

論文 細骨材を粗粉フライアッシュで置換したコンクリートのフレッシュ性状

上原 伸郎^{*1}・長岡 誠一^{*2}・富加見 徳治^{*3}・澤井 壽一^{*4}

要旨：フライアッシュ有効利用量の拡大を目的として、JIS A 6201-1999 IV種に相当する、直径 $20\mu\text{m}$ 以下の微粒子を選別した後の粗粉フライアッシュを、細骨材の一部として置換したコンクリートのフレッシュ性状ならびにポンプ圧送性を確認した。この結果、一部の細骨材を除き、適当な置換率および最適細骨材率を選定することによって、コンクリートの単位水量は低減可能であった。ポンプ圧送性は、品質の良好でない細骨材を置換した場合、圧送負荷値が低減される可能性も示唆された。

キーワード：細骨材, フライアッシュ, 粗粉, 置換, フレッシュ, ポンプ圧送

1. はじめに

石炭火力発電所は石炭資源の賦存量が多く、また原料供給の安定性、経済性に優れていることから、年々増加する傾向を示し、これに伴い石炭灰の発生量も大幅に増加することが見込まれている¹⁾。さらに、平成11年2月には、フライアッシュの有効利用量拡大を目的として日本工業規格(JIS A 6201)が改正された。この改正によって、フライアッシュの品質は4種類に分類され、それぞれの品質に対応した用途、目的への利用が可能となった。一方で、フライアッシュをコンクリート用の混和材料として使用する研究が盛んに行われており、フライアッシュの細骨材代替としての適用性についても検討が始められている。その一つとして、直径 $20\mu\text{m}$ 以下の微粒子を選別した後の残滓(以下、「粗粉フライアッシュ」と称す)を細骨材代替として使用した場合、20vol.%程度置換することによって、高性能 AE 減水剤の添加量を低減できることが明らかになっている²⁾。

本研究では、細骨材の一部を粗粉フライアッシュで置換したコンクリートについて、

表-1 使用材料

材 料	仕 様 等		
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度; 3.15g/cm^3 , プレーン; $3,350\text{cm}^2/\text{g}$		
細骨材 (S)	川砂	a	密度; 2.60g/cm^3 , FM; 3.04 野洲川産
		b	密度; 2.59g/cm^3 , FM; 3.06 阿南市大野町那須川産
	海砂	a	密度; 2.56g/cm^3 , FM; 1.78 香川県室木島沖産
		b	密度; 2.55g/cm^3 , FM; 2.93 愛媛県今治沖産
	砕砂	a	密度; 2.56g/cm^3 , FM; 3.30 小松島市前原町産
		b	密度; 2.55g/cm^3 , FM; 2.84 周桑郡小松町産
粗骨材 (G)	碎石	1	Gmax; 20mm , 密度; 2.68g/cm^3 FM; 6.86 , 高槻市産
		2	Gmax; 20mm , 密度; 2.60g/cm^3 FM; 6.68 , 周桑郡小松町産
混和材 (FAC)	粗粉フライアッシュ		
混和剤	AE 減水剤 (AD)	1	リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体
		2	リグニンスルホン酸塩と特殊界面活性剤
	AE 剤 (AE)	1	アルキルアリルスルホン酸化合物系陰イオン界面活性剤
		2	天然樹脂酸塩
		3	高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン活性剤
		4	アニオン系およびノニオン系特殊界面活性剤

*1 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 (正会員)

*2 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所主任研究員 (正会員)

*3 四国電力(株)建設部計画課

*4 テクノ・リソース(株)環境事業本部企画開発部課長

その置換率がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響を確認するとともに、ポンプ圧送性についても評価した。なお、今回使用した粗粉フライアッシュは JIS A 6201-1999 IV種に相当するものである。

2. 試験概要

2.1 使用材料

細骨材には 6 種類を用い、土木学会の定める粒度の標準範囲内で混合、あるいは単独で使用した。混和剤は実用性を考慮して一般的に使用されている AE 減水剤を 2 銘柄(AD1, AD2), AE 剤については、標準的なもの 2 銘柄(AE1, AE2), フライアッシュ用 2 銘柄(AE3, AE4)を使用した。

使用材料を表-1, 細骨材の混合比率および混合後の品質を表-2, 粗粉フライアッシュの品質を表-3 に示す。

2.2 配合

粗粉フライアッシュは細骨材に対する容積置換としたが、細骨材 S1,S2,S3 および S4 については全細骨材容積に対して置換し、細骨材 S5 および S6 については、細骨材中の海砂 b のみを容積

表-2 細骨材の混合比率および品質

記号 (Sx)	混合比率(%)						密度 (g/cm ³)	FM
	川砂		海砂		砕砂			
	a	b	a	b	a	b		
S1	100						2.60	3.04
S2		60	40				2.58	2.55
S3			30		70		2.56	2.84
S4						100	2.55	2.84
S5				40		60	2.55	2.88
S6				60		40	2.55	2.89

置換することとした。

目標スランプ値は 8cm および 18cm の 2 水準とし、目標空気量は 4.5%一定とした。水セメント比は 60%一定(一部 59.5%)とした。AE 減水剤の添加率はセメント質量に対して 0.25%(AD1), または 0.50%(AD2)とし、スランプは単位水量で調整した。また、空気量は AE 剤の添加量で調整した。最適細骨材率は、所定のスランプが得られる範囲内において、単位水量が最小となるようにこれを定めた。なお配合表では、粗粉フライアッシュを細骨材の一部として取り扱うこととしたため、全細骨材単位容積中には粗粉フライアッシュの容積も含まれる。

表-3 粗粉フライアッシュの品質

種別	化学分析			湿分 (%)	物理特性			フロー 値比 (%)	活性度指数 (%)	
	ig.loss (%)	SiO ₂ (%)	M.B.吸着量 (mg/g)		密度 (g/cm ³)	45 μ m ふる い残分(%)	ブレン値 (cm ² /g)		28 日	91 日
試験品	1.7	55.2	0.24	0.1	2.21	17.9	1890	102	75	86
JIS IV種	≤5.0	45.0≤		≤1.0	1.95≤	≤70	1,500≤	75≤	60≤	70≤

表-4 配合の一例

細骨材 種 別 (Sx)	FAC 置換率 (%)	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)				AE (C×%)	
					W	C	S			G
							FAC	Sx		
S1	0	60.0	60.0	48.0	172	287	0	854	965	0.001
	10		47.1	44.0	154	257	70	732	1080	0.007
	20		40.1	41.0	157	262	130	603	1130	0.019
S2	0		60.0	42.0	158	263	0	757	1109	0.005
	10		48.1	39.0	151	252	62	641	1184	0.014
	20		42.0	35.0	155	258	111	507	1250	0.019
S3	0		60.0	47.0	156	260	0	862	1018	0.005
	10		47.3	42.0	149	248	67	704	1130	0.014
	20		41.1	38.0	157	262	120	556	1188	0.025
S4	0	59.5	59.5	38.0	164	276	0	682	1134	0.012
	10		49.8	35.0	166	279	54	563	1183	0.028

W/B: B はセメントと粗粉フライアッシュの合計質量, AE 減水剤: S1,S2, および S3 は AD1, S4 は AD2, AE 剤: S1,S2, および S3 は AE1, S4 は AE2, 粗骨材: S1,S2, および S3 は G1, S4 は G2

配合の一例として細骨材 S1, S2, S3 および S4 を使用した、目標スランプ値 8cm の配合を表-4 に示す。

2.3 試験項目および方法

(1) フレッシュコンクリート

①スランプ：JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」

②空気量：JIS A 1128「まだ固まらないコンクリートの空気量の試験方法(圧力法)」

③ブリーディング：JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」

④凝結時間：JIS A 6204 附属書 1「コンクリートの凝結時間測定方法」

(2) ポンプ圧送性

水平管(100A, L=68~104m)の圧力損失量によ

り評価することとし、水平直線部分の2点間(55m)で管内圧力を測定し圧力損失量を求めることとした。ポンプ車にはピストン型(最大吐出量 115m³/h, 最大吐出圧 6.57N/mm²)を用い、ポンプ吐出量は約 20m³/h とした。また、計測にはフラッシュダイヤグラム型圧力計を使用した。

3. 試験結果

3.1 フレッシュコンクリート

(1) 最適細骨材率

細骨材を粗粉フライアッシュで置換することにより、コンクリート中の細粒部分が増加することから、表-4 に示すように、粗粉フライアッシュの置換率約 10%の増加に対して最適細骨材率は約 4%小さくなった。

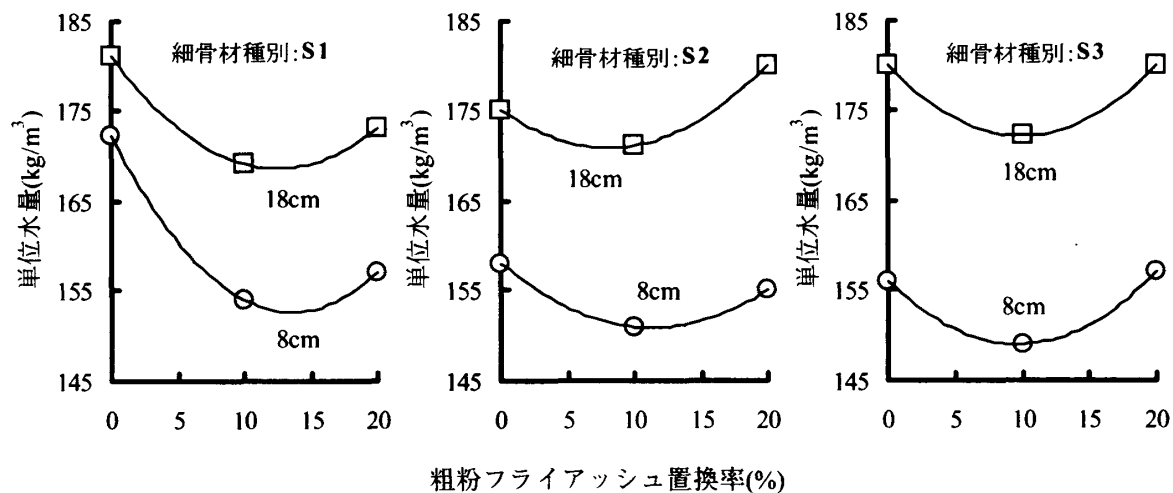


図-1 粗粉フライアッシュ置換率と単位水量の関係(S1, S2 および S3)

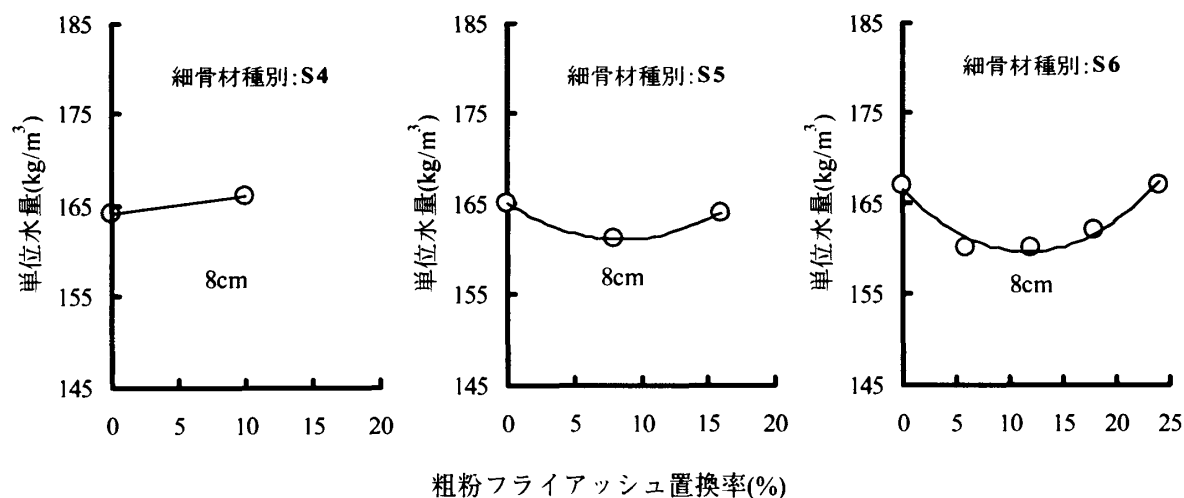


図-2 粗粉フライアッシュ置換率と単位水量の関係(S4, S5 および S6)

(2)粗粉フライアッシュ置換率と単位水量

細骨材 S1,S2 および S3 を使用した場合の粗粉フライアッシュ置換率と単位水量の関係を図-1, 同じく S4,S5 および S6 を使用したものを図-2 に示す。

ここで、セメントをフライアッシュで置換した場合のコンクリートの流動性は、フライアッシュ自体の形状や含有炭素の形状の影響を受け、特に低品質(Ⅲ種相当)のものでは単位水量の低減を期待することは難しいとされている³⁾。

しかしながら本研究では、S4 以外の細骨材で、減水効果が若干異なるものの、目標スランプに関係なく 10%程度を粗粉フライアッシュで置換することにより、単位水量は減少した。

理由としては、次のようなことが考えられる。細骨材代替としてフライアッシュを用いた場合には、 $20\mu\text{m}$ 以下の良質な球形微粒子を選別した残滓である粗粉フライアッシュを用いた場合であっても、ある程度のボールベアリング作用、あるいはコンクリートとしての粒度構成の改善が期待されること。さらに、本研究で用いた未燃炭素の少ない粗粉フライアッシュでは、含有炭素の形状による影響、あるいは AE 減水剤の吸着による影響よりも、前者の効果が良好に作用したためであると考えられる。

しかしながら一方で、S4 のような結果も同時に示されている。ここで、S3 および S4 は FM 値が同一であるとともに、粒度分布もほぼ同一であることを考えると、減水効果の違いは主に細骨材の粒子形状によるものと考えられる。したがって、細骨材を粗粉フライアッシュで置換することによる減水効果は、フライアッシュの品質、細骨材の粒度、あるいは粒度分布のみならず、細骨材の種類、粒形にも大きく影響されるものと考えられる。

(3)粗粉フライアッシュ置換率と AE 剤量

各細骨材を用い、スランプを 8cm としたコンクリートにおける粗粉フライアッシュ置換率と AE 剤添加率の関係を図-3 に示す。なお、S1,S2 および S3 は AE 減水剤 AD1 と AE 剤 AE1 を使

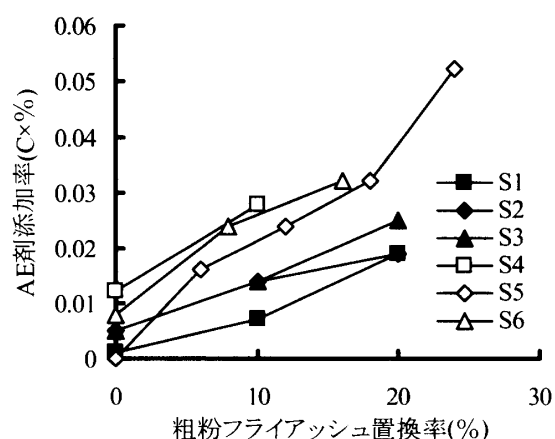


図-3 粗粉フライアッシュ置換率と AE 剤添加率の関係

用し、S4,S5 および S6 は同じく AD2 と AE2 を使用したものである。

AE 剤 AE1 と AE2 では、所定の空気量を連行させるために必要な標準添加量が異なることから傾きが異なるものの、粗粉フライアッシュ置換率の増加に伴い AE 剤添加率は、ほぼ直線的に増加する傾向を示した。今回用いた粗粉フライアッシュは、未燃炭素分の比較的少ないものであったが、細骨材に置換して用いたことにより単位量が多くなったため、AE 成分の吸着による影響が現れたものと考えられる。

(4)空気量の経時変化

細骨材 S6 について空気量の経時変化を測定した。なお、AE 剤には AE2 を使用し、特に粗粉フライアッシュ置換率 12%のものについては、AE2 のほか FA 用 AE 剤 AE3 および AE4 についても試験を実施した。粗粉フライアッシュ置換率を変化させた場合の試験結果を図-4、粗粉フライアッシュ置換率を 12%とし、AE 剤の種類を変えた場合の試験結果を図-5 に示す。

無置換のコンクリートは、60 分後で 0.6%程度空気量が減少した。これに対し、粗粉フライアッシュによって置換したコンクリートは、AE 剤量が多くなっているにも係らず、置換率に関係なく 60 分後に 1.5%以上減少しており、未燃炭素による AE 成分の吸着が経時的に持続することが明らかである。一方、FA 用 AE 剤を用いたコンクリートの空気量の経時変化は、AE3 と AE4

で大きく異なった。AE3を用いたものの減少量は、初期の段階(30分)から低く抑えられており、60分後で1.2%と効果が窺える結果を示した。しかしながらAE4を用いたものは、逆に、一般用(AE2)よりも減少量が大きくなり、60分後で2.4%減少しさらに90分後まで大きく減少した。FA

用AE剤については、「フライアッシュ用AE剤品質規格(案)」(JSCE-D107-1999)によって規定されているが、FA用AE剤を用いる場合には、使用するフライアッシュを用いて試験練りを実施し、その効果を十分確認する必要があるものと考えられる。

(5)ブリーディングおよび凝結時間

粗粉フライアッシュ置換率を変化させた場合のブリーディング率および凝結時間を一例として表-5に示す。

フライアッシュによりセメントの一部を置換した場合、流動性が向上するために単位水量を低減することができるが、凝結が遅延するため、結果としてブリーディングが増加することがある。特に、粉末度の低いフライアッシュでは、ブリーディング率の増加が大きい。しかしながら本研究では、細骨材をフライアッシュで置換しているため、単位セメント量が減少していないことから凝結は遅延しないことと、単位水量

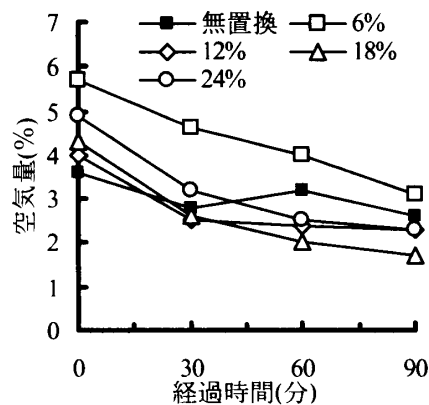


図-4 粗粉フライアッシュ置換率と空気量の経時変化

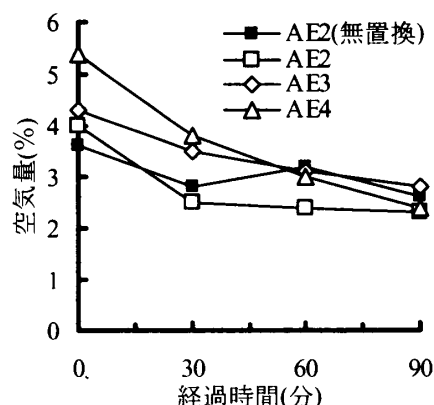


図-5 AE剤の種類と空気量の経時変化

表-5 粗粉フライアッシュ置換率とブリーディング率および凝結時間との関係(細骨材種別：S6)

置換率(%)		0	6	12	18	24
ブリーディング率(%)		3.91	3.41	3.43	3.04	3.50
凝結時間(h-m)	始発	6-30	6-30	6-30	6-45	6-30
	終結	8-15	8-30	8-45	8-45	8-30

が低減されたことおよび微粉量が増加することにより、ブリーディング特性は無置換のコンクリートに比べて同等以上の性能を有することが確認された。

(6)ポンプ圧送性の評価

ポンプ圧送試験に用いた配合を表-6、試験結果を表-7に示す。

配合は実績の多い配合Aを基準とし、海砂を粗粉フライアッシュで置換した配合B、砕砂のみを使用した配合C、および配合Cを粗粉フライアッシュで置換した配合Dの4種類とした。

水平管1.0mあたりの圧力損失量を比較すると、配合Aは0.019N/mm²/mであるのに対し、その他の配合は0.031~0.033N/mm²/mを示した。今回の

表-6 ポンプ圧送に用いたコンクリートの配合

配合	FAC 置換率 (%)	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)					AD2 (C×%)	AE2 (C×%)	
					W	C	S					G1
							FAC	海砂 b	砕砂 b			
A	0	59.5	59.5	46.3	170	286	0	492	328	969	0.50	0.024
B	12		45.8	45.3	167	281	84	388	323	994		0.048
C	0		59.5	46.3	170	286	0	0	820	969		0.028
D	10		47.7	45.3	168	282	70	0	725	992		0.048

W/B：Bはセメントと粗粉フライアッシュの合計質量

表-7 ポンプ圧送試験結果

配合	フレッシュ(圧送前)			フレッシュ(圧送後)		圧縮強度(N/mm ²)			管内圧力測定		
	slump (cm)	Air (%)	C.T. (°C)	slump (cm)	Air (%)	7 日	28 日	91 日	水平距離 (m)	圧力差 (N/mm ²)	管内圧力損失 (N/mm ² /m)
A	11.5	6.1	30.3	9.6	5.0	18.8	25.6	30.9	55	1.064	0.019
B	9.5	4.0	30.6	8.0	2.6	21.9	31.9	39.5		1.818	0.033
C	10.5	5.1	30.8	—	—	17.4	25.7	30.9		1.714	0.031
D	8.5	4.0	30.7	7.2	2.6	19.8	30.3	37.3		1.746	0.032

圧送条件では、0.016～0.019N/mm²/m 程度が一般的な値であると考えられるため⁴⁾、配合 B,C および D は明らかに大きな値であると判断される。この原因として、配合 B および D については、配合 A と比べて単位粉体量が増加しコンクリートの粘性が増加したためと考えられ、配合 C については、砕砂の細粒分量が影響しているものと考えられる。しかしながら、配合 D は配合 C よりスランプが小さいにもかかわらず、圧力損失の差は配合 A と B の差より小さくほぼ同等の値となっている。有スランプコンクリートをポンプ圧送する場合、配管内のコンクリート流は、そのほとんどが管壁におけるすべりによって生じる。配合 D において微粉量が多くなっているにもかかわらず、配合 C と同等の圧力損失量となった理由としては、粗粉フライアッシュで砕砂を置換したことにより、砕砂のみの場合に比べ管壁部分の潤滑層形成が良好になったことが考えられる。また、圧送前後の物性値を比較すると、粗粉フライアッシュで置換した配合において空気量の減少量が若干大きくなったものの、顕著な差は認められない。

4. まとめ

(1)細骨材の一部を JIS A 6201-1999 IV種に相当する粗粉フライアッシュで置換した場合、適当な置換率ならびに最適細骨材率を選定することにより、コンクリートの単位水量は低減可能である。ただし、細骨材種によっては FM 値および粒度分布が同等であっても減水効果が得られないものも認められることから、細骨材の粒子形状も大きく影響を及ぼすものと考えられる。

(2)粗粉フライアッシュ置換率の増加に伴って

AE 剤添加量は漸増する。また FA 用 AE 剤も、銘柄によっては空気量の経時変化が大きいものが認められることから、AE 剤を選定する場合には、使用するフライアッシュとの相性を確認する必要があるものと考えられる。

(3)細骨材を粗粉フライアッシュにより置換した場合には、セメントをフライアッシュで置換した場合と異なり、単位セメント量が減少していないことから凝結は遅延しない。また、単位水量が低減されることおよび微粉量が増加することにより、ブリーディング特性は無置換のコンクリートに比べて同等以上の性能を有する。

(4)細骨材を粗粉フライアッシュで置換したコンクリートの圧力損失量は、必ずしも小さな値を示さなかった。しかし、ポンプ圧送性には細骨材の品質が大きく影響を及ぼすため、品質が良好でない細骨材を用いる場合には、その一部を粗粉フライアッシュで置換することにより、ポンプ圧送性の改善が期待される。

参考文献

- 1)環境技術協会,日本フライアッシュ協会:石炭灰ハンドブック,pp. I-1-2,1995
- 2)小谷正人ほか:分級粗粉フライアッシュを多量に用いたコンクリートの強度発現性,第 53 回セメント技術大会講演要旨,pp.124-125,1999
- 3)長瀧重義,大賀宏行,三宅且仁:フライアッシュを混和したコンクリートの強度とクリープ特性,セメント技術年報,No.37,pp.190-193,1983
- 4)土木学会コンクリート施工研究小委員会:コンクリートのポンプ施工指針(案),コンクリート・ライブラリー第 57 号,pp.11-25,1985