

シールド工事用セグメントの表面の微細構造

Micro-structures on the surface of concrete segments for shield tunnels

木村 定雄¹⁾, 守山 亨²⁾, 宇野 洋志城³⁾, 清水 幸範⁴⁾

Sadao KIMURA, Tooru MORIYAMA, Yoshiki UNO, Yukinori SHIMIZU

As compared with other concrete products, segments used for a primary lining of a shield tunnel are required to possess finer surface appearance, as well as higher durability and quality. On the other hand, cost reduction is an important subject, and shield tunneling is no exception.

In view of the above, the authors carried out microscopic investigations about defects, which spoil surface appearance, and micro cracks on concrete segments. It was proved that the influence from such defects on the durability of segments is fairly small.

Key Words: shield tunnel, highly flowable concrete, micro crack, visual states, SEM, EPMA

1. はじめに

シールドトンネルの一次覆工として適用されるセグメントの大半を占めるものに、二次製品のコンクリート系セグメントがある。従来から、このセグメントの製造に用いられる鉄筋コンクリートは、他の構造物に適用されるそれに比べて、要求される性能や品質がともに高く、製品の表面の美観までも求められてきた。

一方、近年の社会資本整備においては、建設コストを縮減することが重要な課題となっており、シールド工事もその例外ではなく、セグメントの製造費の低減が強く望まれている。現状では、セグメントの製造費を低減するために、その継手構造の合理化¹⁾やセグメント幅の拡大化²⁾などの開発がなされているが、セグメントに要求する性能や品質をより明確にすることで、その製造費の低減を図ることも実務的に有効と考えられる。例えば、セグメント表面の美観を損なうことや微細ひび割れが存在することを許容する程度を明確にすることがそれにあたるものと考えられる。

とくに、セグメントの内表面(トンネル内側の表面)の美観は、トンネルの用途やその使用環境および二次覆工の有無に応じて要求されるべきである。しかしながら、美観そのものが、鉄筋コンクリート製品の耐久性能と直接的に関連していると判断される場合も少なくない。その一方で、これらの関連を明確にする資料は見あたらないのも実状である。他方、鉄筋コンクリート製セグメントの内表面に生じる微細ひび割れは、セグメントの耐久性能に何らかの影響を与えられと考えられる。しかし、セメント水和生成物が主体をなすコンクリートであるならば、その自己収縮や乾燥収縮をなくすることは不可能であり、その程度を微小に抑制することが重要である。現状の技術によると、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの総量を 600~700

-
- 1) 正会員 博士(工学) 金沢工業大学 環境系土木工学科
 - 2) 正会員 佐藤工業(株) 土木本部技術部門
 - 3) 正会員 佐藤工業(株) 中央技術研究所
 - 4) 正会員 修士(工学) 佐藤工業(株) 東京支店

表1 高流動コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブ厚 (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad
20	65±5	2±1	30.7	56.0	182	592	892	783	10.7

C: 普通ポルトランドセメント, S: 葛生産石灰岩系砕砂, G: 玄武岩系砕石, Ad: 高性能減水剤 (主成分はポリカルボン酸と配向ポリマーの複合体)

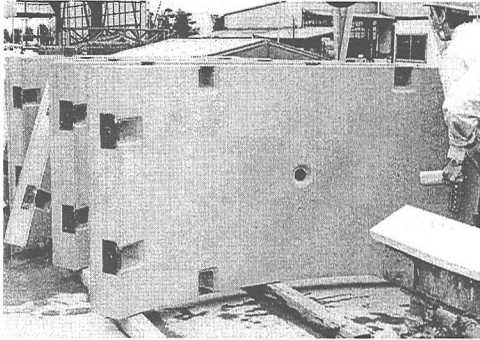


写真1 脱型直後のセグメント

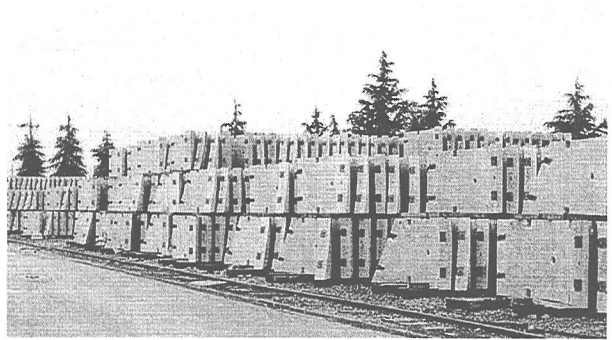


写真2 セグメントの貯蔵状況

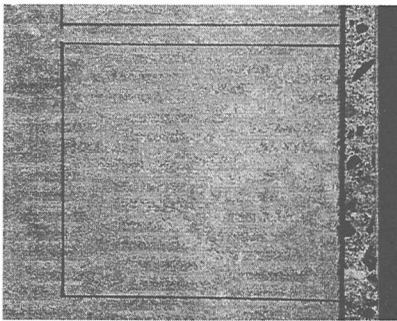


写真3 色むら(表面乾燥状態)

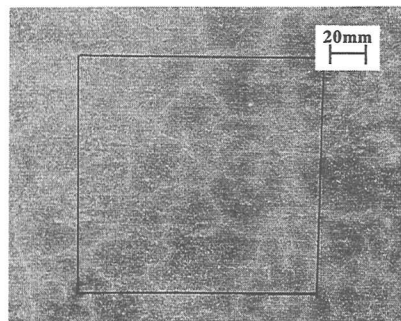


写真5 微細ひび割れ(表面乾燥状態)

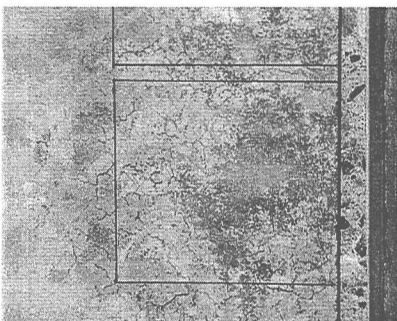


写真4 色むら(表面湿潤状態)

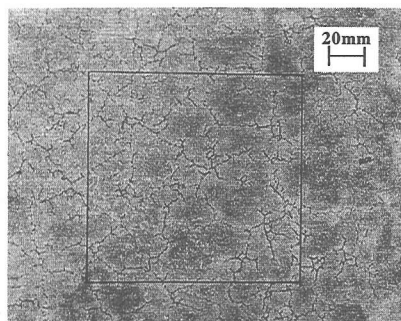


写真6 微細ひび割れ(表面湿潤状態)

μ 程度に抑えることができれば、高耐久なコンクリートと評価され、セグメントの耐久性能に与える影響はほとんどないとされている^{3),4)}。また、ひび割れ幅の観点からみると、0.05mm以下のひび割れ幅であれば、セグメントの耐久性能にほとんど影響を与えないと考えられる⁵⁾。

したがって、セグメントの耐久性能に影響を与えないと考えられる色むらや微細ひび割れの存在を重視するあまりに、その補修や化粧などの方策を図ることは、単にセグメント費を高くすることになる可能性が高い。

表2 美観の不具合の詳細調査項目とその方法

調査項目	調査方法
(1)微生物調査	①蛍光顕微鏡による表面観察
(2)表面調査	①走査型電子顕微鏡(SEM)による表面観察
	②電子線マイクロアナライザー(EPMA)による定性分析
(3)断面調査	①EPMAによる断面観察

表3 微細ひび割れの詳細調査項目とその方法

調査項目	調査方法
(1)表面調査	①実体顕微鏡による表面観察
(2)断面調査	①実体顕微鏡による表面観察
	②EPMAによる断面観察

以上を踏まえ、筆者らは、現在製造しているセグメントの内表面の微細構造を分析し、色むらなどの美観を損なう性状や微細ひび割れの性状を詳細に検討するとともに、それらがセグメントの耐久性能に与える影響について考察した。

2. 調査概要

本調査では、粉体系の高流動コンクリートを用いて製造したセグメント^{6),7)}をその対象とした。表1は高流動コンクリートの配合を示したものである。調査はまず、3日間の水中養生を施した後に屋外で貯蔵しているセグメントの現地調査を行い、その内表面に色むらや斑点模様などの美観上の不具合、および微細ひび割れを有するセグメントを抽出し、それらの性状を調べて不具合を分類した。写真1および写真2は、脱型直後および屋外での貯蔵中のセグメントの状況を示したものである。

(1) 現地調査に基づく美観の不具合の状況

貯蔵を開始した一部のセグメントの内表面に明色部と暗色部からなる色むらや斑点模様が生じていた。写真3および写真4はその一例を示したものである。色むらには規則性がなく、同一製造日の同一バッチのコンクリートを用いて製造したセグメントにおいても、色むらを生じるものと生じないものとが認められた。色むらが確認されたセグメント表面の明色部は暗色部に比べて脆弱であり、爪先などで摩擦すれば、比較的容易に摩滅して粉状になる。一方、暗色部は平滑かつ緻密であり、爪先などでも容易に傷がつかない。他方、明色部と暗色部の色むらとは別に、斑点状の変色部も認められた。そこで、これらを①明色部と暗色部の色むら、および②斑点状の変色部に分類して、それらの性状を詳細に調査した。表2は、詳細調査の項目とその方法を示したものである。なお、調査に用いた供試体は、①および②の性状を示すセグメント部位から板状(130×130×50mm)に切り出したものである。

(2) 現地調査に基づく微細ひび割れの状況

貯蔵を開始してから約1～2週間を経過した時に、亀甲状の微細ひび割れを有するセグメントが確認された。この微細ひび割れは、100～150mm程度の間隔であり、セグメントの表面が乾燥している状態では、肉眼で確認ができなかった。しかし、降雨などにより表面が湿潤状態になると、微細ひび割れの内部に水分が侵入して、それが顕在化したものである。その後、約1ヶ月を経過すると、微細ひび割れの間隔は、20～30mm程度となり、さらに5～6ヶ月を経過しても顕著な変化は見られなかった。この微細ひび割れの幅は、それが確認された当初から0.02mm以下であり、時間の経過に伴って、ひび割れ幅や長さの進展は認められなかった。写真5および写真6は、微細ひび割れの一例を示したものである。

次に、セグメント表面に発生した微細ひび割れを抽出して、その性状を詳細に調査した。表3は、詳細調査の項目とその方法を示したものである。なお、この調査とは別に実施された高流動コンクリートの自己収

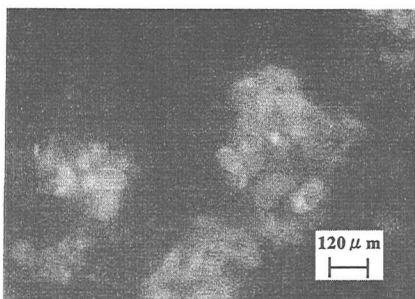


写真7 色むら部の状況 (蛍光顕微鏡)

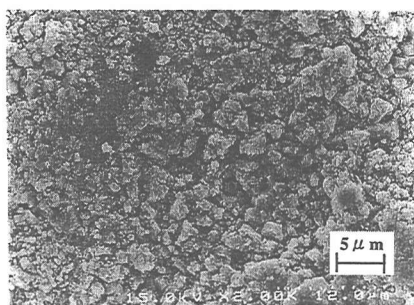


写真9 暗色部の表面構造 (SEM)

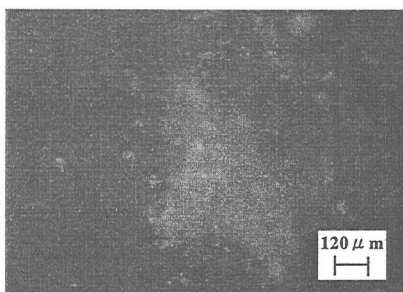


写真8 緑藻の状況 (蛍光顕微鏡)

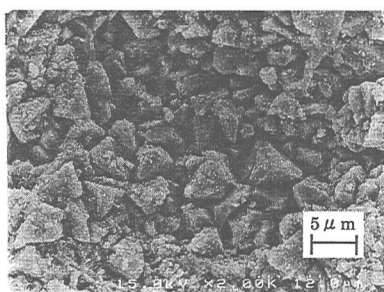


写真10 明色部の表面構造 (SEM)

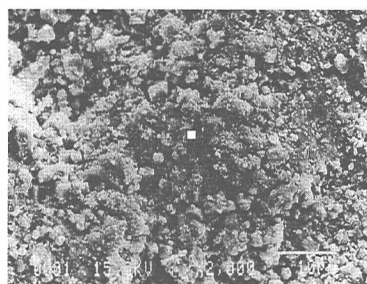


写真11 明色部(微細な不定形粒子)

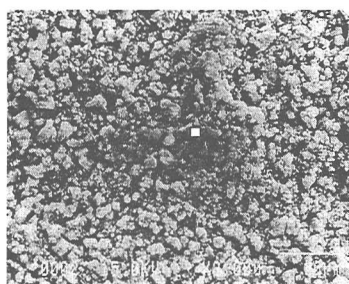


写真13 暗色部(微細な不定形粒子)

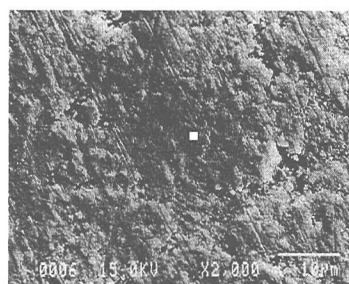


写真15 緻密部(平らな部分)

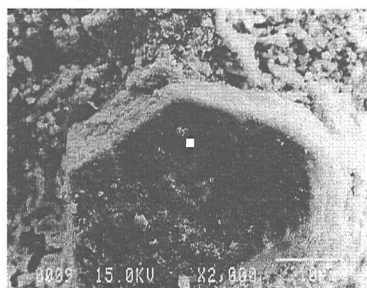


写真12 明色部(角張りのある大粒子)

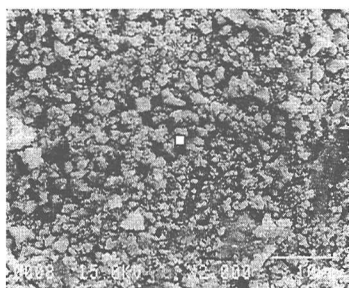


写真14 暗色部(角張りのある大粒子)

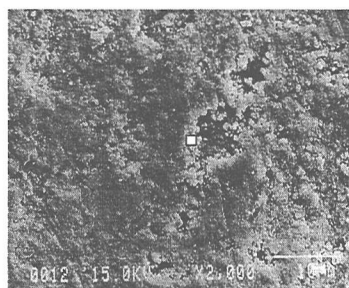


写真16 緻密部(平らな部分と空孔の境界)

注) 写真11～写真16中の口 は、EPMA による定性分析の測定点

表 4 EPMA による表面の定性分析結果

試料の表面の性状		含有量 (%)						
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
明色部	微細な不定形粒子	7	2	—	91	—	—	—
	角張りのある大粒子	1	—	—	99	—	—	—
暗色部	微細な不定形粒子	10	4	—	81	1	2	2
	角張りのある大粒子	6	1	—	91	2	—	—
緻密部	平な部分	5	1	—	94	—	—	—
	平らな部分と空孔の境界	4	1	—	95	—	—	—

縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみの総量は、565 μ (材齢 52 週)である⁸⁾。

3. 美観の不具合に関する詳細調査の結果およびその考察

(1) 微生物調査の結果

①暗色部と明色部の色むらおよび②斑点状の変色部について、蛍光顕微鏡で観察した結果の一例を写真 7 に示す。これより、植物細胞中に存在するクロロフィルに起因して蛍光を発する緑藻などの物質は観察されなかった。なお、写真 8 は緑藻を含む場合の観察例である。

(2) 表面調査の結果

写真 9 および写真 10 に走査型電子顕微鏡(SEM)による観察結果の一例を示す。暗色部は比較的緻密な、明色部は比較的多孔質な構造を形成している。また、表面の大部分の組成は、炭酸カルシウムの結晶であり、一部にエトリンガイトの派生物と思われる針状結晶も確認された。一方、セグメント表面の性状ごとに分けて行った EPMA の観察結果を写真 11～写真 16 に示す。また、その定性分析の結果を表 4 に示す。表 4 中に示した分析結果は、測定点の性状および EPMA のピークカウント数から各元素を酸化物と見なし、かつ含量が 100%となるように換算して得られたものである。これより、表面の暗色部、明色部および緻密部のいずれも成分は Ca が主体をなしており、SEM による観察結果と一致している。したがって、セグメント表面の性状に関わらず、その組成はほぼ同じであると判断できる。

(3) 断面調査

写真 17 および写真 18 に EPMA⁹⁾による断面構造の観察結果の一例を示す。また、写真 19 および写真 20 に明色部と暗色部の特性 X 線像を示す。明色部の表層には、厚さ約 20 μ m の層状物質が存在し、これは 3 層の構造になっている。このうち、最も内側の層は緻密な炭酸カルシウムで形成されており、その外側に多孔質な炭酸カルシウム層がある。最外殻層は Si や Al を含有する厚さ約 1 μ m の微粒子層である。一方、暗色部の表層には、厚さ約 10 μ m の緻密な炭酸カルシウム層と厚さ約 1 μ m の微粒子層が確認された。暗色部の層状物質の厚さは明色部のその半分程度である。

(4) 調査結果の考察

従来、セグメント表面に明色部と暗色部の色むらや斑点状の変色が生じる原因は、苔などの植物類の繁茂やセメント水和生成物の差異、または型枠の脱型を容易にするための剥離剤の種類や塗布むらなどと考えられてきた。しかし、本調査の結果から、これらの性状は、セグメント表層部の炭酸カルシウム層の粗密の差異による可視光の透過の程度や反射の程度の影響であることが明らかとなった。すなわち、明色部は多孔質な炭酸カルシウム層で可視光の乱反射が生じて比較的白く見える。一方、暗色部は薄く、かつ緻密な炭酸カ

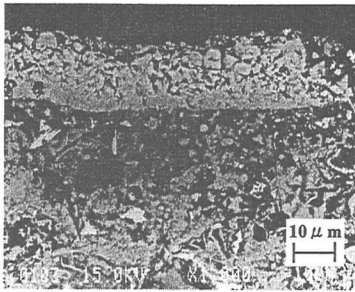


写真17 明色部の断面構造 (EPMA)

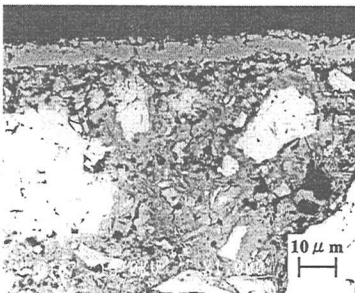


写真18 暗色部の断面構造 (EPMA)

ルシウム層で可視光の乱反射が生じないため、下層のモルタル層の色合いが透過して相対的に黒く見える。したがって、従来から一般に白色で美観が良いとされてきたコンクリートの表面はその耐久性能の評価からすると、いちがいに良好とはならない可能性があると考えられる。また、これらの炭酸カルシウム層は、0.02mm 程度の厚さであることから、表面の色合いがセグメントの耐久性能に与える影響は相当に小さいものと考えられる。

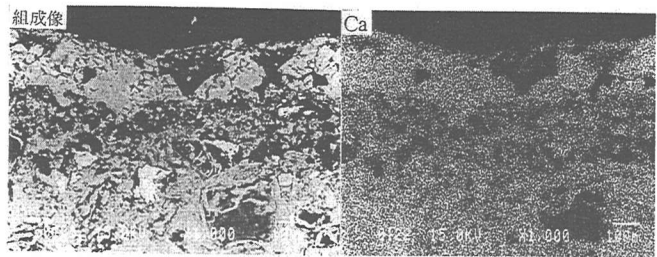


写真19 明色部断面の特性 X 線像

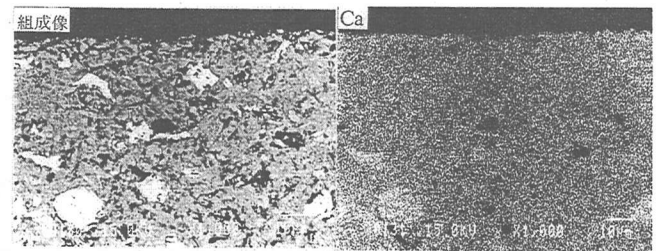


写真20 暗色部(緻密部)断面の特性 X 線像

4. 微細ひび割れに関する詳細調査の結果 およびその考察

(1) 表面調査の結果

実体顕微鏡を用いて、セグメント表面に存在する微細ひび割れを観察した結果を写真 21 および写真 22 に示す。写真 21 はひび割れからの析出物が比較的に少なく、ひび割れが明瞭に判定できるものの例である。写真 22 はエフロレッセンスと考えられる白色生成物がひび割れの内部を充填し、析出物によって、ひび割れが閉塞したように見える例である。観察されたこれらのひび割れの幅は、最大でも 0.02mm 以下である。また、微細ひび割れを中央としてその両側には、ひび割れ幅の数倍～数十倍の幅を有する帯状の白色領域が見られ、この帯状領域の先端は黒色を呈している。

(2) 断面調査の結果

写真 23 および写真 24 は、EPMA により撮影した微細ひび割れの深さおよび進展状況を示したものである。微細ひび割れの深さは、いずれも約 2～3mm であり、その先端は骨材粒周りの付着ひび割れを誘発した安定状態(写真 23)、あるいは微細気泡による進展阻止状態(写真 24)となっている。

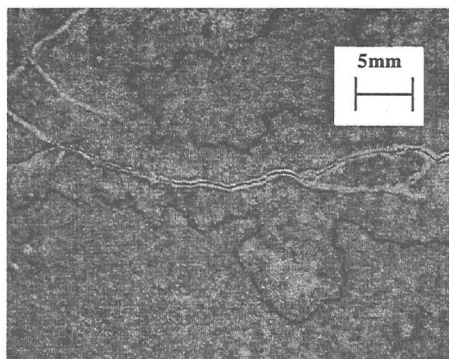


写真 21 明瞭な微細ひび割れ

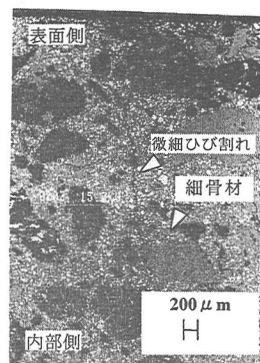


写真 23 ひび割れ性状

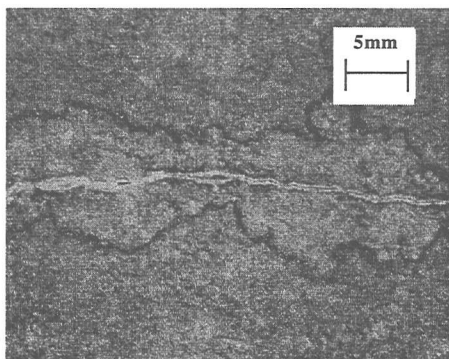


写真 22 不明瞭な微細ひび割れ

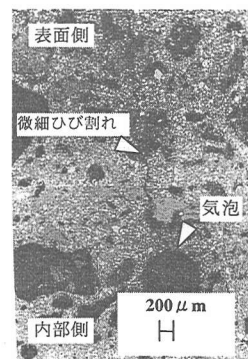


写真 24 ひび割れ性状

(3) 調査結果の考察

セグメント表面に発生した微細ひび割れは、亀甲状を呈しており、その間隔は 20～30mm 程度であり、最大骨材寸法とほぼ一致する。このようなひび割れの発生状況となる原因の一つとして、アルカリ骨材反応が考えられる。しかし、使用した骨材の反応試験結果および微細ひび割れの発生

時期が材齢 1 ヶ月程度と若く、材齢 6 ヶ月でその進展がとまったこと、反応ゲルや反応リムが観察されなかったことなどから、アルカリ骨材反応がその原因でないと判断できる。また、材齢が若く水和反応が促進している時期の水分補給が、不十分ではないことから、自己収縮が微細ひび割れの発生原因であるとは考えられない¹⁰⁾。したがって、微細ひび割れの発生時期や発生状況を考慮すると、その原因は表層部にあるセメントペースト、あるいはモルタルの乾燥収縮を粗骨材が拘束したためと考えられる。

一方、セグメントの表面に生じていた微細ひび割れを観察した結果、その幅は最大でも 0.02mm 以下であるとともに、その深さが最大 2～3mm 程度であり、極表層の炭酸カルシウム層のみでその進展がとまっている性状にある。したがって、トンネルの用途や二次覆工の有無にもよるが、既往の評価基準^{5),11),12)}に照らして、微細ひび割れが耐久性能に与える影響を総合的に判断すると、コンクリートの強度低下、中性化および水密性、さらには、鉄筋の腐食に与える影響は相当に小さいものと考えられる。

4. まとめ

セグメント表面に生じる色むらや微細ひび割れに関する調査を行い、それらがセグメントの耐久性能に与える影響について考察した。得られた主な結論をまとめると以下のとおりである。

(1) 美観の不具合について

- ① セグメント表面の明色部および暗色部の色むらは、コンクリート中に混入した異物に起因するものではない。

- ② セグメント表面の色むらは、ともに水中養生時にセメント水和生成物から派生した炭酸カルシウムが主成分である。その組成構造は、ところにより異なっており、暗色部は明色部に比べて緻密な組成構造となっている。このため、色むらの主因は表面に存在する炭酸カルシウム層の粗密の程度の差異により可視光の反射の程度が異なるためと考えられる。
- ③ セグメント表面の微視的な組織変化は、脱型時においてすでに生じていたものと推察される。明色部は一般的に多孔質な組織構造を有するが、この組織は表面から約 0.02mm であり、極めて微小領域に限定される。
- ④ 以上の結果から、セグメント表面に生じる色むらが、セグメントの耐久性能に与える影響は相当に小さいものと考えられる。

(2) 微細ひび割れについて

- ① セグメント表面に生じた微細ひび割れは、コンクリートの表層部にあるセメントペースト(あるいはモルタル)の乾燥収縮を骨材が拘束することが主因として考えられる。また、水中養生の有無が使用したコンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす影響は、本調査の範囲からは明確にすることはできない。
- ② 微細ひび割れの両側に存在する白色変色域は、表層下の比較的に多孔層がひび割れから侵入した水分による湿潤あるいは乾燥環境による乾燥過程の繰り返しによりコンクリート内部から溶出したエフロレッセンスなどが析出したものと考えられる。
- ③ 微細ひび割れの進長深さは、最大でも 2~3mm であり、極表層の炭酸カルシウム生成層のみの厚さ分において、ひび割れの進展が止まっているものもある。したがって、微細ひび割れは、コンクリート表層に限定された軽微なものである。
- ④ 微細ひび割れの幅は、最大でも 0.02mm であり、耐久性能上最も厳しい海洋コンクリート構造物における許容最大ひび割れ幅が 0.05mm⁵⁾であること、さらに、補修を必要としないひび割れ幅が 0.05mm 以下¹²⁾であること、などを総合的に勘案すれば、微細ひび割れの存在が、コンクリートの強度のみならず、セグメント中の鋼材腐食、中性化などの耐久性能および防水や遮水などの水密性に及ぼす影響は相当に小さいものと考えられる。

参考文献

- 1)例えば、小泉 監修：セグメントの新技术，土木工学社，2000.2.
- 2)例えば、土木学会・日本下水道協会 共編：シールド工用標準セグメント，2001.7.
- 3)土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕，2002 年度制定・第 1 刷発行，p.54, 2002.3.
- 4)日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説，pp.179-184, 1991.
- 5)日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造物の防食指針(案)，pp.11-12, pp.53-58, 1990.
- 6)花見，松裏，岩藤，秋田谷：高流動コンクリートセグメントの開発(1)，第 53 回年次学術講演会，VI-25, 1998.10.
- 7)清水，山田，木村，宇野，秋田谷：セグメント用高流動コンクリートの特性(1)，第 54 回年次学術講演会，VI-50, 1999.10.
- 8)花見：高流動コンクリートを用いたシールド工用セグメントにおける FRP-Key 継手の力学特性に関する研究，早稲田大学学位論文，p.26, 2001.7.
- 9)日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'01〔基礎編〕，pp.136-139, 2001.3.
- 10)日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.7-11, 1996.
- 11)土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，2002 年度制定・第 1 刷発行，pp.95-104, 2002.3.
- 12)日本コンクリート工学協会：コンクリートのひびわれ調査，補修・補強指針，pp.63-74, 1989.