

論文 高強度高流動コンクリートの打足し部における塩化物イオン浸透性と鉄筋腐食に関する研究

山本 祐基*¹・毛見 虎雄*²・藤井 和俊*³・宇仁菅 康行*⁴

要旨: 本研究は、各種高強度高流動コンクリートを用いて、打足し部を想定した供試体を作成し、塩水の浸漬乾燥繰返し試験を60サイクル行い、打足し時間間隔および打足し方法が打足し部の塩化物イオン浸透性と鉄筋腐食に及ぼす影響について検討を行った。

打足し部の塩化物イオン浸透深さは、打足し時間間隔が長くなるに従い大きくなり、突き無しの場合、種類によっては90分以降に増大するものも見られた。突き有りの場合は、打足し時間間隔90分まで打足し部以外の部分と同様に10mm以下と小さく、打足し時間間隔が長くなる場合は、突き固めを行うなどの配慮が必要であると考えられる。

キーワード: 高強度高流動コンクリート、打足し、塩化物イオン浸透性、鉄筋腐食

1. はじめに

海洋建築物、特にコンクリート浮体構造物では立地条件の過酷化に対応して、高強度高流動コンクリートなどの利用が検討されるようになってきた¹⁾。また、コンクリートの種類・品質、使用環境条件および施工条件などにより異なると考えられる、塩化物イオン浸透性や鉄筋腐食性状を把握することは、海洋環境下におけるコンクリート構造物の耐久性を評価するために重要である。これらについては過去に多くの研究²⁾がなされてきた。しかし、打込み欠陥であるコールドジョイント等が生じる可能性のある、打込み継続中における打継ぎ部（以下、打足し部とする）の塩化物イオン浸透性や鉄筋腐食に及ぼす影響についての報告³⁾は数少ないのが現状である。

そこで本研究では、各種の高強度高流動コンクリートを用いて打足し部を想定した供試体を作成し、塩水の浸漬乾燥繰返し試験を60サイクル行い、打足し時間間隔および打足し方法が打足し部の塩化物イオン浸透性と鉄筋腐食に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 要因と水準

表-1に実験の要因と水準を示す。コンクリートの種類は7水準で、高強度高流動コンクリートでシリカフェームセメント（シリカフェームをセメント重量の10%混合したもの）を用いたものをA、高ビーライト系セメント（C₂S量：50%）を用いたものをB、3成分系セメントと天然多糖類系分離低減剤を併用したものをC、人工軽量骨材を用いた高強度高流動コンクリートでシリカフェームセメントを用いたものをAL、高ビーライト系セメントを用いたものをBL、比較用としてW/C=30%の高強度コンクリートをD、W/C=60%の普通コンクリートをEとした。また、打足し時環境温度は20℃とした。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
コンクリートの種類	A, B, C, AL, BL, D, E
打足し時間間隔(分)	0, 30, 60, 90, 120
打足し方法	突き棒による突き有り, 無し

*1 三菱建設(株) 技術本部 技術研究所 研究員(正会員)

*2 足利工業大学教授 工学部 建築学科 工博(正会員)

*3 三菱建設(株) 技術本部 技術研究所 副所長 博士(工学)(正会員)

*4 三菱建設(株) 技術本部 技術研究所 主任研究員(正会員)

2.2 使用材料およびコンクリートの計画調査

表-2に使用材料とその物性および適用したコンクリートを、表-3にコンクリートの計画調査を示す。コンクリートA, B, C, ALおよびBLは、目標とするスランプフローを 65 ± 5 cmとし、空気量はA, ALについては $2.0 \pm 0.5\%$, B, Cは $4.5 \pm 1.5\%$ とした。また、比較用のDはスランプ 21 ± 2.5 cm, Eはスランプ 18 ± 2.5 cm, 空気量はそれぞれ $4.5 \pm 1.5\%$ を目標とした。

2.3 供試体形状および作成方法

図-1に供試体形状を示す。供試体には、かぶり20mmの位置に直径13mmのみがき棒鋼を対角線上に2本配置した。鉄筋の上部には自然電位を測定する時に用いる導線を接続し、その周囲と鉄筋下部からの塩化物イオン浸透を防止するために、エポキシ樹脂を塗布してシールした。

コンクリートは下層部を打設し、各打足し時間間隔において上層部を打設した。突き有りは上層を打設中に突き棒により打足し面から5cm下層まで5回突いた。

なお、上下層のコンクリートの性状は表-4に示すように、計画した範囲内で行った。

2.4 測定項目および方法

供試体は、脱型後材齢7日まで湿封養生した後、材齢28日まで 20°C , 60% R.H.の恒温恒湿内で気中養生し、供試体の側面2面と上下面をエポキシ樹脂でシールした。その後、M社製塩水浸漬噴霧乾燥試験器を使用して、3% NaCl溶液に浸漬、乾燥を繰り返す塩水の浸漬乾燥繰り返し試験を図-2に示すサイクルで60サイクルまで行った。なお、塩水の浸漬乾燥繰返

表-2 使用材料とその物性および適用コンクリート

使用材料	種類および物性	適用コンクリート
セメント	シリカフェウムセメント (比重:3.01, 比表面積:6000 cm^2/g)	A, AL
	高ビーライト系セメント (比重:3.22, 比表面積:3110 cm^2/g)	B, BL
	普通ポルトランドセメント (比重:3.16, 比表面積:3260 cm^2/g)	C, D, E
混和材	高炉スラグ微粉末(比重:2.91, 比表面積:4290 cm^2/g) フライアッシュ(比重:2.32, 比表面積:4020 cm^2/g)	C
細骨材	木更津産山砂(比重:2.60, 吸水率:2.06%)	全て
粗骨材	八王子産硬質砂岩砕石(比重:2.66, 吸水率:0.70%)	A, B, C, D, E
	膨張頁岩系人工軽量粗骨材(比重:1.44, 吸水率:14.1%)	AL, BL
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤	A, B, C, AL, BL, D
	AE減水剤	E
分離低減剤	天然多糖類	C

表-3 コンクリートの計画調査

コンクリートの種類	W/B ^{*1} (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤 (B×%)	
			セメント	高炉スラグ	フライアッシュ	水	細骨材		粗骨材
A	22.0	44.2	705	—	—	155	685	885	2.0
B	30.0	51.0	550	—	—	165	847	836	1.3
C ^{*2}	33.0	49.0	200	200	100	165	796	847	1.1
AL	22.0	44.2	705	—	—	155	660	485	1.7
BL	30.0	45.6	550	—	—	165	733	485	0.8
D	30.0	42.5	550	—	—	165	681	942	1.1
E	60.0	46.0	292	—	—	175	822	990	0.3

注:*1 Bは単位結合材量を示す。

*2 Cは分離低減剤を $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ 使用した。

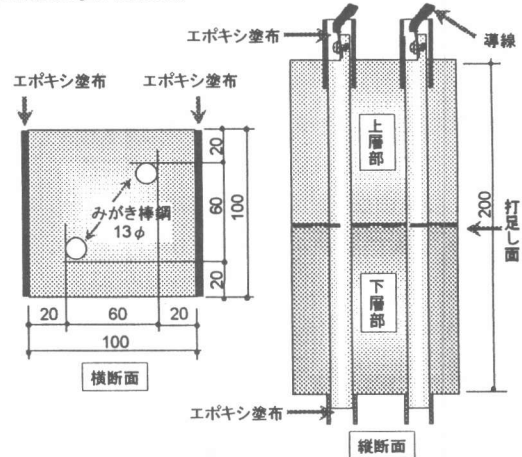


図-1 供試体形状(単位:mm)

表-4 コンクリートの基礎性状

コンクリート種類	下層コンクリート		上層コンクリート		材齢28日における	
	スランプフロー [*] (cm)	空気量 (%)	スランプフロー [*] (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	標準養生 封緘養生
A	65.5	2.4	63.5	2.0	101.0	98.0
B	68.5	4.0	67.0	4.8	55.7	55.5
C	68.5	4.3	69.0	4.4	46.6	41.1
AL	67.0	1.5	66.5	1.7	61.5	61.3
BL	61.5	4.6	65.5	4.8	44.5	42.3
D	22.5	4.3	22.5	3.8	65.2	65.0
E	19.0	3.0	19.5	4.3	27.1	26.4

注 *コンクリートD, Eはスランプ

し試験開始時における圧縮強度を表-4に示した。

(1) 自然電位

図-3に自然電位の測定位置および方法を示す。ASTM C 876 に準じて飽和硫酸銅電極を照合電極として、鉄筋の自然電位を測定した。

(2) 塩化物イオン浸透性

図-4に塩化物イオン浸透深さ測定位置および塩化物イオン含有量試料採取位置を示す。

塩化物イオン浸透深さは、塩水の浸漬乾燥繰返し試験を60サイクル終了後、供試体を鉄筋の位置で割裂し、コンクリート面に2%硝酸銀水溶液を噴霧し、その呈色域をデジタルノギスで計測した。

塩化物イオン含有量(コンクリート中の全塩分量)は、割裂した供試体のコンクリート表面から深さ2.5~7.5, 22.5~27.5, 48.5~52.5mm部分(以下、表面から5, 25, 50mm部分とする)を乾式カッターで切り出し、そのモルタル部分を振動ミルで粉碎した後、JIS R 5202に準じて吸光度により測定した。また、塩化物イオンの含有量からFickの拡散方程式を利用し、拡散係数を算出した。

(3) 腐食面積率

打足し部を中心とする上下10cmの部分での腐食面積を写し取り、画像解析により腐食面積率の測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 自然電位

図-5に打足し部における鉄筋の自然電位を示す。一般に自然電位による鉄筋腐食の確率の判定基準にはASTM C 876-91が適用され、その基準は以下の通りである。

-200mV<測定値	:90%以上の確率で腐食無し
-350mV<測定値≤-200mV	:不確定
測定値≤-350mV	:90%以上の確率で腐食有り(腐食域)

高強度高流動コンクリートBおよび高強度コンクリートDは、全般的に不確定領域を推移した。高強度高流動コンクリートA, C,

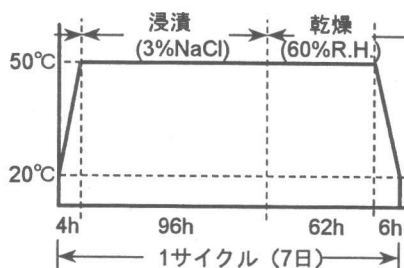


図-2 塩水の浸漬乾燥繰返し試験

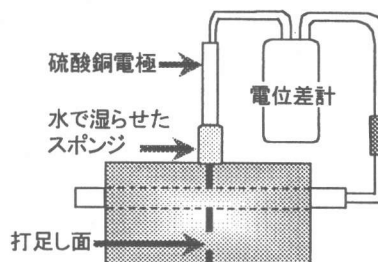


図-3 自然電位の測定位置および方法

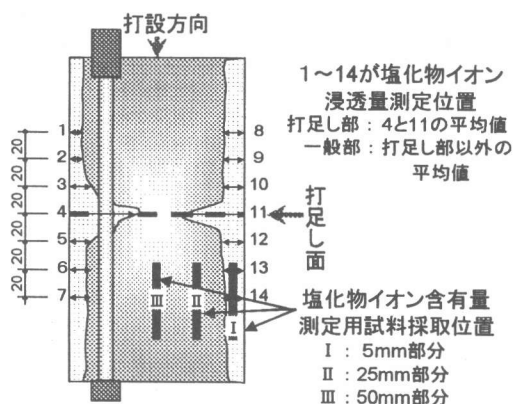


図-4 塩化物イオン浸透深さ測定位置および塩化物イオン含有量試料採取位置

BLおよびALは、浸漬直後から腐食域を推移し、その変動も大きい、概ね35サイクル以降はその他の高強度高流動コンクリートと同様、ほぼ不確定領域で推移した。

普通コンクリートEは浸漬直後から腐食域を推移し、各種高強度高流動コンクリートとは異なる挙動を示した。

3.2 塩化物イオン浸透深さ

図-6に一般部の塩化物イオン浸透深さを示す。普通コンクリートEの一般部の塩化物イオン浸透深さが約45mmに対して、各種高強

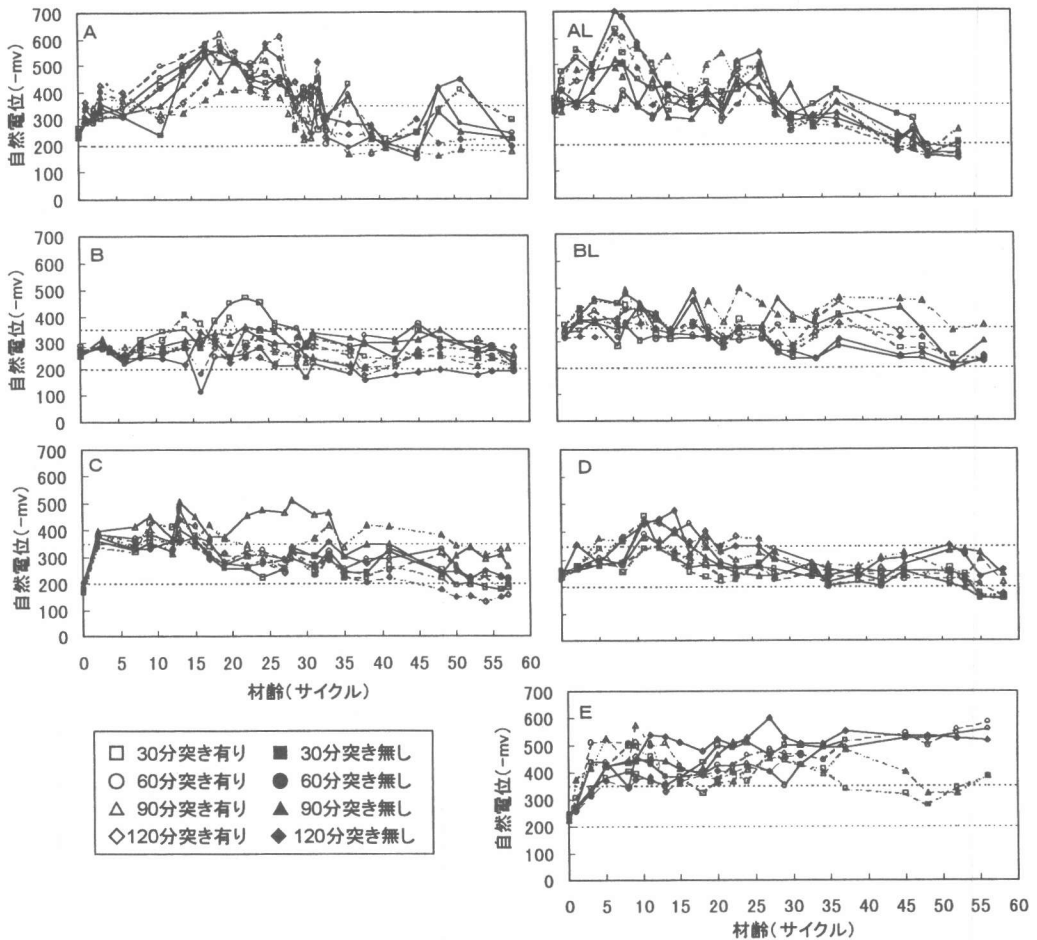


図-5 打足し部における鉄筋の自然電位

度高流動コンクリートおよび高強度コンクリートDは10mm以下と小さく、遮塩性に優れていた。これは、W/Bの違いが大きいことによるものと考えられる。

図-7に打足し部の塩化物イオン浸透深さを示す。なお、図中において塩化物イオン浸透深さ50mmのものは、両側面から全て塩化物イオンが浸透していたものを示す。高強度高流動コンクリートの打足し部の塩化物イオン浸透深さは、打足し時間間隔が長くなるに従い大きくなる傾向が認められた。突き無しの場合、その傾向が突き有りより大きく、特にコンクリートCでは打足し時間間隔90分以降から浸透深さが大きくなり、50mmまで浸透した。突き有りの場合は、打足し時間間隔90分まで

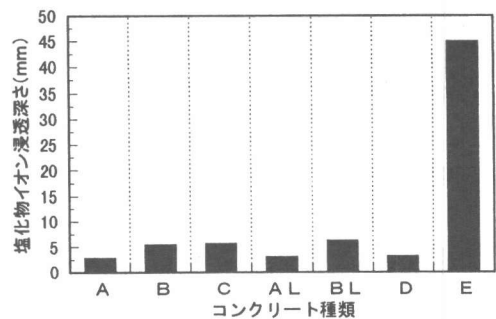


図-6 一般部の塩化物イオン浸透深さ

一般部と同程度の深さとなり、突き固めることは打足し部の遮塩性に有効であった。

それに対して、高強度コンクリートDおよび普通コンクリートEでは、打足し時間間隔120分までの範囲では打足し方法にかかわらず、Dでは約5mm以下、Eでは25~50mmとなり、

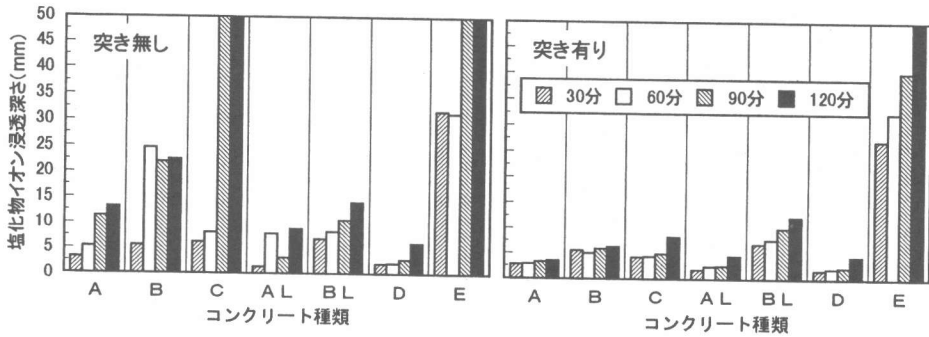


図-7 打足し部の塩化物イオン浸透深さ

打足し方法による影響は少なかった。

3.3 塩化物イオン含有量

図-8に一般部のコンクリート表面からの深さと塩化物イオン含有量の関係を示す。各種高強度高流動コンクリートおよび高強度コンクリートDの塩化物イオン含有量は、5mm付近は0.018~0.162%、25~50mmの範囲は約0.003%であり、普通コンクリートEと比較して小さかった。

また、60サイクルにおける全塩分量から求めた拡散係数は、各種高強度高流動コンクリートで $3.34 \sim 3.96 \times 10^{-8}$ (cm²/s)、普通コンクリートEで 4.68×10^{-8} (cm²/s)であった。

3.4 鉄筋腐食面積率

図-9に打足し部の鉄筋腐食面積率を示す。60サイクルの範囲においては、全ての鉄筋に孔食はみられなかった。また、高強度高流動コンクリートA、CおよびALの錆は黒錆で、鉄筋表面に薄い点錆がみられた。普通コンクリートEの錆は、黒錆と赤錆の両方が見られ、薄い浮き錆が生じていた。

高強度高流動コンクリートの打足し部における鉄筋腐食は、打足し方法による影響が大きく、また、同一供試体中の2本の鉄筋にもかなりばらつきが見られた。突き無しの場合の鉄筋腐食面積率は、コンクリートCの打足し時間間隔90分で最も大きく5%であったが、普通コンクリートDの約1/3と小さかった。それ以外に鉄筋腐食が認められたコンクリートA、CおよびALは、2%以下と僅かであっ

た。コンクリートBおよびBLでは、鉄筋腐食は認められなかった。また、突き有りの場合の鉄筋腐食面積率は僅かで、薄い点錆のみが若干認められた。

高強度コンクリートDでは、鉄筋腐食は認められなかった。普通コンクリートEでは、打足し部には突き無しの120分のみに鉄筋腐食が認められた。それ以外は、上層コンクリートの上部での鉄筋腐食であり、供試体作成時に鉄筋に沿ってブリーディング水が上昇したためであると考えられる。

3.5 自然電位と鉄筋腐食

鉄筋腐食をASTMの基準を用いて判定すると、コンクリート中の含水率や試験方法等に影響も受けるが、鉄筋腐食が認められたコンクリートA、C、ALおよびEの自然電位は、変動は大きい概ね腐食域に達していた。

3.6 塩化物イオン浸透性と鉄筋腐食

写真-1に高強度高流動コンクリートAおよび普通コンクリートEの打足し時間間隔120分突き無しの供試体割裂後の塩化物イオン浸透状況および鉄筋腐食状況を示す。普通コンクリートEは一般部と打足し部の2方向から塩化物イオンが浸透したのに対し、高強度高流動コンクリートは、一般部の塩化物イオン浸透深さおよび含有量が小さい場合においても打足し部に沿って浸透し、打足し時間間隔が長くなった場合や突き固めを行わない場合は、鉄筋腐食が認められた。

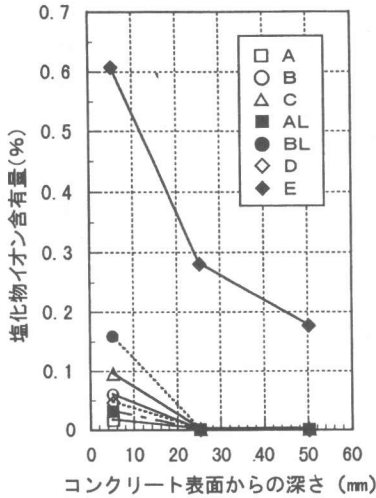


図-8 コンクリート表面からの深さと塩化物イオン含有量の関係

4. まとめ

各種高強度高流動コンクリートの打足し部の塩化物イオン浸透性および鉄筋腐食について、本実験の範囲で明らかとなった結果を以下に示す。

- ①高強度高流動コンクリートの打足し部の塩化物イオン浸透深さは、打足し時間間隔が長くなるに従い大きくなった。突き無しの場合、打足し時間間隔90分から塩化物イオン浸透深さが増大するものも見られた。突き有りの場合は、打足し時間間隔90分まで一般部と同程度の深さとなり、突き固めることは打足し部の遮塩性に有効であった。
- ②高強度高流動コンクリートの一般部の塩化物イオン浸透深さは、10mm以下と小さかった。
- ③高強度高流動コンクリートの一般部の塩化物イオン含有量は、5mm付近は0.018~0.162%、25~50mmの範囲は約0.003%と僅かであった。
- ④一般部の塩化物イオン浸透深さおよび含有量が小さい場合においても、打足し時間間隔が長くなった場合や突き固めを行わない場合、種類によっては打足し部の鉄筋腐食が認められた。

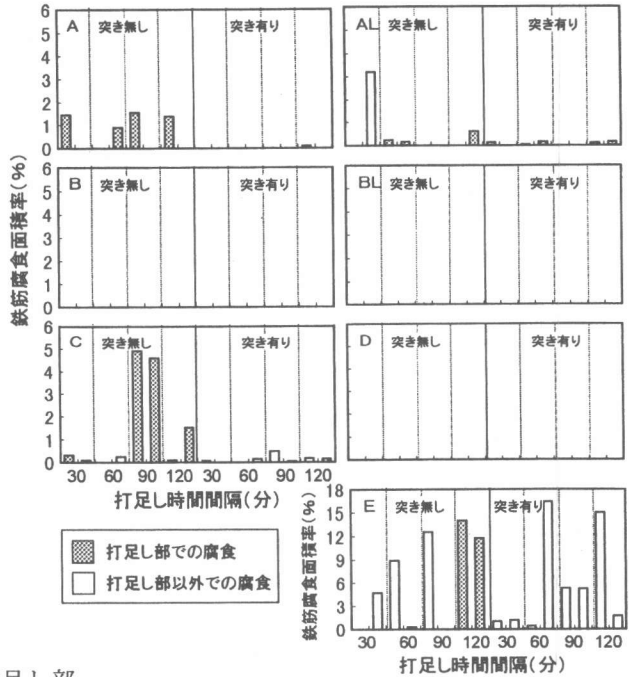


図-9 打足し部の鉄筋腐食面積率

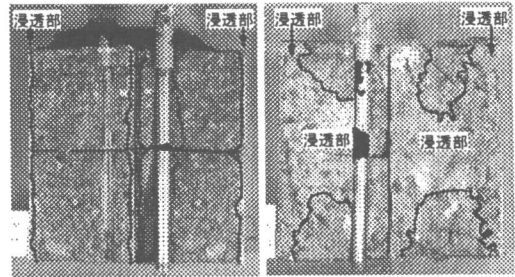


写真-1 塩化物イオン浸透・鉄筋腐食状況 (左:コンクリートA, 右:コンクリートE)

謝辞

本研究をまとめるにあたり、日本大学理工学部佐久田昌昭教授ならびに清水五郎教授にご指導いただいた。また実験にあたり、三菱マテリアル㈱セメント研究所、ピーエス㈱技術研究所、足利工業大学工学部建築学科の学生にご協力いただいた。ここに付して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 上田茂：コンクリート浮体構造物の現状，コンクリート工学，Vol.33，No.6，1995.6
- 2) 例えば笠井英志，古賀康男，飛坂基夫：高流動コンクリートの力学特性・耐久性に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp.301-302，1995.8
- 3) 竹田宣典，十河茂幸，芳賀孝成：各種浸透性防水剤のコンクリートの打継目に対する防食効果，土木学会第43回年次学術講演会，pp.264-265，1988.10