

報告 海水・海砂を用いた自己充填型コンクリートの水中コンクリートへの適用性に関する検討

酒井 貴洋*1・澤田 巧*2・山路 徹*3・清宮 理*4

要旨：著者らは、海水や未洗浄の海砂を使用した自己充填型コンクリートを開発し、これまでにフレッシュコンクリートや硬化コンクリートの基礎特性、さらには乾燥収縮特性および熱特性について報告した。本研究では、このコンクリートの水中コンクリートへの適用性について実験的検討を行った。その結果、L型試験器を用いた水中流動実験では、鉄筋障害の有無に拘わらず良好な流動性を示した。この試験体から採取したコアの圧縮強度は、通常のコンクリートと比較してばらつきが小さい傾向であった。試験体側面での超音波速度計測では、通常のコンクリートと比較して分布傾向に違いがあることが明らかとなった。

キーワード：海水、海砂、自己充填型コンクリート、水中流動実験、粗骨材面積率、超音波速度

1. はじめに

国内外の離島や沿岸部での港湾工事においては、過酷な施工環境であったり、陸上および海上のアクセスが悪い地域も多く、上水道水や骨材などの材料調達や、建設労働者の確保が困難な場合がある。また、先の東日本大震災のように陸・海路などの輸送手段が大きな被害を受けた沿岸地域においては、緊急復旧工事に要する材料の調達や作業員の確保が大きな課題となる。このような条件下でコンクリートを製造・施工する場合、できるかぎり施工場所の近傍で調達可能な海水や未洗浄の海砂などの材料を使用すること、コンクリートの構成材料の種類を最小限に抑え容易に製造できること、また、自己充填性の高いコンクリートを使用し、締固め作業等のコンクリート打込みに関する省力化を図ることで、施工速度を向上することなどが求められる。海水練りコンクリートについては、従来から多くの研究がなされている^{1)~5)}。しかしながら、自己充填性を有する海水練りコンクリートについて検討された事例はほとんどみられない。これは、練混ぜ水に海水を使用する場合、海水中に含まれる無機イオン（主に塩化物イオン）が混和剤の分散性に影響を及ぼすことで⁶⁾、コンクリートに優れた流動性を付与することが困難であるなどの課題があったことも一因

として挙げられる。

そこで著者らは、海水や海砂を用いた場合でも分散性に及ぼす影響の小さい新規混和剤、およびそれを用いた従来の高流動コンクリートに比べて低粘性である自己充填型コンクリートを開発し、これまでフレッシュコンクリートや硬化コンクリートの基礎特性、さらには乾燥収縮特性や熱特性についての検討を行ってきた^{7),8)}。特に港湾工事では水中部へのコンクリート施工が多いため、自己充填性を有する海水練りコンクリートを水中に適用できれば、水中施工の効率化が期待できる。本稿では、このコンクリートの水中コンクリートへの適用性に関する数種の実験的検討から得られた知見を述べる。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの配合および使用材料

コンクリートの配合を表-1に示す。配合は練混ぜ水に海水、細骨材に未洗浄の海砂を使用した配合(SW-SS)と、比較用である普通コンクリート(30-18-20BB：レディーミクストコンクリート)の2水準とし、20℃の環境条件下で実験を行った。海水・海砂を使用した配合(SW-SS)の水セメント比は45%で、目標スランプフローは60±5cmである。なお、SW-SSの単位水量が普通コンクリート

表-1 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Ad		助剤		SLor SF (cm)	Air (%)	温度 (°C)
			W	C	S	G	種類	使用量 (C×%)	種類	使用量 (C×%)			
30-18-20BB	45.6	47.3	172	378	811	902	AE減水剤	1.10	—	—	19.0	3.4	26.5
SW-SS	45.0	48.4	185	411	804	872	新規混和剤	1.00	MA303A	0.0025	55.5	4.5	23.0

※表中の値は代表値

*1 五洋建設(株) 技術研究所 係長 工修 (正会員)

*2 五洋建設(株) 中国支店 工事主任 (正会員)

*3 (独) 港湾空港技術研究所 構造研究領域長 博(工) (正会員)

*4 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 教授 工博 (正会員)

(30-18-20BB) に比べて多くなっているが、これは、本研究で使用した海砂が未洗浄のものであるためコンクリート中の塩化物イオン量が多くなったことや、粗粒率が陸砂に比べ小さいこと、また海水の比重が1.022と上水よりも大きいこと等が要因である。

コンクリートの使用材料を表-2に示す。練混ぜ水に用いた海水は相模湾で採水したものであり、海中には質量比で2.20%の塩化物イオンを含有していた。なお、海水の成分は表-3に示すとおりである。また、海砂は未洗浄のものを使用し、塩化物イオン量は質量比で0.187%であった。混和剤は、前章で述べた新規混和剤(増粘剤一液型高性能AE減水剤)を使用した。

2.2 実験項目および方法

コンクリートの実験項目を表-4に示す。実験は水中での流動性・充填性を確認する水中流動実験と水中流動後のコンクリートの品質確認実験の2種に大別される。品質確認実験では、評価項目として硬化後の試験体から採取したコアによる粗骨材面積率および圧縮強度、さらにコア採取後の試験体両側面における超音波速度計測を設定した。実験ケースを表-5に示す。海水・海砂を使用したコンクリートは鉄筋障害有りとなしとの2ケース、また比較用としての30-18-20BB(レディーミクストコンクリート)は鉄筋障害無しのみである。鉄筋障害は一般的な港湾構造物における配筋を想定し、D19@150mmとした。

水中流動実験に用いたL型試験器を図-1に示す。L型試験器はコンクリート投入口および開閉ゲートを有した流動距離1000mm、高さ300mm、幅400mmの亚克力製容器であり、コンクリート投入口(600×180×400mm)には約45ℓのコンクリートが投入可能である。高さ160mmの開閉ゲートを開くことにより、投入口に溜められたコンクリートが自重によって水で満たされたこの試験器内を流動する構造としている。

水中流動実験ではこの投入口の天端までコンクリートを打ち上げておき、開閉ゲートを開いてコンクリートを自然流動させた後、コンクリート投入口に残留したコンクリート内部に挿入したトレミー管内にコンクリートを打ち込み、コンクリートの一部がL型試験器流下部の天端高さ(300mm)に到達するまで継続して行った。

L型試験器への打込み完了後、打ち込んだコンクリートを試験器内で硬化させた。試験器上面のコンクリートが露出する部分は、乾燥を防ぐために養生マットで湿潤養生を行っている。打込みから2週間後に鉛直方向および水平方向において小径コア(φ40mm)を採取した。鉛直方向は鉄筋障害無しの場合はゲートから200・500・800mmの3箇所において2本ずつ(A側・B側)を採取し、鉄筋障害有りの場合は鉄筋障害通過前の位置を追加して、

表-2 使用材料

材料名	記号	種類	物理的・化学的性質
練混ぜ水	W	上水道水	
		海水(相模湾、茅ヶ崎海岸)	表-3参照
セメント	C	高炉セメントB種	密度 3.04g/cm ³
細骨材	S	陸砂(大井川水系)	表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 2.42% 粗粒率 2.66
		海砂(東村新川沖産, 除塩前)	表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 2.42% 粗粒率 2.26, 塩化物イオン量 0.187%
粗骨材	G	硬質砂岩砕石(青海産)	表乾密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 0.58% 最大寸法 20mm
混和剤	Ad	塩分含有増粘剤一液型高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物の複合体
		AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
		AE剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

表-3 海水の成分

密度 [20°C] (g/cm ³)	pH [17°C]	蒸発残留物 (%)			
1.022	7.7	3.6			
各種イオンの含有量 (%)					
Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺
2.20	0.27	1.00	0.04	0.04	0.12

表-4 実験項目一覧

試験項目	実験方法	実験条件等
水中流動実験	L型試験器流動実験	L型試験器寸法: 1000×300×400mm 自然流動停止後はトレミー工法にて打込みを継続
品質確認実験	粗骨材面積率(コア)	採取コア(φ40mm)側面から粗骨材をトレースその後画像解析にて面積率算出
	圧縮強度(コア)	採取コア(φ40mm)鉛直方向および水平方向
	超音波速度計測	超音波測定器 L型試験体コア採取後に実施 50mmピッチで計測

表-5 実験ケース一覧

ケース	種類	SL or SF(目標値)	鉄筋障害
1	30-18-20BB	18cm	無し
2	SW-SS	60cm	無し
3			D19@150mm

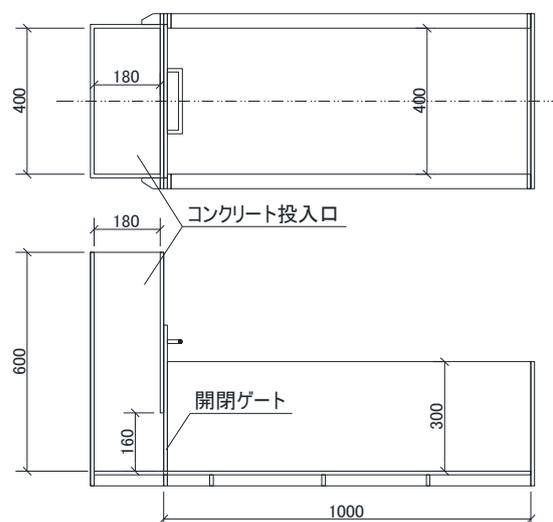


図-1 L型試験器(上:平面図, 下:側面図)

50・200・500・800mmの4箇所を2本ずつ（A側・B側）を採取した。また水平方向は底面から75mmの高さにおいて、2本（A側・B側）を採取した（図-2参照）。その後、100mm長ごとに粗骨材（5mm以上）をトレースし、画像分析により粗骨材面積率を算出した。粗骨材トレース後、コアを切断・端面整形し、圧縮強度試験を実施した。

またコア採取後の試験体の両側面間を伝播する超音波速度を測定することで均一性の評価を試みた。測定は脱型後の試験体側面に50mmピッチで格子をマーキングし、その各々の格子点において実施した。

3. 実験結果

3.1 水中流動性

写真-1 に各ケースの水中流動性状（自然流動）を示す。ゲート開放時、自重により一気にコンクリートが流下して水の濁りが少なからず発生したが、これはL型試験器独自の構造によるものである。

ケース1の30-18-20BB（鉄筋障害無し）は、ゲート開放と同時にコンクリートが自然流動を始めたが、ゲートから550mm程度の位置において流動が停止し、以後流動が再開することはなかった。コンクリート表面付近の水の濁りも他と比較してやや大きい傾向であった。ケース2のSW-SS（鉄筋障害無し）では、自然流動においても平坦性を保ちながらL型試験器の遠端まで到達した。ケース1と比較して水中での流動性が高いことがこの実験より明らかとなった。ケース3のSW-SS（鉄筋障害有り）では、コンクリート表面が鉄筋障害により乱され、鉄筋障害無しのものと比較すると水の濁りはやや大きい。ゲート開放後、コンクリートは鉄筋障害と底面との隙間（65mm程度）を通過して試験体の遠端まで到達した。流動が進むにつれてゲート付近において鉄筋障害を乗り越えながら通過する部分も認められたことから、鉄筋障害を有する場合においても水中における流動性が良好であることが確認された。自然流動後、コンクリート投入口よりトレミー工法にて継続的に打込みを行った。自然流動では流動性が低かったケース1においても、L型試験器の遠端までコンクリートが到達し、L型試験器下部から上部に向かって良好な充填が認められた。同様にケース2およびケース3においてもL型試験器内でコンクリートが下部から上部に向かって充填される様子が観察された。このことから、無筋または比較的鉄筋量が少ない構造物を構築する際には通常のコンクリートをトレミー工法で打ち込む方法で問題ないと考えられるが、複雑な形状の場合やコンクリートに高い充填性能が求められる構造物に対しては、本研究で用いたSW-SSのような自己充填性能を有するコンクリートを用いることで、より充填性能を高めることが望ましいと考えられる。

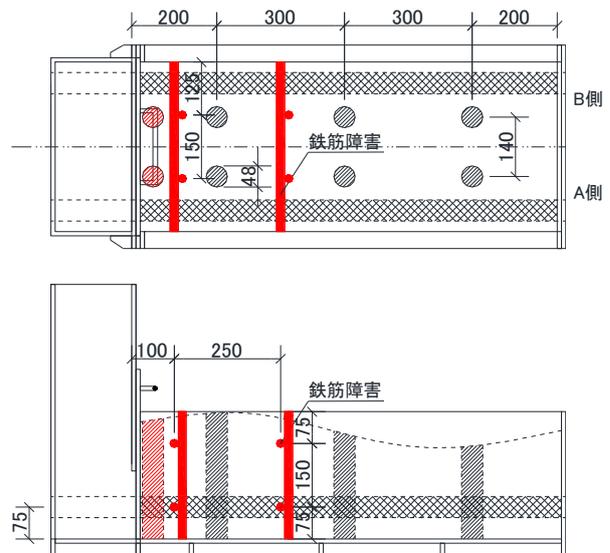
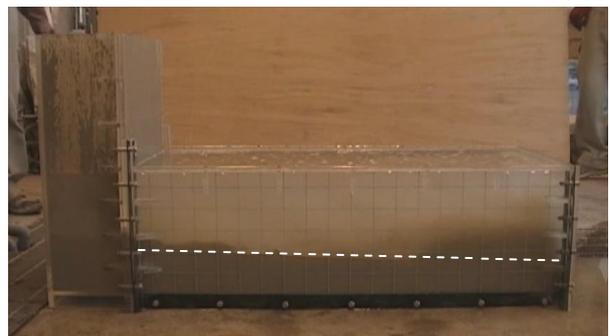


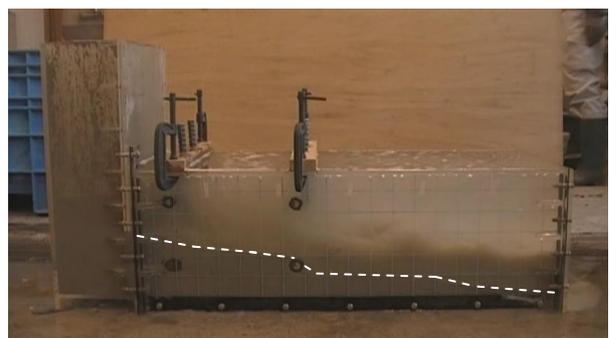
図-2 コア採取位置（ハッチング部）
（上：平面図，下：側面図 ※赤は鉄筋障害有りの場合）



ケース1 30-18-20BB（障害無し）



ケース2 SW-SS（障害無し）



ケース3 SW-SS（障害有り）

写真-1 各ケースの水中流動性状（自然流動）

3.2 粗骨材分布

小径コア側面による粗骨材トレース例を図-3に示す。鉛直方向では採取コアから上部・中部・下部の3つの概ね100mmの範囲に分割し、粗骨材（5mm以上）の分布率を画像分析により算出した。各部位（上部・中部・下部）で対象とした粗骨材は、図-3において緑色で着色した部位である（灰色・黒色は対象外の粗骨材）。水平方向については、1000mmの区間において12本のコアに分割し、鉛直方向と同様に100mm長ごとに粗骨材分布率を算出した。図-4に各ケースにおける鉛直方向および水平方向の粗骨材面積率を示す。グラフ内の凡例はA200の場合、A側（図-2参照）でゲートより200mmの位置を示す。

ケース1では粗骨材面積率は概ね30～40%の範囲にあり、鉛直方向およびゲートからの距離による粗骨材面積率の減少は認められなかった。一方、ケース2ではケース1に比べて多少ばらつきが大きくなり、粗骨材面積率は20～40%の範囲であった。鉛直方向では上部のばらつきが最も小さく粗骨材面積率は30%程度に留まるが、中部・下部では20～40%程度までばらつきが拡大する傾向が見受けられた。またケース3は上部において粗骨材面積率が20～40%でばらつきが最も大きく、中部・下部の順にそ

のばらつきが徐々に減少していく傾向であった。いずれのケースにおいてもゲートからの距離による明確な傾向は認められなかった。一方、水平方向についてはケース1では粗骨材面積率は25～40%程度の範囲に分布しており、ゲートから600mm程度の位置で30%程度となつてから、ばらつきは小さくなった。ケース2では粗骨材面積率は30～40%程度で、ケース1より若干ばらつきは小さくなった。また粗骨材面積率はゲートからの距離によらず概ね一般的な値であった。ケース3はケース2とほぼ同様の傾向であるが、面積率の小さな箇所が局部的に認められ、鉄筋障害の影響が現れたものと推察される。

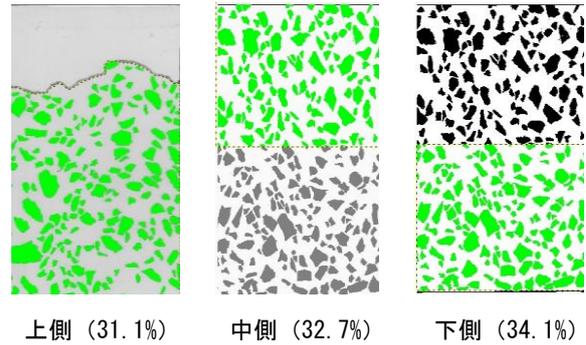


図-3 粗骨材トレースの例（緑着色部位が対象）
（ケース1：ゲートより200mmの位置）

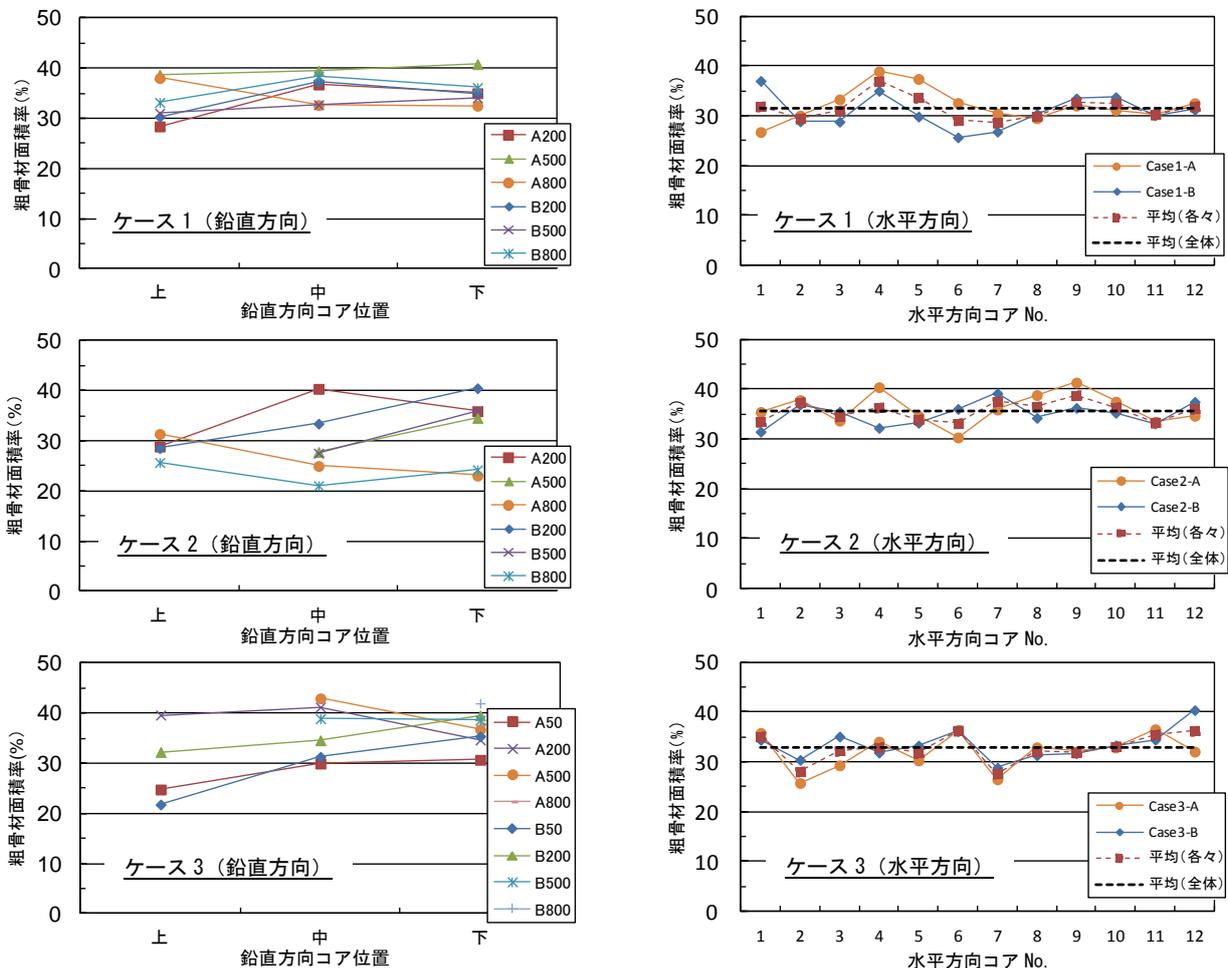


図-4 粗骨材面積率（コア側面）

3.3 採取コア圧縮強度

採取コア側面による粗骨材トレース後、圧縮強度試験を実施した。打ち込んだコンクリートの高さが一様ではないため、圧縮強度試験用のコア高さが直径の2倍に満たない試験体もあったが、これらについてはJIS A 1107に基づき強度補正を行っている。図-5に採取コアの圧縮強度分布を示す。参考のためグラフ内にはコンクリートの28日強度 (σ_{28} : 標準養生) の値も一点鎖線で示した。

ケース1の鉛直方向では、上部・中部・下部の順にばらつきが小さくなる傾向が見られた。この原因として、普通コンクリートの場合、新規混和剤使用の場合と比較して粘性が小さく、上部・中部の部位にあるコンクリートが自然流動時に水に接触することで、比較的強度の低い部位ができたと考えられる。下部のコンクリートは自然流動後のトレミー工法での打込みによるコンクリートであるため、上部・中部と比較して水との接触が小さかったことで、ばらつきが小さくなったと推察される。水平方向ではばらつきは他のケースと比較して小さい。ケース2は、鉛直方向ではケース1と比較して圧縮強度の全

体的なばらつきが小さい傾向であった。これは新規混和剤によって付与された粘性のために、流下時にコンクリート表面が水によって乱される程度が小さくなることで、強度の低い部分が生成されにくかったと推察される。また流下時の水の濁りも小さかったことがこのことを示唆しているものと考えられる。最も強度のばらつきが小さいのは中部であるが、これは高い流動性のために、トレミー工法で打ち込んだ際に前に打ち込んだコンクリートの上に乗上げる形で充填される部位があったことも強度分布に影響しているものと思われる。水平方向ではケース1よりもばらつきが大きく、4本目(300mm程度)・7本目(550mm程度)・9本目(700mm程度)の位置で局所的に強度が小さかった。ケース3では、ゲートからの距離が大きくなるほど圧縮強度は低下する傾向であった。この原因として、コンクリートが水に乱されながら鉄筋障害を通過したことや水と接触した部分がL型試験器の遠端に向かって徐々に集約されたこと、またケース3は他のケースと比較して水面からの距離が大きく水の影響を受けやすかったこと等が挙げられる。ただし、この傾向はB側

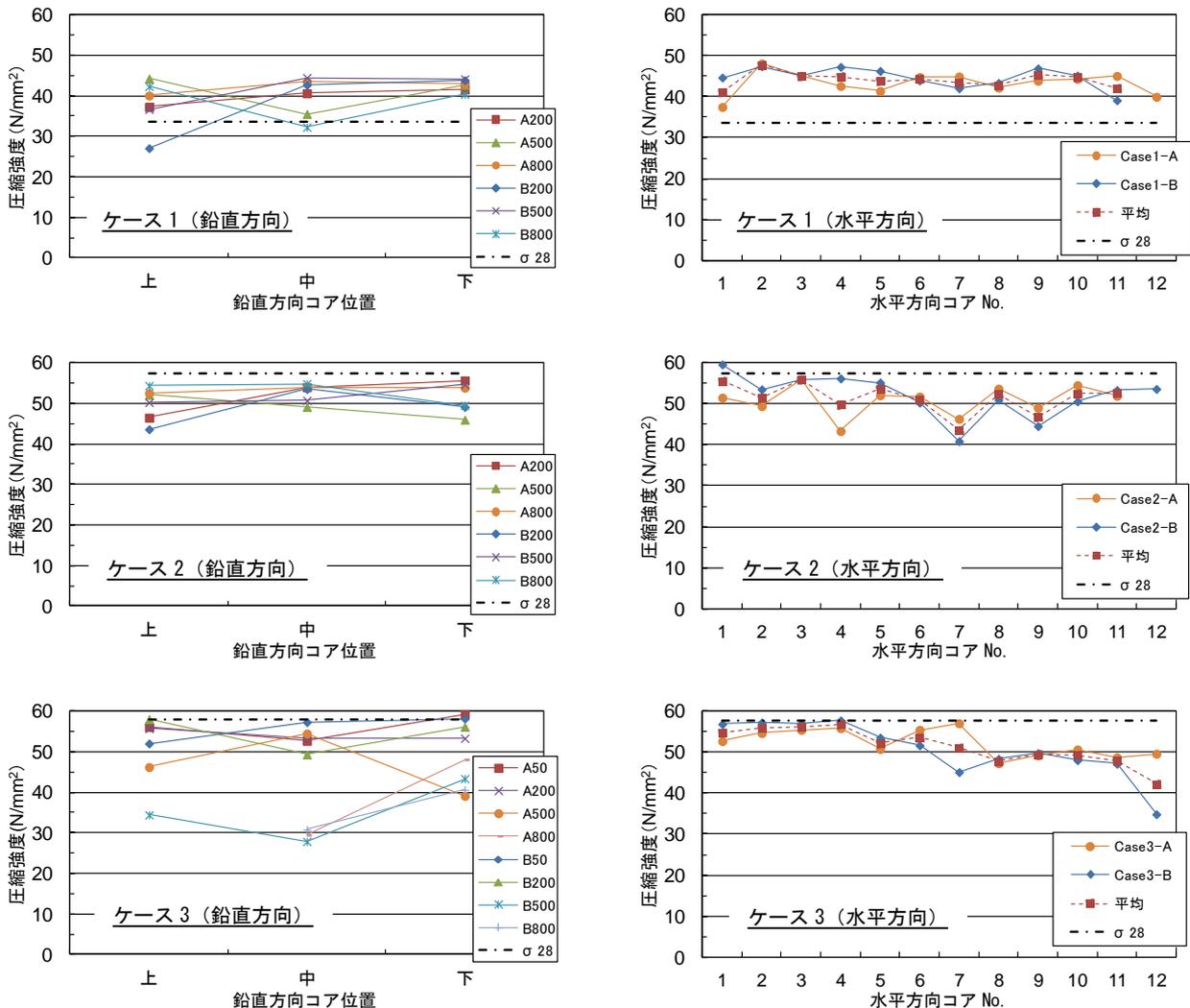
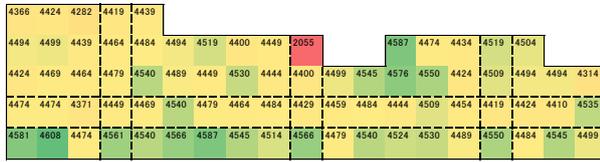


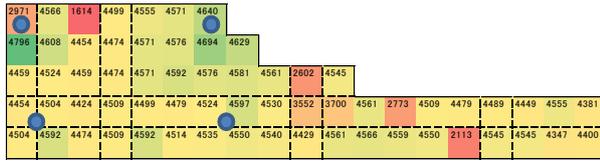
図-5 採取コア圧縮強度分布



ケース 1 (30-18-20BB 鉄筋障害無し)



ケース 2 (SW-SS 鉄筋障害無し)



ケース 3 (SW-SS 鉄筋障害有り)

図-6 試験体 超音波速度分布

で顕著であることから、鉄筋障害と粗骨材との位置関係や、鉄筋障害を通過する際のコンクリートの流動性が試験体の左右 (A側・B側) で異なり一様でなかったと推察されるが、その原因は定かではない。

3.4 超音波速度分布

コア採取後の試験体の側面において超音波速度を測定した。図-6 に超音波速度分布を示す。なお測定は、コア採取後の孔を有する試験体で行ったため、この孔の大凡の位置を図中の点線で示した。また図に配した色は超音波速度の値に応じたものではなく、図内において相対的に値が大きいものを濃い緑、値が小さいものを赤で示しており、濃緑→緑→黄→赤の順に数段階で超音波速度が小さくなる着色としている。

ケース 1 では超音波速度の高い部位が左側 (コンクリート投入口) 付近および中部・下部に局部的に認められ、前述の圧縮強度試験の結果と同様の傾向となった。相対的に速度が小さい赤の部位が認められたが、これはコア採取孔の存在や端部の脆弱層の影響によるものと考えられる。ケース 2 ではケース 1 と異なり、超音波速度の大きい部位は試験体下方に広く分布する傾向であった。ケース 3 は他の 2 ケースと異なり、超音波速度の高い部位は鉄筋障害前後の主に上部に分布した。

4. まとめ

海水・海砂や未洗浄の海砂を使用した自己充填型コンクリートの水中コンクリートへの適用性について実験的検討を行った。得られた知見は以下のとおりである。

(1) 海水・海砂を用いた自己充填型コンクリートは通常のコンクリートと比較して水中流動性に優れており、

特に、複雑な形状や確実な充填性が求められる水中構造物構築の際に有利となる。

- (2) 水中流動後の試験体より採取した鉛直方向コア側面の粗骨材面積率のばらつきは、通常のコンクリートと比較して大きい傾向であったが、水平方向については通常のコンクリートとほぼ同様であった。
- (3) 鉛直方向コアの圧縮強度は通常のコンクリートと比較してばらつきは小さいが、鉄筋等障害を有する場合には局部的に強度が低くなる傾向にある。
- (4) コア採取後の試験体両側面の超音波速度測定では、通常のコンクリートと比較して超音波速度の分布傾向に違いが認められた。

なお、本研究は、早稲田大学清宮研究室、(独) 港湾空港技術研究所、五洋建設 (株)、東亜建設工業 (株)、東洋建設 (株) および BASF ジャパン (株) により、共同で実施したものである。

参考文献

- 1) 榎場重正, 川村満紀, 山田祐定, 高桑二郎: 練り混ぜ水に海水を使用したコンクリートの諸性質について, 材料, Vol.24, No.260, pp.425-431, 1975.5
- 2) 関 博, 大即信明, 堀井義一: 海水練りコンクリートならびに残留ひび割れが鉄筋の腐食におよぼす影響について (5 年結果報告), 港湾技研資料, No.237, 1976.6
- 3) 森 好生, 大即信明, 下沢 治: 海水練りコンクリートの耐海水性試験, 港湾技研資料, No.378, 1981.6
- 4) 福手 勤, 山本邦夫, 濱田秀則: 海水を練り混ぜ水とした海洋コンクリートの耐久性に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol.29, No.3, pp.57-94, 1990.9
- 5) 山路 徹, 審良善和, 小林浩之, 濱田秀則: 海洋環境下における高炉およびフライアッシュセメントを用いたコンクリートの長期強度特性, 混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム論文集, pp.133-138, 2011.12
- 6) 鈴木哲郎, 清宮 理, 山路 徹, 竹中 寛, 酒井貴洋, 田中亮一: 海水・海砂を用いた自己充填コンクリート用高性能 AE 減水剤 (増粘剤一液タイプ) の開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.67, No.5, pp.1181-1182, 2012.9
- 7) 竹中 寛, 内藤英晴, 羽淵貴士, 清宮 理: 海水および海砂を用いた自己充填型コンクリートの基礎特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1912-1917, 2012.6
- 8) 竹中 寛, 酒井貴洋, 山路 徹, 清宮 理: 海水および海砂を用いた自己充填型コンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1501-1506, 2013.6