

# 論文 中流動の重量コンクリートを用いたボックスカルバートの力学的挙動と表面遮水性能への振動締固めによる影響

小川 洋二<sup>\*1</sup>・横室 隆<sup>\*2</sup>・橘高 義典<sup>\*3</sup>・井川 秀樹<sup>\*4</sup>

**要旨**：密度が  $4.0\text{g/cm}^3$  を超える金属スラグ系重量骨材を用いて設計した重量コンクリートを用いてボックスカルバートを実機プラントにて作製した。施工性を考慮して流動性の高い配合とし、振動締固め時間を変化させた時の材料分離が、製品としての力学的特性と、表層部の遮水特性に与える影響を検討した。その結果、膨張材を併用して中流動コンクリートとした今回の配合では、振動時間を通常の 2~10 倍程度与えても、外圧試験による力学的挙動への影響はほとんどなかった。一方で表面遮水性能は型枠頂面近傍で低下した。外圧試験で表層部に生じた  $0.2\text{mm}$  程度の微細ひび割れは、外部からの水分供与により自己治癒性能を示した。

**キーワード**：重量骨材、表面透水試験、遮蔽用コンクリート、ボックスカルバート、自己治癒

## 1. はじめに

2011 年に発生した福島第一原子力発電所の事故以来、施設内で発生する廃棄物および汚染水の処理・保管や、広範囲に飛散した放射性物質の除染作業で発生した土壌・廃棄物類の保管が新たな問題として提起され、安全で確実な放射性物質の封じ込め技術が要求されている。

人体に対する放射線外部被ばくの防護には、線源からの距離を大きくとる、線源近くに滞留する時間を短くする、線源と人体との間に遮蔽を置く防護 3 原則がある。この中で遮蔽は、他の二つに比べて被曝線量を低減させる積極的な方法であり、国土の限られたわが国では、遮蔽技術をうまく活用することが重要なポイントとなる。

重量コンクリートの高密度特性は、放射線の遮蔽に有効とされ、遮蔽用途向け容器等の検討<sup>1)</sup>や遮蔽性能の評価<sup>2)</sup>が始まっている。コンクリートの密度が大きいほど、また部材厚が大きいほど放射線の遮蔽効果は大きくなるが、現状の検討では、容器自体の運搬が容易に行えるように薄くて小型なタイプが多い。限られた敷地において大量の廃棄物を長年月に亘って安全に保管するためには、多層に積み重ねても丈夫な構造的耐力や水分移動抵抗性を兼ね備えた容器が望ましい。

このような頑丈でかつ廃棄物容器としての有効なコンクリート二次製品を想定した場合、ある程度の構造体寸法が必要となるため、コンクリートの打込みと締固め時に生じる材料分離特性の影響がひとつの問題となる。コンクリートの材料分離は、骨材密度とセメントペーストとの密度差が大きくなるほど誘発されるため、重量骨材を用いるコンクリートでは特に材料分離のリスクが高まる。コンクリート密度が打込み高さによって不均一に

なると強度特性や遮蔽性能への影響も考えられるため、構造体として十分な性能を有するとともに、材料分離抵抗性を保持しつつ型枠内への高い充填性の確保を同時に満足する必要がある。対象となる部材や施工方法に応じた配筋とコンクリートの流動性への設計配慮が必要となるが、設計単位容積質量が  $3.2\text{t/m}^3$  を超えた重量コンクリートを用いて検討がなされた報告例はほとんどない。

そこで本報告は、内幅 B1200×内高 H1500×長さ L1500 (単位：mm) のボックスカルバートを遮蔽用容器と想定して材料設計を検討し、実機プラントにて試製造を行い、振動締固め条件を変えた時の打込み高さ方向 (L1500) の材料分離特性が、構造体の力学挙動や、表層部の遮水性能におよぼす影響を評価することを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料と配合

本実験に使用した材料を表 1 に、コンクリート配合を表 2 にそれぞれ示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。重量骨材は、鉄分を多く含むダストと還元スラグを混合溶融し、破碎して粒度調整したものを細骨材および粗骨材として用いた。乾燥単位容積質量が  $3.2\text{t/m}^3$  以上となるよう配合設計を行った。設計基準強度は  $50\text{N/mm}^2$  とし、コンクリートの型枠への充填性を得るために目標スランプフローは  $50\pm 10\text{cm}$  とした。材料分離抵抗性を高めるとともに、物質移動抵抗性と自己治癒機能が期待できるエトリンサイト系膨張材<sup>3) 4)</sup>を混和材としてセメントの外割で使用した。比較実験のため、呼び強度  $18\text{N/mm}^2$ 、スランプ  $21\text{cm}$  の普通コンクリート

\*1 日本ヒューム(株) 技術研究所 課長 博士 (工学) (正会員)

\*2 足利工業大学 工学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 首都大学東京 大学院都市環境科学研究科教授 工学博士 (正会員)

\*4 日本ヒューム(株) 技術研究所 所長 (正会員)

(18-21-20-N) を用いた。目標空気量は 4% とした。

表-1 使用したコンクリートの材料

材料名	記号	種類および物性値
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	砕砂, 表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> , F.M. 2.85
	S2	DSM 骨材, 表乾密度 4.20g/cm <sup>3</sup> , F.M. 3.83
粗骨材	G1	砕石 2005, 表乾密度 2.70g/cm <sup>3</sup> , F.M. 6.62
	G2	DSM 骨材, 表乾密度 4.29g/cm <sup>3</sup> , F.M. 6.52
膨張材	EXP	エトリンガイト系, 密度 3.01g/cm <sup>3</sup>
減水剤	SP1	リガニスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	SP2	コンクリート製品用ポリカルボン酸系

## 2.2 供試体の作製

ボックスカルバートの概要を図-1, 図-2 に示す。外殻部の長辺 1800mm, 短辺 1500mm, 奥行き 1500mm で, 頂版・底版, および側壁の版厚はいずれも 150mm である。主鉄筋には SD295A, D10 を 115mm 間隔で, また配力鉄筋は SD295A, D10 を 2 段で配置した。内容積は約 2.7m<sup>3</sup> である。コンクリートは実機プラント (パン型ミキサ, 容量 0.75m<sup>3</sup>) で製造し, 1 バッチ 0.45m<sup>3</sup> として 2 バッチ連続で混連した。練り上がったコンクリートは移動式ホップにより移送し, 型枠上面からコンクリートを流し込んだ。コンクリートは 2 層で打込み, 1 層ごとに型枠振動機 (振動数 5000rpm) により振動を与えて締め固めた。

試験体に与えた振動締め固め時間は, 試験体 No.1 では, 振動時間が 20 秒程度で打込み面が平坦になり, ペースト層が浮き上がって骨材が覆われる良好な締め固め状態となることを確認した。今回はさらに振動を加えて材料分離を促進し, 下層では 2 分, 上層では 1 分間, それぞれ振動を与えて成型した。試験体 No.2 では, 振動時間 2 分を 2 層にそれぞれ与えて成型した。今回設計した重量コンクリートは, 流動性とともにも粘性を高めているため振動時間が No.1 で適正であった 20 秒より長くする必要があった。目視では 2 分で上面の仕上がりは良好となった。これを踏まえて No.3 では, 1 層目に 4 分, 2 層目に 20 分の振動を与え, 過振動条件で成型した。打込み後は型枠全体をビニルシートで覆い 3 日後の脱型までシート内養生した。脱型後, 実験棟内に製品を移送して静置し, 室内気中養生状態を経て各種試験に供した。

表-2 コンクリートの配 (調) 合

試験体 No.	スランプ・スラン プフロー cm	水粉体比 W/P %	細骨材率 s/a %	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )								
				水 W	セメント C	細骨材				膨張材 EXP	混和剤	
						S1	S2	G1	G2		SP1	SP2
1	21±2.5	69.4	52.5	193	278	924	-	864	-	-	3.89	-
2, 3	50±5.0	28.2	52.0	144	450	-	1417	-	1336	60	-	7.14

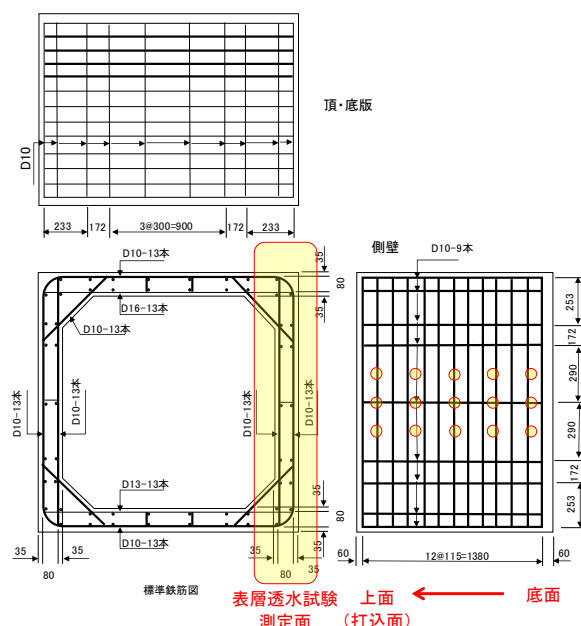


図-1 ボックスカルバートの概要

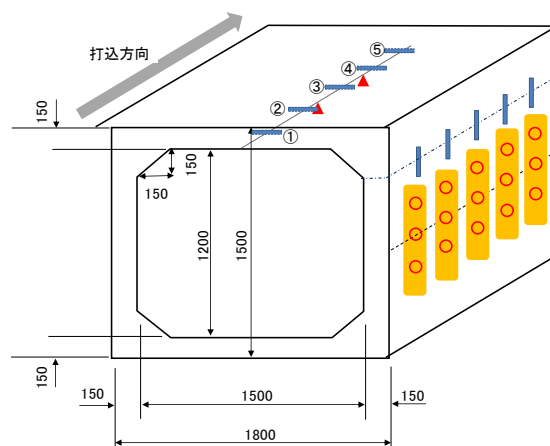


図-2 コンクリートの変位量 (▲), ひずみ (■), 表面透水試験位置 (○) とコア採取位置 (■)

## 2.3 試験方法

### (1) フレッシュコンクリートの試験

コンクリートのスランプフローおよび空気量試験は, JIS A 1150 および JIS A 1128 に準拠して実施した。

### (2) 表面透水試験

コンクリート表層部の遮水性評価は, 林らの提案した表面吸水試験方法<sup>5)</sup>を参考にして材齢 28 日に実施した。測定面は製品の側壁部 (図-2) とし, 壁中心から左右に 200mm 離れた 3 点を, 壁高 (1500mm) 方向に 5

等分して合計 15 か所を測定点として、製品の内面側および外面側からそれぞれ同じ位置で試験を実施した。内径 80mm、幅 10mm、厚さ 4mm の平ゴム製リングを図-1 の測定点に設置し、その上にガラス製漏斗をのせ、漏斗とコンクリートとの隙間から漏水しないよう治具で固定した(写真-1)。漏斗の先端には内径 7.6mm のメスピペットを垂直に固定し、接水面から水頭が  $400 \pm 5$ mm となるよう水を素早く注水し、注水開始から 10 秒後を測定開始点として以後の水頭の変化をメスピペットの目盛から読み取り、透水量として測定した。

### (3) 外圧試験

外圧試験方法は全国ボックスカルバート協会の方法<sup>6)</sup>に準拠した。図-2 のように試験体の頂版の引張側(内面側)の変位量を 2 か所、頂版の引張側とハンチの下側(両外面側)のコンクリートひずみをそれぞれ 5 か所測定した。ひび割れは目視観察し、荷重はひび割れ発生後、最大ひび割れ幅が 1.0mm を超えるまで継続し、ひび割れの進展状況を確認した。試験状況を写真-3 に示す。

### (4) 圧縮強度試験

外圧試験を実施した後、側壁部からコア供試体を採取した。コアは、打込み方向に 5 層に分けた部位からそれぞれ 3~4 本採取した。コア直径は、鉄筋間隔を考慮して 45mm とし、長さは直径の約 2 倍となるよう両端をカットして調整し、JIS A 1107 を参考にして圧縮強度試験を実施した。また、プラントで採取した管理用コンクリートは、 $\phi 100 \times L200$  のテストピースに詰め、外圧試験時に JIS A 1108 に準拠して圧縮強度試験を実施した。

### (5) 気泡面積率

製品外観に生じた表面気泡跡について、側壁中央部約 100cm 四方を測定範囲とし、画像で取り込み目視可能な  $1\text{mm}^2$  以上の気泡数を計測した。

## 3. 実験結果

### 3.1 フレッシュコンクリートの性状および成形状況

フレッシュコンクリートの試験結果を表-3 に示す。試験体 No.1 は普通コンクリートで作製し、No.2 および No.3 が重量コンクリート製である。重量コンクリートは目標スランプ 50cm よりもやや小さめとなった。この理由は、1 バッチ練り上がるまでに通常の 2 倍を超える 13~14 分の混練時間が必要であったため、コンクリー

表-3 フレッシュコンクリートの結果

試験体 No.	気温 (°C)	コンクリート温度 (°C)	スランプまたはスランプフロー (cm)	空気量 (%)
1	20.6	27.7	19.5	3.5
2	17.8	29.6	43.0	1.6
3	17.6	26.6	41.0	1.0

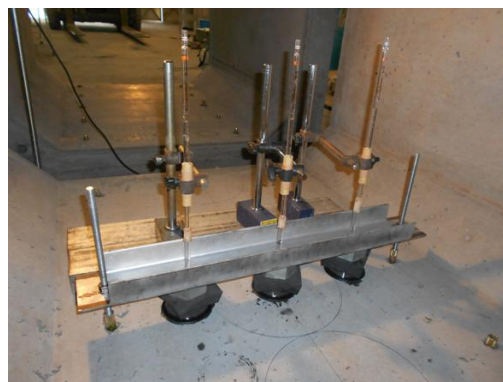


写真-1 表層透水試験状況 (内面側)

ト温度が上昇したこと、作業工程の都合でホッパに 2 バッチ連続で受けたため、1 バッチ目のホッパ下層側コンクリートが経時変化を受けたこと等の影響と考える。打込み開始からしばらくすると、安定した流動性を示すことを目視観察から確認し、均質性には特に問題はない。

脱型時の外観観察では試験体 No.1 と No.3 は、いずれも気泡跡はほとんどなく、測定面全体に対する気泡面積率は 0.1% 以下であった。一方 No.2 では気泡跡が若干見られ、写真-2 のように直径 5mm 大に集積した気泡跡が散見された。しかし、気泡面積率は 0.5~1.0% 程度であり、一般的なコンクリート製品に発生する気泡面積率<sup>7)</sup>よりも半減した。表面気泡は製品の美観上問題視されることがあるが、後述するように強度特性や遮水性にはまったく影響しなかった。

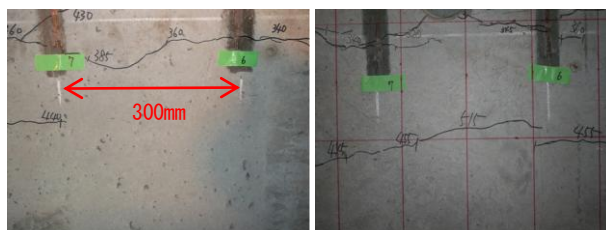


写真-2 外観の気泡跡 (左: No. 2, 右: No. 3)

### 3.2 コアの圧縮強度と見掛け密度

図-3、図-4 にコア採取位置と圧縮強度および見掛け密度の変化をそれぞれ示す。なお重量コンと普通コンとは強度水準が異なるため配合条件も相違する。図-3 はコアから得た圧縮強度の変動幅を、全平均値に対する百分率で示した。No.1 では最大 9.8% の変動が生じていたが、No.2 では 3.6%、No.3 では 4.3% が最大であった。今回実施した重量コンクリートでは、適正な振動締固めにより、圧縮強度の変動は 5% 未満と非常に小さくなった。他方、過剰に振動を与えた No.3 においても同様に 5% 未満となったことから、過振動条件が圧縮強度に及ぼす影響は小さかった。比較で実施した No.1 では、最

大 10%程度の変動を生じており、重量コンよりも変動幅が大きくなった。図-4はコアから得た見掛け密度の変化である。No.2では採取位置による変化はほとんどない。他方、No.3では型枠頂面近傍で顕著な見掛け密度の低下が見られた。コアの外観観察から、粗骨材の沈降分離が型枠頂面近傍部では顕著であった。また、No.1でも打込み面に近いほど直線的に見掛け密度は減少していた。これらの結果から、コアの圧縮強度と見掛け密度とは必ずしも一致した傾向は示さないことが分かった。このことは、圧縮強度の結果だけでは物性変化をとらえきれないことを示唆している。

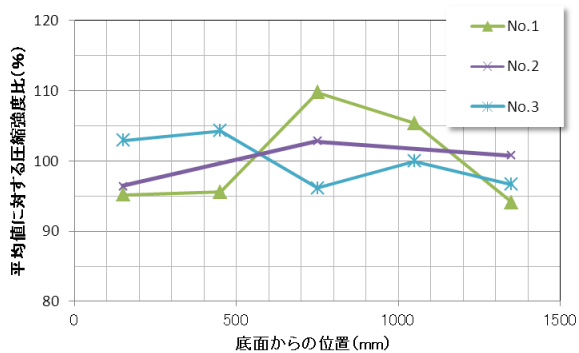


図-3 コア採取位置と圧縮強度

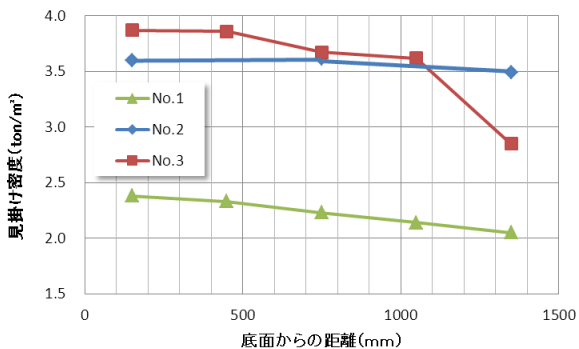


図-4 コア採取位置と見掛け密度

### 3.3 表面透水試験

測定データを処理し、Levittの提案式(1)で評価した。

$$p = a t^{-n} \quad (1)$$

ここで  $p$  : 表面透水速度 ( $\text{ml}/\text{m}^2/\text{sec}$ ) ,  $a$  : ごく初期の透水速度 ( $\text{ml}/\text{m}^2/\text{sec}$ ) ,  $n$  : 透水挙動の変化を表すパラメータである。

図-5に、初期透水速度の結果を底面からの高さ位置ごとに示した。初期透水速度はコンクリートのごく表層の品質を表すとの指摘<sup>8)</sup>がある。各点は、それぞれの高さ位置で測定した3個のデータを、製品の内面側と外面側でそれぞれ平均してプロットしたものである。本実験で初期とは1秒時と定義した。

図-5より、No.1と比較してNo.3の初期透水速度は

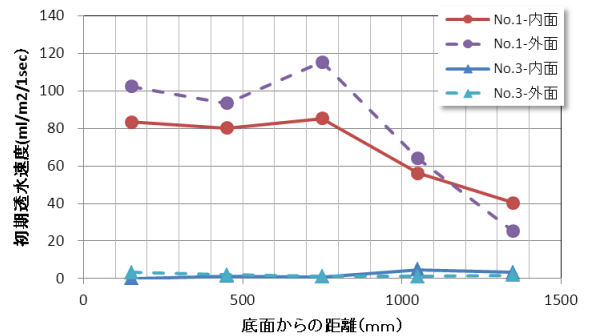


図-5 初期透水速度

きわめて小さいことが分かる。また No.3 は高さ位置の影響はほとんどなかった。一方、No.1 は高さ位置によって初期透水速度が大きく変化しており、一層目の底面から中心部までがやや大きく、二層目は打込み面側ほど小さくなった。No.2 は本試験では透水挙動が全く示されず遮水性能を示したため、位置ごとの性能評価はできなかった。

図-6に、注水から10分経過までの実測データを指数関数で近似して得られた10分経過時透水速度を算出して比較した。コンクリート表層部の物質透過性を評価する際にこの数値を比較することにより、およその傾向を推定することができる。Levittの提唱する品質評価基準によると、0.25 および 0.50  $\text{ml}/\text{m}^2/\text{sec}$  を閾値として Low, Average, および High の指標<sup>8)</sup> がそれぞれ示されている。図-6より、No.3はLevittの指標ではLowに属し、きわめて遮水性が高い範囲にある。比較で実施したNo.1は、Averageの範囲であり、既往の実験結果<sup>9)</sup>と比べると、水セメント比60%程度の透水挙動に相当することが分かった。高さ方向での挙動の傾向は、No.3では内面側ではほとんど変化がなかったものの、外面側では打込み面に近い最上層で急増した結果を示し、型枠頂面近傍の品質のばらつきが大きいことが示された。図-4に示したNo.3の見掛け密度が、表層部で急激に変化した挙動を示しており、表層透水性能との関連が示唆された。No.3の型枠頂面側では、過剰な振動締めにより重量骨材が分離して、骨材よりも透水性の高いペースト相の占有率が高まったことがこのような結果につながったものと考えられる。

1秒時の初期透水速度は、No.1のように水セメント比が高い汎用コンクリート配合において表層の品質の変化を検知する指標となり得ると考えられる。今回実施した重量コンクリート配合では水粉体比が28.2%と低く、また膨張材も添加して緻密な硬化体であったため、感度が低かった可能性がある。

No.2は、今回の実験において透水傾向を全く示さなかったことから、表層コンクリートがきわめて緻密で、

遮水性が高い硬化体であったとの評価ができる。他方、同じ配合の No.3 は、今回与えた過剰な振動締め固め条件により、表層コンクリートの遮水性能が若干損なわれることが明らかとなった。

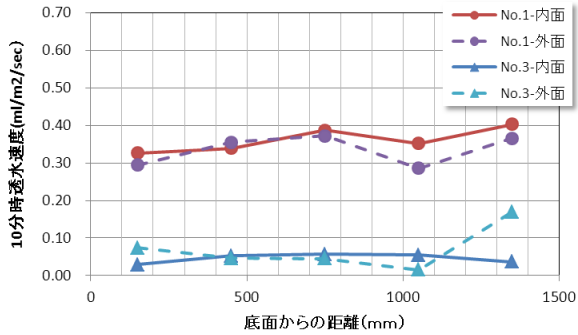


図-6 10分経過時の表面透水速度

### 3.4 ボックスカルバートの外圧試験

外圧試験の状況の一例を写真-3に示す。表-4に実施したそれぞれの試験体でのひび割れ発生荷重を示した。ひび割れ発生荷重は、ひび割れ幅が目で確認できる0.05mmの発生時とした。表中のひび割れ規格荷重は、今回設計したボックスカルバートの設計荷重作用時に、頂版中央にかかる設計モーメントから計算で求めた。今回製造した重量コンクリート No.2 および No.3 はいずれもひび割れ規格荷重を大きく超え、その発生荷重はほぼ同等であった。この結果から、今回与えた振動締め固めの影響はひび割れ発生荷重には認められなかった。



写真-3 外圧試験の状況

表-4 ひび割れ発生荷重

試験体 No.	ひび割れ規格荷重 (KN/m)	ひび割れ発生荷重 (KN/m)	発生荷重/規格荷重
1	64.7	74.4	1.15
2	64.7	146.1	2.26
3	64.7	145.5	2.25

次に上載荷重と頂版下面側コンクリートのひずみとの関係について、過振動を加えた試験体 (No.1, No.3) について、高さ位置の影響を図-7, 図-8にそれぞれ示す。両図より、試験体 No.1 では、ひび割れ発生までの荷重とひずみの挙動が、測定位置によって異なる傾向を示したが、No.3 では測定位置によらずほぼ同一の挙動を示していた。この傾向は、上側ハンチ部の荷重とひずみの挙動にも現れ、No.1 では測定位置でのばらつきが見られた。なお、試験体 No.2 は No.3 と同様に、測定位置でのばらつきはほとんど見られなかった。この原因は、ひずみ測定位置でのコンクリートの物性変化の影響がより顕著に示されたものと考えられる。No.1 では図-9に示すように、圧縮強度の位置による変動に加え、静弾性係数の変動も大きく、変動幅の最大は28.7%であった。

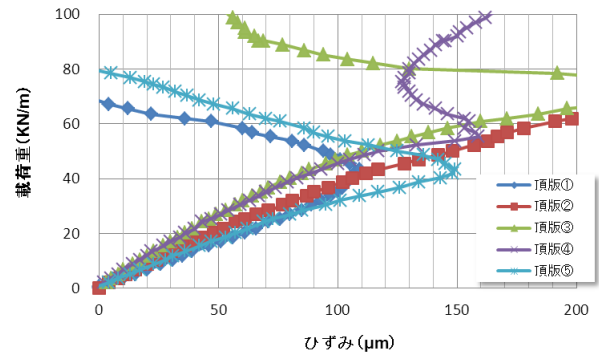


図-7 頂版下面側の荷重-ひずみ関係 (試験体 No. 1)

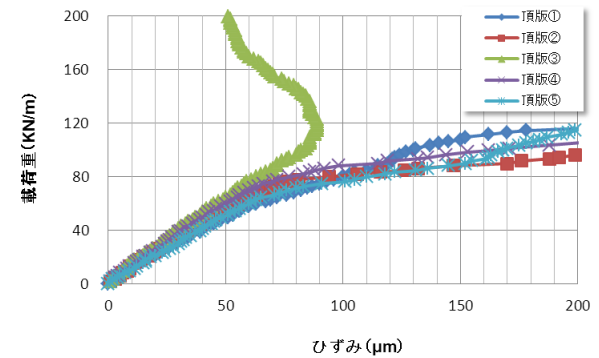


図-8 頂版下面側の荷重-ひずみ関係 (試験体 No. 3)

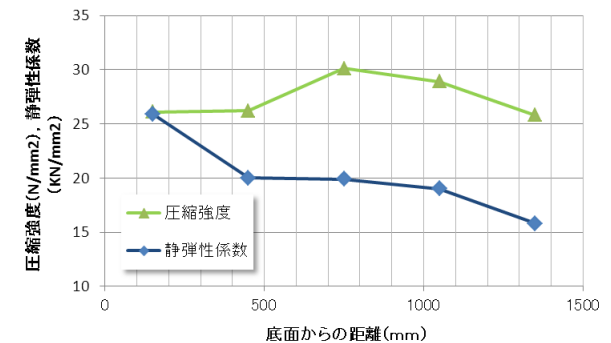


図-9 コアの圧縮強度と静弾性係数 (試験体 No. 1)

今回の過振動実験に伴って生じた試験体内の材料分離の影響は、圧縮強度が低い普通コンクリートでは力学的特性に若干現れた。一方、今回使用した重量コンクリートでは、過剰振動による力学的な挙動への影響は認められなかった。次に頂版の上載荷重と変位量の結果を図-10に示す。変位量はひび割れ発生前後の挙動をマクロに観察したものであり実用的に重要である。この結果では、高さ位置での差異がいずれの試験体にもほとんど認められず、今回与えた過剰振動の影響は小さいといえる。以上の結果から、ひび割れ発生までのひずみ挙動のばらつきは、No.1では多少生じたもののNo.2およびNo.3にはほとんど生じず、構造体のマクロな変位量への影響にはほとんど問題とならないことが示された。

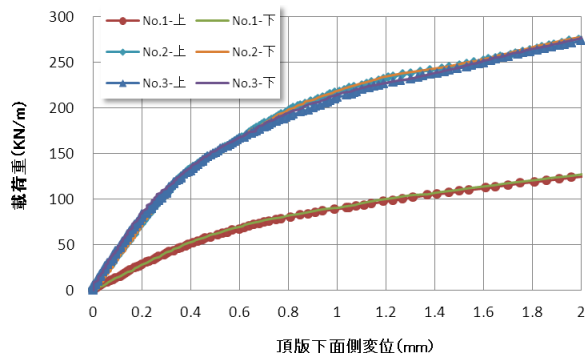


図-10 頂版下面側の荷重-変位 (試験体 No. 1~No. 3)

### 3.5 自己治癒機能

外圧試験により表面部に0.15~0.25mmのひび割れ幅が確認できた箇所からコアを試験体ごとに3体採取し、顕微鏡でひび割れ幅の測定点を固定して基長を取り、試験室で20℃の水に浸漬して自己治癒機能を比較した。今回用いた重量コンクリートNo.2及びNo.3では、自己治癒の機能が浸漬後5日後から確認された。

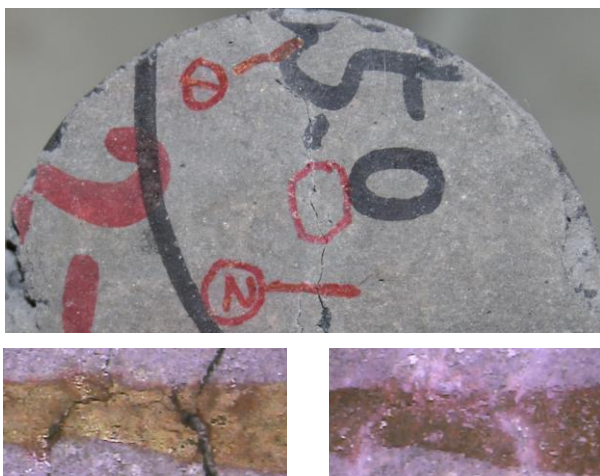


写真-4 上 (試験体 No. 3) : 水に浸漬7日後、  
下 (位置②の拡大) 左 : 浸漬開始時, 右 : 浸漬21日後

## 4. まとめ

密度が4.0g/cm<sup>3</sup>を超える重量骨材と膨張材とを用いて、乾燥単位容積質量が3.2t/m<sup>3</sup>以上となる中流動の重量コンクリートによりボックスカルバートを製造した。本実験の範囲で得られた主な成果を以下にまとめた。

- (1) 型枠振動機による締固め時間を、目視による適正な締固め時間よりも2~10倍長くしても構造体の力学的特性に与える影響は小さかった。
- (2) コンクリートの表面遮水性能は、振動締固め時間が適正であればきわめて高いが、過剰振動により材料分離が顕著であった型枠頂面近傍部では若干低下した。
- (3) ひび割れ幅が0.2mm程度の微細な場合、水分の供給により自己治癒によるひび割れ閉塞機能を確認した。

## 参考文献

- 1) 坂本浩幸, 肥後康秀 : コンクリートによる放射線の遮蔽とコンクリート製容器の開発, 太平洋セメント研究報告, 第163号, pp.59-65, 2012
- 2) 橘高義典, 横室隆, 小川洋二, 井川秀樹 : X線透過デジタル画像によるコンクリートのX線遮蔽性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1507-1512, 2013
- 3) 下村哲雄, 細田暁, 岸利治 : 低水粉体比コンクリートのひび割れ自己治癒性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.661-666, 2001
- 4) 李春鶴, 田中佳宏, 横塚清規 : 膨張モルタルの細孔構造および酸素拡散係数に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.111-117, 2011
- 5) 林和彦, 細田暁, Usman AKMAL, 藤原麻希子 : コンクリートの表面吸水試験における計測方法およびデータ処理方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1804-1809, 2012
- 6) プレキャストボックスカルバート設計・施工マニュアル, 全国ボックスカルバート協会編, 2001
- 7) 一宮一夫, 出光隆, 山崎竹博, 渡辺明 : 粉体系および増粘剤系高流動コンクリートの表面気泡性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.541-546, 1999
- 8) 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研究小委員会 第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ97, pp.152-162, 土木学会, 2012.7
- 9) 小川洋二, 横室隆, 橘高義典, 井川秀樹 : 常圧蒸気養生で硬化を促進した重量コンクリートの遮水性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1495-1500, 2013