

論文

[1048] シリカフェームを混入した高強度コンクリートのワーカビリティおよび力学的特性に関する研究

正会員○金 武漢 (韓国忠南大学校建築工学科)
 正会員 洪 悦郎 (関東学院大学建築学科)
 正会員 鎌田英治 (北海道大学建築工学科)
 正会員 児玉和巳 (エヌエムビー)

1. まえがき

近年、土地の有効利用・居住性・建築コストの低減の面からRC造高層建築物の計画が増加し、コンクリートの高強度化が必要となっている。高性能減水剤のみを利用した現場打ちコンクリートの高強度化にも限界が見られている一方、超微粉末「シリカフェーム」を利用した高強度コンクリートの開発及び製造が注目され、1982年のノルウエーにおける「シリカフェームの利用に関するセミナー」、翌1983年の「産業副産物のコンクリートへの利用に関する国際会議」等を通じてその顕著な効果が認識された¹⁾。本研究は産業副産物の有効利用という観点でシリカフェームとフライアッシュを混入した高強度コンクリートのワーカビリティと力学的特性を実験的に研究し、その適用可能性を検討したものである。

2. 実験計画及び実験方法

2.1 実験計画

実験の要因及び水準を表1に示す。水結合材比は30%とし、混和材の混入率はセメント重量に対してシリカフェームとフライアッシュ各々0, 10, 20, 及び30%の4水準とした。また目標スランプは18cmとして混和材の混入によるスランプの低下は同時添加の高性能減水剤で調整した。

表2は実験に使用したセメント、シリカフェーム(SF)、フライアッシュ(FA)、骨材及び高性能減水剤(SP剤)等の物理化学的な性質を示したものである。

2.2 コンクリートの調合、混練及び実験方法

コンクリートの調合は日本建築学会の「コンクリートの調合設計・調合管理・品質検査指針案・同解説²⁾」及び「高強度鉄筋コンクリート造設計施工指針案・同解説³⁾」の参考調合表を参考に、試し練りを行って表3のように決定した。コンクリートの混練は、粗骨材-混和材-セメント-細骨材-水の順に100ℓ強制練ミキサに投入後、3分間の練りませ(1分混練-1分休止-2分

表1. 実験の要因と水準

要因	水準	
水結合材比(%wt)	30	
混和材種類	シリカフェーム	フライアッシュ
混和材混入率(%)	0, 10, 20, 30	
SP剤添加率(%)	1.0, 1.2, 1.4, 1.6	
材令(日)	7, 28, 60, 90, 180	

表2. 使用材料の性質

セメント	早強ポルトランドセメント, 比重3.12
シリカフェーム	比重2.2, SiO ₂ 78.9%
フライアッシュ	比重2.1, SiO ₂ 63.6%
細骨材	川砂, 比重2.64, 吸水率1.11%, FM2.56
粗骨材	川砂利, 比重2.59, 吸水率1.65%, FM6.78
高性能減水剤	主成分Synthetic Polymers, 比重1.10

表3. コンクリートの調合

調合種類	水結合材比(%wt)	SP剤添加率(%)	目標スランプ(cm)	細骨材率(%)	単位水量(kg/m ³)	絶対容積(ℓ/m ³)			
						セメント	混和材	細骨材	粗骨材
Plain	30	1.0	18	35	195	206	0	206	383
SF 10		1.2			193	183	30	204	380
SF 20		1.4			192	162	58	202	376
SF 30		1.6			190	140	87	200	373
FA 10		1.2			193	183	31	204	379
FA 20		1.4			191	161	61	202	375
FA 30		1.6			189	140	90	200	371

混練)を行った。また、シリカフェーム及びフライアッシュの混入段階で高性能減水剤を添加し、所要のコンシステンシーを得た。実験項目は、スランプ、空気量、締固め係数、フロー値、単位容積重量及び練り上がり温度とし、所定の材令まで20℃の水中標準養生を行った後に圧縮強度、引張強度、動弾性係数、静弾性係数及び反発度を測定した。

3. 実験結果の分析及び検討

3.1 フレッシュコンクリートの性状の検討

シリカフェーム及びフライアッシュ混入率の変化にともなう単位容積重量及び空気量の変化を示した表4と図1によると各混和材共に混入率が增大するにつれてコンクリートの単位容積重量は少なくなる傾向が見られる。また空気量において、いずれの混和材の場合もその混入率の増加に伴い連行空気量が減少する傾向がみられ、混和材の混入率が大きくなるほど所要の空気量を得るためのAE剤を増す必要がある⁴⁾。

また、図1は各混和材の混入率ごとに初期スランプ、フロー、締固め係数を表したもので、所定のコンシステンシーを得るために、混和材の混入率が大きくなるほど高性能減水剤を増す必要があることがわかる。このような傾向は、シリカフェームが超微粒子であることから所要の施工性と作業性を得るために高性能減水剤の使用が非常に効果があるという既往の研究報告を再確認している。しかし、フライアッシュを用いた場合には所要のコンシステンシーを得るのに必要なSP剤の添加量が増加し、その程度は混入率の増加にともないほぼ直線的に増加した。これはフライアッシュを混入したコンクリートで知られている一般的な特性とは異なる結果であった。韓国産有煙炭フライアッシュは粒の形状が不整形であり、また多孔質なものも認められるなど、セメント用フライアッシュとしての品質に問題がある事によるものと考えられるが、未燃カーボンによるSP剤の吸着も考えられ、より検討を深める必要がある⁵⁾。

図2は、シリカフェーム及びフライアッシュの混入率別にスランプの経時変化を示したもので、フライアッシュを混入した場合、スランプロスがプレーンコンクリートに比べ大きくなり、このような傾向はフライアッシュ混入率が高くなるほど顕著であった。

一方、シリカフェームの場合にはスランプロスはプレーンコンクリートと類似な水準にあることを示し、さらに混入率が增大するにしたがってスランプロスが鈍化する傾向がみられ、高性能減水剤の適切な添加によっ

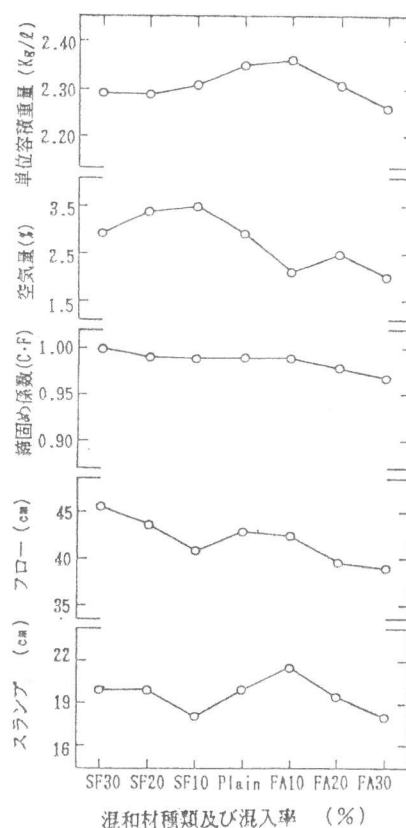


図1. シリカフェーム及びフライアッシュ混入率によるフレッシュコンクリートの諸物性変化

表4. フレッシュコンクリートの試験結果

調査種類	単位容積重量 (kg/L)	空気量 (%)	練り上がり温度 (℃)	締固め係数 (C:F)	フロー値 (cm)	スランプの経時変化 (cm)						
						0	15	30	45	60	90	120
Plain	2.35	2.9	28	0.99	43.0	20.0	13.0	11.0	9.0	7.3	5.0	4.0
SF 10	2.31	3.5	28	0.99	41.0	18.0	9.0	6.5	4.5	4.0	2.8	2.0
SF 20	2.29	3.4	28	0.99	43.5	20.0	15.5	13.5	11.0	10.0	8.5	6.0
SF 30	2.29	2.9	29	1.00	45.5	20.0	18.5	16.0	14.0	9.6	8.2	7.0
FA 10	2.36	2.1	29	0.99	42.5	21.5	7.5	7.0	6.4	6.3	4.0	3.0
FA 20	2.31	2.5	29	0.98	39.5	19.5	5.5	3.3	2.5	1.8	1.0	0.7
FA 30	2.26	2.0	29	0.97	39.0	17.0	3.2	3.0	2.0	1.5	0.5	0.5

て施工性及び作業性の改善が期待されると思われる。

3.2 硬化コンクリートの高強度特性の検討

硬化コンクリートの試験結果を示した表5と、シリカフェームとフライアッシュ混入率ごとの圧縮強度及び相対強度の材令による変化を表した図3、図5およびプレーンコンクリートの圧縮強度と混和材混入コンクリートの圧縮強度の関係を示した図6によると、材令7日の場合シリカフェームの混入率が大きくなるほど強度は高く発現しているが、フライアッシュコンクリートでは反対に低下し、このような傾向は材令28日においてさらに顕著であった。

SF30調合では、圧縮強度はプレーンコンクリートに比べ42kgf/cm²(6%)増加しているが、FA30調合では185kgf/cm²(27%)低下し、大きい差異をみせている。しかし材令60日以後、SFの場合には強度増進が鈍化しているが、FAでは継続的に増進し、材令180日のFA20ではプレーンコンクリート水準の強度、FA10の場合にはプレーンコンクリートより25kgf/cm²高い749kgf/cm²の強度を発現し、SF30の776kgf/cm²との差異も大きく現われず、初期性状とは顕著な差異をみせてい

る。このような傾向は図4の引張強度の発現にも見られている。引張強度は材令7日及び28日では圧縮強度と類似な傾向であるが、材令60日以後のSFでは引張強度の増進がほとんど現れないのに対し、FAにおいては材令180日まで継続的に増加している。このような傾向はシリカフェームの主成分のシリカが非晶質の超微粒子であるため水和活性が大きく、初期にボゾラン反応が現れたためと思われる。フライアッシュの場合には養生温度が高いほど強度増進に及ぼす影響が大きくなるものと予想される。従って高温で養生する場合に現れる長期強度増進の低下をフライアッシュの混入により抑制することができる可能性がある⁶⁾⁷⁾⁸⁾。

3.3 シリカフェームとフライアッシュを混入したコンクリートの力学的特性の検討

図7はシリカフェーム及びフライアッシュを混入したコンクリートの単位容積重量の変化を示したもので、シリカフェームとフライアッシュを混入するに従って単位容積重量は低下している。このような傾向は混入率の増大によりさらに大きく現れ、これはシリカフェーム及びフライアッシュの低い比重に起因している。

また、各混和材混入率別に反発度の変化を示した図8によると各混和剤の混入率が大きくなるほどプレーンコンクリートに比べて、SFの反発度は増加するがFAの場合には低下し、圧縮強

表5. 硬化コンクリートの試験結果

水結合材比 (%wt)		30						
混和材種類		Plain			Fly ash			
混和材混入率(%wt)		0	10	20	30	10	20	30
SF剤添加率(%)		1.0	1.2	1.4	1.6	1.2	1.4	1.6
単位容積重量 (kg/l)	7d.	2.37	2.35	2.31	2.32	2.35	2.35	2.31
	28d.	2.38	2.35	2.34	2.33	2.37	2.36	2.32
	60d.	2.44	2.39	2.37	2.38	2.43	2.39	2.37
	90d.	2.42	2.40	2.40	2.37	2.44	2.39	2.33
	180d.	2.44	2.39	2.38	2.36	2.43	2.40	2.37
圧縮強度 (kgf/cm ²)	7d.	527	597	538	573	497	490	471
	28d.	678	692	712	720	659	561	493
	60d.	711	733	732	760	714	655	555
	90d.	720	722	746	772	720	683	613
	180d.	724	736	762	776	749	709	659
圧縮強度 発現比率 (28日強度 に対する%)	7d.	78	86	76	80	75	87	96
	28d.	100	100	100	100	100	100	100
	60d.	105	106	103	106	108	117	113
	90d.	106	104	105	107	109	122	124
	180d.	107	106	107	108	114	126	134
引張強度 (kgf/cm ²)	7d.	35	38	41	45	40	39	30
	28d.	42	43	47	48	44	44	36
	60d.	44	46	46	47	46	46	39
	90d.	45	46	47	48	48	47	42
	180d.	46	47	47	48	49	48	44
圧縮強度と 引張強度の比 (F _c /F _t)	7d.	1/15	1/16	1/13	1/13	1/12	1/13	1/16
	28d.	1/16	1/15	1/15	1/15	1/15	1/13	1/14
	60d.	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/14	1/14
	90d.	1/16	1/16	1/16	1/16	1/15	1/15	1/15
	180d.	1/16	1/16	1/16	1/16	1/15	1/15	1/15
動弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)	7d.	3.64	3.43	3.41	3.44	3.49	3.24	3.13
	28d.	3.77	3.72	3.60	3.53	3.73	3.59	3.49
	60d.	3.90	3.83	3.69	3.65	3.97	3.78	3.71
	90d.	4.00	3.80	3.69	3.60	3.94	3.74	3.80
	180d.	4.03	3.81	3.67	3.66	4.06	3.89	3.84
静弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)	7d.	2.45	2.60	2.48	2.49	2.29	2.30	2.29
	28d.	2.90	2.71	2.60	2.58	2.69	2.49	2.39
	60d.	2.95	2.74	2.65	2.70	2.95	2.77	2.34
	90d.	3.05	2.84	2.80	2.72	3.00	2.85	2.90
	180d.	3.11	2.95	2.90	2.84	3.07	2.91	2.89
反発度 (R.N)	7d.	40	40	38	40	38	38	34
	28d.	44	45	46	46	43	42	39
	60d.	47	47	48	48	46	44	41
	90d.	48	47	49	50	48	46	43
	180d.	48	48	50	50	48	47	44

度の性状と類似な傾向をみせている。図9と図10はシリカフェーム及びフライアッシュ混入率ごとに静弾性係数と動弾性係数の変化を示したもので、一般的に混和材を混入したコンクリートがプレーンコンクリートに比べ、動弾性係数・静弾性係数ともに低下する傾向がみられ、その低下率も混和材の混入量が大きくなるほど大きく現れている。このような傾向は、図11に示すようにコンクリートの弾性係数が単位容積重量と密接な関係があることにより、混和材混入により単位容積重量が低下することに起因した現象と思われるが、より深度ある研究が必要であろう⁷⁾⁸⁾。

図12は圧縮強度と引張強度の関係を示したもので、コンクリートの引張強度は圧縮強度の増加とともに増しているが、圧縮強度が700kgf/cm²以上の場合にその増加は鈍化する傾向をみせ、引張強度と圧縮強度の比の値は、表5に示すようにプレーンコンクリートで1/15~1/16、シリカフェームコンクリート1/13~1/16、フライアッシュコンクリート1/12~1/16で、普通コンクリートでの1/9~1/13とは著しい異差がみられる。さらに、圧縮強度と引張強度の実験式は $F_t = 1.8\sqrt{F_c}$ と $F_t = 1.6\sqrt{F_c}$ の間に存在していることがわかる。

図13と図14は圧縮強度と動弾性係数及び圧縮強度と静弾性係数の関係を示したもので、体的に見て混和材を混入したコンクリートがプレーンコンクリートに比べて弾性係数が低い傾向がみられ、このような傾向はシリカフェームの場合において、さらに大きく現れている。産業副産物をコンクリート混和材として使用するコンクリートの力学的特性に関するより多角的な深度ある研究が必要なることを示唆している。図15は反発度と圧縮強度の関係を示したもので、本実験

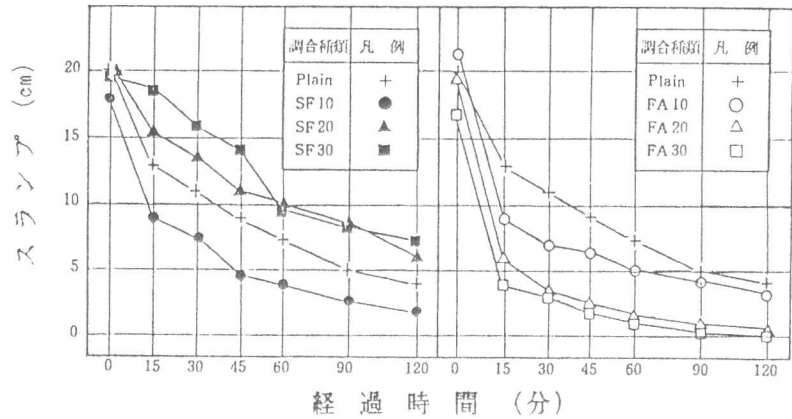


図2. シリカフェーム及びフライアッシュ混入率別スランプの経時変化

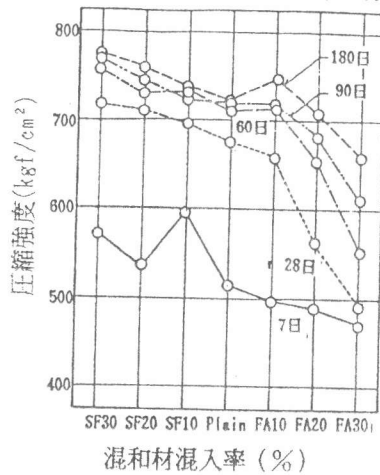


図3. シリカフェーム及びフライアッシュ混入率別材令による圧縮強度の変化

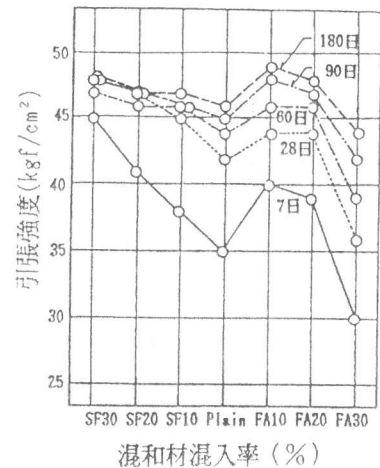


図4. シリカフェーム及びフライアッシュ混入率別材令による引張強度の変化

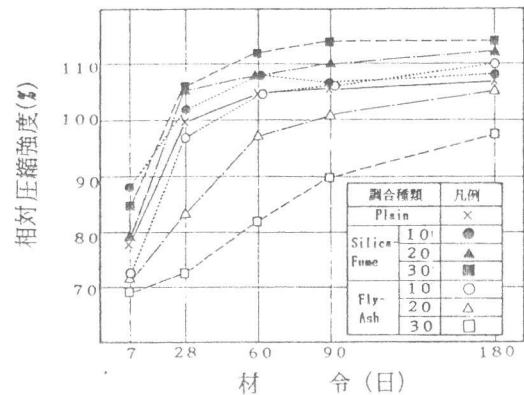


図5. プレーンコンクリートの材令28日を基準とした各調合条件別材令による相対圧縮強度の変化

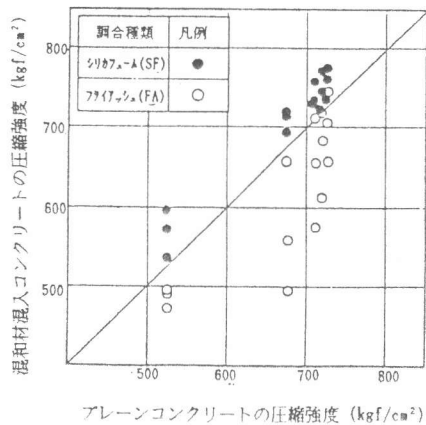


図6. プレーンコンクリートと混和材混入コンクリートの圧縮強度の関係

の結果は小阪の実験式と類似な傾向を示し、実験値に対する回帰式の適合性が高い。この範囲の強度推定には反発度法が有効であると思われる。

4. まとめ

シリカフューム及びフライアッシュを混入した高強度コンクリートのワーカビリティと力学的特性を検討した本研究の結果を要約すると次のようになる。

- 1) 各混和材の混入率が増加するに従ってコンクリートの単位容積重量及び空気量は低下する傾向がみられ、プレーンコンクリートと同一スランプを得るための高性能減水剤の量は増加する。また、フライアッシュコンクリートではシリカフュームコンクリートよりスランプロスが大きく現れている。
- 2) シリカフュームの混入率が多くなるほど、フライアッシュの混入率が少なくなるほど、圧縮及び引張強度が高くなり、材令180日のSF30及びFA10の圧縮強度でそれぞれ776、749 kgf/cm²の高強度コンクリートの製作が可能であった。

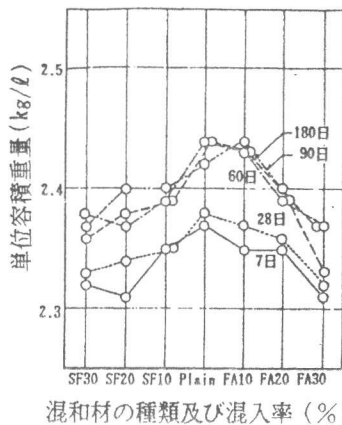


図7. シリカフューム及びフライアッシュ混入率別材令による単位容積重量の変化

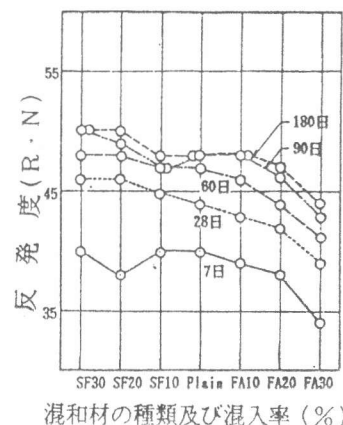


図8. シリカフューム及びフライアッシュ混入率別材令による反発度の変化

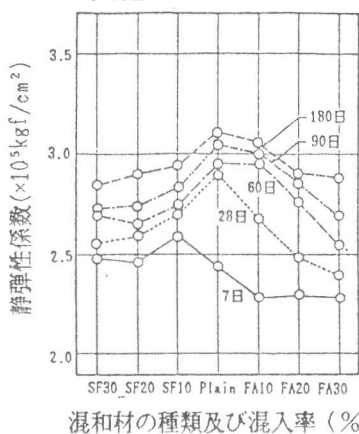


図9. シリカフューム及びフライアッシュ混入率別材令による静弾性係数の変化

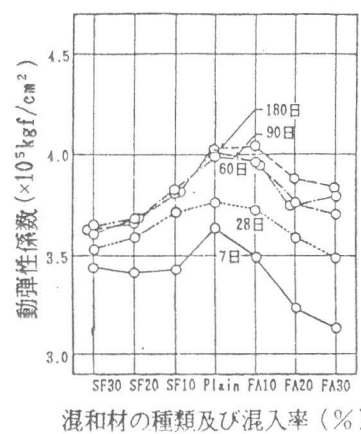


図10. シリカフューム及びフライアッシュ混入率別材令による動弾性係数の変化

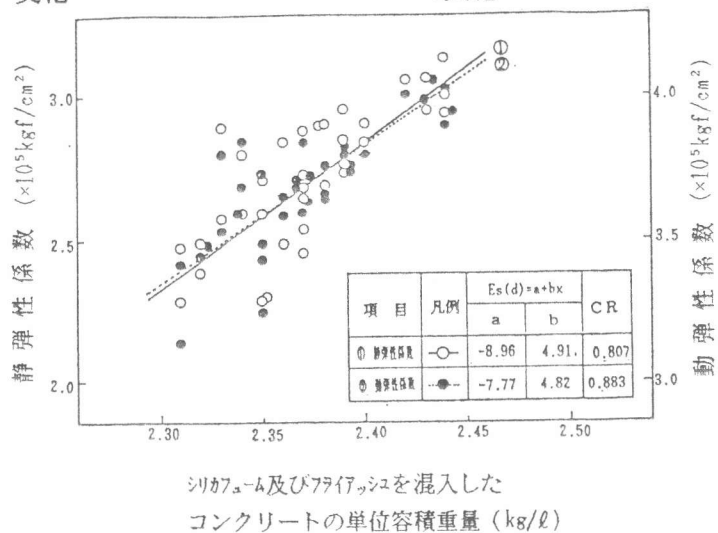


図11. シリカフューム及びフライアッシュを混入したコンクリートの単位容積重量と静弾性係数及び動弾性係数の関係

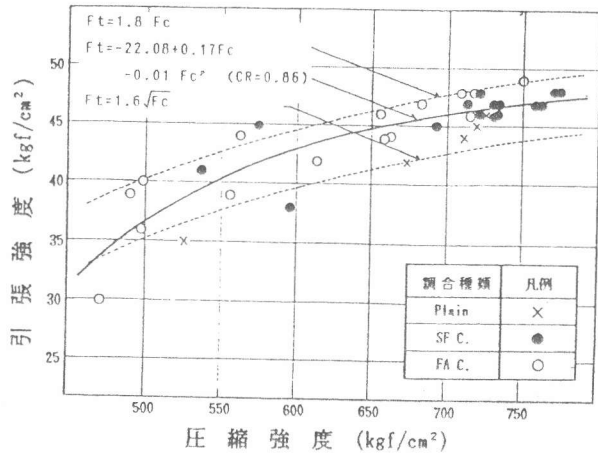


図12. 圧縮強度と引張強度の関係

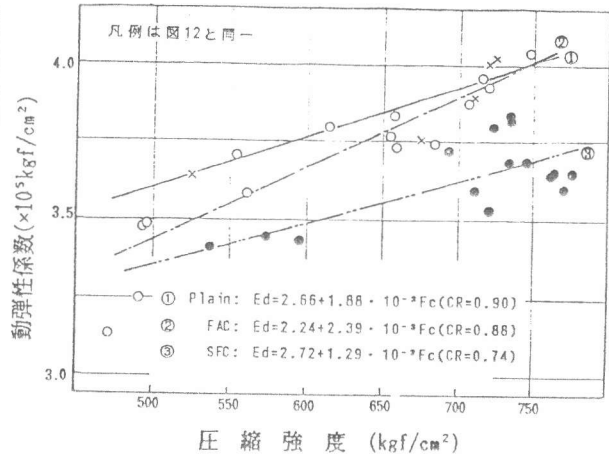


図13. 圧縮強度と動弾性係数の関係

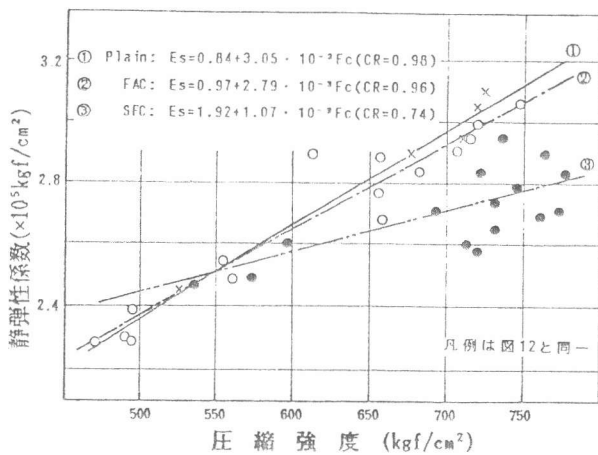


図14. 圧縮強度と静弾性係数の関係

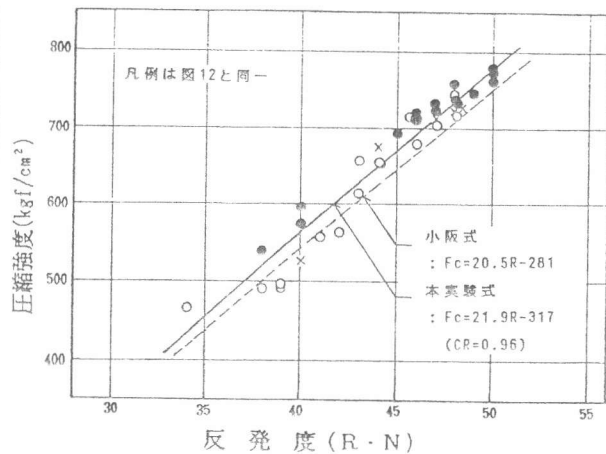


図15. 反発度と圧縮強度の関係

3) 混和材を混入した高強度コンクリートの場合、圧縮強度に対する引張強度の比率は全体的に1/12~1/16で普通強度コンクリートに比べ小さく、圧縮強度の増加によりさらに小さくなる傾向がみられフライアッシュを混入したコンクリートは長期にわたる引張強度の増進が著しい。

4) いずれの混和材を混入した場合もプレーンコンクリートに比べ、動弾性係数及び静弾性係数が低く、このような傾向はシリカフェームの場合顕著である。また、混和材を混入したコンクリートの強度推定には、反発度法が有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本セメント協会：シリカフェームを用いたコンクリート、セメント・コンクリート、No.480 Feb, P.41~47
- 2) 日本建築学会：コンクリートの調合設計・調合管理・品質検査指針案・同解説、1983, P.68~71
- 3) 日本建築学会：高強度鉄筋コンクリート造設計施工指針案・同解説、1976, P.69~95
- 4) 長滝重義 他：シリカフェームとコンクリート、コンクリート工学、Vol133, No.5 May 1985, P.5~15
- 5) 大槻光雄 他：最近のフライアッシュの性状、セメント・コンクリート、No.443、1984, P.43~49
- 6) 柿崎正義 他：シリカフェーム、アダム系鉱物、フライアッシュを用いた超高強度コンクリート（その1及びその2）、No.482とNo.483, 1987.
- 7) 高木宣章 他：シリカフェームを混入したコンクリートの特性について、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、1984, P.110~120
- 8) 三浦律彦：シリカフェームを混入した高強度コンクリートの基礎性状、第9回コンクリート工学年次講演会論文集、1987, P.45~50