

モルタルおよびコンクリートの締固めに関する研究

—セメント調合物の振動性状について(その1)—

森

概 要

超硬練りコンクリートを振動で有効に締め固めるための基礎資料として、セメント調合物の振動性状、すなわちセメントペースト、モルタル、コンクリートで主として振動数および振動加速度と粘性の関係を調べた。その結果、セメント調合物を容器に入れて振動を与えるとある振動数で共振し、共振点では粘性が著しく低下し高い充填性が得られ、その共振数と振動数は流体柱の縦振動の法則に従うこと、また粘性は振動加速度の増加に伴い対数値で直線比例的に減少するが、その減少率は共振振動数およびそれ以外の振動数で大きく異なり、後者は前者に対して3倍以上の加速度を必要とすること、また液性限界は静止時の粘性の約2,000分1の程度であること、などの結果を得た。

1. 序

近年プレキャスト工法が発達し、その分野におけるコンクリートは次第に硬練り化している。それを締め固める方法として、従来から用いられている振動締め固めに加えて、圧密、ショック等の新締め固め方式も開発されている。しかるにいまだ締め固めていない硬練りコンクリートは骨材間のペーストの粘性が高いためから蜂窩状の空隙の多い構造をしており、従来の振動(1500~3000RPM)方式ではその締め固めは十分でなく、また圧密あるいはショック締め固めは、締め固め効果は期待できるものの、大規模な設備を必要とすることから一般的にはなり得ない。以上の事柄を考慮し、ここでは比較的施工容易な振動締め固めに注目し、硬練りコンクリートを振動により有効に締め固めるための基礎資料を得ることを目的とし研究を進めることにした。

硬練りコンクリートの振動締め固めは、骨材間に存在する高い粘性を振動によって破壊し、各粒子を最も密実な状態に再配列することにある。一方セメントペーストは非ニュートン流体であり、振動を与えればその粘性が低下することは知られており、したがって硬練りコンクリートの振動締め固め効果は、コンクリートの液性化によるところ大であると考えられる。この観点に基づき、セメント調合物の振動と液性化の状態を実験的に調べることにし、まずセメントペーストおよびモルタルで、振動数および振動加速度と粘性の関係を調べ、つぎにその結果がコンクリートの充填性お

よび圧縮強度に如何に対応するかを調べた。

この実験が硬練りコンクリートの振動締め固めにおける基礎的な一資料になれば幸いである。

2. セメント調合物における振動数と粘性との関係

セメントペースト(以下ペースト)およびセメントモルタル(以下モルタル)を容器に入れ、強制振動を与えた場合の振動数と粘性の関係について調べた。

2.1. 実験計画

振動数を振動台の能力範囲内において適当な間隔で変化させ、各振動数に対する試料の粘性を鋼球の引抜き抵抗で調べることにした。また一般には、管内に流体を入れて縦振動を与えるとその流体はある振動数で共振することは物理的に認められるところであり、セメント調合物における場合の共振現象も見つかるため、要因として振動数の他に容器の高さの影響もみることにした。またセメント調合物としては、ペースト、モルタルの2種類を対象に、各々 W/C を変化させたもの

要 因	水 準
1. セメント調合物	a. ペースト(W/C=30, 35, 40, 45, 50%) b. モルタル(W/C=40, 45, 50, 60%)
2. 振 動 数	0, 20~150サイクル/秒, @4~5サイクル/秒
3. 試 料 高 さ	a. 15cm (15×15×15cm ³ 鋼製型枠) b. 30cm (15φ×30cm 鋼製型枠)

注: モルタルは、C : S = 1 : 2 (容積比)

表一2—1 実験要因と水準

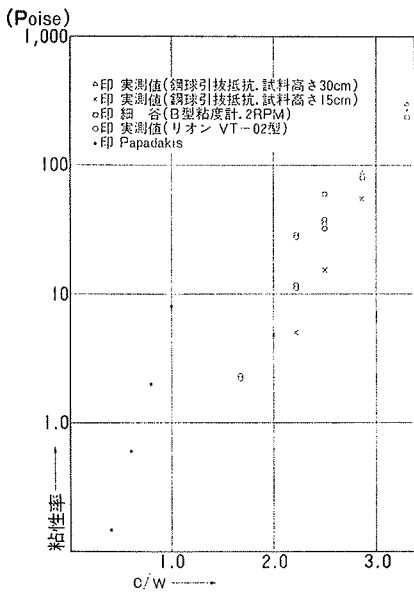


図-2-2 セメントペーストのC/Wと粘性率

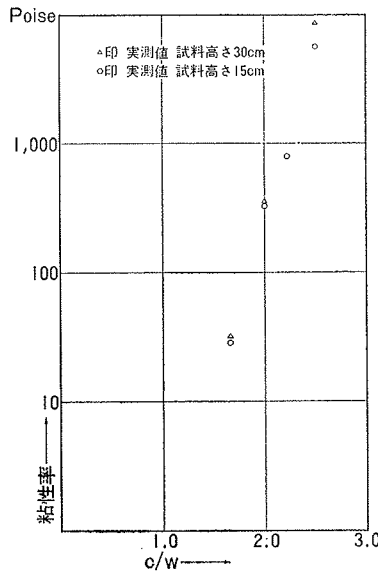


図-2-3 セメントモルタルのC/Wと粘性率

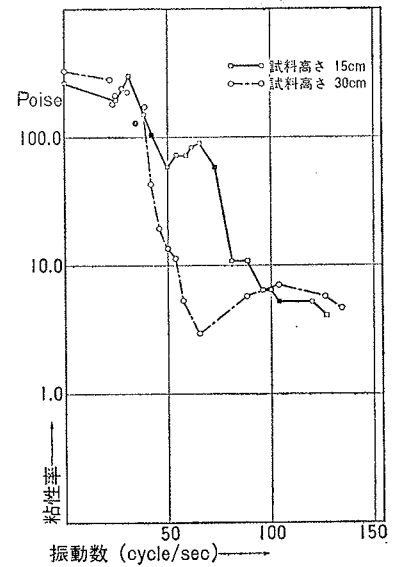


図-2-4 セメントペーストの振動数と粘性の関係 W/C=30%

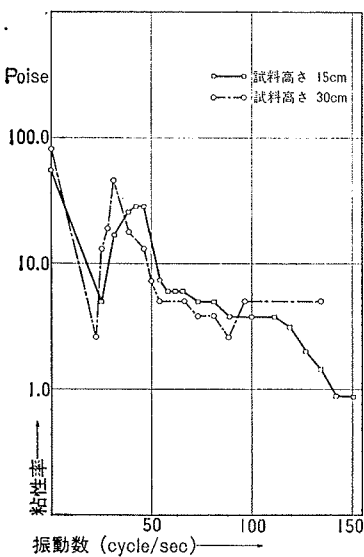


図-2-5 セメントペーストの振動数と粘性の関係 W/C=35%

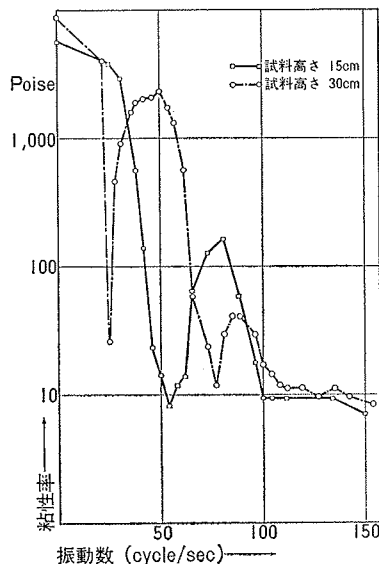


図-2-6 セメントモルタルの振動数と粘性の関係 W/C=40%

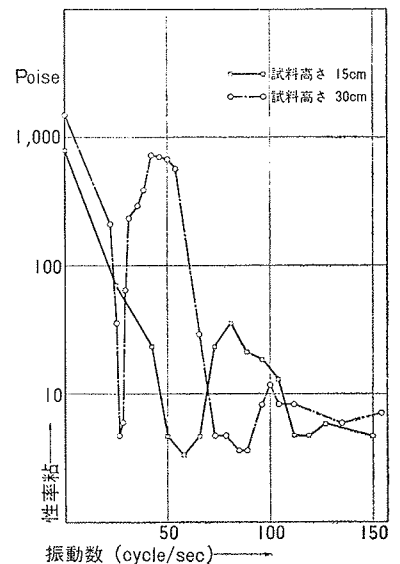


図-2-7 セメントモルタルの振動数と粘性の関係 W/C=45%

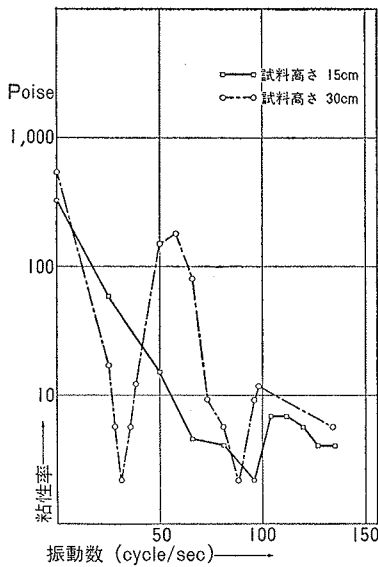
え、任意の振動数に対して測定した各試料の鋼球引抜き抵抗値とその中部位の瓦重からストークスの法則に基づいて算出した粘性率 (Poise) を表 2-4 に示す。

2.3.1. 静止時の粘性 静止しているペーストの粘性係数についてはいくつか報告例もあり、またペーストのC/Wと塑性粘度係数の対数値が直線関係にあることも認められている。本実験においては、測定値及びその測定値から算出した粘性率そのものに重要な意味はないが、測定結果の点検とモルタルにおける粘性とC/Wとの関係を見るため、粘性率を縦軸にC/Wを横軸にとりグラフ化すると図2-2、図2-3の如くなる。なほペーストの場合はPapadakis、細谷、両氏

の結果およびリオンVT-02型粘度計にて測定した結果も同時に記入した。

本実験の測定結果もペーストおよびモルタルのC/Wと粘性率の対数値はほぼ直線関係を示めており、しかもペーストの場合、細谷氏の結果およびリオンVT-02型粘度計の測定結果とほぼ合致している。なほ試料高さ30cmの場合は15cmの場合に比して抵抗値は多少大き目になっている。

2.3.2. 振動数と粘性 ペーストについてはW/C=30, 35%の2試料について、またモルタルについてはW/C=40, 45, 50%の3試料について各々試料高さ15cmと30cmの場合を対比させ、振動数と粘性



図—2—8 セメントモルタルの振動数と粘性の関係 W/C=50%

の関係をグラフ化して図 2—4, ~図 2—8 に示す。

グラフからペースト、モルタル共その粘性は振動数の増加に伴い低下している。ただしこの場合振動台の加速度も同時に増加していることから、粘性の低下がどちらの影響によるものであるかは確かでない(粘性と振動加速度の関係は後で検討する)。しかも粘性の低下は一様でなく、その曲線は極小値をもっている。ペーストの場合、第1次極小値は W/C および試料高さに関係なく25サイクル近辺に現れているが、本実験においては0~25サイクル間の内容は不明である。モルタルの場合、試料高さ 15cm では極小値がほぼ 50~70サイクルの範囲に、試料高さ 30cm では第1次極小値が 25~30 サイクルに、第2次極小値が 70~90 サイクルに明瞭に認められ、第1次および第2次極小値における振動数の比は 1 対 3 となっている。

2.3.3. 試料高さの影響 ペーストの場合、試料高さの影響は明瞭でないが、モルタルの場合、各試料とも第1次極小値は全く異なっており、しかも試料高さ 15cm の場合の第1次極小値サイクルは 30cm の場合の約2倍になっている。

2.3.4. W/C の影響 ペーストの場合やはり不明瞭であるが、モルタルの場合、各極小値サイクルは W/C の増加に伴い多小増大する傾向が認められる。

2.3.5. 共振と粘性 以上の結果からペーストおよびモルタルを容器に入れて強制振動を与えるとその調合物はある振動数で著じるしい粘性の低下を示し、その第1次極小値と第2次極小値における振動数の比は 1 対 3 の関係にあること、また第1次極小値は試料高さを2倍にすると振動数は1/2になることが判明した。

一方流体柱の縦振動は次の(1)式に示す関係にあり、実験で得られた各試料の極小値サイクルの関係は(1)式をほぼ満足している。したがって、セメント調合物を容器

$$V = (2m - 1) \frac{1}{4l} \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに

V: 固有振動数 サイクル/秒

l: 流体柱の高さ cm

K: 流体の弾性率 g/cm²

ρ: 流体が静止にあるときの密度 g·sec²/cm⁴

m: 1, 2, 3 ……などの整数

に入れて強制振動を与えると、ある振動数で共振し、その共振点では粘性が著じるしく低下する。またその共振々動数は流体柱の縦振動の法則に従う、ことが推論できる。

3. セメント調合物における振動加速度と粘性の関係

前項の実験において、ペーストあるいはモルタルを容器に入れて振動を与えると、ある振動数で共振し、そこでは粘性が著じるしく低下することが判明した。

一方振動加速度の増加による粘性の低下も認められることから、本実験は振動加速度と粘性の関係を振動数を一定にして調べたものである。

3.1. 実験計画

共振効果も同時に見ることとし、50サイクルおよび共振々動数の2振動数を対象にして各々の振動数で振動加速度を振動台の能力範囲で変化させた場合のセメ

要因	水準
1.セメント調合物	モルタル(W/C=40, 45, 50%)
2.振動数	50サイクル, 共振々動数
3.試料高さ	30cm, (15φ×30cm鋼製型枠)

注: モルタルは C : S = 1 : 2 (容積比), 使用材料は前回の実験と同じ

表—3—1 実験要因と水準

項目	摘用
1.製造会社	光洋工業
2.振動数	3,000~10,000 VPM
3.型式	電動モーターによるAnbarance Counter Weight
4.変速装置	無段変速
5.振動加速度	Counter Weight をとりかえることにより制御できる

表—3—2 振動台の仕様

W/C	40 %								45 %								50 %			
	50 サイクル				共振々動数				50 サイクル				共振々動数				50 サイクル			
	瓦重 (gr)			粘性率	瓦重 (gr)			粘性率	瓦重 (gr)			粘性率	瓦重 (gr)			粘性率	瓦重 (gr)			粘性率
加 速 度 (G)	下部	中部	上部	poise	下部	中部	上部	poise	下部	中部	上部	poise	下部	中部	上部	poise	下部	中部	上部	poise
	0.9					5500	2000	—	91.7					52	33	53	6.8	280	255	310
1.0									150	670	—	339.8					140	138	160	62.8
1.1					150	80	80	30.6												
1.2													28	24	40	2.1				
1.3	3500	2300	2000	1161					60	210	190	99.4								
1.4					52	50	50	15.4									74	—	27	—
1.7																	32	62	23	22.3
1.8									35	72	50	27.2								
1.9																	24	41	25	11.1
2.1					52	35	42	7.7					22	22	25	1.1				
2.2	630	150	320	66					32	50	33	15.7								
2.5																	25	28	23	4.2
2.6									27	33	29	9.8								
2.7					32	32	32	6.2												
2.8	60	100	180	41																
3.1																	24	27	22	3.7
3.3									26	32	26	6.3								
3.4	55	60	110	21																
3.6					30	30	30	5.2	25	30	25	5.3								

表一—3—3 セメントモルタルにおける振動加速度と粘性抵抗測定結果

ント調合物の粘性を前回同様、鋼球の引抜き抵抗で調べることにした。なほセメント調合物はモルタルとし、3種類の W/C について検討した。本実験の要因と水準を表 3—1 に、振動台の仕様を表 3—2 に示す。

3.2. 実験方法

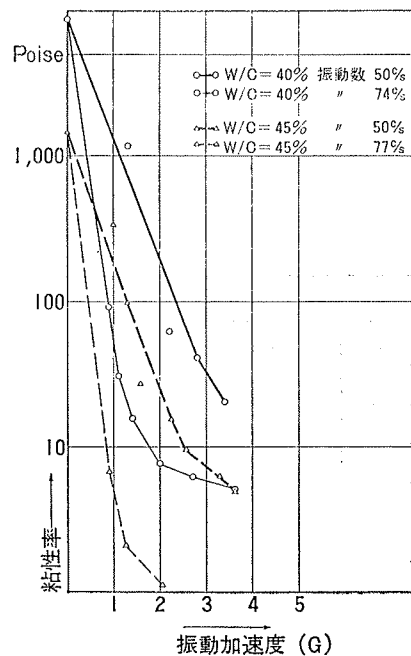
3.2.1. 粘性の測定 振動数を一定にし、振動台の Counter Weight を順次取換え、振動台上に固定したピックアップ (B & K, Accelerometer Type 4334) 及び Precision Sound Level Meter (B & K, Type 2203) にて振動加速度を読みとると同時に粘性を測定した。なほ粘性の測定方法は前回と同様である。

3.2.2. その他 試料の混練および試験時の条件は前回と同様である。

3.3. 測定結果および考察

W/C=40, 45, 50% の各試料に対し、50サイクルおよび共振々動数において振動加速度を変化させた場合の鋼球の引抜き抵抗値およびその中部位の抵抗値からストークスの法則に基づいて算出した粘性率を表3—3, に、その粘性率と振動加速度の関係をグラフ化したものを図 3—1 に示す。

3.3.1. 振動加速度と粘性 いずれの場合も試料の粘性は加速度の増加に伴い著るしく減少し、その関係はある範囲まで対数値で直線比例であり、またその



図一—3—1 セメントモルタルの振動加速度・粘性率曲線

液性限界は静止時の粘性の約 2000 分の 1 程度と推定される。

3.3.2. 共振効果 振動数50サイクルで加速度を増大させた場合と、共振々動数において加速度を増大させた場合では粘性の低下率は全く異なり、対数値直

線比例部分では前者は後者の3倍以上の振動加速度が必要なることを示している。

4. コンクリートにおける振動数と充填性および圧縮強度の関係

ペーストおよびモルタルにおける振動数と粘性の関係で得られた結果に対してコンクリートが如何に対応するかを調べるために行なった。なほコンクリートの場合は粘性の測定が不可能なことから、振動数の影響は充填性および圧縮強度で検討することにした。

4.1. 実験計画

振動数を50~150サイクルの範囲で10サイクル間隔に測定することとし、各振動数で締め固めたコンクリートの供試体の充填性および圧縮強度で検討することにした。また振動数の他に前回同様、試料高さの影響も見ることとし、調合としては単位セメント量および単位水量の影響も見ることにした。なほ振動台は3章の実験で用いたものとし、振動加速度は3~4Gの範囲でなるべく一定状態で行なうことにした。本実験の

要 因	水 準
1.調 合	a.単位セメント量 220, 280kg/m ³ b.単 位 水 量 110, 130, 150kg/m ³
2.振 動 数	50~150サイクル @10サイクル
3.振 動 加 速 度	3~4G const.
4.試 料 高 さ	a.10cm (10×10×10cm ³ 鋼製型枠) b.20cm (10φ×20cm鋼製型枠)

表—4—1 実験要因と水準

試料 番号	重 量 (kg)				W/C %	最密々度 gr/cm ³
	水	セメント	砂	砂 利		
1	110	220	723	1344	50	2,397
2	130	220	705	1309	59.2	2,364
3	150	220	686	1275	68.3	2,331
4	110	280	707	1326	39.3	2,423
5	130	280	687	1276	46.5	2,374
6	150	280	669	1242	53.6	2,341

表—4—2 コンクリートの調合

使用材料	仕 様
セ メ ン ト	秩父普通ポルトランドセメント
細 骨 材	富士川産 5mm以下
粗 骨 材	富士川産 25mm以下

表—4—3 使用材料と仕様

要因と水準を表 4—1 に、コンクリートの調合を表 4—2 に、使用材料を表 4—3 に示す。

4.2. 実験方法

4.2.1. コンクリートの混練 材料の計量はすべて重量計量とし、混練は山中式ジェットミキサーを用いた。

4.2.2. コンクリートの充填 コンクリートは混練後直ちにモールド (10×10×10cm³ 供試体は11ヶ, 10φ×20cm 供試体は22ヶ) に詰め込み、10×10×10cm³ のものは1ヶづつ、10φ×20cm のものは2ヶづつ、順次振動台に固定して、処定の振動数で90秒間締め固めた。なおあらかじめモールドに詰め込んだコンクリートは、水分の蒸発を防ぐため湿布で保護した。また、締め固めたコンクリートは 10×10×10cm³ のものは表面をコテで均し、10φ×20cm のものは上面をキャッピングし、脱型後直ちに20°C±2°C で水中養生を行なった。

4.3. 測定結果および考察

調合試料別に各動振数で締め固めた供試体の重量と圧縮強度の測定結果を、10×10×10cm³ については表 4—4に、10φ×20cm のものについては表 4—5に示す。なほ供試体 10φ×20cm における調合 4~6 の3種類の圧縮強度は都合により省略した。

調合番号	1		2		3		4		5		6	
	振動数 (サイクル/分)	重 量 kg	圧縮強度 kg/cm ²	重 量 kg	圧縮強度 kg/cm ²	重 量 kg	圧縮強度 kg/cm ²	重 量 kg	圧縮強度 kg/cm ²	重 量 kg	圧縮強度 kg/cm ²	重 量 kg
50	2,582	434	2,579	362	2,528	—	2,613	503	2,571	460	2,591	375
60	2,550	462	2,542	370	2,531	315	2,579	578	2,589	558	2,571	356
70	2,562	456	2,571	394	2,516	293	2,571	559	2,619	583	2,571	423
80	2,545	393	2,571	382	2,576	234	2,552	523	2,591	583	2,576	439
90	2,585	464	2,592	429	2,575	316	2,556	537	2,626	572	2,571	456
100	2,565	456	2,601	423	2,531	340	2,556	536	2,637	583	2,579	482
110	2,572	438	2,583	435	2,605	345	2,635	584	2,603	584	2,591	443
120	2,554	456	2,593	424	2,594	323	2,571	537	2,537	509	2,599	500
130	2,510	419	2,549	355	2,548	391	2,576	579	2,535	484	2,558	484
140	2,518	455	2,549	368	2,505	314	2,559	623	2,555	550	2,588	456
150	2,517	444	2,545	353	2,506	303	2,581	523	2,551	530	2,551	448

表—4—4 10×10×10cm³ 供試体の振動数別重量と圧縮強度

4.3.1. 振動数と充填性 振動数と充填性の関係をグラフ化して図 4—1, 図 4—2 に示す。なほ充填性は空隙率で表すこととし、次式によって求めた。

$$V = 100 - \frac{W_1}{W_0} \times 100\%$$

ここに、

V = コンクリートの空隙率 %

W₀ = 計算より求めた練り上り時の最密重量 kg

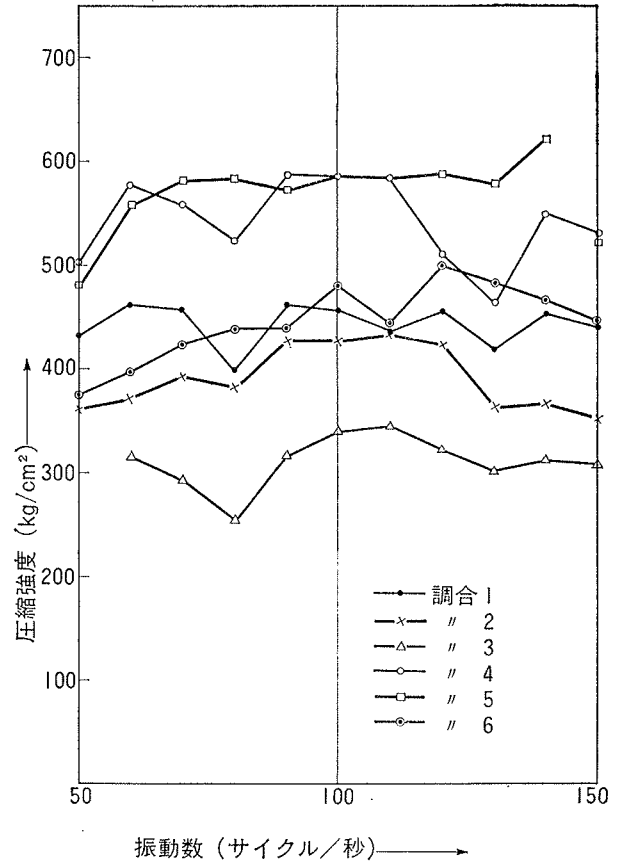
W₁ = 供試体の表乾重量 kg

グラフに見られるごとく、各試料とも充填性は振動数によって異なり、その曲線は極大値、極小値をもつ

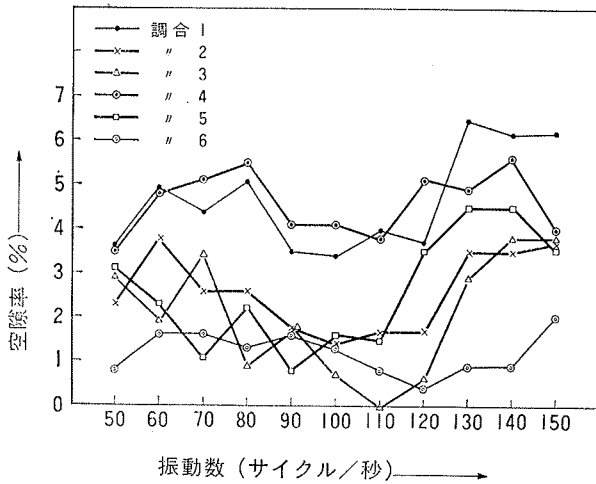
モルタルおよびコンクリートの締固めに関する研究 (その1)・森

調合番号	1	2	3	4	5	6				
振動数 (サイクル/秒)	振動量 kg	圧縮強度 kg/cm ²	振動量 kg	圧縮強度 kg/cm ²	振動量 kg	圧縮強度 kg/cm ²				
50	1	3,725	448.4	3,789	355.4	3,694	231.8	3,806	3,858	3,784
	2	3,831	455.4	3,758	281.8	3,858	214.0	3,812	3,858	3,791
	平均	3,814	455.9	3,794	358.6	3,676	222.9	3,809	3,858	3,788
60	1	3,855	444.6	3,776	345.2	3,705	234.4	3,776	3,863	3,841
	2	3,859	452.4	3,819	315.8	3,759	235.7	3,831	3,858	3,828
	平均	3,812	452.5	3,813	309.5	3,752	235.1	3,804	3,863	3,835
70	1	3,766	452.2	3,751	331.5	3,762	231.8	3,752	3,835	3,785
	2	3,745	382.2	3,761	319.7	3,767	285.0	3,785	3,759	3,764
	平均	3,755	389.3	3,756	312.1	3,776	259.9	3,769	3,793	3,775
80	1	3,711	389.8	3,775	327.4	3,744	236.9	3,735	3,809	3,744
	2	3,711	397.5	3,758	309.6	3,741	233.1	3,769	3,788	3,758
	平均	3,711	393.7	3,767	318.5	3,744	235.1	3,753	3,794	3,771
90	1	3,755	374.5	3,788	270.1	3,744	245.9	3,778	3,757	3,690
	2	3,724	352.2	3,788	233.5	3,744	236.9	3,737	3,763	3,752
	平均	3,740	355.4	3,788	261.8	3,744	241.4	3,758	3,760	3,721
100	1	3,789	431.3	3,731	293.0	3,691	185.0	3,729	3,761	3,748
	2	3,716	369.5	3,725	276.4	3,709	243.3	3,741	3,749	3,730
	平均	3,748	389.9	3,728	284.7	3,700	214.7	3,735	3,755	3,739
110	1	3,721	345.5	3,716	232.8	3,658	200.0	3,741	3,773	3,785
	2	3,743	385.0	3,651	291.7	3,718	210.2	3,761	3,741	3,785
	平均	3,732	366.3	3,704	287.3	3,703	205.1	3,751	3,757	3,785
120	1	3,684	298.8	3,755	291.7	3,616	203.8	3,735	3,714	3,769
	2	3,711	308.3	3,755	292.4	3,702	181.7	3,733	3,737	3,737
	平均	3,678	302.6	3,755	277.1	3,659	194.3	3,734	3,726	3,723
130	1	3,665	226.8	3,774	287.9	3,692	188.5	3,785	3,771	3,791
	2	3,669	238.0	3,774	279.0	3,704	178.3	3,735	3,771	3,774
	平均	3,679	257.4	3,774	283.5	3,658	183.4	3,761	3,771	3,783
140	1	3,573	165.6	3,831	258.6	3,722	193.6	3,759	3,771	3,771
	2	3,574	149.0	3,749	289.2	3,712	181.7	3,688	3,787	3,781
	平均	3,577	157.3	3,785	273.9	3,717	189.2	3,723	3,779	3,776
150	1	3,605	138.9	3,769	272.6	3,776	233.1		3,759	3,768
	2	3,601	209.0	3,769	239.2	3,802	225.5		3,795	3,781
	平均	3,604	169.5	3,769	260.9	3,789	229.2		3,793	3,759

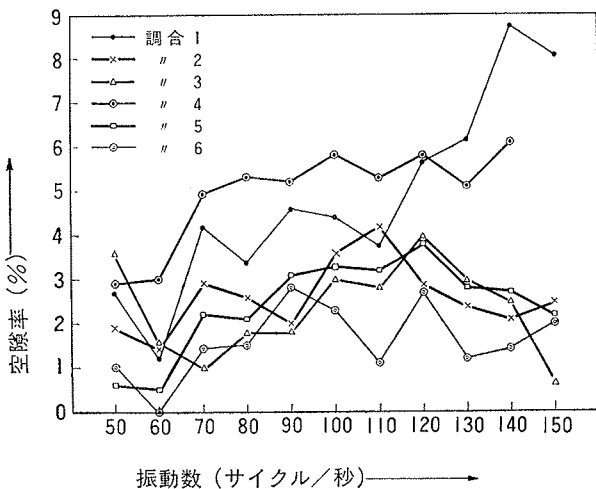
表—4—5 10φ×20cm 供試体の振動数別重量と圧縮強度



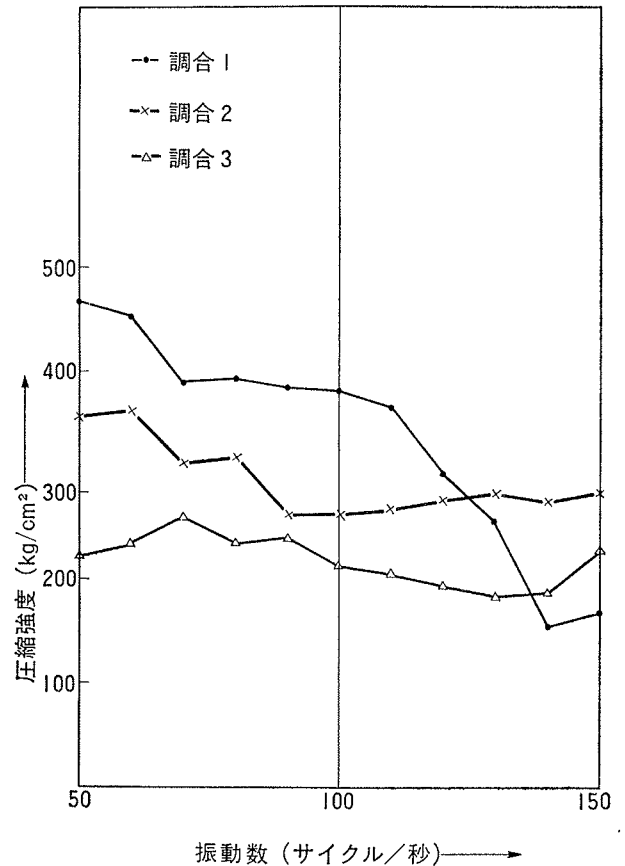
図—4—3 振動数と圧縮強度 (10×10×10cm³ 供試体)



図—4—1 振動数と充填性 (10×10×10cm³ 供試体)



図—4—2 振動数と充填性 (10φ×20cm 供試体)



図—4—4 振動数と圧縮強度 (10φ×20cm 供試体)

ている。しかも $10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$ の各試料に対する極小値が 90~110 サイクルであるのに対して、 $10\phi \times 20 \text{cm}$ の試料では約60サイクルであり、この関係は流体柱の縦振動の法則に従うことから、各試料の極小値サイクルは各々の共振点と推察する。なおモルタルの場合、軟練りになるに従い共振点が多少増大する傾向が見られたが、コンクリートの場合、調合による影響はあまり明確でない。

4.3.2. 振動数と圧縮強度 振動数と圧縮強度の関係をグラフ化して図 4—3, 図 4—4 に示す。強度結果は試料数が少ないこともあってかなりばらついているためその関係は明瞭でないが、傾向としては充填性と同様のものが認められる。すなわち強度が極大となる振動数は $10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$ の場合 70~140 サイクル、 $10\phi \times 20 \text{cm}$ の場合 50~70 サイクルの範囲にあり、各々中央値をとると最密充填サイクルと一致する。ただし、圧縮強度では最適振動数の範囲がいくらか広いようで、各調合においてその W/C から計算で求めた基準圧縮強度と比較すると、かなりの範囲がそれを上回る結果を得ている。

5. 結 論

セメント調合物を容器に入れて強制振動を与えた場合の性状に関する一連の実験結果をまとめると次の如

くである。

a. 振動数との関係 セメントペースト、モルタル、コンクリート等のセメント調合物を容器に入れて振動を与えるとある振動数で共振し、その共振点では粘性が著しく低下し、高い充填性が得られる。なほその共振々動数は流体柱の縦振動の法則に従う。

b. 振動加速度との関係 セメント調合物の粘性は振動加速度の増加に伴い著しく減少し、その関係はほぼ液性限界まで対数値で直線比例を示す。なほモルタルにおける液性限界は静止時の粘性の約2000分の1程度である。また液性化と振動加速度の関係は共振々動数およびそれ以外の振動数で大きく異り、同一液性化に必要な振動加速度は、モルタルによる実験で後者は前者の3倍以上の加速度を必要とする結果を得ている。

参考文献

- 1) D.A. STEWRT; THE DESIGN AND PLACING OF HIGH QUALITY CONCRETE
- 2) POWERS, T.C.; SOME ANALYTICAL ASPECTS OF FRESH CONCRETE
- 3) KUPPERS B; Die Dimensionierung von Rüttelgeräten für das Verdichten von Beton.
- 4) ERIK HÖGBERG; Vibreringens inverkan på lufthalten; cementbruk och betong.