流動化コンクリートの実験的研究*

児 玉 和 巳** 御 所 窪 邦 男***
中 川 脩*** 福 馬 直 昭****

Experimental Studies on Flowing Concretes

by

Kazumi KODAMA

(Nisso Master Builders Co. Ltd., Tokyo)

Kunio GOSHOKUBO, Hisashi NAKAGAWA

(Nisso Master Builders Co. Ltd., Chigasaki)

and Naoaki FUKUMA

(Pozzolite Bussan Co. Ltd., Tokyo)

Flowing concrete was produced by adding some superplasticizers and their properties were examined experimentally. The results obtained are as follows.

(1) The most suitable sand percentage in flowing concrete can be approximately determined from the amount of slump.

(2) There is such trend that the flowing properties improve with increasing unit amount of cement. It is desirable that concrete contains more than 420 kg/m³ of fine particles of less than 0.3 mm size.

(3) The flowing property and slump loss of flowing concrete vary depending upon the temperature and timing of the addition of superplasticizers.

(4) The compressive strength develops up to three years in the same trend as in the case of low slump concrete.

(5) The relationship between compressive strength and tensile one or static modulus of elasticity is the same as that of conventional concrete.

(6) The drying shrinkage and the durability to freezing and thawing are the same as those of low slump concrete.

Also, several examples of job site application of the flowing concrete were given along with the mix proportion used and the reason of adopting the present method.

(Received Aug. 27, 1979)

キー・ワード：流動化コンクリート，高性能減水剤，あと添加，乾燥収縮，凍結融解に対する抵抗性

1 ま え が き

ここ数年来，減水剤の新しい使用方法，特に高性能減水剤のあと添加による流動化コンクリート工法が注目されてその実用化研究が進められ，すでにその施工実績は累計 100 万 m³ を超えるものと思われる。しかし，実際の現場への適用は試験施工の段階にあるともいえ，一般的な工法として利用していくためには，その基礎的データの蓄積，施工管理上の問題点など，まだ解明すべき特性，解決すべき問題点を数多くもって

いるといえる。

流動化コンクリートの目的は，コンクリートの施工性と品質性能の改善であるといわれている。流動化コンクリートは，1971年頃西ドイツで硬練りコンクリートの施工性改善を目的として考案され，我が国で用いられたのは昭和50年以降である。我が国の建築工事においては，従来より 21 cm の軟練りコンクリートが多用されてきたので施工性の改善という目的より施工性を変えることなく，硬練りコンクリートに近い品質のものを得ようとするコンクリートの品質改善という目的の方が強く意識されている。しかし土木用コンクリートでは，西ドイツ，イギリス等と同様，施工性改善というメリットを生かした使い方，あるいは，高強度

* 原稿受理 昭和54年8月27日

** 正 会 員 日曹マスタビルダーズ(株) 東京都港区六本木

*** 日曹マスタビルダーズ(株)中央研究所 茅ヶ崎市萩園

**** ポゾリス物産(株) 東京都港区六本木

でかつ大きな流動性を要求されるコンクリートにおいて単位セメント量を低減するという目的での使用などが考えられる。

本研究は、高性能減水剤系の流動化剤を用いた流動化コンクリートのワーカビリティ、硬化後のコンクリートの諸性状についての実験結果に対し、考察を加え、現場での施工例を挙げて本工法をより一般的なものとして利用していくための一助とするためのものである。

2 実験概要

2.1 使用材料

2.1.1 セメントおよび骨材 セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材は大井川と鬼怒川産川砂の混合砂（比重=2.62, F.M.=2.80）、粗骨材は大井川産の川砂利（比重=2.64, 単位容積質量=1690 kg/m³, 最大寸法=25 mm）を使用した。

2.1.2 混和剤 ベースコンクリートに用いた混和剤、ならびに流動化剤を Table I に示す。

2.2 練り混ぜ方法

100 l 可傾式ミキサーを用いて全材料投入後3分間ベースコンクリートを練り混ぜた後、ただちに4rpmの回転数で所定時間までアジテートしてから流動化剤を所要量添加し30秒間、通常回転数で練り混ぜた。

流動化剤添加後のスランプの経時変化を試験した場合には、再び上述の回転数で所定の時間までアジテートした。

2.3 検討項目および試験方法

検討項目、要因と水準、および測定方法は Table II

に示すとおりである。

3 実験結果および考察

3.1 配合選定に関する実験

3.1.1 流動化コンクリートの適正 s/a に関する実験 所定のワーカビリティが得られるコンクリートの s/a は、同一 W/C でもスランプが14~15 cm 以上になるとスランプの増大に伴って増す必要がある。流動化コンクリートの場合も流動化後のスランプに応じて所定のワーカビリティが得られるように s/a を定める必要があるものと考えられる。

この実験は、スランプ12 cmのベースコンクリートをスランプ21 cmに流動化する場合の適正 s/a を検討するため、通常練り混ぜコンクリートと流動化コンクリートについて単位セメント量と単位水量を一定とし、 s/a を変えた場合のスランプの変化とワーカビリティを試験したもので、この結果は Fig. 1 に示すとおりであり、スランプが12 cmと21 cmの通常練り混ぜコンクリートは、それぞれ s/a が約39%と45%のときに最大のスランプ値を示し、また目視観察でもワーカビリティは良好であって、いわゆる所定のワーカビリティが得られる範囲内で単位水量が最小となる最適 s/a と推定される。

一方、 s/a の増加に応じてスランプが約14~11 cmに変動したベースコンクリートに450 cc/セメント100 kgの流動化剤F-1を添加したコンクリートの流動化後のスランプは通常練り混ぜのスランプ21 cmのコンクリートと同様に s/a が45%のときに最大値を示し、

Table I. Admixtures for base concrete and superplasticizers.

Code	Admixture for base concrete		Code	Superplasticizer
	Type	Principal constituents		Principal constituents
AE	AE-agent	Neutralized resin	F-1	Polymer of aromatic compound sulfonate
P-1	Water-reducing agent (Normal)	Lignin sulfonate	F-2	Polymer of triazin
P-2	Water-reducing agent (Retarding)	Lignin sulfonate	F-3	Polymer of alkyl aryl sulfonate
PO	Water-reducing agent (Retarding)	Polyol	F-4	Polymer of alkyl aryl sulfonate

Table II. Planning of test.

Object of test	Factor and level
Optimum s/a	s/a : 4 level, Slump: 12→21 cm, Superplasticizer: F-1
Effect of unit cement content	C: 240~500 kg/m ³ 6 level, Slump of base concrete: 8 cm, Superplasticizer: F-1
Superplasticizing effect and slump loss at time of delayed addition	C: 300 kg/m ³ , Slump: 12→21 cm, Superplasticizer: F-1 Time of delayed addition: 30, 60, 90 min., Temp.: 20, 30°C
Strengths and modulus of elasticity	C: 300 kg/m ³ , Slump: 12→18 cm, Superplasticizer: F1~F4
Comp. strength for a long term	C: 300 kg/m ³ , Slump: 12→21 cm, Superplasticizer: F-1 F-2
Drying shrinkage ¹⁾	C: 300 kg/m ³ , Slump: 12→21 cm, Superplasticizer: F-1 F-2
Durability to ²⁾ freezing and thawing	Sampling time of test: 15, 45, 90 min. C: 300 kg/m ³ , Slump: 12→21 cm, Superplasticizer: F-1 F-2

Note 1) Test drying shrinkage in accordance with JIS A 1129 (Dialgauge method)

2) Test resistance to freezing and thawing in accordance with ASTM C 666 (A method)

Fig. 1. Relationship between the sand percentage and slump.

ワーカビリティーも良好であり、また流動化剤のスランプ増大効果も最大であって適正 s/a と判断される。これらの結果は流動化コンクリートの適正 s/a は流動化後のスランプと同一スランプの通常練り混ぜコンクリートと同じに選定すれば良いことを示すもので、スランプを 12 cm から 21 cm に流動化する場合にはベースコンクリートの s/a を通常練り混ぜ 12 cm のコンクリートの適正值より約 6 % 増加する必要があることを示している。この s/a の増加は日本建築学会「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」の参考調合表のスランプ 12 cm と 21 cm のコンクリートの s/a の差にほぼ等しい。

本実験とこれに続く一連の実験結果によれば、スランプを 8~15 cm に流動化する場合には、ベースコンクリートの s/a を補正する必要がなく、またベースコンクリートのスランプ 8 または 12 cm から 18 cm に流動化する場合には、ベースコンクリートの s/a を 2 ~ 3 % 増加する必要があることを明らかにされている。

3・1・2 単位セメント量による流動化剤の流動効果の変化 イギリスセメントコンクリート協会の報告書では流動化コンクリートの配合上の注意点の一つと

してコンクリート中にセメントと細骨材を合計したもののうち、0.3 mm ふるいを通過する微粒分が最大寸法 20~40 mm のコンクリートでそれぞれ 400~450 kg/m³ 以上必要であることを指摘しているが、国内における実績でも単位セメント量が少な過ぎたり、粗粒率の比較的大きい細骨材を用いた場合には流動化剤の効果が充分発揮されない場合がある。

この実験は流動化コンクリートに対する微粒分の影響を検討するため行ったもので、ベースコンクリートのスランプと流動化剤 F-1 の使用量を一定にした場合の単位セメント量による流動効果の変化を試験した。

この結果は Table III に示すとおりであり、最大寸法 25 mm の粗骨材を用いた本実験の場合には単位セメント量 280 kg/m³ 以上では流動化剤の効果はほぼ一定であるが、それ以下では大幅に低下する傾向を示している。ちなみにコンクリート中の 0.3 mm ふるいを通過する微粒分量と流動化剤添加によるスランプ増大量の関係を示せば Fig. 2 のとおりで、イギリスセメント・コンクリート協会の報告書にみられるように最大寸法 25 mm の流動化コンクリートの場合には 0.3 mm 以下の微粒分が 420 kg/m³ 以上必要なものと思われる。

3・1・3 水セメント比および単位水量 Table III の結果および既往の研究例できらかなように流動化コンクリートの強度は空気量が同一であればベースコ

Fig. 2. Relationship between contents of parts of concrete having less than 0.3 mm of particle size and increase in slump.

Table III. Relationship between unit content of cement and slump on the flowing concrete.

No.	Mix proportion of base concrete					Slump (cm)		Air content (%)		Compressive strength (kg/cm ²)	
	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	W/C (%)	s/a (%)	Less than 0.3 mm (kg/m ³)	Base concrete	Delayed addition	Base concrete	Delayed addition	Base concrete 28 days	Delayed addition 28 days
1	240	152	63.3	44.0	392	8.5	14.0	4.2	3.9	289	286
2	280	150	53.6	42.0	423	7.5	18.0	4.3	4.2	382	388
3	320	150	46.9	41.0	457	8.0	19.0	4.1	4.2	475	483
4	380	152	40.0	39.5	508	8.0	20.0	4.0	3.8	495	499
5	440	160	36.4	38.5	560	8.5	19.5	4.2	4.0	537	546
6	500	163	32.6	38.0	614	8.5	20.5	4.0	3.7	551	539

Note: 1) Admixture base concrete=P-1, C×0.25%

Flowing concrete=F-1, 600 cc/C=100 kg

2) Superplasticizer added after mixing and agitated for 15 min.

ンクリートとほぼ同等といえるので通常の場合と同様に所要の強度が得られるようにベースコンクリートの W/C を定めればよい。しかしベースコンクリートの単位水量は $3 \cdot 1 \cdot 1$ 節で述べたように流動化後に所定のワーカビリティが得られるよう s/a を増すため、スランプを 18~21 cm に流動化する場合、 s/a の増加に応じて 4~10 kg/m³ 程度単位水量も増さなければならない。したがって、単位セメント量も通常練り混ぜの硬練りコンクリートより増大する。

流動化コンクリートの配合選定上の留意点は以上のとおりであるが、この他、流動化剤の流動効果にコンクリート温度が影響を及ぼすとの研究例もみられるので実施に際しては十分に施工条件を勘案して対処すべきものと思われる。

3・2 流動化コンクリートの諸性状

3・2・1 流動効果とスランプの経時変化 流動化剤の流動効果は、ベースコンクリートの練り混ぜ後60分程度まではほとんど変わらないが、更に添加時期が遅れると流動効果が低減するといわれている。

本実験においても流動化剤の流動効果は Fig. 3 に示すように、その添加時期と温度により異っている。

すなわち、20℃では60分程度まで流動効果はほとんど変わらないが90分になると同一スランプ増大量を得るための流動化剤の使用量は約10%程度増大する。また、30℃の場合には添加時期が早いと流動化剤の使用量は20℃の場合より減少するが、添加時期の遅れとともに使用量は著しく増大し、90分後添加では、30分後添加より約40%近くも増大する。これは、流動化剤自身の特性とセメントの水和の進行による比表面積の増大、あるいはセメントマトリックスの形成に関連するものと思われる。

現場施工に当り問題とされる流動化後のスランプの経時変化は、Fig. 3 に示すように、コンクリート温度にかかわらず、流動化時期の遅いものほど大きい傾向にあり、また全体的に20℃より30℃の方が大きい傾向にある。また、いずれの場合も流動化後20~30分までのスランプ低下量は通常練り混ぜコンクリートと同程度であって、それ以後の低下量に比べて小さいことが特徴として挙げられ、この傾向は30℃の場合により明らかに表れている。

3・2・2 強度および静弾性係数 市販されている4種類の流動化剤を用いた流動化コンクリートの圧縮

Fig. 3. Effects of delayed addition time to superplasticizing efficiency and slump loss of flowing concrete.

Table IV. Test result of strengths and static modulus of elasticity.

Admix. for base concrete	Temp. of concrete (°C)	Super-plasticizer	W/C (%)	Compressive strength (kg/cm ²)		Tensile strength (kg/cm ²)		Static modulus of elasticity (×10 ³ kg/cm ²)	
				7 days	28 days	7 days	28 days	7 days	28 days
AE	20	(Base)	54	215	342	20.8	30.5	230	275
		F-1	54	215	358	20.5	30.8	229	281
		F-2	54	220	345	21.2	30.4	231	283
		F-3	54	217	340	20.7	29.8	225	273
		F-4	54	206	310	19.8	28.7	225	262
P-2	20	(Base)	51.3	266	373	25.4	31.8	250	292
		F-1	51.3	281	385	26.0	32.6	266	293
		F-2	51.3	260	367	24.7	31.5	247	285
		F-3	51.3	277	391	25.7	32.3	263	301
		F-4	51.3	268	377	25.0	32.0	251	295

Note: Base concrete slump 12±2 cm, Flowing concrete slump 18±2 cm, Air content 4±0.5%

Fig. 4. Relationship between the compressive strength and tensile strength.

Fig. 5. Relationship between the compressive strength and static modulus of elasticity.

および引張強度と静弾性係数を試験した結果を Table IV に示し、圧縮強度と引張強度の関係および圧縮強度と静弾性係数の関係を Fig. 4, 5 に示す。

この結果で明らかのように流動化コンクリートの強度と静弾性係数はベースコンクリートとほぼ同等であり、引張強度は通常のコンクリートと同様に圧縮強度の $1/9 \sim 1/13$ の範囲内にあり、また圧縮強度と静弾性係数の関係も A. C. I の関係式にはほぼ適合する。

3・2・3 長期材令における圧縮強度 ベースコンクリートの混和剤と流動化剤の種類を変えて材令3年までの圧縮強度を試験した結果を Table V に示す。

この結果で明らかのように流動化コンクリートの圧縮強度は、いずれの配合でも試験した各材令でベースコンクリートとほぼ同等であり、材令3年まで強度の低下、その他の異常は認められなかった。

3・2・4 乾燥収縮 F-1 および F-2 を用いた流動化コンクリートについて流動化程度とアジテート時間（流動化剤の添加時間と同じ）を変えた場合の乾燥収縮をベースコンクリート、および通常練り混ぜの軟練りコンクリートと比較検討した。

この試験結果は Table VI および Fig. 6 に示すとおりであり、流動化コンクリートの乾燥収縮はベースコンクリートとほぼ同等であって、当然のことながらベースコンクリートのスランプが小さいほど少く、スランプ 21 cm の通常練り混ぜコンクリートより 9～15 %減少した。

アジテート時間による乾燥収縮の変化は Fig. 6 に示すとおりで、アジテート時間が長くなるほど乾燥収縮が増大する傾向が認められるが、現在のところこの原因は明確ではなく今後、検討を要するものと思われる。

Fig. 6. Relationship between sampling time and drying shrinkage.

3・2・5 凍結融解に対する抵抗性 流動化コンクリートの凍結融解性に対する抵抗性をベースコンクリートと比較検討した結果を Table VII および Fig. 7 に示す。一般に高性能減水剤を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性は同一空気量の AE コンクリートより小さいといわれているが、この試験結果ではベースコンクリートよりやや小さい程度で差なく充分な耐久性を示している。

4 流動化コンクリートの現場施工例^{9)~11)}

Table V. Compressive strength of flowing concrete aged for long term.

Mix Proportion of base concrete						Super-plasticizer	Dosage (cc/C=100 kg)	Slump (cm)	Air contents (%)	Compressive strength (kg/cm²)				
Admix	Dosage	C (kg/m³)	W (kg/m³)	W/C (%)	s/a (%)					7 days	28 days	91 days	1 year	3 years
P-2	C×0.25%	300	156	52	43	(Base)	—	12.0	4.0	255	380	425	466	468
						F-1	400	20.5	4.5	264	389	426	470	475
						F-2	800	21.0	4.1	262	391	437	475	479
PO	250 cc/ C=100 kg	300	156	52	43	(Base)	—	12.5	4.1	259	372	424	466	469
						F-1	400	21.0	4.2	260	380	422	462	470
						F-2	800	21.5	4.0	261	386	430	467	472

Table VI. Test result of drying shrinkage.

Mixing method	Admix, for base concrete	Design slump (cm)		Superplasticizer			Mix proportion			Drying shrinkage ³⁾ ($\times 10^{-5}$)	
		Base concrete	Flowing concrete	Type	Agitate-time	Dosage (cc/C=100 kg)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	Base concrete	Flowing concrete
Conventional ¹⁾	AE	21	—	—	15 45 90	—	63.5	45	190	74 76 76	—
	P-1	21	—	—	15 45 90	—	60.7	45	182	73 74 76	—
Delayed addition ²⁾	P-1	8	15	F-1	15	250	50.0	40	550	65	63
		8	21	F-1	15	650	52.0	15	156	—	64
		12	21	F-1	15	450	54.7	45	164	66	66
					45	450	55.3	45	166	68	70
					90	500	56.7	45	170	70	70
				F-2	15	900	54.7	45	164	—	67
					45	900	55.3	45	166	—	68
					90	1000	56.7	45	170	—	71
		15	21	F-1	15	350	56.0	45	168	68	69
				F-2	15	700	56.0	45	168	—	68

Note: 1) Agitated in 4 rpm after mixing and sampled in every fixed time indicated

2) Agitated in 4 rpm after mixing and superplasticizer in every fixed time, then sampled

3) Drying age=6 months

Table VII. Results of freezing and thawing tests of flowing concrete.

Admixture		Mix proportion				Slump (%)	Air content (%)	Dynamic modulus of elasticity at the start of test ($\times 10^9$ kg/cm ²)	Durability factor (%)
Conventional	Delayed addition	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	W/C (%)	s/a (%)				
P-1	—	300	154	51.3	43	13.0	4.8	382	94
C $\times 0.25\%$	—	300	154	51.3	43	20.5	4.6	398	89
—	F-1 400 cc/C=100 kg	300	154	51.3	43	19.4	4.2	395	90
—	F-2 800 cc/C=100 kg	300	154	51.3	43				

Fig. 7. Above-relationship between the number of freezing and thawing cycles and the relative dynamic modulus. Below-relationship between the number of freezing and thawing cycles and the weight loss.

流動化コンクリートの実施は、現在までのところ建築構造物を対象にしたものが大部分であるが、最近では Table VIII に示すように土木部門でも種々の構造物に利用されるようになってきている。また、流動化コンクリートの使用目的は建築部門では単位水量の減少

による品質向上であるのに対し、土木部門では施工性の改善が主として採り上げられているのが特徴である。

現在まで実施された流動化コンクリートを配合面からみると、普通コンクリートの場合は単位セメント量が 300 kg/m³ 前後、ベースコンクリートのスランプが 8~15 cm で、これを 18~21 cm に流動化する例が多く、軽量コンクリートの場合は単位セメント量が 320~360 kg/m³、ベースコンクリートのスランプ 18 cm を 21~23 cm に流動化する例が多い。

5 む す び

高性能減水剤を流動化剤として用いた流動化コンクリートの諸性質についての実験結果および現場施工例から次のようなことがいえる。

(1) 流動化コンクリートのワーカビリティは、そのスランプに左右されるのでベースコンクリートの細骨材率を流動化後のスランプに応じたものとする必要がある。

(2) 流動効果は、単位セメント量とともに増大するが、280 kg/m³ 以上はほぼ一定となる。

Table VIII. Job sites application of flowing concrete.

Structure	Type of concrete	Slump (cm)	Mix proportion					Admix. for base concrete	Super-plasticizer	Object of use
			M/S (mm)	W/C (%)	s/a (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)			
Bridge (PC-beam)	Accelerating	8→15	25	39.0	37.0	420	164	Pozz. No. 5L	NP-20	Improvement of workability
Drainage tunnel	Normal	15→21	25	57.6	47.0	297	171	Pozz. No. 5L	NP-20	Pumping for long distance (500 m)
Checkdam	Normal	5→12	40	63.0	44.0	236	148	Pozz. No. 5L	NP-10	Transporting for long time and pumping
Undergrand tunnel for multipurpose	Normal	8→20	25	51.0	43.3	288	147	Pozz. No. 5L	NP-10	Improvement of workability
Earth heat energy power plant	Normal	12→21	25	43.0	40.5	336	145	Pozz. No. 5L	NP-10	Transporting for long time
Caisson	Normal	10→18	40	60.8	44.5	250	152	AE	NP-20	Improvement of workability
General building	Normal	12→20	25	57.3	46.0	286	164	Pozz. No. 8	NP-10	Improvement of workability, prevention of cracking
Food factory	In cold weather	15→21	25	47.0	43.1	347	163	Pozz. No. 10L	NP-10	Prevention of cracking
Silo for cereals	Normal	12→21	25	47.8	48.0	335	160	Pozz. No. 5L	NP-20	Improvement of workability
Lofty building	Light weight	18→22	15	51.0	50.6	343	175	Pozz. No. 5L	NP-20	Pumping up to high stage

(3) 流動化コンクリートの流動効果およびスランプ低下は、温度、添加時期などにより異なるので、コンクリート配合、現場条件などを十分に把握し、より適切な現場打設計画をたてるべきである。

(4) 硬化した流動コンクリートの諸物性は流動化前の硬練りコンクリートのそれとほぼ同一と見なし得る。

(5) 使用目的を充分理解し、適切かつ十分な施工管理により所期の目的を達したコンクリート構造物を流動化コンクリートにより造り得ることが明らかである。

おわりに、本実験およびまたいくつかの現場施工の実施に当り、終始ご指導頂いた東京大学、岸谷孝一教授に厚くお礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) Superplasticizing Admixtures in Concrete; Cement Admixtures Association/Cement and Concrete Association (1976).
- 2) 日本建築学会, 「コンクリートの調査設計・調査管理・

品質検査指針案・同解説」(1976).

- 3) 児玉和巳, 中川 脩, 御所窪邦男, 材料, **26**, 1072 (1977).
- 4) 嵩 英雄, 佐藤忠博, 大竹隆夫, 山本常夫, 下野敏秀, 浅井敏雄, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 85 (1976).
- 5) 日曹マスタービルダーズ(株) 資料
- 6) 岸谷孝一, 橋 高章, 児玉和巳, 福馬直昭, 中川 脩, セメント技術年報, **32**, p. 335 (1978).
- 7) 田村 博, 倉橋岩夫, 日本建築総合試験所報, p. 34 (1978).
- 8) 亀田泰弘, 柿崎正義, 和美廣喜, 荒屋敷明夫, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 99 (1976).
- 9) 友沢史紀, 福士 勲, コンクリート工学, **16**, No. 8, p. 1 (1978).
- 10) 掛貝安雄, 立沢卓郎, 市川喜彦, 田中健治郎, コンクリート工学, **17**, No. 1, p. 47 (1979).
- 11) 落合豊次郎, 志村征夫, 笠井浩平, 高杉庸司, 多勢 裕, 大和田信敬, 建築技術, No. 317 (1978).