

論文 フライアッシュを使用した高流動コンクリート消波ブロックの暴露試験

船本 憲治^{*1}・内田 直人^{*2}・永松 武教^{*3}・小谷 一臣^{*4}

要旨: フライアッシュを使用した高流動コンクリートで作成した消波ブロックを対象として、まず、室内試験により、コンクリートの強度発現特性およびロッド式すりへり試験機による磨耗特性を確認した。次に、磯浜海岸にて5年間の5トン消波ブロックの暴露試験を行い、その磨耗状況を確認した。その結果、今回の消波ブロックは、従来の消波ブロックよりも長期強度の伸びが大きく、同等のコストで2倍程度耐磨耗性に優れていることが確認できた。
キーワード: フライアッシュ, 高流動コンクリート, 消波ブロック, 耐磨耗性, 暴露試験

1. はじめに

電気事業における平成14年度の石炭灰発生量は約690万tであり、今後の石炭火力発電所の新・増設により、2010年までに一般事業も含めその排出量は1000万t/年にまで増加することが予想されている。

そのような状況の中、消波ブロックにフライアッシュ、製鋼スラグ、転炉スラグを混合使用したコンクリートの研究開発がなされている^{1),2)}。一方、筆者らも消波ブロック等にフライアッシュを使用した高流動コンクリートの研究を実施しており^{3),4)}、海水の作用を受ける表層部ではフライアッシュ混入による水酸化カルシウムの減少等により耐海水性が向上すると考えられる。

そこで、本論文では、フライアッシュを使用

した高流動コンクリートで作成した消波ブロックを対象として、コンクリートの強度発現特性および磨耗特性に関して、室内試験および5年間の暴露試験による検討を行った。

2. 実験概要

2.1 要因と水準

実験の要因と水準を表-1に示す。

高流動コンクリートの目標強度(材齢1年)は55, 70N/mm²の2水準とし、フライアッシュは

表-2 使用材料

項目		種類および産地
セメント	高流動コンクリート	普通ポルトランドセメント (密度3.15g/cm ³)
	普通コンクリート	高炉セメントB種 (密度3.04g/cm ³)
フライアッシュ		表-3参照
細骨材	細粒	熊本県八代産海砂 (表乾密度2.58g/cm ³ , 吸水率2.45%)
	粗粒	長崎県崎戸産海砂 (表乾密度2.59g/cm ³ , 吸水率2.10%)
粗骨材	4020	熊本県芦北産砕石 (表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率0.77%)
	2005	
混和剤	高性能A E減水剤(ポリカルボン酸系)	
	A E減水剤(リグニンスルホン酸系)	
	A E剤(アニオン系)	

表-1 実験の要因と水準

コンクリート種類	目標強度(材齢1年)(N/mm ²)	フライアッシュ種別	目標スランプ・フロー・スランプ(cm)	目標空気量(%)
高流動	70	II種	65±7.5	3±1.5
	55	A		
	70	II種		
	55	B		
普通	21*	—	12±2.5	4.5±1.5

* 設計基準強度(材齢28日)

*1 九州電力(株) 総合研究所土木グループ主幹 博士(工学) (正会員)

*2 九州電力(株) 総合研究所土木グループ

*3 西日本技術開発(株) 地盤耐震部土木試験室長 (正会員)

*4 西日本技術開発(株) 地盤耐震部土木試験室

JIS II種規格において比表面積の異なる2水準とした。また、比較用として、通常、消波ブロックで使用されている設計基準強度 21N/mm² (材齢 28 日) の普通コンクリートを用いた。なお、ここで目標強度 55N/mm² の高流動コンクリートは、比較用として用いた普通コンクリートと同等の材料コストを想定している。

高流動コンクリートは、スランプフロー65±7.5cm・空気量 3±1.5%、普通コンクリートは、スランプ 12±2.5cm・空気量 4.5±1.5%とした。

2.2 使用材料

使用材料を表—2に、フライアッシュの品質を表—3に示す。

セメントは、高流動コンクリートの場合は普通ポルトランドセメントを、普通コンクリートの場合は高炉セメントB種を用いた。

フライアッシュは、JIS II種規格を満足する比表面積の異なるAおよびBを用いた。Aは、JIS II種を満たす小さい比表面積 (2690cm²/g) のフライアッシュであり、活性度指数は小さいもののフロー値は大きくなっている。一方、Bは、JIS II種を満たす大きい比表面積 (4300cm²/g) のフライアッシュであり、活性度指数は大きいもの

表—3 フライアッシュの品質

項目	A	B	JIS II種規格
二酸化けい素 (%)	64.5	71.1	45以上
湿分 (%)	0.1	0.1	1以下
強熱減量 (%)	1.6	1.4	5以下
密度 (g/cm ³)	2.31	2.22	1.95以上
粉末度	45μmふるい残分 (%)	33	12
	比表面積 (cm ² /g)	2690	4300
フロー値比 (%)	101	98	95以上
28日活性度指数 (%)	80	83	80以上
91日活性度指数 (%)	93	97	90以上
メチレンブルー吸着量 (mg/g)	0.40	0.28	—

のフロー値は小さい値となっている。なお、AおよびBとも、現在、大型石炭火力発電所ではほぼ安定的に発生している強熱減量の小さいフライアッシュである。

細骨材は海砂を、粗骨材は砕石を使用した。また、高流動コンクリートにはポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤およびアニオン系 AE 剤を用い、普通コンクリートにはリグニンスルホン酸系 AE 減水剤を用いた。

2.3 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表—4に示す。

高流動コンクリートの配合は、まず、粉体容積 180 l/m³ および粗骨材容積 320 l/m³ を一定とし、フライアッシュのフロー値比を基に試し練りより単位水量を決定した。次に、粉体容積一定の条件下で、各目標強度を満たす単位セメント量および単位フライアッシュ量を決定した。

一方、普通コンクリートは、今回使用したレディーミクストコンクリート工場ですべて通常消波ブロックを製造している時の配合とした。

なお、F-70、F-55、S21 の材料コストは、ほぼ 1.3 : 1 : 1 である。

2.4 実験方法

コンクリートの製造は、すべて同時にレディーミクストコンクリート工場で行い、圧縮強度試験用供試体 (φ 12.5cm × H25cm, 標準養生)、磨耗加速試験用供試体および5トン消波ブロックに打設した。

磨耗加速試験は、文献 5) に基づき、コンクリートを 20mm ふるいでウェット・スクリーニングしたものを L14.5cm × W29.5cm × H3.4cm の鋼製容器に一層で詰め、ジッキングによる締固めを行い、約 2~3 時間後に表面が平滑になるよう

表—4 コンクリートの配合表

配合番号	コンクリート種類	目標強度 (1年) (N/mm ²)	設計基準強度 (28日) (N/mm ²)	FA 種別	水セメント比 (%)	粉体容積 (l/m ³)	粗骨材容積 (l/m ³)	FA置換率 FA/P (%)	単位量 (kg/m ³)					高性能 AE減水剤 (P*) (%)	AE減水剤 (P*) (%)	AE剤 (P*) (%)
									水 W	セメント C	フライアッシュ FA	細骨材 S	粗骨材 G			
F-70-A	高流動	70	—	II種	50	180	320	32.8	170	340	166	749	848	1.4	—	0.011
F-55-A		55	—	A	85			57.4	170	200	269	749	848	0.8	—	0.011
F-70-B		70	—	II種	50			28.9	180	360	146	723	848	1.4	—	0.011
F-55-B		55	—	B	85			54.1	180	212	250	723	848	0.9	—	0.011
S21	普通	—	21	—	56	94	451	—	160	286	—	645	1194	—	0.275	—

注) P=C+FA

に成型した。また、試験機は文献 5)で考案されたロッド式すりへり試験機を用い、試験は材齢 1 年後に行った。なお、本試験機は、回転ドラムと無段変速モーターで構成され、両者がVベルトで連結されており、モーターの起動により回転ドラムが回転すると、ドラム内に装填した磨耗材が回転ドラムに設置した供試体の表面を転がり磨耗作用を与えるようになっている。

暴露試験は、図—1の5トン消波ブロックを一配合につき6個合計30個作製し、1ヶ月後に九州電力(株)苓北発電所近郊の礫浜に暴露した。

3. 実験結果

3.1 室内試験

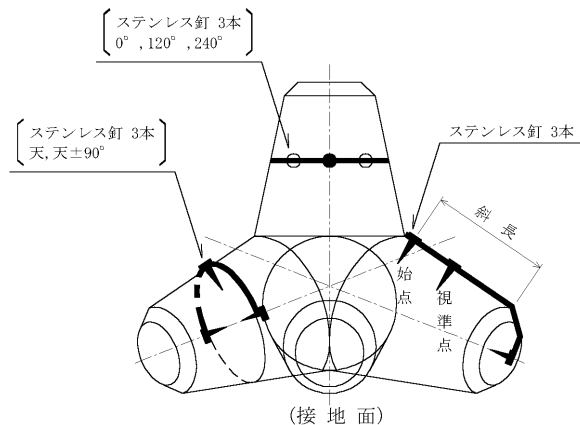
(1) フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状を表—5に示すが、高流動コンクリートのスランプフローは、フライアッシュ混入により流動性が改善され、高性能 AE 減水剤使用量を少なくしても所要の性能が満足できている。一方、空気量も所要の性能を満足し、今回、大量のフライアッシュを使用したにもかかわらず、その強熱減量が小さいため AE 剤使用量も安定していた。

普通コンクリートのスランプおよび空気量は、所要の性能を満足し、AE 減水剤使用量も標準的な量であった。

(2) 圧縮強度特性 (標準養生)

材齢と圧縮強度の関係を図—2に示す。



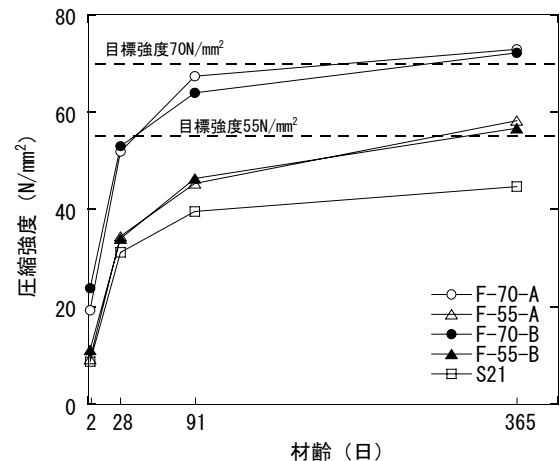
図—1 5トン消波ブロックの寸法測定箇所

高流動コンクリートは、少ないセメントでもセメント外割のフライアッシュが強度発現に大きく寄与し⁶⁾、F-55は同等のコストでS21の1.3倍の長期強度を実現でき、各配合は各々の目標強度を満足できた。また、フライアッシュの種類A、Bによる差は見受けられず、表—3の活性度指数の差の影響は見られなかった。

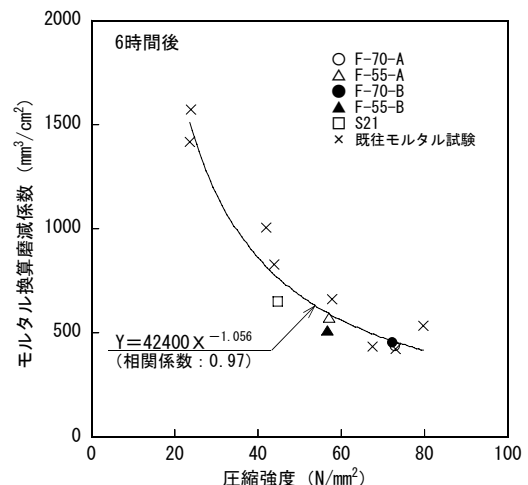
材齢 91 日から1年までの強度の増加率は、F-55が1.22~1.26で、F-70およびS21の1.08~

表—5 コンクリートのフレッシュ性状

配合番号	コンクリート種類	F A 種別	スランプフロー・スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
F-70-A	高流動	II種	71.5	1.5	27
F-55-A		A	59.5	2.9	28
F-70-B		II種	64.5	2.7	29
F-55-B		B	58.0	2.6	28
S21	普通	—	11.5	4.9	28



図—2 材齢と圧縮強度の関係



図—3 圧縮強度とモルタル換算磨減係数の関係

1.13 と比較して大きい値となった。

(3) 磨耗加速試験

磨耗6時間後の圧縮強度とモルタル換算後の磨減係数の関係を図—3に示す。なお、モルタル換算後の磨減係数は式(1)により算出した。

$$A_{cm} = V_{cm} / A \times 1000 \quad (1)$$

$$V_{cm} = \{(W_o - W_i) \times V_n / V_m\} / \rho_m \quad (2)$$

ここに、 A_{cm} ：モルタル換算後の磨減係数(mm^3/cm^2)

V_{cm} ：モルタル換算後の磨減容積(cm^3)

A ：磨耗を受ける面の供試体面積(cm^2)

W_o, W_i ：試験前、後の供試体質量(g)

V_n, V_m ：コンクリート、モルタル容積(l/m^3)

ρ_m ：モルタル換算単位容積質量(g/cm^3)

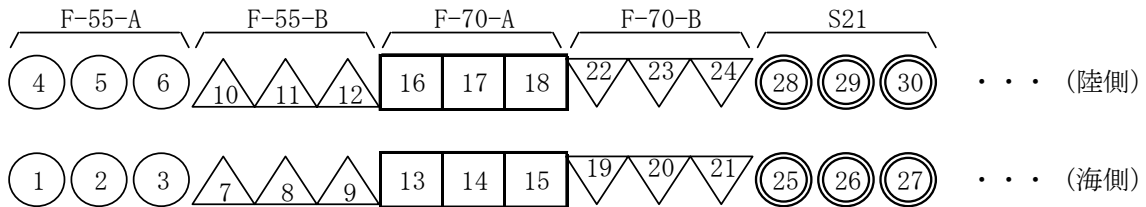
磨減係数は、文献 7)と同様に圧縮強度が大きくなるほど指数関数的に小さくなる傾向を示し、良い相関式が得られている。なお、ここで×印の値は、本試験機で今回試験以前に実施したモルタルでの磨耗加速試験結果⁸⁾である。

また、今回の高流動コンクリートは、普通コンクリートよりも強度が大きく、耐磨耗性に優れていることが明らかになった。

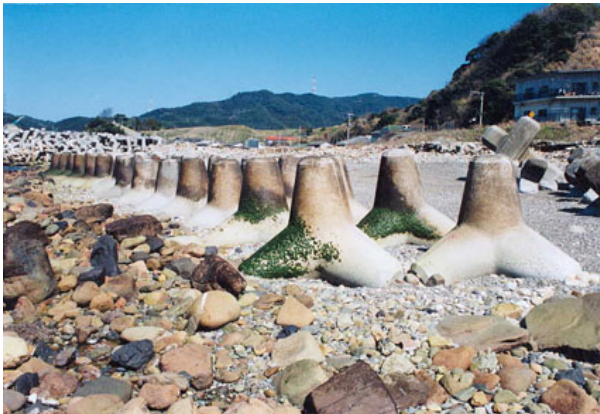
3.2 礫浜における暴露試験

(1) 目視観察

図—4に消波ブロックの配合番号と暴露配置を、写真—1にその設置状況を示す。また、各配合における磨耗状況を写真—2～4に示す。



図—4 消波ブロックの配合番号と暴露配置



写真—1 礫浜における消波ブロック設置状況



写真—3 消波ブロック脚部磨耗状況 (F-55-A)



写真—2 消波ブロック脚部磨耗状況 (F-70-A)



写真—4 消波ブロック脚部磨耗状況 (S21)

5年間設置後の磨耗状況を目視により観察すると、磨耗は消波ブロック全体に生じるのではなく、ブロックの脚部に著しく生じていた。また、S21の磨耗が大きく、F-70とF-55は特に有意な差は見受けられなかった。

(2) 寸法変化率

消波ブロックの寸法測定箇所を図—1に示す。

測定箇所は、頭部円周、脚部半円周および斜辺とし、一配合毎に、頭部円周は1側線×6個、脚部半円周および斜辺はそれぞれ3側線×6個とし、その平均値を用いた。

5年間設置後の頭部円周はほとんど磨耗が見られず、また、脚部斜辺には有意な差が見られなかった。一方、脚部半円周では有意な差が見られ、圧縮強度と脚部半円周寸法変化率の関係を図—5に示す。

脚部半円周寸法変化率は、前述の磨耗加速試験結果と同様に、圧縮強度が大きくなるほど指数関数的に小さくなる傾向を示しており、良い相関式が得られている。また、今回の高流動コンクリートの寸法変化率は、普通コンクリートの約半分であり、今回の高流動コンクリートが耐磨耗性に優れていることが明らかになった。

(3) 既設消波ブロックを含めた検討

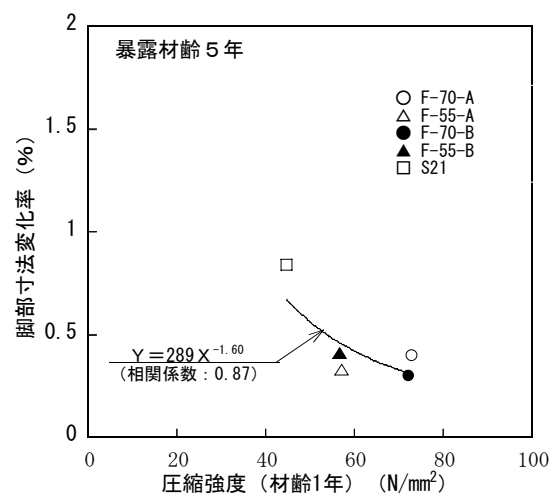
既設の5トン六脚ブロックの磨耗状況を写真—5に示す。既設の5トン六脚ブロックは、今回試験した暴露場所の近くの礫浜に昭和60年に設置されたもので、設置年数は14年目の測定結果である。また、コンクリートの配合資料は入

手できなかったが、レディーミクストコンクリート工場等からの聞取によると、今回試験したS21に近い配合と推察される。

磨耗状況を目視により観察すると、頭部ではほとんど磨耗がなかったものの、ブロックの脚部では全体的に粗骨材がはっきりと浮き出た状態が見られた。

そこで、今回のケース（設置期間5年）と既設六脚ブロック（設置期間14年）の寸法測定結果を含め、設置年数と脚部寸法変化率の関係を図—6に示す。なお、調査した45個の六脚ブロックの寸法測定箇所は、脚部の縦・横・奥行の合計231側線とし、その平均値を用いた。

同一配合と推察される今回のS21（設置期間5年）と既設六脚ブロック（設置期間14年）は、ほぼ同一直線上となり、今回のS21の測定値は



図—5 圧縮強度と脚部寸法変化率の関係



写真—5 既設5トン六脚ブロックの磨耗状況

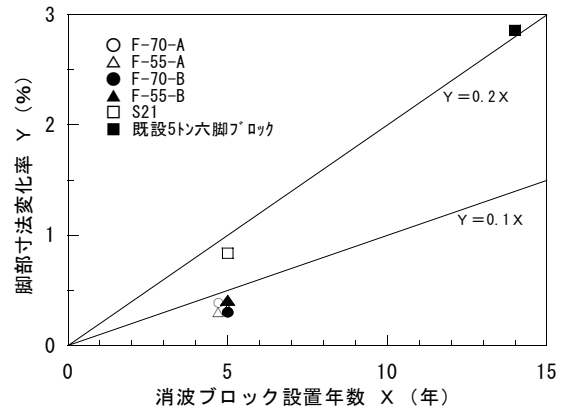
ほぼ妥当なものと考えられる。

また、高流動コンクリート（F-70, F-55）の寸法変化率は、普通コンクリート（S21）の約半分であり、今回の高流動コンクリートが耐磨耗性に優れていることが明らかになった。

4. 結論

本実験により得られた結論を以下に示す。

- (1) JIS II種を満足する比表面積の異なるフライアッシュ（2690～4300cm²/g）を高流動コンクリートに使用する場合、単位水量はフライアッシュ JIS 規格のフロー値比を基に決定する必要があるが、強度発現性状はフライアッシュ JIS 規格の活性度指数による有意な差は見受けられなかった。
- (2) フライアッシュを使用した高流動コンクリートの場合、少ないセメントでもセメント外割のフライアッシュが強度発現に大きく寄与し、同等のコストで、現在一般的に用いられている消波ブロック配合の約 1.3 倍の長期強度を実現することができる。
- (3) 磨耗加速試験によると、磨減係数は、コンクリートの圧縮強度が大きくなるほど指数関数的に小さくなる傾向を示し、良い相関式が得られる。
- (4) 礫浜における消波ブロックの暴露試験によると、脚部寸法変化率は、コンクリートの圧縮強度が大きくなるほど指数関数的に小さくなる傾向を示し、良い相関式が得られる。
- (5) 礫浜における 5 年間の消波ブロック暴露試験により、フライアッシュを使用した高流動コンクリート消波ブロックは、従来の消波ブロックと比較して、ほぼ同等のコストで脚部寸法変化率を約半分に低減でき、長期強度および耐磨耗性に優れていることが明らかになった。なお、本暴露試験は、現在継続中であり、今後とも追跡調査を行う予定である。



図—6 設置年数と脚部寸法変化率の関係

参考文献

- 1) 斎藤直ほか：金属スラグを骨材とした石炭灰コンクリートの特性と配合設計手法，土木学会論文集，No.697/VI-53，pp.187-204，2001.12
- 2) FS コンクリート利用手引書，沿岸環境開発資源利用センター，2000
- 3) 永松武教ほか：海外炭灰を用いた高流動コンクリートの硬化性状について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.73-78，1997
- 4) 船本憲治ほか：フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.117-122，2002
- 5) （財）電力中央研究所：モルタルおよびコンクリートに耐磨耗性をあたえる材料のロット方法によるすりへり試験
- 6) 松藤泰典ほか：石炭灰を外割大量使用したコンクリートの調合に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.12，No.2，pp.51-60，2001.5
- 7) 豊福俊英ほか：各種コンクリートの衝撃磨耗特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.901-906，1999
- 8) 西日本技術開発(株)：水路工作物コンクリートの補修技術に関する研究のうち補修材料の室内磨耗促進試験業務報告書，1994.3,1995.2