

報告 海水および海砂を用いた自己充填型コンクリートへのフライアッシュの適用性

竹中 寛^{*1}・末岡 英二^{*2}・佐野 清史^{*3}・清宮 理^{*4}

要旨：著者らは、海水、未洗浄の海砂および特殊混和剤を使用した自己充填型コンクリートを開発し、これまでその諸特性について報告してきた。本研究では、当該コンクリートの用途拡大や自己収縮の増大などの課題改善を目的として、フライアッシュを用いたコンクリートの諸性状について検討を行った。その結果、フライアッシュの置換に伴う初期材齢の強度低下が、海水や海砂を併用することで抑制され、海水や海砂を用いることによる自己収縮の増大が、フライアッシュの添加により抑制される、すなわち、海水とフライアッシュのそれぞれがコンクリートの品質に及ぼす効果により、相乗的に改善しうることを明らかにした。

キーワード：海水、海砂、自己充填、フライアッシュ、圧縮強度、自己収縮

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、過酷な施工環境となる場合や、陸上や海上のアクセスが悪く、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、先般の大震災のように、陸・海路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、自己充填性を有するコンクリートを使用し、締め固め作業を省力化することで施工速度を向上することなどが求められる。

海水練りのコンクリートについては、従来から多くの研究¹⁾⁵⁾がなされてきたが、自己充填型コンクリートについて検討された事例は少ない。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）が混和剤の分散性を阻害し、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ことも一因と考えられる⁶⁾。このような課題を改善すべく、著者らは海水や未洗浄の海砂を用いた場合でも無機イオンの影響を受けにくい特殊混和剤、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な特長を有する自己充填型コンクリート（以下、海水・海砂自己充填型コンクリートと称す）を開発し、その諸性状についてこれまで研究を進めてきた⁷⁾⁸⁾。その結果、当該コンクリートは、施工の効率化や初期材齢の強度発現性の向上が図れる一方で、自己収縮が大きくなるなどの課題を有する

ことを明らかにしている。

また近年、海水の硫酸塩濃度の比較的高い地域（東南アジアなど）では、コンクリートの耐久性を向上するためにフライアッシュを添加する事例がある。このような場合、コンクリートの長期的な耐久性の向上は図れるものの、フライアッシュの種類やその添加量によっては初期材齢における強度発現が低下し、施工サイクルに影響を及ぼす場合があるため、強度発現性が向上する海水・海砂自己充填型コンクリートの適用が期待できる。

そこで本検討では、海水および海砂を用いた自己充填型コンクリートの用途拡大や課題改善を目的として、フライアッシュを用いたコンクリートの諸性状を確認し、初期材齢における強度低下の抑制や自己収縮の低減効果について検証を行った。ここに、これまでの検討から得られた知見を報告する。

2. 試験概要

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。練混ぜ水と細骨材の組合せは、水道水・陸砂（記号 TL）と海水・未洗浄の海砂（記号 SS）の2水準とし、それぞれフライアッシュを使用しない配合と、2種類のフライアッシュ（記号 F1, F2）を結合材の内割りりで15, 30%（質量比）置換した配合について検討を行った。水結合材比は45%で一定、単位水量も TL と SS のそれぞれで一定とし、スランプフローが 600±50mm、空気量が 4.5±1.5%となるよう混和剤（特殊混和剤, AE 剤）の添加量等を調整した。なお、TL と SS で単位水量が異なるが、これは海水が固形分を含むこと、使用した海砂の粗粒率が陸砂に比べて小さか

*1 東洋建設(株) 美浦研究所 主任研究員 博(工) (正会員)

*2 東洋建設(株) 美浦研究所 所長 博(工) (正会員)

*3 東洋建設(株) 土木技術部 部長 工博 (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)

表-1 コンクリートの配合

No.	記号	スランブ フロー (mm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位粗 骨材絶 対容積 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)							混和剤 [※]	
							W1	W2	C	F1	F2	S1	S2	G	Ad (B×%)
1	TL-F-0	600 ±50	4.5 ±1.5	45	49.7	0.330	175	—	389	—	—	850	—	873	1.15
2	TL-F1-15						175	—	331	58	—	829	—	873	1.28
3	TL-F1-30						175	—	272	117	—	809	—	873	1.12
4	TL-F2-15						175	—	331	—	58	832	—	873	0.85
5	TL-F2-30						175	—	272	—	117	816	—	873	0.70
6	SS-F-0						—	185	411	—	—	—	825	873	1.60
7	SS-F1-15						—	185	349	62	—	—	804	873	1.36
8	SS-F1-30						—	185	288	123	—	—	781	873	1.19
9	SS-F2-15						—	185	349	—	62	—	810	873	0.93
10	SS-F2-30						—	185	288	—	123	—	791	873	0.91

※ 代表値（自己収縮以外の試験時のもの）

ったことなどが要因と考えられる。練混ぜ時のコンクリートおよび雰囲気温度は、いずれも 20℃とした。

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、海水中には質量比で 1.76%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。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。フライアッシュは JIS 非適合品（記号 F1）と JIS 適合品（Ⅱ種，記号 F2）の 2 種類とし、F1 は F2 に比べ、密度が小さく、強熱減量や MB 吸着量が大きいなどの特徴を有していた。また、混和剤は本研究で開発した特殊混和剤（増粘剤-液型高性能 AE 減水剤）を使用した。

2.2 試験項目および方法

コンクリートの試験項目および方法を表-4に示す。スランブフローについては、フロー値に併せて停止までの経過時間（T_{stop}）も計測した。また、自己収縮は自己収縮研究委員会報告書（日本コンクリート工学会）に示す試験方法に準拠し、凝結始発時間を基準に埋め込み型ひずみ計を用いて計測を行った。なお、自己収縮の試験については、F1 のフライアッシュを 30%置換した配合（TL-F1-30，TL-F1-30）を除いて実施した。それ以外の試験は全ての配合を対象に実施した。

3. 試験結果および考察

試験結果の一覧を表-5に示す。

3.1 コンクリートの流動性

練混ぜ水と細骨材の種類、フライアッシュの種類や置換率によって配合は異なるが、表-1に示す全ての配合においてスランブフローの目標範囲（600±50mm）を満足した。各配合の値に若干の違いはあったが、ほぼ同じとして検討する。コンクリートのフライアッシュ（FA）の置換率と混和剤添加率の関係を図-1に示す。F1のフライアッシュに比べてF2のほうが、さらにフライアッシュの置換率が大きいほど特殊混和剤の使用量が少なく

表-2 使用材料

使用材料	記号	種類，物理的・化学的性質
練混ぜ水	W1	水道水(Tap Water)
	W2	海水(Sea Water, 相模湾より採水), 表-3参照
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³ , 比表面積3320cm ² /g.
混和材 (フライアッシュ)	F1	JIS非適合品, 密度2.19g/cm ³ , 比表面積3950cm ² /g, 強熱減量5.1%, MB吸着量1.42mg/g
	F2	JISⅡ種適合品, 密度2.35g/cm ³ , 比表面積4490cm ² /g, 強熱減量2.0%, MB吸着量0.52mg/g
細骨材	S1	陸砂(Land Sand, 大井川水系), 表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率1.86%
	S2	海砂(Sea Sand, 東村新川沖産, 未洗浄), 表乾密度2.62g/cm ³ , 吸水率2.42%
粗骨材	G	硬質砂岩砕石(青梅産), 表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率0.51%, 最大寸法20mm
混和剤	Ad	増粘剤-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), 塩分対応型

表-3 海水の成分

密度 [20℃] (g/cm ³)	pH [20℃]	固形分濃度 [105℃, 3hr] (%)			
1.024	8.2	3.96			
各種イオンの含有量(%)					
Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
1.76	0.34	1.08	0.04	0.04	0.12

表-4 試験方法および項目

試験項目	試験方法	試験条件など
スランブフロー・停止時間	JIS A 1150	—
空気量	JIS A 1128	—
凝結時間	JIS A 1147	—
圧縮強度	JIS A 1108	養生条件：標準水中養生 試験材齢：1, 3, 7, 28日
静弾性係数	JIS A 1149	同上 (TL・SS-F2-15を除く)
自己収縮	埋込型ひずみ計による	自己収縮研究委員会報告書 (JCI)の試験方法に準拠

なる傾向が認められた。これは、F1に比べてF2の未燃カーボン量が少ないこと、一般的にフライアッシュは粒子が球状であり、コンクリートの流動性を向上させる特徴を有すること⁹⁾などが起因したものと考えられる。

フライアッシュの置換率とスランブフローの停止時間

表-5 試験結果一覧表

No.	記号	スランブフロー (mm)	スランブフロー 停止時間 (s)	空気量 (%)	凝結時間 (h-m)		圧縮強度 (N/mm ²)				静弾性係数 (kN/mm ²)	
					始発	終結	材齢1日	材齢3日	材齢7日	材齢28日	材齢7日	材齢28日
1	TL-F-0	590	45	4.6	6-30	8-40	10.7	27.9	42.6	52.5	30.5	34.8
2	TL-F1-15	615	40	5.5	6-50	8-50	10.1	26.2	39.4	52.8	30.4	33.3
3	TL-F1-30	605	39	4.2	6-55	9-35	6.70	19.2	29.3	41.6	26.9	30.2
4	TL-F2-15	630	37	4.5	6-45	8-55	9.30	25.8	40.0	52.6	—	—
5	TL-F2-30	605	29	3.9	6-55	9-20	6.81	18.2	30.1	44.9	27.4	31.3
6	SS-F-0	640	48	4.5	5-45	7-40	19.9	33.2	39.9	49.5	27.5	31.2
7	SS-F1-15	645	41	3.5	5-55	8-15	16.9	29.1	36.6	48.4	26.3	30.0
8	SS-F1-30	615	35	3.7	6-20	8-55	11.6	21.1	27.4	39.7	23.8	28.9
9	SS-F2-15	630	32	4.3	6-00	7-50	19.2	31.9	41.1	51.9	—	—
10	SS-F2-30	625	26	3.1	6-05	8-45	12.1	22.9	30.2	43.9	25.2	30.1

— 試験未実施

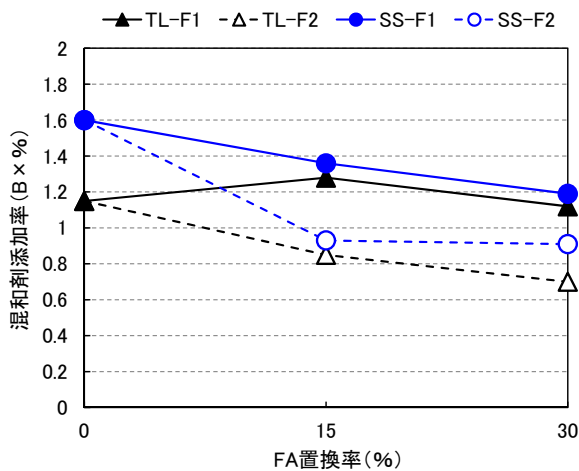


図-1 FA置換率と混和剤添加率の関係

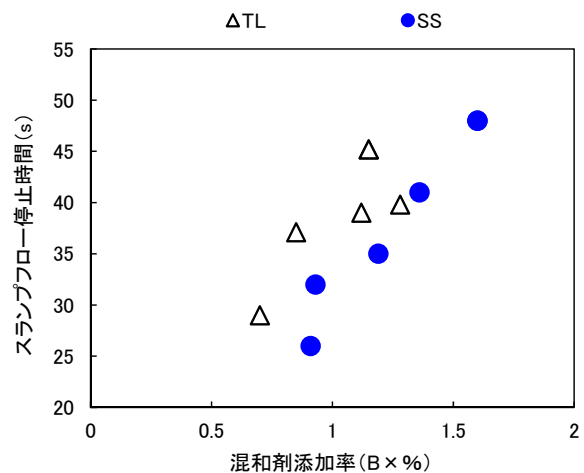


図-3 混和剤添加率とフロー停止時間の関係

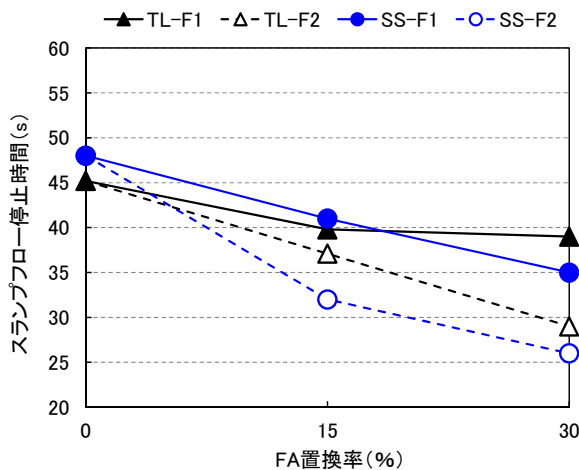


図-2 FA置換率とフロー停止時間の関係

の関係を図-2に示す。図より、フライアッシュの置換率が大きいほど停止時間が早くなる、すなわちコンクリートの粘性が小さくなる傾向が認められた。これは、前述したフライアッシュの粒形による影響も一因と考えられるが、図-3に示すとおり混和剤添加率とスランブフローの停止時間に相関がみられることから、増粘剤を含有する混和剤の添加率が支配的であったものと推察され

る。つまり、フライアッシュの置換率が大きい場合、混和剤の添加率が小さくなり、これに伴って混和剤が含有する増粘剤の量も相対的に減少するため、コンクリートの粘性が低下したものと考えられる。

3.2 コンクリートの凝結時間

フライアッシュの置換率と凝結時間の関係を図-4に示す。水道水・陸砂 (TL)、海水・海砂 (SS) のいずれの場合においても、コンクリートの凝結時間はフライアッシュの置換率の増加に伴い若干遅くなる傾向を示し、30%置換した場合、無置換の場合に比べて始発時間が0.5時間程度、終結時間が1時間程度遅くなった。しかしながら、海水・海砂 (SS) の場合、水道水・陸砂 (TL) の場合に比べて1時間程度始発・終結時間が速くなることから、フライアッシュを30%置換した配合 (SS-F1-30, SS-F2-30) でも、TLのフライアッシュを置換していない配合 (TL-F-0) と同等程度になることがわかった。SSの凝結促進については、既往の研究によると、海水に含まれる塩化ナトリウムなどが影響したものと推察される。なお、本検討の範囲では、フライアッシュの種類の違いによる差異は明確ではなかった。

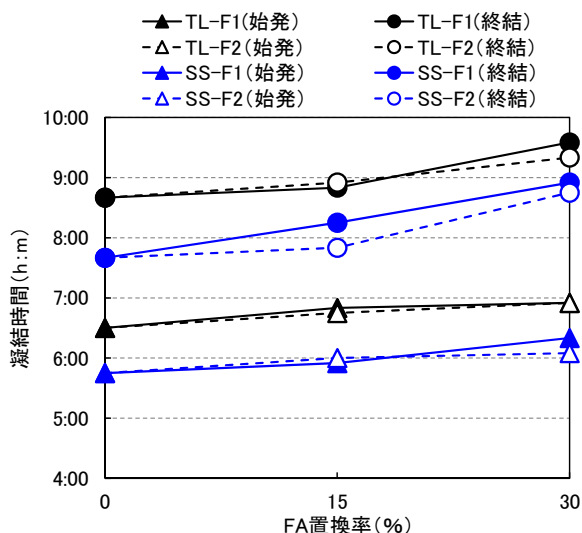


図-4 FA 置換率と凝結時間の関係

3.3 コンクリートの強度発現性

(1) 圧縮強度

フライアッシュ F1 および F2 を置換したコンクリートの圧縮強度を、それぞれ図-5、図-6 に示す。海水・海砂 (SS) の場合、フライアッシュの置換の有無を問わず、水道水・陸砂 (TL) の場合に比べて初期材齢 (1, 3 日) における圧縮強度の発現性が高くなるのが認められ、このような傾向は、前述したコンクリート中に塩化ナトリウムが含有されることで硬化が促進されるとの既往知見とも合致する。

材齢 1, 3 および 7 日におけるフライアッシュの置換率と圧縮強度の関係を図-7 に示す。いずれの材齢においても、フライアッシュの置換率の増加に伴い圧縮強度は低下したが、海水・海砂 (SS) の場合、水道水・陸砂 (TL) の場合に比べて初期材齢の強度が相対的に大きくなるため、材齢 1 日では 30%、材齢 3 日では 15% のフライアッシュを置換した配合が、TL のフライアッシュを置換していない配合と同等以上の強度発現性を示すことがわかった。なお、フライアッシュの種類の違いによる影響については、強熱減量などが大きい F1 のほうが、F2 に比べて初期材齢の強度が若干小さくなった。これらの結果から、例えば、型枠の取外しや転置の時期が全体の工程に大きく影響を及ぼす多数のコンクリートブロック製作工事などにおいて、耐久性の向上や温度低減を図るために比較的多量のフライアッシュを置換する場合でも、海水・海砂を用いることでフライアッシュの置換に伴う強度発現の低下が抑制されるため、効率的な施工に寄与できるものと推察される。なお、本稿では材齢 28 日までの強度発現性について報告したが、さらに長期の材齢において海水・海砂によるポズラン反応の活性化が期待される¹⁰⁾。したがって、今後も継続して検討を進め、それ

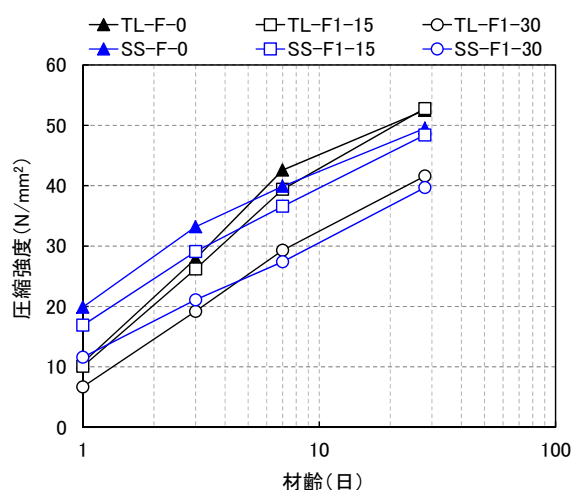


図-5 圧縮強度 (FA-F1)

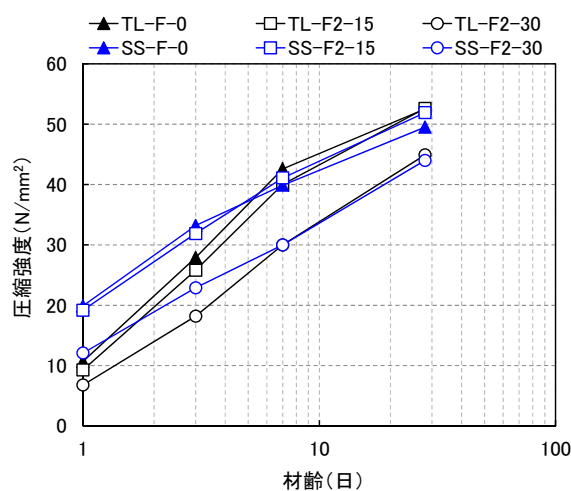


図-6 圧縮強度 (FA-F2)

らの傾向を検証してゆきたい。

(2) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-8 に示す。海水・海砂 (SS) の場合、水道水・陸砂 (TL) の場合に比べて同一の圧縮強度における静弾性係数が若干小さくなるが、高炉セメント B 種を用いた既往の知見⁷⁾と同様、概ね一樣な傾向が認められた。なお、SS と TL の値の差異については、使用骨材の違いやセメントペースト量の違いが起因したものと推察される。また、これらの結果を図中に併記した JCI および土木学会の推定式¹¹⁾と比較すると、本検討の結果のほうがやや下方に位置するものの、概ね近似することがわかった。

3.4 コンクリートの自己収縮特性

F1 のフライアッシュを置換したコンクリートの、自己収縮によるひずみを図-9 に示す。高炉セメント B 種を用いた既往の知見⁸⁾と同様、フライアッシュ無置換の海水・海砂を用いた配合 (SS-F-0) の収縮ひずみは、水道水・陸砂を用いた配合 (TL-F-0) に比べて大きくなり、約 4 週が経過した現時点では、前者のほうが 4 割程度大

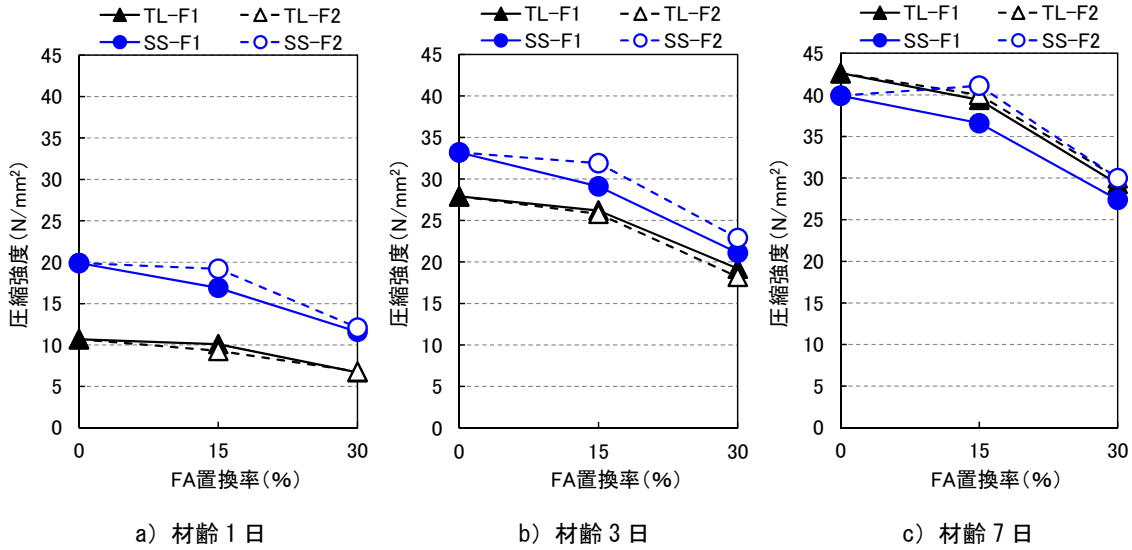


図-7 FA 置換率と圧縮強度の関係

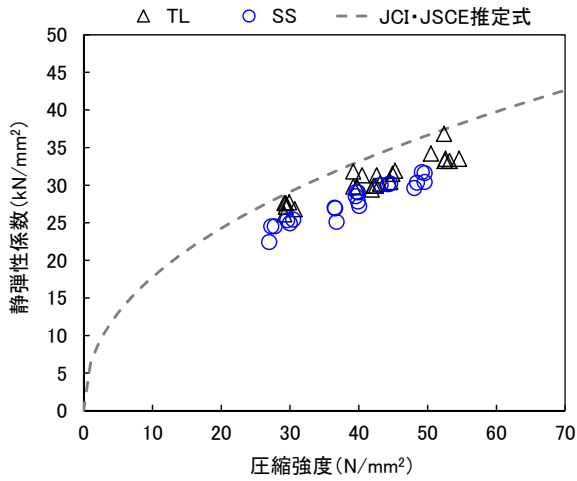
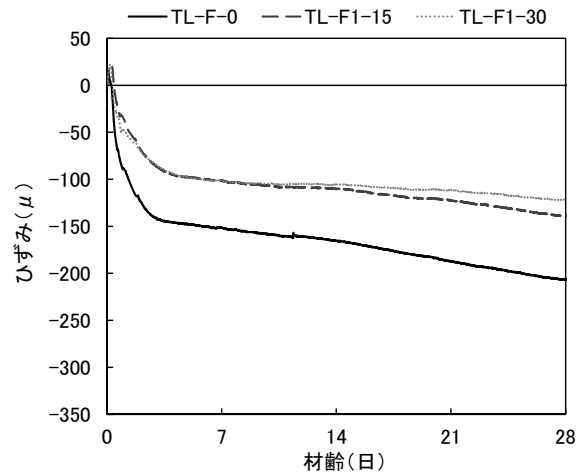
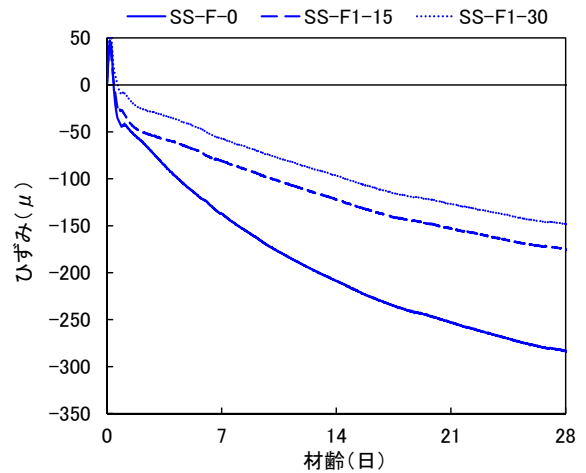


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

きくなった。海水を用いた場合に自己収縮が大きくなる要因は明らかでないが、初期材齢におけるセメントの水和反応が促進され、自己乾燥の影響が大きくなったことなどが考えられる。しかしながら、フライアッシュを置換すると、水道水・陸砂 (TL)、海水・海砂 (SS) のいずれの場合も収縮ひずみが減少する傾向を示した。これは、フライアッシュの置換に伴い単位セメント量が減少したことも一因と考えられる。材齢 28 日における海水・海砂 (SS) の収縮ひずみの減少率は、フライアッシュの置換率が 30% で 5 割程度、15% で 4 割程度であり、収縮ひずみの値はフライアッシュ無置換の水道水・陸砂を用いた配合 (TL-F-0) よりも小さい。収縮ひずみは材齢 28 日以降も進展する兆候がみられ (特に SS)、最終的にはもう少し経過した時点で評価するべきではあるが、これまでに得られた結果からも、海水・海砂 (SS) を用いた場合に生じる自己収縮の増大は、フライアッシュの置換により低減できる可能性のあることが示唆された。なお、



a) 水道水・陸砂 (TL)



b) 海水・海砂 (SS)

図-9 自己収縮に伴うひずみの経時変化

フライアッシュの種類の違いによる影響については、図-10 に示すとおり海水・海砂 (SS) のほうがやや大きいよ

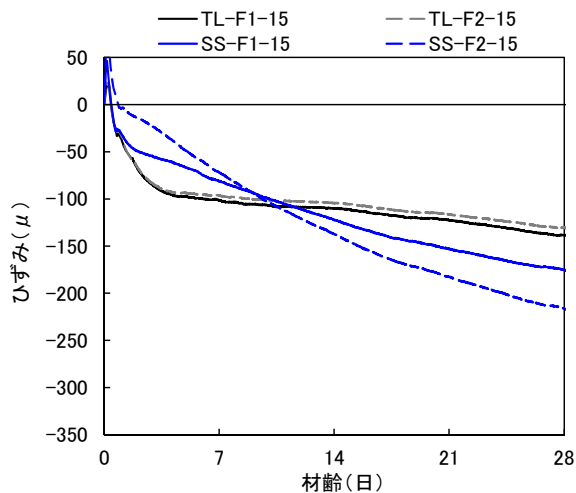


図-10 FAの種類の違いが自己収縮に及ぼす影響

うである。

4. まとめ

海水・海砂を用いた自己充填型コンクリートへのフライアッシュの適用性について検討した結果、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 海水・海砂を用いた場合においても、フライアッシュの置換率の増加に伴い流動性が向上し、同一のスランプフローを得るための特殊混和剤の添加量が減少する。また、コンクリートの粘性は、増粘剤を含有する特殊混和剤の添加量に影響される。
- (2) 海水・海砂を用いたコンクリートの凝結時間は、フライアッシュの置換率の増加に伴い若干遅くなるが、水道水・陸砂を用いた場合に比べて1時間程度速くなるため、フライアッシュを30%置換した配合でも、水道水・陸砂を用いたフライアッシュ無置換の配合と同等程度になる。
- (3) 海水・海砂を用いた場合、水道水・陸砂を用いた場合と同様、フライアッシュの置換率の増加に伴い圧縮強度が低下するが、初期材齢における強度発現性が水道水・陸砂の場合に比べて相対的に高くなるため、フライアッシュの置換に伴う初期材齢の強度低下を抑制するのに効果的である。
- (4) 圧縮強度と静弾性係数の関係は、練混ぜ水や細骨材の種類、フライアッシュの置換の有無を問わず、ほぼ一様な傾向を示し、既往の推定式と概ね近似する。
- (5) 海水・海砂を用いた場合の自己収縮は、水道水・陸砂を用いた場合に比べて大きくなるが、フライアッシュの置換により低減できる可能性が示唆された。

本研究は、早稲田大学、(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。ここに、関係者へ謝意を表す。

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, 羽瀨貴士, 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, 田中亮一, 馬場勇介, 山路 徹, 清宮 理: 海水・海砂を用いた自己充填型コンクリートの収縮特性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68, No.5, pp.111-112, 2013.9
- 9) 土木学会: フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案), コンクリートライブラリー94FA, 1999.7
- 10) 福留和人, 石川嘉崇, 大即信明, 西田孝弘: フライアッシュを高置換したコンクリートの強度発現に及ぼすNaClの効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.187-192, 2013.6
- 11) 土木学会: コンクリート標準示方書【設計編】, 2012