

論文 かぶりコンクリートの水分浸透性状に与えるかぶりの大きさの影響とその要因に関する検討

八木 幸音^{*1}・鎌田 知久^{*2}・上野 敦^{*3}・大野 健太郎^{*3}

要旨：本研究では、異なるかぶりを有する鉄筋コンクリート供試体を対象に、水分浸透試験および各種表層品質試験を実施し、かぶりの大きさが水分浸透性状に及ぼす影響とその要因について検討した。その結果、かぶりが小さいほど水分浸透速度が上昇したことから、水分浸透速度にかぶり依存性があることが明らかとなった。さらに、水分浸透速度のかぶり依存性が、水分浸透速度の経時変化、およびかぶりに応じてかぶり全域に占める品質低下領域の割合が異なることに起因している可能性が示唆された。

キーワード：かぶりコンクリート、水分浸透速度、表層品質、かぶり依存性、維持管理

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において、水、酸素、塩化物イオンなどに代表される各種有害物質は、かぶりコンクリートを通じて鉄筋まで侵入する。このため、設計耐用期間にわたって構造物を健全な状態に保つためには、かぶりコンクリートの品質を高めるとともに、各種耐久性を満足する十分なかぶりを設定する必要がある。しかしながら、石橋ら¹⁾や永野ら²⁾によると、既設構造物の中には、設計時に想定した耐久性能を満足しない可能性があるかぶりを有する構造物が多く存在し、中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に起因する変状の多くが、かぶりが20mm以下の箇所で見出されていることが報告されている。さらに、かぶりの減少に伴い表層品質が低下すること³⁾、そして、表層品質の低下（空隙構造の粗大化）により、かぶりコンクリートの透気性が増加すること⁴⁾が確認されている。

以上を踏まえると、かぶり不足は、単にコンクリート表面から鉄筋までの距離を短くするだけでなく、表層品質や物質移動抵抗性の低下をも招く恐れがあると考えられる。特に、物質移動抵抗性の低下は、かぶりが不足している箇所の変状発生リスクを助長する要因となっている可能性がある。したがって、維持管理の場面において、変状発生を精度よく予測するためには、かぶりの大きさが物質移動性状に及ぼす影響を明らかにする必要があると考えられる。

以上より、本研究では、鉄筋コンクリートの代表的な劣化因子である水に着目し、かぶりの大きさが水分浸透性状に及ぼす影響を明らかにすること、さらに、かぶりの大きさに応じて水分浸透性状が変化する要因を種々の表層品質試験により明確にすることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

図-1に示すように、D16鉄筋をあき30mmで2本埋設した100×100×376mmの鉄筋コンクリート供試体を作製した。使用材料を表-1に、コンクリートの配合、フレッシュ性状および後述する養生を施したφ100×200mmの円柱供試体の材齢28日における圧縮強度を表-2に示す。振動締固めによるかぶり部へのコンクリートの流動を模擬するため、コンクリートは鉄筋間を通じてかぶり部に流動させ、2層に分けて打ち込んだ。各層テーブルバイブレータを用いて7秒間締め固めた。かぶりの大きさは10mm（以下、C10）、20mm（C20）、30mm（C30）、50mm（C50）とし、比較のため無筋供試体（Plain）も作製した。供試体は、20℃、60%R.H.の恒温恒湿室内で5日間封緘養生した後に脱型し、その後56日間、同室内に静置した。なお、本研究では、ブリーディングの影響を考慮し、主に下段鉄筋のかぶり部を対象に各種試験を実施した。

2.2 試験概要

(1) 供試体の寸法調整

材齢61日目に、水冷式コンクリートカッタを用いて、後述する試験ごとに寸法を調整した。なお、型枠面の影響を排除するため、供試体両端部35mmは切断除去した。寸法調整後は、上述の恒温恒湿室で24時間以上乾燥させた。

表-1 使用材料

結合材 (C) (密度: 3.16g/cm ³)	普通ポルトランドセメント
細骨材 (S) (表乾密度: 2.57g/cm ³ , 吸水率: 2.14%, 粗粒率 F.M.: 3.12)	神奈川県相模原産砕砂
粗骨材 (G) (表乾密度: 2.59g/cm ³ , 吸水率: 1.60%, 粗粒率 F.M.: 6.76)	神奈川県相模原産砕石2005

*1 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (学生会員)

*2 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域助教 博士(工学) (正会員)

*3 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域准教授 博士(工学) (正会員)

表－2 コンクリートの配合，フレッシュ性状および圧縮強度

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)		スランブ (cm)	空気量 (%)	28日圧縮強度 (N/mm ²)
			W	C	S	G	AE減水剤	AE助剤			
20	55	47.7	171	309	822	949	0.45	0.008	9.0	5.0	27.5

(2) 水分浸透試験

供試体の寸法を 100×100×50mm とし，吸水面はかぶり面（100×50mm）とした。吸水面とその反対面以外の面は，一方向吸水とするためにエポキシ樹脂で被覆した。水分浸透試験は，工藤らの手法⁹⁾を参考に，供試体を十分に吸水させたメラミンスポンジの上に設置する形で実施した（図－2）。なお，本手法と水に直接浸せきする方法とでは，水分浸透性状に大きな違いがないことを事前に確認している。吸水時間は，水分が鉄筋位置に到達する時間（ t_{ci} ）を予測するために，かぶりごとに任意の時間を設定した。任意の吸水時間経過後，耐圧試験機を用いて供試体を下段鉄筋直上位置で割裂し，速やかに水漏れ検知剤を噴霧した。割裂面の両端 10mm を除いた 4 点（10mm 間隔）の呈色深さを測定し，その平均値を水分浸透深さとした。

本研究では，水分が鉄筋位置 i に到達する時間（ t_{ci} ）を用いて算出した水分浸透速度係数を「実効水分浸透速度係数（ q_e ）」と定義し，以下のように算出した。図－3 に，C10 での算出方法の一例を示す。まず，異なる吸水時間で測定した水分浸透深さの結果を用いて，水分浸透深さと吸水時間の平方根との関係の回帰直線式を求めた（図中(a)）。次に，この式を用いて，水分が鉄筋位置に到達する時間（ t_{ci} ，水分浸透深さ＝かぶり，となる時間）を求めた（図中(b)）。そして，式(1)に示すように，かぶり（ c ）を水分が鉄筋位置に到達する時間（ t_{ci} ）の平方根で除することで実効水分浸透速度係数（ q_e ）を算出した（図中(c)）。

$$q_e = c / \sqrt{t_{ci}} \quad (1)$$

ここで， q_e ：実効水分浸透速度係数（mm/√hr）

c ：かぶり（mm）

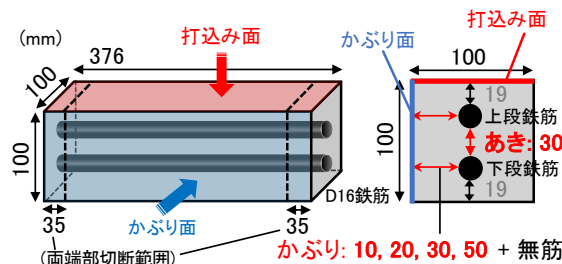
t_{ci} ：水分が鉄筋位置に到達する時間（hr）

i ：鉄筋位置（mm）

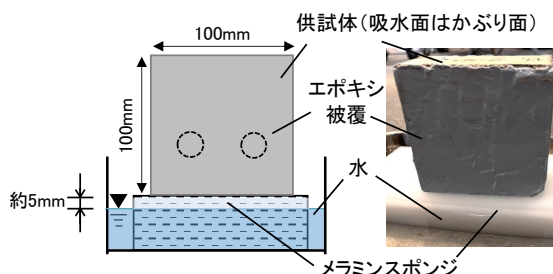
(3) 表層品質試験

かぶりの大きさが表層品質に及ぼす影響を把握するため，空隙構造分析，表層透気試験，粗骨材面積率測定，硬化コンクリートの配合推定試験を実施した。

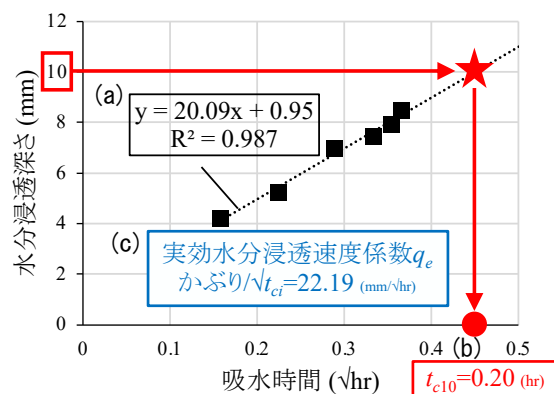
空隙構造分析では，水銀圧入法により総空隙量と閾細孔径⁹⁾を求めた。深さ方向の空隙構造の変化を把握するため，図－4(a)に示すように，表面から 10mm ごとに幅 20mm（下段鉄筋のかぶり部 16mm＋左右 2mm），奥行き 50mm の試料を切断採取した。Plain については，かぶり



図－1 供試体概要



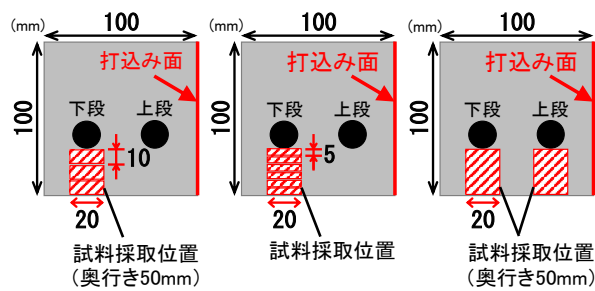
図－2 吸水方法の概要



図－3 実効水分浸透速度係数の算出方法（例：C10）

50mm のかぶり部に相当する位置から，上記と同様に試料を採取した。切断試料から粗骨材を除いた 5mm 角程度のモルタル片を約 2g 採取し，アセトンに 24 時間以上浸せきした後に，7 日以上真空乾燥を行ったものを分析に供した。

表層透気試験では，ダブルチャンバー法（Torrent 法）⁷⁾により表層透気係数 kT を求めた。供試体の寸法は 100×100×100mm とし，測定面はかぶり面（100×100mm）とした。測定面以外の面はエポキシ樹脂で被覆した。試験は，各水準 3 体の供試体を 2 日に分けて 2 回測定し，



(a) 細孔構造分析 (b) 面積率測定 (c) 配合推定

図-4 試料採取位置

計 6 回の測定結果の平均値を結果に用いた。なお、試験前に高周波容量式的水分計を用いて測定面の表面含水率を測定し、全ての供試体の表面含水率が 5.5% 以下であることを確認した。

粗骨材面積率測定では、画像解析ソフトを用いて、深さごとの粗骨材面積率を測定した。測定面は、鉄筋軸直角方向の切断面 (100×100mm) とした。測定範囲は、図-4(b) に示すように、表層から深さ方向に 5mm 間隔、かつ幅 20mm (同上) とした。長さが 5mm 以上の骨材を粗骨材として扱い、黒色マーカーで塗りつぶした後に、イメージスキャナを用いて切断面の画像を取得した。その後、画像解析ソフトを用いてマークした粗骨材の総面積を求め、それを測定範囲の面積で除することで粗骨材面積率を算出した。結果には 20 断面の平均値を用いた。

配合推定試験では、セメント協会法 (F-18) ⁸⁾ により硬化コンクリートの推定水セメント比を求めた。図-4(c) に示すように、試料の寸法は、幅 20mm (同上)、奥行き 50mm とし、かぶり全域から試料を採取した。Plain については、かぶり 50mm と同様の位置から試料を採取した。なお、供試体数の制約上、合計で 1~2kg の試料を試験に供した。

3. 実験結果・考察

3.1 水分浸透試験

(1) 鉄筋コンクリート供試体 (C10, C20, C30, C50)

水分浸透深さと吸水時間の平方根との関係を図-5 に示す。本研究でかぶりごとに設定した吸水時間内では、いずれのかぶりにおいても水分浸透深さと吸水時間の平方根との関係 (近似直線、図中点線) が一次関数でよく近似できていることがわかる。また、いずれのかぶりにおいても、水分浸透深さが鉄筋位置に近づくにつれて、無筋供試体 (図中黒色実線) から分岐していく傾向を確認した。

本結果を用いて水分が鉄筋位置に到達する時間 (t_{ci}) を求め、実効水分浸透速度係数 (q_e) を算出した。図-6 に算出した実効水分浸透速度係数を示す。C10 および C20 の実効水分浸透速度係数は、C50 の約 2.5 倍大きく、

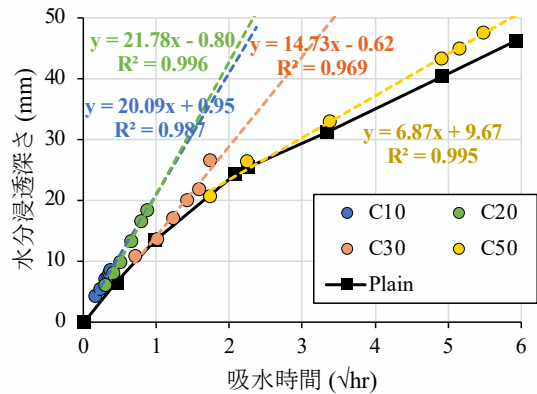


図-5 水分浸透深さの経時変化

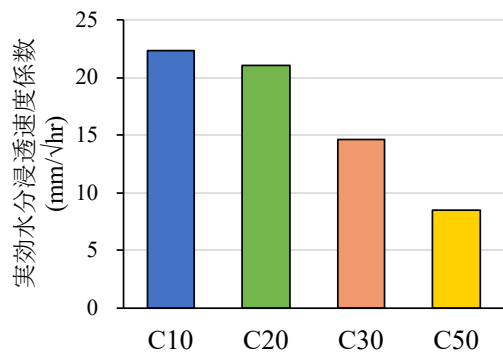


図-6 実効水分浸透速度係数

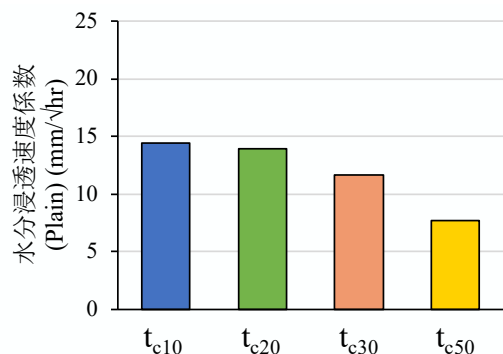


図-7 水分浸透速度係数 (Plain)

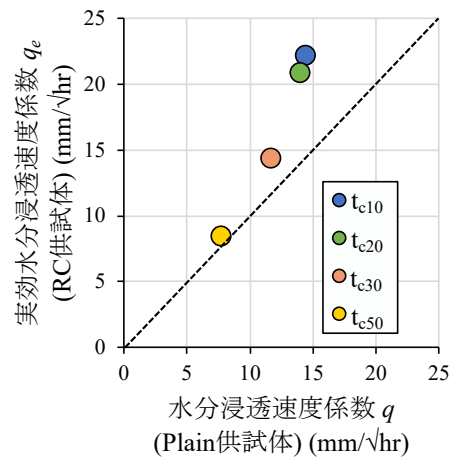


図-8 鉄筋コンクリート供試体と無筋供試体の水分浸透速度係数の関係

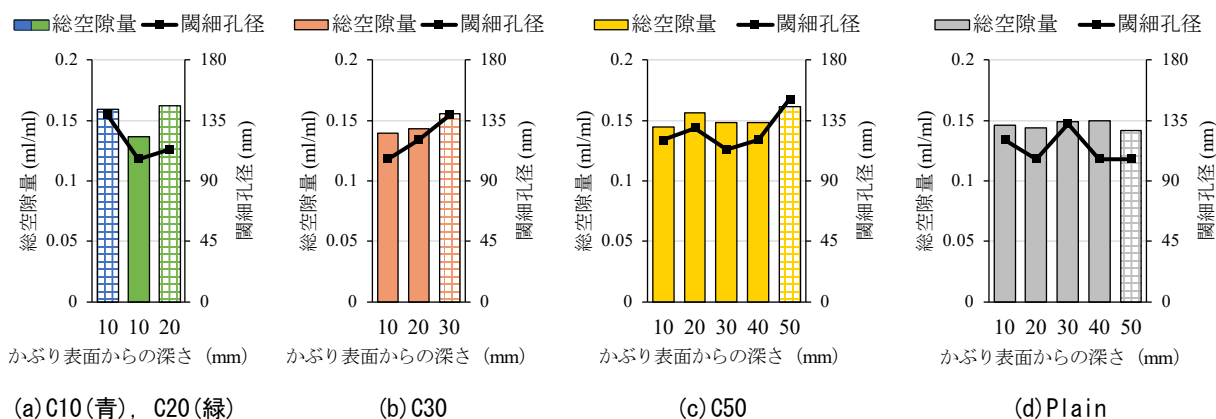


図-9 総空隙量と閾細孔径

かぶりが小さいほど実効水分浸透速度係数が大きくなる傾向が認められた。このことから、かぶりコンクリートの水分浸透速度にかぶり依存性があることが明らかとなった。

(2) 無筋供試体 (Plain)

各鉄筋コンクリート供試体の、水分が鉄筋位置に到達する時間 (t_{ci}) と同じ吸水時間において Plain の水分浸透深さを測定し、それを吸水時間 ($=t_{ci}$) で除することで、水分浸透速度係数を算出した。その結果を図-7に示す。図より、吸水時間が短いほど水分浸透速度係数が大きくなる傾向が認められた。水分浸透深さと時間の平方根との関係は、時間の経過とともに逸脱することが知られており⁹⁾、本研究の無筋供試体においても同様の傾向が確認された。したがって、水分浸透速度の経時的な変化が水分浸透速度のかぶり依存性の一因であることが明らかとなった。

また、鉄筋コンクリート供試体の実効水分浸透速度係数 (図-6) と無筋供試体の水分浸透速度係数 (図-7) との関係を図-8に示す。図より、同一吸水時間 (t_{ci}) での水分浸透速度係数を比較すると、両者は相違しており、特に C10 および C20 ではこの傾向が顕著であることがわかる。このことから、水分浸透速度の経時的な変化は、水分浸透速度のかぶり依存性の唯一の要因ではなく、他の影響要因が存在することが示唆された。

3.2 表層品質試験

(1) 総空隙量および閾細孔径

水銀圧入法により測定した総空隙量と閾細孔径を、表面から深さ 10mm ごとに整理した結果を図-9に示す。図より、C20, C30, C50 の鉄筋近傍 (鉄筋から 10mm の範囲、図中網掛けの部分) の総空隙量および閾細孔径が、それ以浅と比較して大きいことがわかる。また、C10 についても、その他のかぶりの鉄筋近傍の総空隙量および閾細孔径と近い値を取った。鉄筋周囲には他のマトリックス部分と比較して粗大な空隙を多く有する遷移帯が形

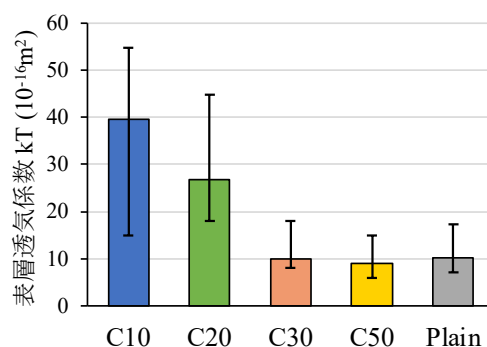
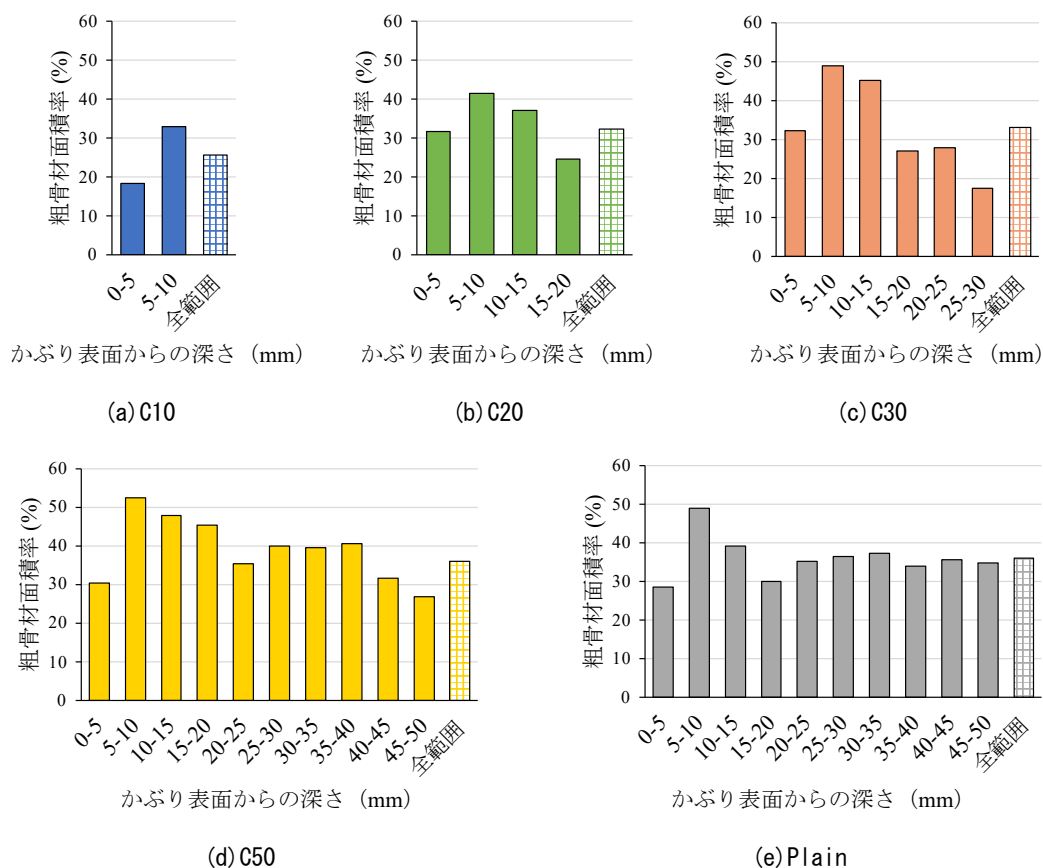


図-10 表層透気係数

成されることが知られている。しかし、本研究で確認された粗大な空隙構造を有する範囲 (鉄筋近傍 10mm) は、既往の研究¹²⁾で報告されている遷移帯厚さ (30~100 μm) と比較して極めて大きい。このため、本研究で観察された鉄筋近傍 10mm における粗大な空隙構造が遷移帯の影響だけに起因しているとは考え難い。一方、Plain では、総空隙量、閾細孔径ともに、深さ方向に大きな変化は認められなかった。このため、鉄筋近傍の空隙構造の粗大化に対して、鉄筋の存在が何らかの影響を与えているものと考えられる。

(2) 表層透気係数

図-10に、ダブルチャンバー法により測定した表層透気係数 kT を示す。図中のエラーバーはそれぞれ、6回の測定値の最大値と最小値を示している。C10とC20では、C30, C50, Plainと比較して表層透気係数 kT が明確に大きく、かぶりが極端に小さい場合、表層部の透気性が高くなることがわかる。表層透気試験において精度良く測定可能な最大深さは、コンクリート表層から 20~30mm 程度であると報告されている^{10), 11)}ことから、かぶりが小さいほど鉄筋近傍の粗大な空隙構造の影響を強く受け、表層透気係数 kT が大きくなったと考えられる。なお、かぶりが小さいほどばらつきが大きくなっているが、目視



図－11 粗骨材面積率

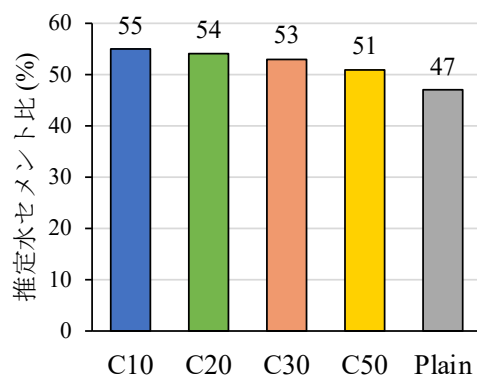
による観察では測定面にひび割れは確認されなかった。

(3) 粗骨材面積率

粗骨材面積率を表面から深さ 5mm ごとに整理した結果を図－11 に示す。Plain の全範囲 (0～50mm) の粗骨材面積率は 36.0%であり、表－1 に示した配合から求めた粗骨材容積率 36.6%と概ね同程度であった。このため、測定精度は良好であったと考えられる。かぶりの大きさが粗骨材の最大寸法である 20mm よりも小さい C10 では、寸法の大きい粗骨材のかぶり部への流入が阻害され、粗骨材面積率が小さくなった。また、かぶりによらず表面から 5mm の範囲において粗骨材面積率の低下が確認された。さらに、C20、C30 および C50 では、鉄筋近傍 5mm の範囲において粗骨材面積率が小さくなった。これは、型枠および鉄筋の壁効果の影響によるものと考えられるが、その影響は、鉄筋近傍においてより明確であった。なお、C50 と Plain では、鉄筋近傍を除いた範囲で概ね同等の面積率となっていることから、本研究の範囲内では鉄筋間通過の影響は小さいと考えられる。

(4) 推定水セメント比

図－12 に、セメント協会法により推定した硬化コンクリートの水セメント比を示す。図より、鉄筋の有無により推定水セメント比に明確な差異が認められ、さらに、緩やかではあるがかぶりが小さいほど推定水セメント比



図－12 推定水セメント比

が高くなる傾向を確認した。図－9 に示した空隙構造の結果を踏まえると、かぶりが小さいほど、かぶり全域に占める鉄筋近傍の品質低下領域の割合が大きくなるため、かぶりと推定水セメント比との間に僅かな関係が認められたのではないかと考えられる。

3.3 かぶりコンクリートの品質に及ぼすかぶりの大きさの影響および水分浸透速度のかぶり依存性に関する考察

粗骨材面積率の結果から、鉄筋近傍では打込み時に鉄筋の干渉による材料分離が生じていたものと推察される。また、空隙構造分析および配合推定試験において、鉄筋

近傍はそれ以浅と比較して水セメント比が高く、品質が低下（空隙構造が粗大化）していたことを示唆する結果を得た。これにより、かぶりが小さいほど、かぶり全域に占める品質低下領域の割合が大きくなる可能性があることが明らかとなった。

以上を踏まえて、水分浸透速度のかぶり依存性について考察する。かぶりが小さい場合（20mm 以下）には、吸水初期の高い速度を維持したまま水分が鉄筋に到達する一方で、かぶりが十分大きい場合（30mm 以上）には、水分が鉄筋に到達する前に速度が低下する。これにより、水分浸透速度に僅かなかぶり依存性が生じる。さらに、かぶりに応じてかぶり全域に占める品質の低い領域の割合が異なることが、かぶり依存性をより助長する要因となっているものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、かぶりの大きさがかぶりコンクリートの水分浸透性状に及ぼす影響とその要因を明らかにすることを目的とし、異なるかぶりの大きさを設定した鉄筋コンクリート供試体を対象に、水分浸透試験および各種表層品質試験を実施した。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 水分が鉄筋に到達する時間を正確に予測することを目的に、水の鉄筋位置への到達時間（ t_{ci} ）、実効水分浸透速度係数（ q_e ）を算出した。鉄筋コンクリート供試体では、かぶりの大きさが小さいほど実効水分浸透速度係数（ q_e ）が大きくなり、水分浸透速度にかぶり依存性があることを確認した。
- (2) 無筋供試体においても吸水時間が短いほど水分浸透速度係数が大きくなることが確認された。このことから、水分浸透速度の経時的な変化が水分浸透速度のかぶり依存性の一因であることが明らかとなった。
- (3) かぶりが小さいほど、表層透気係数が大きくなった。また、鉄筋近傍 10mm の範囲では、打込み時の鉄筋干渉による材料分離により、水セメント比が増加し、空隙構造が粗大化する可能性があることを確認した。
- (4) かぶりの大きさに応じてかぶり全域に占める品質低下領域の割合が異なることが、かぶり依存性をより助長する要因となっているものと考えられる。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 JP 23K13386 の助成によるものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 石橋忠良，古谷時春，浜崎直行，鈴木博人：高架橋

等からのコンクリート片剥落に関する調査研究，土木学会論文集，Vol.56，No.711，pp.125-134，2002.8

- 2) 永野匡敏，岸利治：鉄道高架橋における鉄筋かぶりおよび中性化深さの実態と変状発生との相関，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.1483-1488，2016.6
- 3) 太田達見，山崎庸行，枘田佳寛：かぶりコンクリートの性状に及ぼす各種要因に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.68，No.572，pp.1-8，2003.10
- 4) Liyanto Eddy, Koji Matsumoto, Kohei Nagal, Piyaphat Chaemchuen, Michael Henry and Kota Horiguchi : Investigation on quality of thin concrete cover using mercury intrusion porosimetry and non-destructive tests, Journal of Asian Concrete Federation Vol.4, No.1, pp.47-66, 2018.6
- 5) 工藤めい，下村匠：コンクリート部材への水の浸透・乾燥に及ぼすひび割れの影響に関する実験と数値解析，土木学会論文集 E2, Vol.75, No.3, pp.196-207, 2019.8
- 6) 酒井雄也，岸利治：閾細孔半径に基づくコンクリート中の物質移動の定量評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.688-693，2014.6
- 7) Torrent. R. : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site. Materials & Structures, Vol.25, No.150, pp.358-365, 1992.7
- 8) セメント協会：コンクリート専門委員会報告，F-18 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告，1967.9
- 9) Shiyu Zhuang, Qiang Wang, Mingzhong Zhang : Water absorption behavior of concrete, Novel experimental findings and model characterization, Journal of Building Engineering, Vol.53, Article ID 104602, 2022.4
- 10) 早川健司，水上翔太，加藤佳孝：表層透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp.385-398, 2012.11
- 11) 寺西浩司，葛山育海：トレント試験における透気深さの実験的検討，コンクリート工学年次論文集 Vol.42, No.1, pp.1642-1647, 2020.6
- 12) 加藤佳孝，西村次男，魚本健人：骨材周囲の遷移帯厚さおよび空隙率の簡易測定手法の提案，セメント・コンクリート論文集，No.63, pp.308-315, 2009.3