

コンクリートの初期性状に関する研究 (その2)

野 中 稔
小 山 将 之

■ はじめに

本報告は施工の側からみたコンクリートの性状を追求しようとするものである。前報告¹⁾では実際に現場に打込まれたコンクリートより、「セメントの水和熱による温度の上昇」「注水後の運搬時間」「上部コンクリートが下部へ伝える圧力」を調査し、実験室内において上記の三要因を再現し、標準養生のものとの各材令における圧縮強度の比較を行なったものである。

初期の圧縮強度に影響する要因は数多くあるが、本報告では、要因の中から調査については「水セメント比」「セメント量」「フライアッシュの混入」「砂率」を取り出し、また打込時にコンクリートへの「振動」、上部コンクリートが下部に伝える「圧力」をも加えた。なお、この実験によりコンクリートの初期における圧縮強度に影響する要因を分析し、コンクリートの強度発現状況を調査することを目的とした。

§ 1. 要因および水準の選定

コンクリートの硬化速度は材料・調査・打設・養生また打上がりの形状および型わくの材料や形態、そしてその置かれている環境条件などによって左右される。今回の実験では上記の条件や状態から、調査では水セメント比、セメント量、フライアッシュの混和、細骨材率を、

要 因	水 準 1	水 準 2
水セメント比	50 ⁰ /wt	60 ⁰ /wr
セメント量	300kg/m ³	360kg/m ³
フライアッシュ	無	60kg/m ³
砂 率	37 ⁰ /wt	42 ⁰ /wt
振 動	無	有
加 圧 力	無	0.5kg/cm ²

表一 要因および水準

打設方法としてはコンクリートへの振動、その他にコンクリートへの圧力¹⁾をとり出して実験を行なった。

水準1は現在一般に用いられている調査に近いものにした。水準2の水セメント比・セメント量およびフライアッシュ量は水準1の量より20%変化したもの、砂率は5%変化したものにした。なお、フライアッシュの混入についてはセメントと代替とした。

コンクリートへの振動およびコンクリートへの圧力については有・無の2種にした。以上の要因および水準を表一に示す。

§ 2. 使用材料および調査

2.1 セメント

N社製普通ポルトランドセメントを使用した。化学成分および物理試験結果を表二、表三に示す。

強熱減量 Loss	不溶残分 Insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	合計 Total
0.5	0.7	22.3	5.1	3.0	64.8	1.1	1.8	99.3

表二 使用セメントの化学成分

比重	粉末度		凝 結				安定性 (煮沸 方法)	
	比表面積 cm ² /g	標準フルイ88 μ残分 %	室温 °C	湿度 %	水量 %	始発 (時・分)		終結 (時・分)
3.15	3040	1.6	20.5	90	28.3	2-26	3-44	良
フロー値 mm	曲げ強さ (kg/cm ²)			圧縮強さ (kg/cm ²)				
	3日	7日	28日	3日	7日	28日		
252	32.1	49.3	73.8	126	232	422		

表三 セメントの物理試験結果

2.2 フライアッシュ

T社製フライアッシュを使用した。試験成績結果を、

表-4 に示す。

	比 重	比表面積 (ブレーン法) cm ² /g	標準フライ 44μ 残分 %	所要水 量比 %	圧縮強 度比 %
JIS 規格 試験成績	1.95 以上 2.18	2,700 以上 3,550	25.0 以下 9.5	100 以下 94	63 以上 80.3

表-4 フライアッシュの試験成績結果

2.3 骨 材

骨材は表-5、表-6に示すものを用いた。なお粗骨材は JASS 5 の標準粒度分布に近づけるように 25, 20, 10 mm の目のふるいで調整し、それぞれの通過したものを大・中・小別に分け、大を 25%, 中を 40%, 小を 35% の割合で混合したものを用いた。

ふるい寸法mm	30	25	20	15	10	5	5以下
通過率%	100	100	71	60	36	4	0

表-5 粗骨材の粒度 (ふるいを通るものの重量百分率)

ふるい寸法mm	5.0	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.15 以下
通過率%	100	87	70	46	17	4	0

表-6 細骨材の粒度

2.4 混和剤

混和剤は Y 社製の空気連行剤を 10% の水溶液として用いた。

2.5 コンクリートの調合

コンクリートの調合は、日本建築学会標準仕様書 JASS 5 に準じて行なった。調合は表-1 の要因および水準表にしたがって 8 種類とし、コンクリートへの圧力と振動の条件が加わって計 16 とした。調合および条件を表-7 に示す。

§ 3. 供試体の作製、養生および試験方法

3.1 供試体の寸法および個数

供試体の寸法は径 100mm, 高さ 200mm とし、1 材令 3 個とし、材令数 10 で 1 試験 30 個とした。調合および条件が 16 種類であるから、合計で 480 個の供試体数である。

3.2 コンクリート混練りおよび供試体の成形

コンクリートの混練りは可傾式 55ℓ ミキサーを用い、注水後 3 分間を基本練りとし、混練りされたコンクリートは前記寸法の型むくくに 2 層に分けて各層を規定のつき棒により 15 回突き成形した。成形された供試体のキッピングは、材令 24 時間未満のものは圧縮強度試験 30 分前に石膏で行ない、材令 24 時間以後のものは早強セメントで行なった。

3.3 供試体の圧縮強度試験方法

試験機は材令 3 日 (72 時間) までのものは 10 t アムス

N	水セメント比 %/wt	砂 率 %/wt	有効水 量 kg	セメント 量 kg	フライア ッシュ kg	砂 kg	砂 利 kg	圧力	振動
1	50	37	150	300	—	688	1,190	×	×
2	50	42	180	300	60	718	1,010	×	×
3	50	42	150	300	—	783	1,100	○	×
4	50	37	180	300	60	632	1,096	○	×
5	60	42	180	240	60	738	1,040	×	×
6	60	37	216	360	—	607	1,050	×	×
7	60	37	180	240	60	650	1,130	○	×
8	60	42	216	360	—	688	969	○	×
9	50	42	150	300	—	783	1,100	×	○
10	50	37	180	300	60	632	1,096	×	○
11	50	37	150	300	—	688	1,190	○	○
12	50	42	180	300	60	718	1,010	○	○
13	60	37	180	240	60	650	1,130	×	○
14	60	42	216	360	—	688	969	×	○
15	60	42	180	240	60	738	1,040	○	○
16	60	37	216	360	—	607	1,050	○	○

表-7 調合および条件

ラー万能試験機を使用し、それ以後は30 t のものを使用した。試験時の加重速度は材令ごとに变化させた。表—8 に荷重速度を示す。

材 令	4 hr	6 hr	8 hr	10hr	12hr	24~72hr	7~28日
荷重速度	0.002	0.007	0.02	0.04	0.07	0.35 ~0.8	1.3~2.3

表—8 荷重速度 (単位: kg/cm²/sec.)

3.4 供試体の作製および養生

(1) コンクリートへの振動: 振動機は振動部径25mm, 振動数7,200cpm, 100Vのものを用い, 型わく内に全量入れたコンクリートの中央に振動部を挿入し, 10秒間加振した。

(2) コンクリートへの圧力: 加圧力は型わくの中にコンクリートを入れた状態で1時間目に 0.1kg/cm², 2時間目に0.2kg/cm², 3時間目に0.3kg/cm², 4時間目に0.4kg/cm², 5時間目に最高の0.5kg/cm²とし, その状態を24時間継続し, それ以後は加圧を開放し, 他の供試体と同様な方法で養生した。なお, 加圧装置は前報告¹⁾を参照されたい。

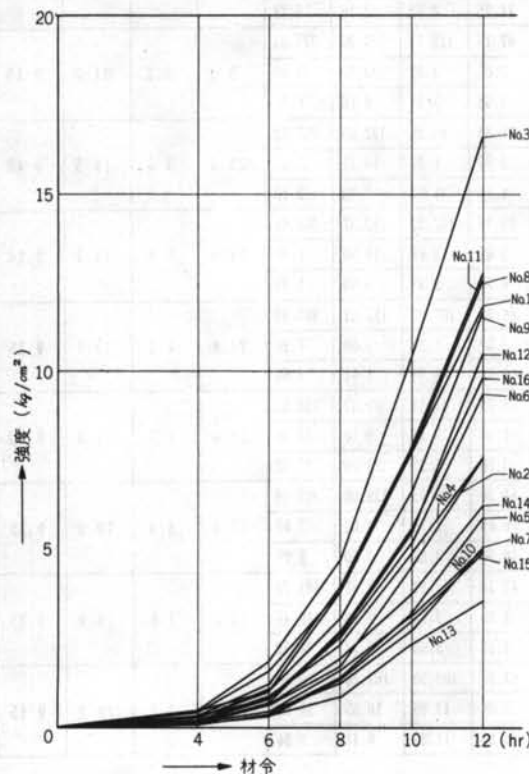
(3) 供試体の養生: 成形された供試体は打込み後直ち

に温度20°C±3°Cの恒温養生室に入れ, 4~24時間までのものはキャッピングも養生室中で行ない試験に供した。2日以後のものについては, キャッピングを完了し, 打込み後24時間で脱型し, 20°C±1°C の水中に供試体を入れ養生した。

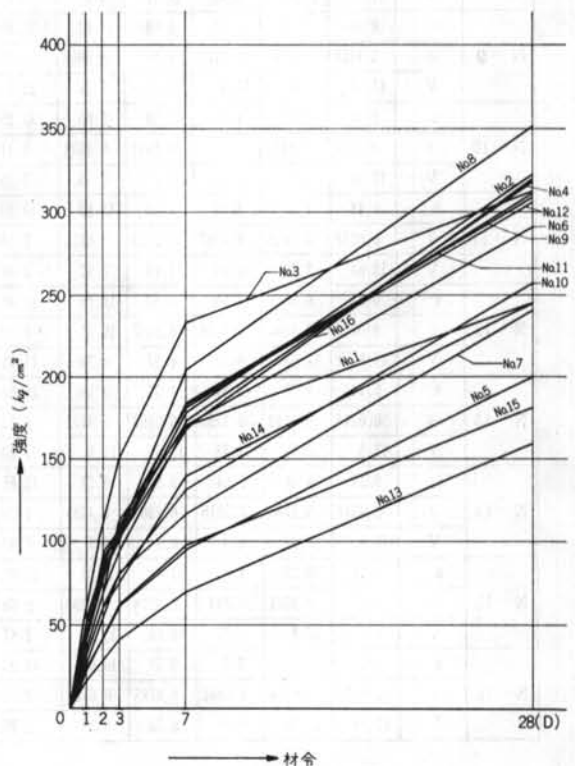
§ 4. 試験結果

(1) 試験結果は表—9に示し, またコンクリートの圧縮強度(平均値)の発現の様相を図—1に示す。

●水セメント比: 今回の実験における水セメント比の水準は50%と60%であり, それぞれの強度発現の相違は前者のほうが速い。材令4時間~24時間については水セメント比50%のものが強度発現は速いが, それよりもコンクリートの容積に対する水量の影響が大きい。今回の実験ではコンクリート1m³に対して水量が150kg, 180kg, 216kgの3種であるが, セメント量に関係なく12時間までは水量150kgのものが高い値を示している。材令1日目から3日目ごろになると徐々に水セメント比の影響を受け, 材令7日以後になると圧縮強度発現の速度は水セ



図—1 圧縮強度試験結果 (ただし値は3本の平均)



試験番号	強度平均値 標準偏差δ 変動係数V	材										令		備考			
		4時間	6時間	8時間	10時間	12時間	24時間	48時間	72時間	7日	28日	スラブ	空気量	打込み時のコンクリート温度	打込み期		
N-1	\bar{x}	0.5	1.03	3.83	7.87	11.96	36.98	71.65	114.11	169.84	245.21	19.5	-	20	9:20		
	δ	0.0921	0.1549	0.3373	0.7123	0.7128	3.99	1.46	4.94	1.95	27.12						
	V	18.4	15.0	8.8	9.0	5.96	10.79	2.04	4.33	1.15	11.06						
N-2	\bar{x}	0.21	0.68	1.78	4.56	7.62	45.51	79.61	103.81	177.95	322.69	23.2	3.1	19.5	9:30		
	δ	0.0264	0.1322	0.204	0.2756	0.5029	2.87	4.42	2.92	9.32	8.00						
	V	12.57	19.4	13.5	6.0	6.9	6.31	5.55	2.81	5.24	2.48						
N-3	\bar{x}	0.48	1.87	4.70	10.52	16.7	65.86	112.48	151.80	233.53	312.08	15.4	5.0	21.0	9:20		
	δ	0.063	0.158	0.339	0.3875	0.4868	1.34	8.84	6.38	15.79	17.66						
	V	13.1	8.4	7.2	3.6	2.90	2.03	7.86	4.20	6.76	5.66						
N-4	\bar{x}	0.23	0.9	2.36	4.93	7.66	45.98	94.30	108.17	173.87	318.67	23.2	3.1	19.5	9:55		
	δ	0.0424	0.1276	0.7071	0.5948	0.8656	4.05	0.82	2.60	12.55	35.10						
	V	18.43	14.18	29.9	12.06	11.3	8.81	0.87	2.40	7.22	11.01						
N-5	\bar{x}	0.11	0.39	1.4	3.24	5.92	25.16	40.58	61.49	94.48	200.00	22.8	4.3	21.2	9:30		
	δ	0.02	0.1513	0.1509	0.2685	0.3708	0.75	2.48	4.37	2.39	14.22						
	V	18.18	38.8	10.78	8.29	6.2	2.98	6.11	7.11	2.53	7.11						
N-6	\bar{x}	0.22	0.86	2.56	5.23	9.46	40.47	71.33	95.54	169.42	291.32	22.5	3.2	20.6	9:15		
	δ	0.26	0.0721	0.147	0.3080	0.497	2.12	6.98	3.73	11.90	3.84						
	V	11.82	8.38	5.74	5.89	5.25	5.24	9.79	3.90	7.02	1.32						
N-7	\bar{x}	0.12	0.48	1.26	2.73	5.08	27.42	57.19	82.06	116.34	240.75	23.1	2.8	21.2	9:25		
	δ	0.007	0.0141	0.0547	0.2308	0.5837	1.70	4.27	3.99	2.05	14.05						
	V	5.8	2.9	4.341	8.45	11.49	6.20	7.47	4.87	1.76	5.84						
N-8	\bar{x}	0.35	1.23	3.94	7.87	12.73	51.88	91.10	106.78	204.19	351.19	23.5	3.9	19.0	9:15		
	δ	0.0754	0.1687	0.2151	0.1431	0.6157	2.07	10.25	9.10	4.82	20.31						
	V	21	13.7	5.46	18.18	4.8	3.99	11.25	8.52	2.36	5.78						
N-9	\bar{x}	0.26	1.05	3.08	6.68	11.83	55.86	87.15	112.51	181.30	311.65	9.0	5.2	21.0	9:15		
	δ	0.1081	0.016	0.4409	0.2816	0.6908	12.57	2.07	4.32	0.37	21.20						
	V	41.58	5.8	14.3	4.22	5.84	22.5	2.38	3.84	0.20	6.80						
N-10	\bar{x}	0.18	0.47	1.61	3.18	5.05	33.25	61.88	81.20	132.09	257.52	22.8	3.5	19.5	9:40		
	δ	0.0316	0.0412	0.07	0.1941	0.3524	2.41	2.57	1.57	10.51	5.42						
	V	17.56	8.8	4.35	6.1	6.98	7.25	4.15	1.93	7.96	2.10						
N-11	\bar{x}	0.44	1.6	3.84	7.93	12.82	48.28	83.12	107.22	182.37	308.68	14.9	5.4	19.2	9:20		
	δ	0.0556	0.0435	0.4087	0.2722	1.0216	0.66	5.62	2.65	16.30	7.38						
	V	12.64	2.72	10.64	3.43	7.97	1.37	6.76	2.47	8.94	2.39						
N-12	\bar{x}	0.31	0.85	2.66	5.52	10.66	43.86	89.90	107.85	183.21	305.93	21.8	4.2	20.5	9:25		
	δ	0.0707	0.1664	0.1734	0.3637	10.51	4.99	2.57	7.38	3.50	7.96						
	V	22.8	19.58	6.52	6.97	4.78	11.38	2.86	6.84	1.91	2.60						
N-13	\bar{x}	0.14	0.33	0.87	2.37	3.59	16.53	28.75	41.14	69.42	159.65	23.0	1.7	21.0	9:40		
	δ	0.0244	0.0223	0.1268	0.2603	6.4171	2.12	1.08	2.21	9.19	24.46						
	V	17.5	6.7	14.58	10.99	11.6	12.83	3.76	5.37	13.24	15.32						
N-14	\bar{x}	0.19	0.64	1.94	3.8	6.27	32.65	61.36	76.05	139.06	245.46	23.0	3.4	19.5	9:35		
	δ	0.0547	0.1760	0.1816	0.2302	0.4289	2.16	6.69	2.30	3.62	12.89						
	V	28.8	27.5	9.4	6.1	6.8	6.62	10.90	3.20	2.60	5.25						
N-15	\bar{x}	0.14	0.33	1.38	3.01	4.93	23.03	43.18	62.80	97.87	181.30	23.7	2.6	20.0	9:25		
	δ	0	0.0574	0.244	0.3278	0.6298	0.66	1.78	3.51	7.58	18.47						
	V	0	17.4	1.77	10.89	12.78	2.87	4.12	5.59	7.74	10.19						
N-16	\bar{x}	0.15	0.7	2.7	5.59	10.04	41.23	83.97	103.50	169.20	320.36	23.7	3.5	20.2	9:15		
	δ	0.0932	0.0964	0.1802	0.4785	0.6585	2.17	5.06	13.69	10.85	29.61						
	V	62.18	13.78	6.68	8.56	6.56	5.26	6.03	13.25	6.41	9.24						

表-9 コンクリート強度試験結果

メント比50%のものの方が大きくなる。

●セメント量：水準を300kg/m³と360kg/m³とした。もちろん、セメント量は水セメント比との関係で圧縮強度の発現の速度は決められるが、4時間から12時間まではセメント量に関係がなく、かえってセメント量300kg/m³の方が高い値を示している。これは水セメント比つまり有効水量の影響が大きいことで、24時間から3日目になると、セメント量360kg/m³のものが発現の速度が速くなり、7日以後の圧縮強度はセメント量によって決定される。

●フライアッシュ：水準差をセメント量の代替率20%と大きくしたので、今回の実験の結果では圧縮強度値の差が大きく表われた。特に材令4時間から12時間までについては強度の発現は遅く、フライアッシュの混入しないものの1/2～1/3の圧縮強度値を示している。フライアッシュ混入のN-2とN-12のように強度の発現が比較的速いものでも初期の圧縮強度値は低い。それが材令24時間では発現の速度は速くなるが、それ以後はセメント量が少ないことによる影響から発現の速度は遅くなる。

●砂率と圧力：砂率についてはその水準差が5%と小さく、今回の実験では圧縮強度発現の相違が大きく表われなかった。圧力については前報告に示した強度の発現の影響は調合の変化によるものが大きく、今回の実験ではその効果は比較的小さかった。

●振動：今回の実験ではスランプの調整は考慮していないのでN-9のスランプ値9cmからN-8の23.5cmとその範囲は広がった。振動の効果は硬練りのコンクリートにあるのであって、スランプ値の大部分が18cm～21cmであるから、振動の影響は大きく表われなかった。

(2) 試験結果より要因の主効果の時間的推移は 図-2 に示す。

コンクリートの材令が24時間までではフライアッシュの効果が大きく、セメント量の効果はほとんどない。圧力および振動は多少の効果はあるが、主力の効果はフライアッシュと水セメント比(有効水量ともいえる)の2つである。

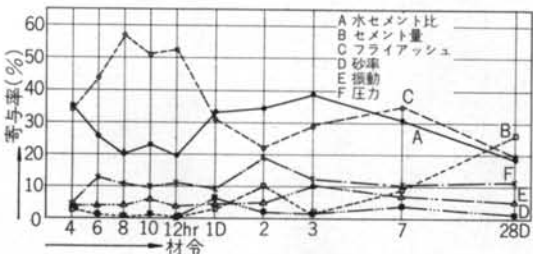


図-2 材令と寄与率の関係

1日目～3日目においてはフライアッシュの効果は減少して水セメント比の効果が大きく出る。他の効果はあまり変わらないが2日目の圧力とセメント量、3日目の振動の効果が特異的に大きく表われる。

7日目になると水セメント比とフライアッシュが効果の主力となり、セメント量、圧力および振動が従力的な効果である。

28日目になるとセメント量、フライアッシュ、水セメント比の3つが効果の主力となり、他のものは従力的な効果である。しかし、セメント量の効果は7日～28日目にその効果は急増している。

§ 5. 考 察

本報告はその1、に続いて行なったものである。コンクリートの初期圧縮強度に影響する要因は使用材料、その調合、打設方法および養生方法、また型わくの形状や材料、鉄筋や鉄骨の配置などがある。前報告では実際に打込まれたコンクリートから「セメントの水和熱によるコンクリート温度の変化」「上部コンクリートが下部に伝える圧力」および「コンクリートの運搬時間」のみを調査し、実験室内においてそれぞれを再現して標準養生(JIS A1132コンクリートの強度試験用供試体の作り方に準じた)のものとの材令3時間目から28日目までの圧縮強度の比較を行なったものである。その結果を要約すると、3時間から8時間までは標準養生の3～4倍の圧縮強度値を示す。また型わくの脱型時期の1つの指針となる圧縮強度50kg/cm²については、実際に打込まれたコンクリートは標準養生のものより約7時間から8時間前に50kg/cm²の強度に達している。つまり標準養生の圧縮強度が35～37kg/cm²前後に達したときに、すでに実際に打込まれたコンクリートは50kg/cm²になっていることが推定できた。材令が7日以上になると標準養生のものとの圧縮強度値がほぼ一致することも分かった。

本報告は初期の圧縮強度を支配するであろう、水セメント比、セメント量、フライアッシュの混入、砂率および打設時に加える振動、打込まれたコンクリートが下部に伝える圧力のみを取り出して行なったものである。

本実験から初期圧縮強度を支配するものは、その使用材料と調合にあり、それもコンクリート中の水量と各材料による配合率による保水性であろう。つまり材令4時間から12時間までの圧縮強度値は有効水量とフライアッシュの混入であった。もちろん有効水量と水セメント比の関係はあるが、水セメント比値が小さくてもセメン

ト量が多ければコンクリート中に含まれる絶体水量が多くなり、初期の圧縮強度値の発現の速度は遅くなる。セメントにもいえることであるが、特にフライアッシュはその保水性に優れ、その混入によりワーカブルなコンクリートを調合することは確かであるが、この保水性のために初期の強度値の発現は極端に遅れることが分かる。水セメント比がコンクリートの強度を支配するのは24時間以後であり、またセメント量が強度を支配するのは7日以後であることも推定できた。

振動や圧力の効果に対しては、4時間～12時間までの初期材令から28日間まで通して、強度の発現の速度は従力的であった。

本実験の目的である施工面より、特に型わく工事からみたコンクリートの初期の性状を知り、それによる工事方法、たとえば一般工法では型わくの在置期間、スライディングフォーム工法では滑揚速度などの適宜な方法を見つけ出すことにある。本実験結果からももちろん長期のコンクリートの強度に影響しない範囲で、初期の圧縮強度値の発現を速めるためには次のことがいえる。

- (1) コンクリート中に含まれる絶体水量を少なくする。このことは水セメント比を小さくする。
- (2) フライアッシュはできるだけ使用しない。しかしフライアッシュの混入により、有効水量を減少する

ことができ、なおワーカビリティに影響しなければ、そのかぎりではない。

- (3) 長期強度に影響しない範囲でできるだけセメント量を少なくする。
- (4) ワーカブルなコンクリートが得られる範囲で砂率を決定する。ただし微粒分を少なくする。
- (5) 打設には適度な振動を与える。
- (6) 打込みはできるだけ早くし、内部に含まれている余分の水分を絞り出す、などである。

■ おわりに

本実験はコンクリートの初期性状を支配する種々な要因の、ごくわずかなものを取り出したものである。それも供試体数も少なく、本実験からすべてを決定するまでには至らなかったが、その一端は考察できると思われる。

コンクリートの初期の圧縮強度を支配する要因の中で、調合による保水性に問題がありそうであるので、今後は型わくやコンクリートの形状などによる脱水状態を調査し、それが初期圧縮強度にどのように影響するかの追求を進めて行きたい。

<参考文献>

- 1) 野中稔他2名：“コンクリートの初期性状に関する研究（その1）” 清水建設研究所報 第13号
- 2) 鳥田専右他3名：“練りませ時間がコンクリートに与える影響” 清水建設研究所報 第2報、第3報
- 3) 笠井芳夫：“コンクリートの初期性状に関する研究” セメント技術年報 昭和36年、37年、38年、39年
- 4) 木沢久兵衛、棚橋 勇：“コンクリートの初期性状に関する研究” 日本建築学会論文報告集 No. 103 昭和39年
- 5) 鳥田専右：“レディーミクストコンクリートの輸送時間管理に関する研究” 清水建設研究所報 第7号
- 6) C. A. Vollick：“Effect of Revibrating Concrete” ACI Journal, March 1958
- 7) 木沢久兵衛他1名：“脱水による水セメント比の減少および沈降率について” 日本建築学会論文報告集 No. 103 昭和39年