

論文 コンクリートコアによる SCC 構造物内部品質の評価

菊地達哉^{*1}・木ノ村幸士^{*2}・岸利治^{*3}・渡部正^{*4}

要旨: 本研究では SCC の実構造物からコンクリートコアを採取し、骨材面積率・中性化深さ・ヒステリシスを測定することにより、構造物の内部品質を評価した。その結果、たとえ一点から打設し、長い距離を水平流動させてできた構造物でも大きな材料分離をせず、骨材がほぼ均一に分布していることが確認された。また、水結合材比の小さい緻密な構造物であっても、スラグ系の SCC 構造物では、表面にある微細な収縮ひび割れから中性化が進行し、耐久性を低下させる可能性のあることが確認された。さらに、モルタル中の空隙量と空隙構造によりマトリックスの特徴を評価し、中性化の進行状況との比較を行った。

キーワード: 自己充填コンクリート (SCC), 骨材面積率, ヒステリシス, 自己収縮, 空隙構造

1. はじめに

自己充填コンクリート (SCC) は、流動性・材料分離抵抗性に優れ、施工の影響を受けない高品質なコンクリートであることが知られている。しかし、実構造物レベルでその性状を示すデータがないのが現状である。本研究では、富山県内山間部のもたれ擁壁 (図-1) と埼玉県内にある SCC の実物大模型 (図-3) からコンクリートコアを採取し内部品質を評価した。

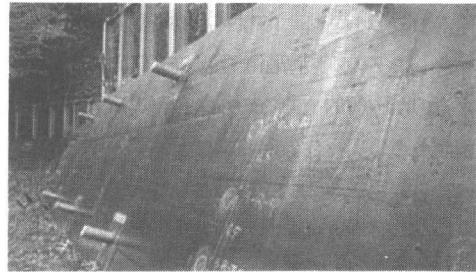


図-1 富山県内山間部のもたれ擁壁の外観

2. 対象構造物とコア採取位置

2. 1 富山県内山間部のもたれ擁壁

もたれ擁壁のコア採取位置とコンクリートの配合表をそれぞれ図-2、表-1に示す。使用されたコンクリートはフライアッシュ系の SCC であり、平成3年に打設されたものである。打設は擁壁中央部からの1点打設であり、3層にわたって行われた。本研究においては、擁壁各部位の内部品質を比較するために、擁壁第2リフト部分の左側・中央部・右側の3箇所から、それぞれ高さ方向に上・中・下・打ち継ぎ目の4点の合計12本のコアを採取した。コンクリートコアの採取には、測定面を出すために、冷却水を用いたコアボーリングによる切断法を採用した。

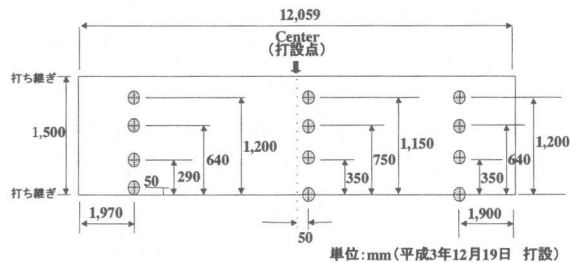


図-2 コア採取位置図

表-1 コンクリートの配合

配合条件		単位量(kg/m ³)						
水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	増粘剤	高性能入水剤
34.6	53	160	260	202	870	783	0.02	10.2

^{*1} 東京大学大学院 社会基盤工学専攻 (正会員)

^{*3} 東京大学助教授 大学院 博 (工) (正会員)

^{*2} 東京大学大学院 社会基盤工学専攻 (正会員)

^{*4} 前田建設工業 (株) 技術研究所課長 博 (工) (正会員)

2. 2 SCC 実大模型

埼玉県内にある SCC 実大模型の外観とコア採取位置およびコンクリートの配合をそれぞれ図-3、図-4、表-2に示す。使用されたコンクリートはスラグ系の SCC である。本研究においてコア採取の対象としたのは、実大模型の南側部分である2スパンの壁（A柱-壁-B柱-壁-C柱）の内側部分であり、コンクリートはA柱1点から平成2年10月28日に打設された。A柱-壁-B柱-壁-C柱の5箇所から、それぞれ上・中・下の3点の合計15本のコアを採取した。

3 測定項目および実験方法

3. 1 骨材面積率測定

通常コンクリートコアから骨材面積率を測定する場合、コアの割裂断面またはコア側面において評価するのが一般的である。しかし、本研究では構造物表面からの奥行き方向の骨材面積率のばらつきについても検討することを目的としたので、以下に示すようなコア断面により骨材面積率を測定することとした。

まず、採取したコンクリートコアから厚さ1cm程度のスライスピースを切り出す。スライスは、コアの表面部分、表面から8cm、15cmの位置からそれぞれ1ピースずつ、合計3ピース切り出した（図-5）。次に、スライス表面をアセトンできれいに拭き取った後で、断面内に存在する粒径5mm以上の粗骨材に油性マジックでマーキングをした。マーキングしたコアの表面をスキャナで読み取り、その画像ファイルを画像処理ソフト¹⁾にかけ断面内の骨材面積率を算定した。コア採取位置の骨材面積率には、3箇所から切り出したピースそれぞれの骨材面積率の平均値を用いた。また、スライス切断位置の関係で見かけ上5mm以下の粒径となり、面積率算定に含まれていない粗骨材も存在するので、粒径2mm以上の粗骨材を拾ったケースについても同様の測定を行い、面積率のデータに大きな影響がないかどうか検討した。

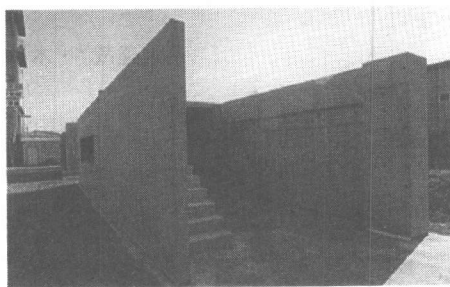


図-3 埼玉県内にある SCC 実大模型の外観

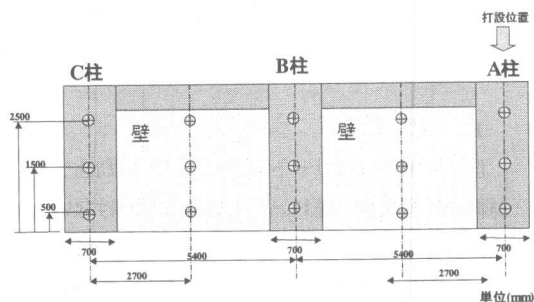


図-4 コア採取位置図

配合条件		単位量(kg/m ³)						
水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	水	セメント	高炉スラグ	細骨材	粗骨材	増粘剤	高性能AE減水剤
33.6	50.3	178	169	350	808	823	0.02	8.43

表-2 コンクリートの配合

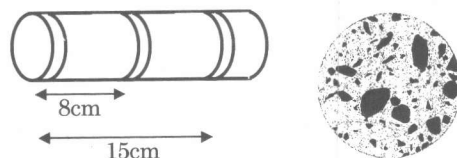


図-5 スライス切断位置とマーキング後のスライス

3. 2 中性化深さ測定

中性化深さの測定は、一般的に割裂面を測定面とするとフェノールフタレインがきれいに着色し、中性化深さを測定しやすいので望ましいとされている。しかし本研究においては、コアを割裂にしてしまう

と、後述する、コア表面からの距離に応じた面積率測定が困難になるので、コンクリートコアの円柱側面に直接フェノールフタレインを吹きかけて中性化深さを測定することにした。

まず、コア採取時に表面に付着したアルカリ分にフェノールフタレインが反応しないように、採取したコンクリートコアの表面をきれいに洗浄し、完全に表面が乾燥した後で、コアの側面にフェノールフタレインを吹きかけて測定した。中性化深さは、元位置において構造物の上部側に位置していた点を基準とするコア円周の8等分点でそれぞれ読み取り、それらの平均値をコア採取位置の平均中性化深さとした。さらに、全円周にわたって中性化深さの最大値と最小値を測定し、中性化深さのばらつき範囲を示した。

3. 3 乾燥・湿潤過程における採取コアの含水状態経路の測定（ヒステリシス測定）

もたれ擁壁および SCC 実大模型から採取したコアを5mm程度の小片に粉砕し、得られた小片3片を試料として、乾燥・湿潤過程における各コア小片の等温線の履歴挙動を測定した（以下、本文中ではヒステリシス測定と呼ぶ）。ヒステリシス測定の方法は以下に示す通りである。

(i) 湿潤過程

最初に真空乾燥（RH=0%）を行い、重量を測定する。その後、温度を25℃一定に保ち、相対湿度をRH=0, 35, 50, 70, 85, 97, 100%と順次変化させた恒温恒湿槽に試料を投入し重量を測定する。ここで、RH=100%とは試料を水に浸した状態である。

(ii) 乾燥過程

湿潤過程同様、相対湿度をRH=100, 85, 50, 35, 0%と順次変化させ重量を測定する。なお、相対湿度は湿潤・乾燥過程とも試料の重量変化が平衡に達したのを確認した後、変化させた。

4. 実験結果および考察

4. 1 骨材面積率測定結果および考察

3. 1で説明した通り、各部位の骨材面積率は3

断面の面積率の平均値としている。しかし、スライスを切り出す位置によって面積率がばらつく可能性があり、また粗骨材を5mmから拾うか2mmから拾うかによっても値がばらつく可能性がある。そこでまずは、コアの表面から奥行き方向に10ピースのスライスを連続して切り出し、切り出すスライス断面の位置によって骨材面積率がどの程度ばらつくのかを、粒径5mm以上で拾ったケースと粒径2mm以上で拾ったケースについて調べた（図-8）。実験結果を図-9に示す。図-9はもたれ擁壁の打設点下の中央部から採取したコアについて、スライス断面位置による骨材面積率のばらつきを2mm粒径と5mm粒径のそれぞれのケースでプロットしたグラフである。

グラフから分かるように、2mm粒径のケースは5mm粒径のケースを単に上にシフトしたような形になっており、骨材面積率のばらつき性状もほぼ同一となっている。従って、粒径が5mm以上の粗骨材を拾って各部位の骨材面積率を算出しても、構造物各部位の骨材分布を比較するのには影響がないことが分かる。しかし、スライスをどの部位から切り出すかによっては骨材面積率が多少ばらつくことが確認された。原因としては主として、コア断面積が

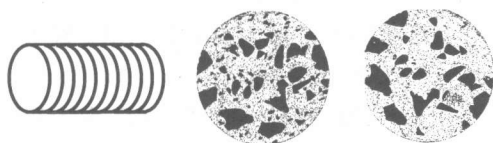


図-8 スライスピースの切り出しの様子と
2mm以上（左）と5mm以上（右）で拾った断面

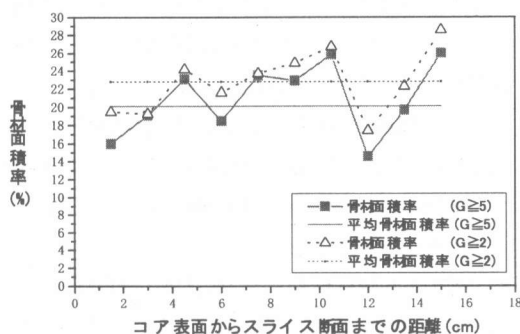
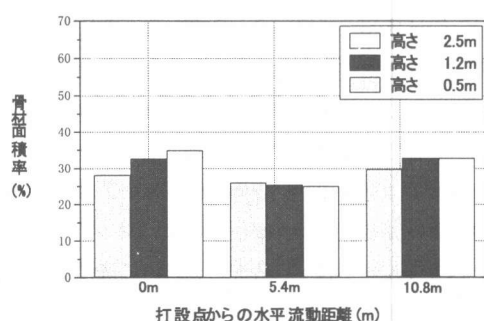


図-9 コア表面からの距離と骨材面積率の関係

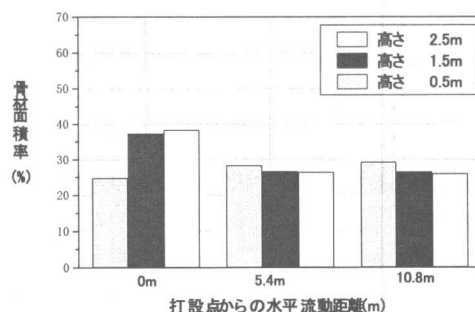
粗骨材最大粒径に対して十分な大きさを有しないこととや配筋の影響などが考えられる。本研究ではコア採取位置の骨材面積率を3箇所のスライスから算定した面積率の平均値としているが、グラフのように断面位置によって値がばらつくことを考えると、3断面の平均値の重みには多少の疑問が残る。幸いにして、同一の構造物のほぼ同一の個所で測定された骨材面積率のデータが入手できたので、本研究における骨材面積率データと比較してみた。図-10がその結果である。グラフは、打設点からの水平流動距離と構造物底部からの高さによる骨材面積率の関係を表している。2つのグラフを比較すると分かるように、面積率の値、骨材分布の性状ともにほぼ同じ様な結果となっている。参考文献では、コンクリートコアの側面部を紙にトレースし、それを画像処理にかけて骨材面積率を算出しており、測定対象面積が粗骨材最大粒径に比べて十分に大きいことから、骨材面積率の値としては信頼性の高い測定方法であると考えられる。本研究における測定方法でも同様の測定結果が得られることから、コア採取位置の骨材面積率として3箇所のスライスから算定した面積率の平均値を用いても、各部位の骨材分布を表現しうると考えられる。

以上の結果を踏まえて、もたれ擁壁、SCC 実大模型について骨材面積率の分布を測定した。図-11、図-12にその結果を示す。

まずもたれ擁壁の骨材分布を考察する。図-11を見ると分かるように、多少のばらつきはみられるものの、コンクリートは大きな材料分離を生じることなく、ほぼ均一に充填されていることが確認された。一方、図-12に示したSCC 実大模型においても同様に、わずかなばらつきが見られるものの、骨材は各部位にほぼ均一に分布している。骨材面積率の値がばらつく原因としてはいくつか考えられる。構造物底部に骨材が多いという傾向が全ての部位で認められれば材料分離による可能性が高いが、グラフを見ると分かるように、部位によっては上部の方が骨材が多いという結果が得られている。従って、骨材面積率がばらつく原因としては、配筋の影響・バッチごとのコンクリートの品質のばらつ



(a) 参考文献から引用した測定結果



(b) 本研究における測定結果

図-10 打設点からの水平流動距離と高さによる骨材面積率の関係

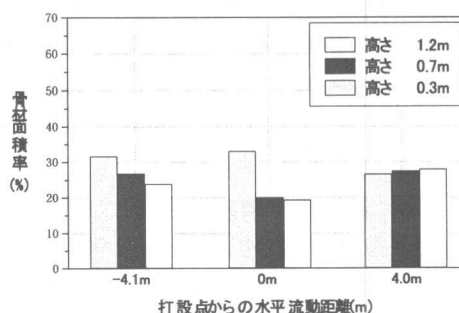


図-11 もたれ擁壁の骨材分布

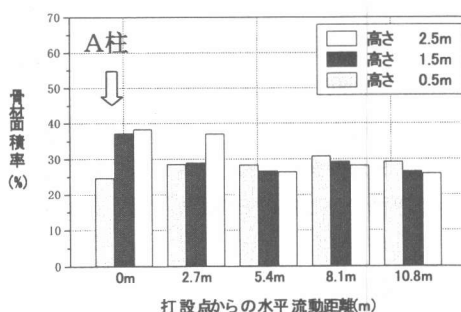


図-12 SCC 実大模型の骨材分布

きの影響・施工の影響などが考えられる。

しかし、部位によって骨材の分布がわずかにばらつくものの、コンクリートを一点打設し、約10mにわたって水平方向に流動させているにもかかわらず、いずれの構造物においても、型枠の隅々まで骨材が充填されている。これは普通コンクリートにおいては考えられないことであり、実構造物レベルでSCCの高い流動性・材料分離抵抗性、充填性を確認することができたと言える。

4. 2 中性化深さ測定結果および考察

もたれ擁壁から採取したコアにより中性化試験を行った結果、打ち継ぎ目以外の部位では全く中性化が進行していないことが確認された。これは、水結合材比が34%と低いため、コンクリート内部の細孔組織が緻密であることによると考えられる。また、フライアッシュ系のSCCを使用していることから、コンクリート表面における微小なひび割れがほとんど生じていないということも、中性化を抑制していると考えられる。

次にSCC実大模型での中性化深さを図-7に示す。SCC実大模型はスラグ系のSCCを使用しており、構造物表面に微細な収縮ひび割れが多数存在していた。その結果として、低水結合材比の緻密な構造であっても、部位によっては数cm程度の中性化が進行していたものと考えられる。

図-7を見ると、柱よりも壁の方が、またA柱とB柱の間の壁を除く部位においては、構造物底部よりも上部のほうが中性化が深く進行している傾向が見られる。柱よりも壁において中性化の進行が速いのは、収縮によるひび割れに起因しているものと考えられる。本構造物はスラグ系のSCCであることから、自己収縮の影響が大きいはずである。自己収縮は構造物中の部位によらず一様に生じるはずであるが、柱よりも壁の方が収縮に対する拘束効果を大きく受けるはずである。また、本構造物のように部位によって断面形状と部材厚さが異なる場合には、部材厚さの薄い部位、すなわち相対的に表面積が大きくなる部位において乾燥収縮の影響が大きいことも考えられる。

一方、底部よりも上部において中性化が大きい理由については、乾燥程度の部位による相違やブリーディングなどの局所的な材料分離の影響が考えられる。後述する、構造物部位ごとのモルタル中に含まれる空隙総量のデータ(図-13(b))によると、構造物上部の方が空隙量が多いという結果が得られており、これは図-7の傾向と一致している。

ただし、前述のもたれ擁壁においても、同様に上部の方が空隙量が多いという傾向が得られている(図-13(a))にも関わらず、中性化が全く進行していないことを考えると、仮にある程度の材料分離が生じたとしても、緻密な空隙構造をもつSCCでは、空隙量分布の多少のばらつきが単純に中性化の進行を支配するものではないと考えられる。

4. 3 ヒステリシス測定結果および考察

まず、100%含水状態と真空乾燥状態の重量差として得られる試料内の空隙総量を、試料モルタルの体積で割ったモルタル単位体積あたりの総空隙量を算出し、これを構造物内部の部位ごとで比較してみた(図-13)。図から、構造物上部の方が空隙の量が多いという傾向がうかがえる。前述した骨材面積率測定では、構造物内部の骨材分布に関する明確な傾向をみることは出来なかったが、マトリックス(モルタル)レベルでは、部位ごとの品質にある程度の傾向が認められたことになる。特に、SCC実大模型における総空隙量の測定結果は、平均中性化深さの分布状況にほぼ一致しており、A柱とB柱間の壁における特異な傾向にも合致している。

次にモルタル試料の異なる相対湿度下における、含水状態の推移をプロットしてみると、乾燥過程、

C柱		B柱		A柱
壁	2.1 (0~7)	壁	1.0 (0~3.5)	0
	5.31 (0~15)		5.63 (1~20)	0
	1.56 (0~7)		0.31 (0~3.5)	0
	2.06 (1~5)		7.5 (2~15)	0
	1.44 (0~6.5)		0.06 (0~0.5)	0
	0.81 (0~4.5)		6.13 (2~13.5)	0

図-7 各部位の平均中性化深さの分布の様子 単位 (mm)

括弧内は中性化深さのとりうる範囲(最小値から最大値)

湿潤過程で経路が異なるループを描く。この乾湿の非可逆性は、インクボトル効果、水分子の細孔壁への吸脱着などのメカニズムによるものとされており、幾何学的細孔構造が大きく影響している。従って、等温線履歴曲線の描くループは、細孔構造の情報を含んでいると考えられる。図-14は対象の2つの構造物の打設点直下上部位置の試料から得られた等温履歴曲線である。2つのループを比較してみると、スラグ系のループの方が、上に位置している。これは、実大模型 SCC の方が細孔組織中において、微小な空隙の割合が多いということを意味している。図-13に示したモルタル中の空隙量においても、もたれ擁壁よりも実大模型における SCC の方が緻密であることがわかる。ただし、スラグ系 SCC の等温履歴曲線には、相対湿度 85 % 近辺において、フライアッシュ系 SCC には見られない特異な形状を見ることが出来る。このことから、スラグ系 SCC では、微小な空隙が多い一方で、数 μ ~数十 μ レベルの比較的大きな空隙も内包しており、空隙構造が二極化していることも考えられる。表面ひび割れが多いことに加えて、このような特徴的な空隙構造が、空隙総量が少ないスラグ系 SCC において中性化が速いことの一因と考えられる。

5. まとめ

- (1) 低水結合材比の緻密な SCC 構造物であっても、スラグ系の SCC 構造物では、収縮により構造物表面に微細な収縮ひび割れが多数存在し、表面ひび割れが存在する部分での中性化の進行は速い。
- (2) 一点打設により、長い距離流動させても、SCC は大きな材料分離を生じることなく、骨材は型枠の隅々までほぼ均一に充填されている。
- (3) スラグ系 SCC において、モルタル中の空隙量と空隙構造といったマトリックスレベルの細孔特性が、中性化の進行状況に関与している可能性が認められた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、前田建設工業（株）技術本部技術研究所の方々には多大なるご協力を頂きま

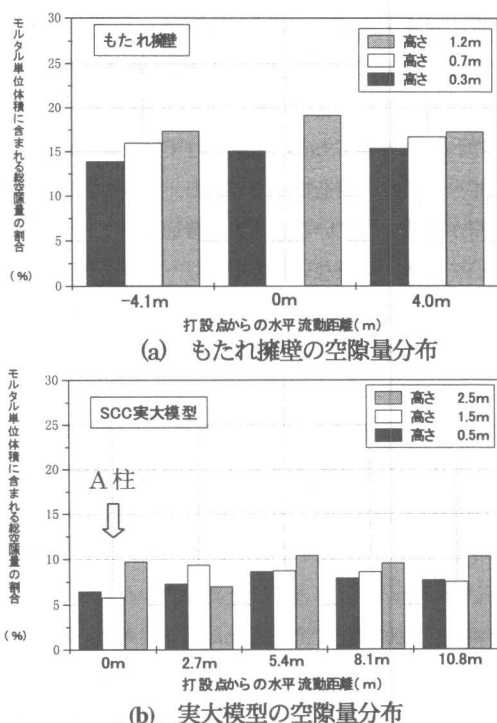


図-13 モルタル単位体積あたりに含まれる総空隙量の分布

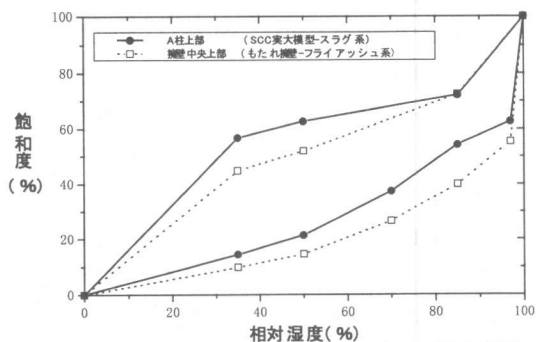


図-14 A柱上部と擁壁中央上部の含水状態履歴曲線

した。深く感謝申し上げます。また、骨材面積率算定のための画像処理ソフトを提供して下さいました SRA（株）の青木淳氏にも感謝の意を表します。

参考文献

- 1) SRA（株）：フリーソフトウェア「じゅん」
<http://www.sra.co.jp/people/aoki/Jun/>
- 2) 三浦信一他：コンクリート工学年次論文報告集、13-1、1991、PP869~874