

論文 初期ひび割れ導入モルタルの自己修復特性に関する研究

内藤 哉良^{*1}・松下 博通^{*2}・鶴田 浩章^{*3}・佐川 康貴^{*4}

要旨：既往の研究において、EN規格の強さ32.5クラスに相当する、石灰石フィラーセメント、三成分系混合セメントは、初期ひび割れ導入後に湿潤養生を施すことで強度が回復されることが確認された。そこで本研究では、強度が回復し、初期ひび割れの耐荷性能低下が軽減されたモルタル供試体の耐久性能を評価することを目的とし、初期ひび割れ導入時期および水中養生期間を変化させたモルタル供試体の促進中性化試験を行った。その結果、中性化の進行はひび割れの修復量に依存し、初期ひび割れ導入後に湿潤養生を施すことにより、強度が回復するとともに中性化抵抗性の低下を軽減することが可能となることが確認された。

キーワード：初期ひび割れ、強度回復特性、32.5クラスセメント、中性化深さ

1. はじめに

セメントの製造技術が進歩したこと、高度成長期における建設ラッシュの中で初期強度発現性に優れたセメントを施工側が要求したことなどを受けて、現在の我が国におけるJISのセメントは、強度の下限値のみを規定してある。そのためJISのセメントは、早期強度発現性に優れ、かつ高強度なセメントへと発展してきた。しかし、コンクリートが安定した品質と耐久性を確保するためには、粉体量を確保でき良好なフレッシュ性状を有した、欧州規格中において強さ32.5クラスに相当するセメントが適しており、同セメントを使用したコンクリートは、一般構造物において満足な強度を得ることが出来る¹⁾。

そこで著者らは既往の研究²⁾において、基材をJISの普通ポルトランドセメントとして、石灰石微粉末を混入した石灰石フィラーセメント(以下LS)、石灰石および高炉スラグ微粉末を混入した三成分系混合セメント(以下BL)を使用し、強さ32.5クラスセメントを使用した初期ひび割れ導入モルタルのひび割れ修復に伴う強度回復特性について検討した。その結果、強さ32.5ク

ラスのセメントにおいても、JISのセメントと同様に、内部に存在する未水和セメントの水和反応に伴う初期ひび割れ修復および強度回復が可能であることが確認された。また、その回復量は、LSでは普通ポルトランドセメントと同等、BLでは混和材である高炉スラグ微粉末の有する潜在水硬性が働き、普通ポルトランドセメント以上となり、初期ひび割れ修復による耐荷性能低下の軽減が可能であることが証明された。これらは、セメント量の低減に伴う初期強度発現性の抑制により、セメントの水和反応が短期間に集中することを防ぎ、初期ひび割れ導入後においても、未水和セメントの残存へとつながり、修復に至ったと考えられる。

ここで、コンクリートに発生した欠陥を問題にする際、構造物の耐久性評価が重要とされる。これは、構造物の大半が鉄筋コンクリートであり、鋼材腐食はコンクリート構造物の安全性低下を助長するためである。そこで本研究では、強さ32.5クラスセメントを使用し、耐荷性能低下が抑制された供試体に対し促進中性化試験を行い、耐久性能の評価を行った。

*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門助教授 博士(工学) (正会員)

*4 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門助手 修士(工学) (正会員)

表－1 32.5クラスセメントの諸物性

セメント	ブレン (cm^2/g)	密度 (g/cm^3)	混合割合(mass%)			圧縮強さ(N/mm^2)				凝結		
			NPC	石灰石	スラグ	2d	3d	7d	28d	水量(%)	始発(h-m)	終結(h-m)
LS	4200	3.00	71.4	28.6	-	14.6	20.3	31.6	41.0	28.2	2-25	3-50
BL	4210	3.02	64.3	21.4	14.3	14.1	19.6	31.8	46.8	28.0	2-25	3-35
NPC	3370	3.16	100	-	-	22.3	28.3	37.9	56.9	28.0	1-50	3-19

2. 実験概要

2.1 使用材料

表－1に本研究で使用したLS, BL, NPCの各セメントの諸物性を示す。セメントは、基材をJISの普通ポルトランドセメント（以下NPC）とし、混和材として高炉スラグ微粉末（粉末度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ ）および石灰石微粉末（粉末度 $5400\text{cm}^2/\text{g}$ ）をセメント置換し、強さ32.5クラスを満足するように作製したセメントである。なお、混和材の混合割合は、EN規格における化学組成の規定を満足するものである。また、比較水準としてNPCを使用した。細骨材には標準砂（絶対密度 $2.64\text{g}/\text{cm}^3$ ）を使用した。

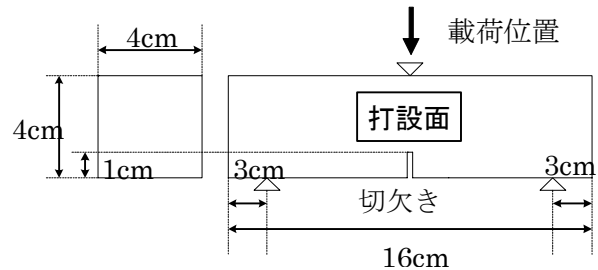
2.2 実験方法

(1) 初期ひび割れ導入方法

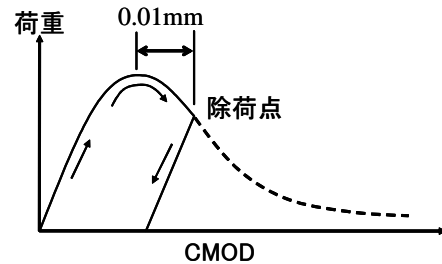
供試体は、JIS R 5201に準じ、配合条件を水粉体比50%、砂セメント比を3としたモルタル供試体とした。打設後24時間静置した後脱型し、荷重試験材齢まで 20°C 水中養生を行った。初期ひび割れ導入時期と促進中性化試験開始材齢を要因とし、供試体は1要因につき、切欠きのみを導入した供試体は2本、初期ひび割れを導入した供試体は3本とした。表－2にひび割れ導入材齢と促進中性化試験開始材齢の組み合わせを示す。所定の材齢に達した供試体は、ひび割れ箇所を特定するため、図－1に示すように、曲げ試験時に底面となる、打設側面（以下、底面）の中央部に幅1mm、深さ1cmの切欠きを湿式コンクリートカッターにより導入した。さらに、初期ひび割れを導入する供試体に関しては直ちに3点曲げ試験を行い、導入しない供試体はそのまま再度 20°C の水中で所定の材齢まで養生した。なお、3点曲げ試験においては、供試体底面部にひび割れを挟むように高感度クリップ

表－2 ひび割れ導入材齢と促進中性化試験開始材齢の組み合わせ

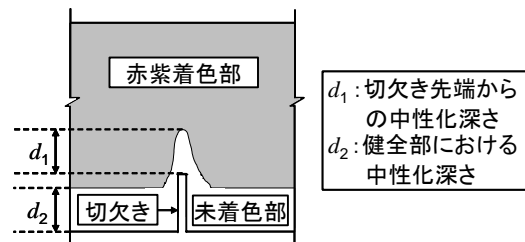
中性化試験開始材齢	ひび割れ導入材齢(日)					
	1日	3日	7日	14日	28日	91日
14日	1-14	3-14	7-14	14-14	-	-
28日	1-28	3-28	7-28	14-28	28-28	-
91日	1-91	3-91	7-91	14-91	28-91	91-91



図－1 供試体寸法



図－2 初期ひび割れ導入方法



図－3 中性化深さ測定位置

型変位計（感度約 0.0005mm ）を取り付け、切欠き部のひび割れ開口変位（以下CMOD；Crack Mouth Open Displacement）を測定するが、図－2に示すように、荷重が最大荷重に達した後、CMODが最大荷重時のCMODよりも 0.01mm 大きくなった時点で除荷し、これを初期ひび割れ導入とした。

(2) 促進中性化試験

以上の過程を経た供試体は、次に促進中性化試験（温度 30°C 、相対湿度60%、 CO_2 濃度5%）

を行った。その際、供試体は底面を除く全ての面をペースト状のシリコン系コーキング材を用いてシールし、物質移動が一次元状態になるようにした。促進終了後、供試体を乾式コンクリートカッターにより軸方向に切断し、切断面にフェノールフタレイン 1%エタノール溶液を噴霧し、未着色部を中性化領域とし、中性化深さを測定した。中性化深さは、図-3に示すように、健全部において測定した10箇所(図中 d_2)の平均および切欠き先端から測定した1箇所(図中 d_1)を、それぞれ中性化深さとした。促進期間は、2, 4, 8, 13, 16, 17, 21, 26週とした。

3. 実験結果および考察

3.1 各セメントの強度発現性

図-4に各セメントの圧縮強さを示す。図の結果より、LSは早期強度発現を促進させる³⁾石灰石微粉末を混入しているため、材齢7日において材齢91日における圧縮強さの約7割に相当する強度を発現した。一方BLは、潜在水硬性を発揮する高炉スラグ微粉末が混入されており、一般に強度は材齢28日以降において顕著に発現されるとされている⁴⁾が本研究においても同様の結果が得られた。

3.2 試験開始材齢の異なる供試体の底面からの中性化深さ d_2

次に、中性化試験開始材齢の違いが中性化進行に及ぼす影響について検討した。図-5に各セメントを使用したモルタルに関して、供試体底面からの中性化深さ d_2 の平均値を示す。その

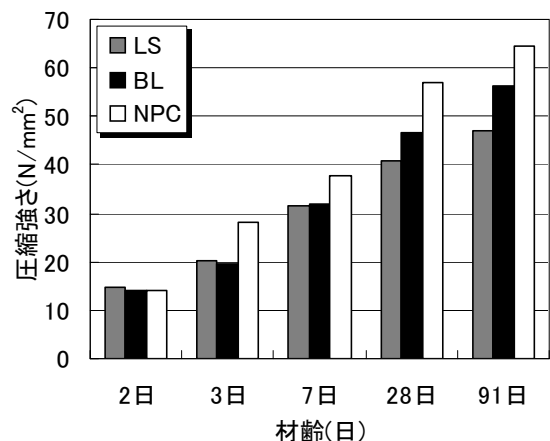


図-4 各セメントの圧縮強さ

結果、LSおよびNPCに養生期間の違いによる中性化深さの差異は認められなかった。しかし、BLは、養生期間が長いほど、中性化深さが小さくなる傾向にある。これは、3.1で述べたように、BLは潜在水硬性を有しているため、組織の緻密化が材齢28日前後から顕著になり、養生期間が短いほど、中性化速度が早くなったためと考えられる。よって、各セメントでは同一材齢においても強度発現や硬化体組織が異なり、中性化深さに影響が生じるものと推測される。

3.3 底面からの中性化深さ d_2 と切欠き先端からの中性化深さ d_1 の違い

次に、切欠きの存在が中性化進行に及ぼす影響について調べた。図-6にLSに関して、試験開始材齢を91日とした際の、供試体底面からの中性化深さ d_2 (凡例中、「底面」)および切欠き先端からの中性化深さ d_1 (凡例中、「切」)の経時変化を示す。図より、切欠き部では底面よりも、中性化進行量が小さいことが分かる。これ

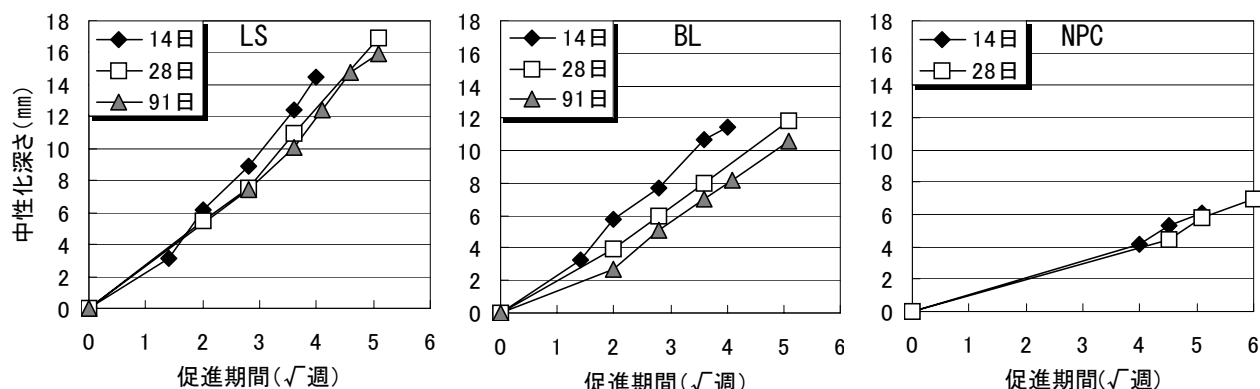


図-5 試験開始材齢の異なる供試体の底面からの中性化深さ d_2

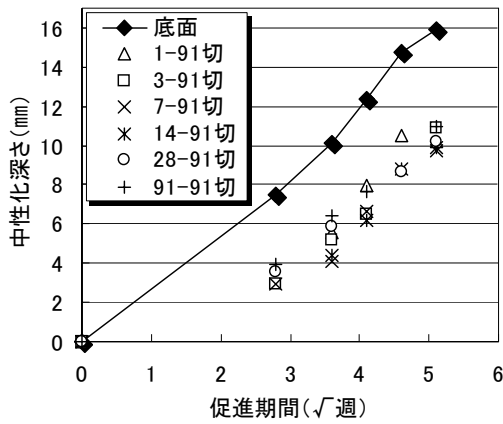


図-6 切欠きみの供試体の中性化深さ (LSセメント)

は、底面（型枠接触面）の表面付近と切欠き先端部付近を比較した際、含水状態や細孔組織に差異が生じているためと考えられる。

また、本研究においては図の結果より、中性化深さは切欠き導入材齢に無関係に、ほぼ一直線に近似されることが分かった。試験開始材齢 14 日、28 日についても同様の傾向となった。

3.4 ひび割れ導入材齢の違いが中性化進行に及ぼす影響

次に、ひび割れ導入材齢の違いが中性化進行に及ぼす影響について評価した。図-7 に促進中性化試験開始時材齢を 28 日として初期ひび割れ導入時期を変化させた際の中性化深さ d_1 の経時変化を示す。ここで、前述したように、切欠き導入材齢が中性化進行に及ぼす影響は無視できるため、切欠きのみを導入した供試体の中性化深さは、各切欠き導入材齢における中性化深さの平均値を、その中性化深さとした（凡例中、「切欠き平均」）。本研究においては同一ひび割れ幅のひび割れを導入したにも拘らず、図より、初期ひび割れ導入材齢が遅くなるに従い、中性化深さが大きくなるという傾向が確認された。ひび割れ導入時期が遅くなると、ひび割れ深さが深くなり、さらに硬化の進行に伴い供試体内部に残存する未水和セメント量が減少するため、修復量も小さくなる。そのため、ひび割れ部分が空隙となり、中性化が進行しやすくなるものと考えられる。したがって、初期ひび割れは若

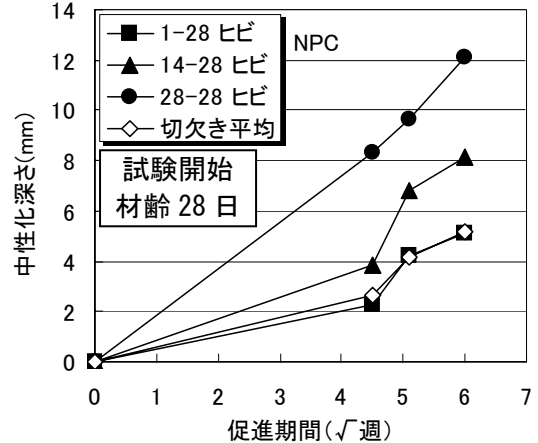
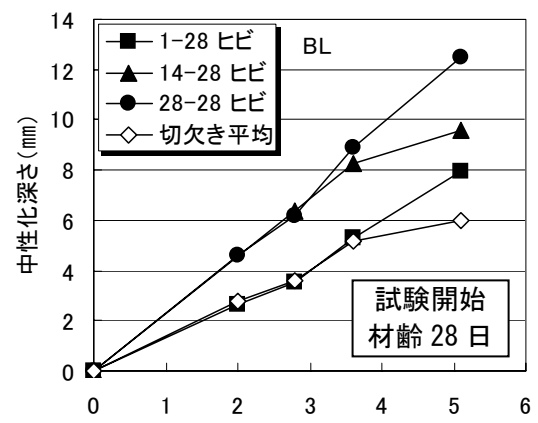
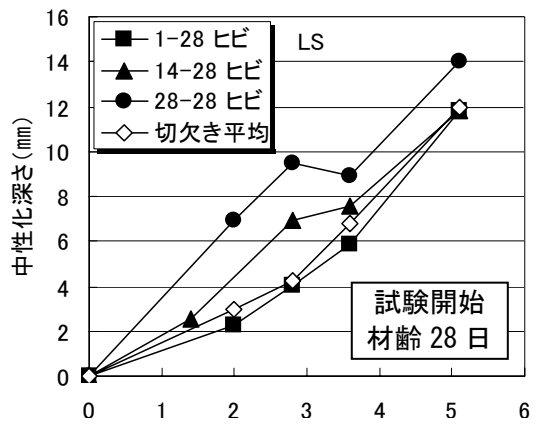


図-7 ひび割れ導入時期の異なる供試体の中性化深さ d_1

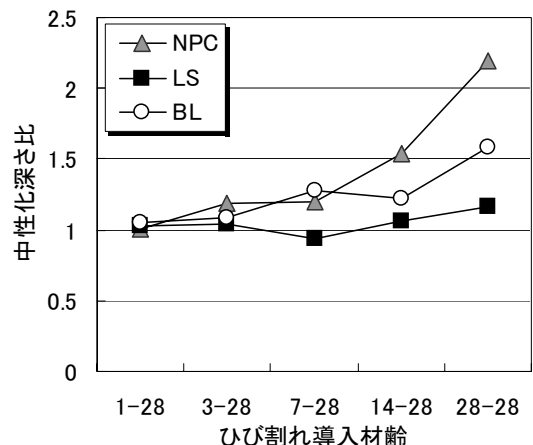


図-8 各セメントの中性化

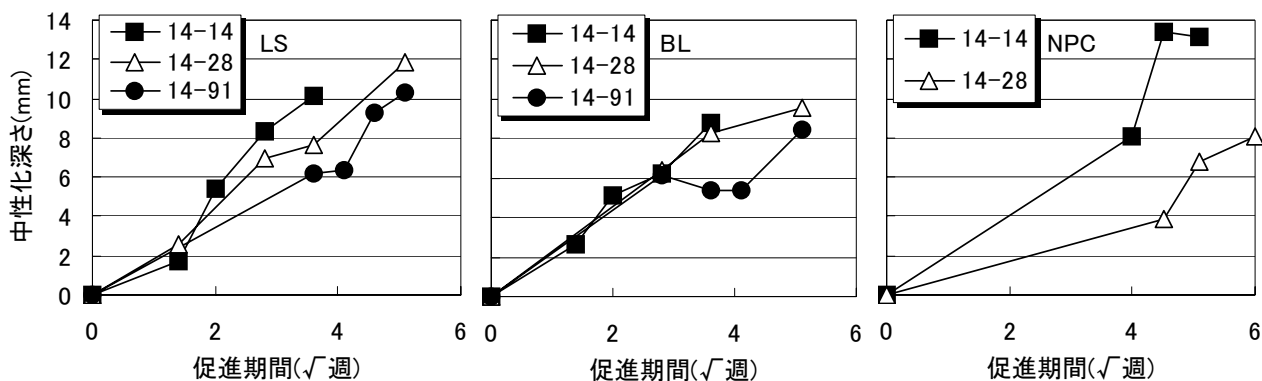


図-9 第二養生期間を変化させた際の中性化深さ d_1

材齢に生じるほど、ひび割れ部分がセメントの水和生成物で充填され、透気性が抑制され、中性化抵抗性の低下を軽減できることが分かった。

また、図より切欠きのみを導入した供試体の中性化深さは、NPCと比較して、32.5クラスセメントの方が大きくなる結果となった。これは、32.5クラスセメントの粉体中の反応性成分がNPCよりも少ないためと考えられる。一方、ひび割れが存在する供試体は、ひび割れ導入材齢が遅くなるに従いセメント間の差異が小さくなる。したがって、ひび割れ導入材齢の違いが中性化進行に影響を及ぼすことが分かった。しかし、以上の結果においては、セメント自体の中性化速度係数が異なるため、セメントの種類によるひび割れの影響を特定するには至らない。

そこで、ひび割れを導入した供試体の切欠き先端からの中性化深さ d_1 を、切欠きのみ導入した供試体の切欠き先端からの中性化深さ d_1 で除した値を中性化深さ比と定義する。図-8に各セメントにおいて、試験開始材齢を28日とし、促進期間20週においてひび割れ導入材齢を変化させた際の中性化深さ比を示す。中性化深さ比が1に近づくほど、ひび割れが耐久性に影響を与えないと判断できるため、本研究の範囲内ではNPCと比較して、32.5クラスセメントを使用することによる初期ひび割れの影響が小さくなると言える。

3.5 試験開始材齢が中性化進行に及ぼす影響

図-9に、各セメントに関して、初期ひび割れ導入材齢を14日とし、第二養生期間を変化さ

せた供試体の切欠き先端からの中性化深さ d_1 を示す。図の結果より、同一材齢に同一ひび割れ幅のひび割れを導入しているにも拘らず、LS、NPCに関しては、第二養生期間が短い供試体ほど、中性化深さが大きくなる傾向が認められた。したがって、中性化の進行には試験開始材齢も影響しており、修復期間が長くなるに従い、ひび割れの影響が小さくなり、中性化の進行は抑制されるということが言える。また、BLに関しては、試験開始材齢の違いによる中性化深さの差異が小さく、ひび割れの存在が中性化進行に及ぼす影響が小さいということが分かる。

また、切欠きのみを導入した供試体の切欠き先端からの中性化深さ d_1 は、3.4で述べたように、32.5クラスセメントの方がNPCと比較して大きくなる傾向にあるにも拘らず、ひび割れ修復期間を設けていない供試体(14-14)においてはNPCの中性化深さと同等となっており、32.5クラスセメントを使用したモルタルは、初期ひび割れが中性化進行に及ぼす影響が小さいということが明らかとなった。これは、本研究ではひび割れ幅を同一としてひび割れを導入し、全く同一のひび割れであると仮定して検討を行ったが、曲げ試験時における剛性に差が生じていたため、NPCのひび割れ深さの方が深くなっていたことに起因すると考えられる。

3.6 強度回復率と中性化深さ比の相関性

図-10に強度回復率を定義する。強度回復率とは、同一第二載荷材齢において、修復期間を設けていない供試体の第二載荷における最大荷

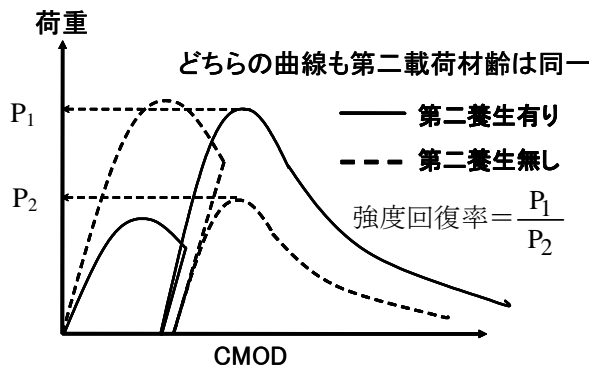


図-10 強度回復率の算定

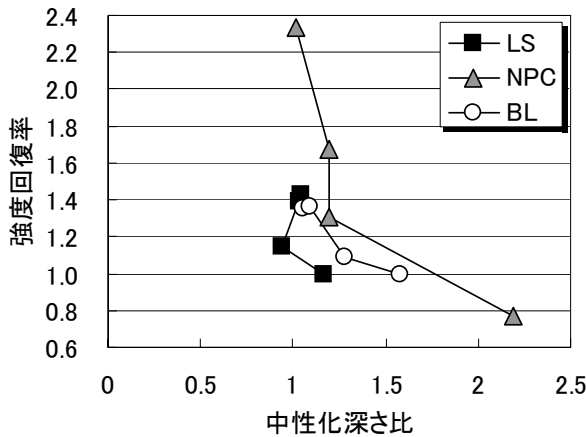


図-11 強度回復率と中性化深さ比の関係

重と、修復期間を設けた供試体の第二載荷における最大荷重との比である。したがって、強度回復率が1より大きな値となると少なからずひび割れは修復しており、その修復は強度回復率が大きいほど顕著であるということが言える。また、図-11に強度回復率と中性化深さ比の関係を示す。図より、強度回復率と中性化深さ比は右下がりの傾向を示しており、両者は相関性が高く、強度回復率が低下すると中性化深さ比は増加する関係にあると言える。しかし強度回復率が1以上の場合においても中性化深さ比が1を上回る場合がほとんどであり、強度が多少回復した場合においても、第二養生期間を十分設けていなければ、他の硬化体組織と比較すると疎であり、付着強度等が低下している可能性があると考えられる。

また、同一強度回復率においては、32.5クラスセメントのほうが、中性化深さ比が小さくなり、3.5で述べたのと同様に、32.5クラスセメントは、ひび割れの存在による中性化進行への影

響が小さいということが確認された。

本研究においては、強度の回復された供試体に関して、初期ひび割れ修復状況を把握し、中性化抵抗性の確保についても考慮できると考えられる。しかし、強度が回復された供試体においても中性化抵抗性の低下は起こりうるため、注意する必要があるということが分かった。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 切欠き先端部からの中性化深さは、底面からの中性化深さよりも小さい。
- (2) 初期ひび割れ発生時期と促進中性化試験開始材齢が中性化進行に影響を与える。
- (3) ひび割れの修復に伴う強度回復と中性化抵抗性の確保には相関性があり、強度回復率が低下すると、中性化深さ比は増加する。
- (4) 同一ひび割れ幅のひび割れに関して、32.5クラスセメントは、ひび割れが中性化進行に与える影響が小さいセメントである。

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)(研究代表者：松下博通，課題番号 No.14350235)の一環として行ったものである。

参考文献

- 1) 三谷裕二ほか：強さ 32.5 クラスセメントを使用した汎用コンクリートのフレッシュ性状および材料分離抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp.627-632, 2002.6
- 2) 清崎里恵ほか：強さ 32.5 クラスセメントを用いたコンクリートの強度回復特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.57-65, 2003, 7
- 3) 土木学会：コンクリート用化学混和剤の性能評価，コンクリート技術シリーズ 47, pp98-100, 2002.12
- 4) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー-86, pp.5-12, 1996, 1