

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21246069

研究課題名（和文） 実構造物調査によるかぶり品質の実態把握と耐久性照査設計／  
竣工検査体系の高次融合研究課題名（英文） Prehension of actual quality of cover concrete by field survey and  
high level integration between durability design and inspection

研究代表者

岸 利治（KISHI TOSHIHARU）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：90251339

研究成果の概要（和文）：

品質の良いコンクリート中への塩分の浸透は材齢1年程度で停滞し、拡散則に基づいた浸入評価が必ずしも合理的ではないことを明らかにした。また、液状水の浸潤可能範囲とそれ以降の塩化物イオンの拡散可能性に関して3区分して評価するのが適当であると指摘した。さらに、液状水が浸入しない不飽和領域で塩分の拡散が生じない機構について、電気二重層の影響であることを、ガラス製マイクロ／ナノ複合チップを用いた光学的実験によって明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

It is pointed out that it is important to conduct direct inspection on surface quality of cover concrete in order to assure the effectiveness of durability design for structures. It is also found that chloride ion ingress into concrete does not necessarily follow the fick's diffusion law and is often stagnated at certain position in depth. It is also proved by a series of optical experiments using micro-nano combined glass chip that the electric double layer blocks diffusion of chloride ion in micro pores of concrete in unsaturated deeper zone.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	15,900,000	4,770,000	20,670,000
2010年度	11,100,000	3,330,000	14,430,000
2011年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
年度			
年度			
総計	35,600,000	10,680,000	46,280,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート・耐久性・かぶり・表層品質・耐久設計・検査・透気試験

## 1. 研究開始当初の背景

耐久性能照査設計が導入され、かぶりと水セメント比の妥当性を事前に照査し、場合によっては現場で単位水量を検査するようになった。このような耐久性向上を目指す技術的対応は従来に比べれば格段の進歩であるが、依然として、コンクリートの硬化品質の確認は強度によって行われているのが実状

であり、一般には物質移動抵抗性などの発現状況が実構造物で検証されることはなかった。

## 2. 研究の目的

かぶりコンクリートの品質確認の必要性を明らかにするために、構造形式、経年、地域特性の異なる多様な実構造物の調査を実

施し、かぶりコンクリートの物質移動抵抗性に関する品質検査の必要性を明らかにする。また、実構造物において、必要にして十分な耐久性能が確実に達成される総合的な枠組みを整えるため、竣工時のかぶりコンクリート品質検査システムの確立に取り組む。最終的には、耐久性照査設計と竣工検査体系を高いレベルで融合させ、非破壊ないし微破壊試験手法を用いて、耐久性能照査設計で設定した物性の発現状況とかぶり厚さを確認し、竣工検査段階で耐久性を診断するシステムを整備する。また、耐久性照査設計と竣工時の検査システムの高いレベルでの融合を目指し、耐久性照査設計と竣工検査を連成させてLCC 評価に基づく判定基準を導入した体系化を提案する。

### 3. 研究の方法

実構造物のかぶり品質の実態把握に関する全国調査を実施する。調査の目的は、圧縮強度は物質移動抵抗性を代表する耐久性指標としては十分でないこと、そのため、竣工検査においては、圧縮強度の確認に加えて、コンクリート表層の物質移動抵抗性を確認すべきことを明らかにすることである。特に高い塩化物イオン侵入抵抗性が期待されるフライアッシュもしくは高炉スラグ微粉末を使用した実構造物も調査対象に加える。実構造物の調査は研究分担者および連携研究者らと共に実施する。また、室内試験によるコアの分析では、透気試験・透水試験・空隙構造分析・促進中性化試験・塩水浸漬試験などを行って、材料・仕様・施工条件・環境条件と物性の発現状況に関する広範な知見の取得を行う。

また、竣工検査段階で、非破壊ないし微破壊試験を用いて、耐久性能照査設計で設定した物性の発現状況とかぶり厚さを確認し、環境条件および耐用期間に応じた耐久性能の達成程度を診断するシステムの提案に向けた検討を行う。そのため、竣工時のかぶりコンクリート品質検査システムの検討として、表層品質の測定方法の信頼性を確認する。また、表面透気試験の結果だけでは、かぶりコンクリートのバリア性能を正しく判定できないと考えられる場合には、深さ方向の品質の確認と併せた総合的な判定方法も検討する。

また、特に高い塩化物イオン侵入抵抗性を示すフライアッシュもしくは高炉スラグ微粉末を使用したコンクリート中への塩化物イオンの浸透および停滞現象に関する実態の把握を行い、それらのメカニズムの検討を通して、従来よりも合理的な評価手法の提案を目指す。また、内部が完全には液状水で満たされていない不飽和コンクリート中における塩化物イオンの拡散可能性についての

検討を行うため、実構造物もガラス製マイクロ/ナノ複合チップを用いた光学的実験の実施を追加した。

### 4. 研究成果

かぶりコンクリートの品質確認の必要性を明らかにするために、構造形式、経年、地域特性の異なる多様な実構造物の調査を実施した。その結果、設計上のコンクリート配合が似通っていても、現場透気試験等によって評価されるかぶりコンクリートの物質移動抵抗性は大きく異なる場合があることを複数の構造物において確認し、耐久設計の実効性を担保するために構造物の竣工時にコンクリートの表層品質を直接検査する必要性が高いことを明らかにした。

また、フライアッシュや高炉スラグ微粉末を使用したコンクリート製護岸構造物の飛沫帯および干満帯に位置する部位からコアを採取し、深さ方向の塩化物イオンの濃度分布を測定し、過去の調査結果や高さ方向に異なる位置から採取したコアとの比較を行った結果、塩分のコンクリート深さ方向への浸透は材齢数年程度で停滞しており、その浸透抑制程度は、普通コンクリート、高炉スラグコンクリート、フライアッシュコンクリートの順で顕著であることを明らかにした。このことは、現在一般的に行われている拡散則に基づいた塩化物イオンの浸透予測が必ずしも合理的ではないこと、また、液状水の浸潤深さの予測を加えることで、より合理的な耐久設計が可能となることを示唆するものである。

そこで、液状水の侵入限界深さに関する照査項目を新設して、竣工検査における表面吸水試験結果と連成させることを提案した。コンクリート中への液状水と塩化物イオンの浸透性状の相関関係は、コンクリートの品質の違いに応じて、大きく分ければ液状水の侵入範囲を越えて塩分の拡散が継続するかないかで2区分で扱うのが合理的であり、塩分の拡散が液状水の侵入可能範囲に留まる場合でも、液状水の侵入フロントの位置のばらつきの程度に応じて、ばらつきを考慮する必要がない場合と考慮した方が適切な場合を区別することができるので、合計で3カテゴリーに区分して評価するのが適当であるとの結論を得た。

なお、現実には、品質の悪いコンクリートにおいて、液状水の浸潤が深い位置で停滞しているにもかかわらず、塩化物イオンの浸透は、さらに深い不飽和領域に及んで、液状水の浸潤範囲にもかかわらず拡散が生じる場合があることも指摘した。液状水の浸潤範囲を超えた不飽和領域を塩化物イオンが拡散するか否かは、不飽和領域で凝縮水に満たされた細孔が電気二重層の影響により拡散を許

容するかしないかに掛かっている可能性があることを、ガラス製マイクロ/ナノ複合チップを用いた光学的実験によって明らかにした。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- 1) 中村兆治, 酒井雄也, 岸利治, コンクリートへの塩化物イオン浸透停滞の機構に関するガラス製マイクロ/ナノ複合チップを用いた光学的実験による検討, コンクリート工学年次論文集, 査読有、Vol. 35, 2013, 未定
- 2) 落合昂雄, 吉田亮, 岸利治, 梅原秀哲、高炉スラグ微粉末を用いたセメントペースト硬化体の透気性状に湿度環境の変化が及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 35、2013、未定
- 3) 酒井雄也, 岸利治, 中村兆治, 微細空隙中を毛管張力により浸入する液状水挙動に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 査読有、Vol. 34, No. 1, 2012, 730-735
- 4) 内田雅人, 松尾賢, 岸利治, 鉄筋コンクリート構造物の効率的な維持管理手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有、Vol. 34, No. 2、2012, 1459-1464
- 5) 岡崎慎一郎, 氏家勲, コンクリート中の含水を考慮した非破壊透気係数の物質移動係数への換算, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, 査読有、Vol. 4, 2012, 53-62
- 6) 蔵重勲, 廣永道彦, 透気係数の含水依存性を考慮したコンクリート表層品質の非破壊評価法の一提案, セメント・コンクリート論文集, 査読有、No. 65, 2012, 225-231
- 7) 蔵重勲, 廣永道彦, コンクリートの中性化抵抗性と表層透気係数の関連分析に基づいた品質検査判定基準の提案, コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 34, No. 1, 2012, 718-723
- 8) 蔵重勲, 西田孝弘, 秋山仁志, 岸利治, 中規模柱試験体を対象とした非破壊評価による表層品質の要因分析, コンクリート工学年次論文集, 査読有、Vol. 33, No. 1, 2011, 1835-1840
- 9) 岡崎慎一郎, 岸利治, 微小空隙中の微速透水現象の支配機構と飽和コンクリートの液状水挙動モデル, 土木学会論文集E 2, 査読有、Vol. 67, No. 3, 2011, 396-410
- 10) 蔵重勲, 西田孝弘, 廣永道彦, 低熱ポル

トランドセメント-フライアッシュ系材料の強度発現や中性化抵抗性に及ぼす脱型材齢の影響と表層品質の非破壊評価, セメント・コンクリート論文集, 査読有、No. 63, 2011, 203-210

- 11) 高橋佑弥, 井上翔, 秋山仁志, 岸利治, 実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有、Vol. 32, No. 1, 2010, 803-808
- 12) 松崎晋一郎, 吉田亮, 岸利治, 単位水量と水セメント比がコンクリート表層の透気性に及ぼす影響とその養生依存性, コンクリート工学年次論文集, 査読有、Vol. 31, No. 1, 2009, 757-762
- 13) 岡崎慎一郎, 浅本慎吾, 岸利治, 分子シミュレーションによる微小空隙中の液状水挙動の検証, 土木学会論文集E, 査読有、2009, 311-321

[学会発表] (計 40 件)

- 1) 落合昂雄, 吉田亮, 岸利治, 尾澤敏行、BFSセメントペースト硬化体の透気性状におけるインクボトル現象、第67回セメント技術大会、2013年05月13日～2013年5月15日、東京：ホテルメトロポリタン
- 2) 落合昂雄, 吉田亮, 岸利治, 尾澤敏行、BFSセメントペースト硬化体の透気性状におけるインクボトル現象、第67回セメント技術大会、2013年05月13日～2013年5月15日、東京：ホテルメトロポリタン
- 3) 落合昂雄, 吉田亮, 岸利治, 梅原秀哲、高炉スラグ微粉末を用いたセメントペースト硬化体の透気性状に湿度環境が及ぼす影響に関する研究、平成24年度土木学会中部支部研究発表会、2013年03月08日～2013年3月8日、愛知：愛知工業大学
- 4) Isao Ujike and Shinichiro Okazaki, An In-situ Test to Measure the Distribution of Air Permeability Coefficient of Concrete, 5th International Conference of Asia Concrete federation (招待講演)、2012年10月24日～2012年10月26日、Pattaya : Thailand
- 5) 岸利治, 高橋佑弥, Shafiqul Md. ISLAM, 酒井雄也、コンクリート中への塩分浸透停滞現象の確認と液状水浸透挙動との相関に関する研究、コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術に関するシンポジウム、2012年10月19日～2012年10月19日、東京
- 6) Chohji NAKAMURA, Yuya SAKAI and Toshiharu KISHI, Study on the effects of chemical and physical properties of concrete on the behavior of internal

- water, 11th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, 2012年10月10日～2012年10月12日, Ulaan-baatar : Mongolia
- 7) Shinichiro Okazaki and Isao Ujike, Effect of admixing fly ash on tortuosity of concrete, Information & Computation in Civil & Environmental Engineering, 2012年09月19日～2012年9月19日, Ehime, Minshuku Sennen-Matsu
  - 8) 太田健司, 吉田亮, 鷺見高典, 梅原秀哲, 岸利治, 実構造物コンクリート表層品質に日射が与える影響に関する一考察, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年09月05日～2012年09月07日, 愛知: 名古屋大学
  - 9) 佐々木章, 竹内直也, 岸利治, 蔵重勲, 混和材を使用したコンクリート護岸から採取したコアを用いた塩分浸透停滞に関する研究, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年09月05日～2012年9月7日, 愛知: 名古屋大学
  - 10) 落合昂雄, 吉田亮, 岸利治, 梅原秀哲, 異なる湿度環境下における高炉スラグ微粉末を用いたセメントペースト硬化体の透気性状に関する研究, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年09月05日～2012年09月05日, 愛知: 名古屋大学
  - 11) 酒井雄也, 岸利治, 中村兆治, 多孔質体の空隙径分布と毛管張力による液状水浸入挙動に関する数値解析的検討, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年09月05日～2012年09月07日, 愛知: 名古屋大学
  - 12) 内田雅人, 岸利治, 流水距離によるコンクリート表層部の中性化速度係数評価, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年09月05日～2012年9月7日, 愛知: 名古屋大学
  - 13) 中村兆治, 酒井雄也, 岸利治, 見かけの接触角を指標とした配合の違いが毛管張力に与える影響の検討, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年09月05日～2012年9月7日, 愛知: 名古屋大学
  - 14) 家辺麻里子, 秋山仁志, 岸利治, 水の流下試験によるコンクリートの表層品質評価に関する検討, 第4回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム, 2012年08月09日～2012年08月10日, 東京: 東京大学生産技術研究所
  - 15) 蔵重勲, 廣永道彦, 実構造物を対象とした非破壊試験の結果とコア品質の関連分析, 構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システムに関するシンポジウム, 2012年07月19日～2012年07月19日, 東京: 東京大学生産技術研究所
  - 16) 家辺麻里子, 岸利治, 西尾壮平, 上田洋 繰返し流水試験によるコンクリートの表層品質評価に関する検討 構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システムに関するシンポジウム 2012年07月19日～2012年07月19日, 東京: 東京大学生産技術研究所
  - 17) 中村兆治, 酒井雄也, 岸利治, 若材齢モルタル硬化体への液状水浸入挙動に関する基礎的研究, 第66回セメント技術大会, 2012年05月29日～2012年05月31日, 東京
  - 18) 落合昂雄, 吉田亮, 岸利治, 養生条件および水セメント比の異なるOPCペースト硬化体における吸水・乾燥特性および透気性の空隙構造に基づいた検討, 第66回セメント技術大会, 2012年05月29日～2012年05月31日, 東京: ホテルメトロポリタン
  - 19) 蔵重勲, 廣永道彦, Torrento法透気試験により評価される表層透気係数に関する再考, 第66回セメント技術大会, 2012年05月29日～2012年5月31日, 東京: ホテルメトロポリタン
  - 20) 國方翔太, 氏家勲, 岡崎慎一郎, 透気係数を用いた構造体コンクリートの品質評価手法の提案, 平成24年度四国支部技術研究発表会, 2012年05月19日～2012年05月19日, 高知: 高知工科大学
  - 21) Ryo Yoshida, Toshiharu Kishi, Properties of Pore Structure measured by Step-by-step Mercury Intrusion Porosimetry test, 2nd International conference on Microstructure Related Durability of Cementitious composite, 2012年04月11日～2012年04月13日, Amsterdam: Netherlands
  - 22) 落合昂雄, 吉田亮, 岸利治, 水セメント比および養生条件の異なるセメントペースト硬化体の透気係数に関する一考察, 平成23年度土木学会中部支部研究発表会, 2012年03月08日～2012年03月08日, 長野: 信州大学
  - 23) Hitoshi AKIYAMA, Tomoya SAGAWA, Shafiqul Md. ISLAM and Toshiharu KISHI, Durability Evaluation of Marine Structure based on Continuous Microstructure of Concrete, 10th International Symposium on New Technologies for Urban Safety Mega Cities in Asia, 2011年10月12日～2011年10月14日, Chiang Mai, Thailand
  - 24) MD. Shafiqul Islam, Toshiharu Kishi, LCC Synchronization by Proposed Methods of Chloride Distribution in Concrete Considering Stagnation of Liquid Water Front, SSMS, IESL-SSM

- Joint International Symposium Social Management System 2011, 2011年09月14日～2011年09月16日, Colombo, SriLanka
- 25) 吉田亮, 岸利治, 浅賀喜与志, 伊藤慎祐, 炭酸化したOPCペースト硬化体の空隙構造に関する一考察, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011年09月07日～2011年09月09日, 愛媛: 愛媛大学
- 26) 岡崎慎一郎, 氏家勲, コンクリート中の液状水浸潤および空隙構造が果たす塩化物イオン拡散への影響, 土木学会全国大会第66年次学術講演会, 2011年09月07日～2011年9月9日, 愛媛: 愛媛大学
- 27) 秋山仁志, 岸利治, 吉田亮, AE剤の混和がセメントペーストの細孔径分布および透気性に及ぼす影響, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011年9月7日～2011年9月9日, 愛媛: 愛媛大学
- 28) 蔵重勲, 廣永道彦, 行平訓規, 屋内外に1年間曝露したコンクリートの反発度と表層透気係数の推移, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011年09月07日～2011年9月9日, 愛媛: 愛媛大学
- 29) 吉田亮, 岸利治, 水銀漸次繰返し圧入法によって観察されるOPC・BFSペースト硬化体の空隙構造の相違, 第65回セメント技術大会, 2011年05月18日～2011年05月20日, 東京ホテルメトロポリタン
- 30) 蔵重勲, 廣永道彦, 透気係数の含水依存性を考慮したコンクリート表層品質の非破壊評価法, 第65回セメント技術大会, 2011年05月18日～2011年5月20日, 東京: ホテルメトロポリタン
- 31) 杉本淳, 土井佐記, 岡崎慎一郎, 氏家勲, コンクリート中の液状水浸潤が果たす塩化物イオン拡散への影響, 平成23年度四国支部技術発表会, 2011年05月14日～2011年5月14日, 香川: 香川大学
- 32) 高橋佑弥, 岸利治, フライアッシュコンクリートの塩分浸透抑制現象と液状水浸潤限界の関与, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月1日, 北海道: 北海道大学
- 33) 吉田亮, 岸利治, 浅賀喜与志, 伊藤慎祐, 高炉スラグ微粉末を添加したセメントペースト硬化体の空隙構造に関する一考察, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月1日, 北海道: 北海道大学
- 34) 高橋佑弥, 岸利治, 糸山豊, フライアッシュを用いた護岸コンクリート構造物の液状水移動に着目した塩分浸透性状の検討, 土木学会混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333委員会)シンポジウム, 2010年5月1日, 東京: 土木学会
- 35) 井上翔, 秋山仁志, 岸利治, 魚本健人, 耐久性指標に与える養生条件の影響とその空隙構造に関する研究, 土木学会関東支部第37回技術研究発表会, 2010年3月1日, 東京: 日本大学駿河台キャンパス
- 36) 吉田亮, 岸利治, 水銀漸次繰返し圧入法によって同定される連続空隙の有意性とその指標化, 土木学会コンクリート構造物の表層品質評価と耐久性性能検証に関するシンポジウム, 2009年11月1日, 東京: 土木学会講堂
- 37) 高橋佑弥, 岸利治, 山田義智, 岡本賢志, フライアッシュを含む護岸コンクリートの塩化物イオン浸透性状と見かけの拡散係数の調査時材齢による相違, 土木学会コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術に関するシンポジウム, 2009年10月1日, 東京: 土木学会講堂
- 38) 岸利治, 耐久設計への液状化と塩化物イオンの侵入限界深さに関する照差の導入に向けた一考察, 第36回セメントコンクリート研究討論会, 2009年10月1日, 鹿児島: 鹿児島大学稲盛会館
- 39) 松崎晋一朗, 吉田亮, 岸利治, 配合と養生がコンクリート表層の透気性に及ぼす影響程度に関する一考察, 土木学会第64回年次学術講演会, 2009年9月1日, 福岡: 福岡大学七隈キャンパス
- 40) Phan HuuDuy Quoc, Toshiharu KISHI, Investigation on the Measurement of Air Permeability of Surface Concrete Using Double Chamber Method, ConMat'09 4th International Conference on Construction Materials, 2009年8月1日, 愛知: 名古屋国際会議場
- ## 6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
岸 利治 (KISHI TOSHIHARU)  
東京大学・生産技術研究所・教授  
研究者番号: 90251339
- (2) 研究分担者  
蔵重 勲 (KURASHIGE ISAO)  
電力中央研究所・地球工学研究所・主任研究員  
研究者番号: 20371461  
岡崎 慎一郎 (OKAZAKI SHINICHIRO)  
愛媛大学・理工学研究科・講師  
研究者番号: 30510507  
吉田 亮 (YOSHIDA RYO)  
名古屋工業大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 40548575
- (3) 連携研究者  
松田芳範 (MATSUDA YOSHINORI)  
東日本旅客鉄道(株)・建設工事部構造技術センター・副課長  
研究者番号: 20520977

上田洋 (UEDA HIROSHI)  
鉄道総合研究所・材料研究部・室長  
研究者番号：80426056