係

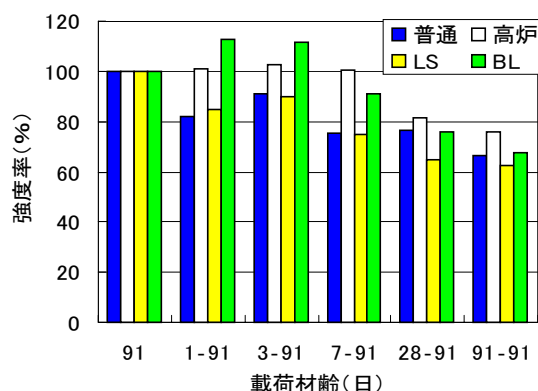
することで、初期強度発現を低減させ、初期ひび割れ修復に必要な未水和セメント量が確保され、加えて水硬性を発揮するスラグが強度の増加を促したと考えられる。高炉セメント B 種では、セメント分が少なく初期ひび割れの修復に必要な未水和セメントが初期ひび割れ近傍においても減少したと推測される。

3.4 初期ひび割れ修復が強度へ及ぼす影響

最後に、図－9 に強度率と材齢の関係を示す。表－3 にその基準値となる材齢 91 日における最大荷重値を示す。強度率とは、初期ひび割れを導入せずに切欠きのみを導入した供試体の最大荷重を 100% として、最終載荷材齢が同一の供試体の第二載荷時における最大荷重との比較を行ったものである。

まず、普通ポルトランドセメントと LS セメントを比較すると、強度率はほぼ同等の結果となった。しかし、BL セメントに関しては、特に初期ひび割れ導入時期が早い(1-91)、3-91)では強度率が高く、健全な供試体と同程度まで強度が回復している。これは、前述の通り、初期ひび割れを導入することで、新たな未水和セメントが露呈されて水和反応が促進されたことに加え、高炉スラグ微粉末が有する潜在水硬性が発揮されたためと考えられる。

そのため、BL セメントに加え高炉セメント B



図－9 強度率

表－3 材齢 91 日における最大荷重 (kN)

セメントの種類	最大荷重
普通ポルトランドセメント	1.51
高炉セメントB種	1.51
LSセメント	1.60
BLセメント	1.38

種においても、普通ポルトランドセメントよりも高い強度率となっている。したがって、初期ひび割れ修復に伴う強度回復には、初期ひび割れ発生時期や修復期間、セメントの強度発現特性に加え、セメントの付加的要因が混在して強度回復に影響を及ぼすことが分かった。

4. まとめ

強さ 32.5 クラスに相当するセメントを用いた初期ひび割れ修復による強度回復特性に関して、本研究で明らかになった知見を以下に述べる。

(1) 強さ 32.5 クラスのセメントにおいても、JIS セメントと同様に初期ひび割れが発生した後、初期ひび割れ近傍に顕在した未水和セメントの水和に伴う強度回復が認められ、その回復量は JIS のセメントに劣らない。

(2) 強さ 32.5 クラスのセメントは、初期ひび割れ発生時期が早く修復期間を長くすることで、初期ひび割れ閉塞による強度回復が大きくなる。

(3) BL セメントは潜在水硬性を発揮する高炉スラグ微粉末と初期ひび割れ閉塞に影響するセメント量の混合割合が初期ひび割れ修復に伴う強度回復に適し、強度率は JIS のセメントよりも高くなる。

参考文献

- 1)セメント共同試験報告書：(社)セメント協会，1996
- 2)羽原俊裕，山田一夫：もう一度セメントを見つめ直してみよう，コンクリートテクノ，Vol.20，No.9，pp.70－78，2001.9
- 3)松下博通，陶佳宏，清崎里恵：初期ひび割れを導入したモルタルの強度回復特性，コンクリート工学論文集，第 14 巻，第 1 号，pp.57－66，2003.1
- 4)セメント協会：石灰石微粉末委員会報告書，2001.10
- 5)三橋博三：コンクリートの破壊の力学:魅力と展望，コンクリート工学，Vol.37，No.9，pp.4－10，1999