

論文 フレッシュコンクリートの振動伝播性状に関する実験的・解析的研究

黒川 善幸^{*1}・谷川 恭雄^{*2}・森 博嗣^{*3}・渡辺 貴樹^{*4}

要旨：本研究では、内部振動機による強制振動力を受けるフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの振動伝播性状を把握するための振動伝播実験を行い、振動性状とビンガム定数の関係について考察した。また、粘塑性有限要素法による振動解析を行い、実験結果との比較を行った。実験結果においては、モルタルとコンクリートで、振動性状とビンガム定数の関係が一部逆の傾向を示した。また、解析結果は、ビンガム定数が小さい領域と大きい領域で、実験と同様に相関が逆転する傾向を示した。

キーワード：レオロジー、振動伝播性状、内部振動機、ビンガム定数、粘塑性有限要素法

1. はじめに

建築・土木分野では、コンクリート打設時に様々な種類のバイブレータを用いた締固めが行われているが、施工の省力化や迅速化の観点からも、フレッシュコンクリートの締固め効率を正確に把握し、施工設計にこれらを合理的に反映させることは重要である。しかし、実際には技術者の経験と勘に頼って作業が行われているのが現状であり、また、フレッシュコンクリートの振動伝播性状に関する研究¹⁾も、他の分野と比較して少なく、未解決な部分が多い。

筆者らは、内部振動機により強制振動力を受けるフレッシュコンクリートの振動伝播性状に関して粘塑性有限要素法²⁾を用いた解析を実施し、振動伝播に関して理論的な検討を行ってきた³⁾。しかし、実現象との比較では、村田らによる実験⁴⁾との比較を行ったに過ぎず、解析の妥当性について検討の余地が残った。

そこで本研究では、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートを用いて振動伝播実験を行い、レオロジー性質が振動伝播性状に与える影響について考察した。また、粘塑性有限要素法を用いた解析を行い、実験結果との比較を行った。

2. 実験方法

Fig.1に実験装置の概要を示す。530mm×350mmの型枠中に、まず深さ50mmまで試料を充填し、中央部分に棒状バイブレータ(φ35mm, 200Hz)を挿入した。Fig.2およびTable 1に示す加速度計を、1個はバイブレータ本体に取り付け、その他の5個はそこから50mm間隔で試料上面に一列に設置した。さらに、試料を深さ100mmま

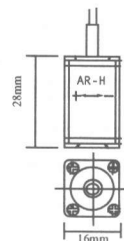
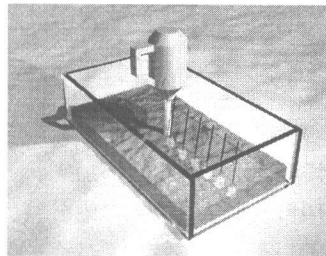


Fig.2 Acceleration Meter

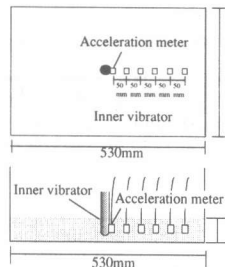


Fig.1 Outline of Experiment

Table 1 Specification of Acceleration Meter

No.	Distnce (mm)	Capacity (G)	Mass (g)
1	0	100	8
2	50	50	18
3	100	20	18
4	150	20	18
5	200	5	18
6	250	5	18

*1 名古屋大学助手 工学研究科建築学専攻 工修 (正会員)
 *2 名古屋大学教授 工学研究科建築学専攻 工博 (正会員)
 *3 名古屋大学助教授 工学研究科建築学専攻 工博 (正会員)
 *4 旭化成工業株式会社

で打設した後、表面を軽くならしてから、パイプレータにより加振した。なお、加速度計はコードに拘束されており、試料中では水平方向にのみ自由に移動可能である。1回の加振時間を10sとし、1ms間隔で加速度を計測した。また、1回目の加振終了から5min後に再度加振を行った。この他、スランプ試験、モルタルフロー試験およびコンクリートフロー試験を実施し、それぞれスランプ値と、テーブル落下前および15回落下後のフロー値を測定し、既に提案したレオロジー定数簡易推定法⁴⁾によりビンガム定数を算定した。

3. フレッシュモルタルの振動伝播性状

3.1 調合およびコンシステンシー試験結果

Table 2に、本実験に用いたモルタル試料の調合およびコンシステンシー試験結果を示す。試料No.1～No.3は、降伏値の大きい硬練りモルタル、試料No.4～No.6は、降伏値の小さい軟練りモルタルのシリーズである。また各シリーズとも、W/Cを変化させることにより粘性を変化させた。ビンガム定数の推定結果はほぼこれに対応している。

3.2 振動伝播実験

Fig.3に各モルタル試料の測定結果を示す。1ms間隔で加速度を計測したが、同図では、加速度の絶対値を取り、10個のデータの平均値を10ms間の平均加速度として示した。また、パイプレータ本体に取り付けた加速度計の値は、い

れも約80Gのほぼ同一の値を示したため、図中では表示を省略した。

いずれの調合においても、加振中の加速度の時刻変化はあまり見られない。試料No.6の加振初期において大きな値が計測されているが、計測中に加速度計が若干移動した影響と思われる。

1回目の加振時に比べ、2回目の加振時には加速度が小さくなっている。特に降伏値の大きな試料No.1～No.3では、1回目に見られる加速度のブレが減少し、より安定した値を示すようになる。これは、1回目の加振により試料が締め固まった影響と思われるが、加速度計の周りに溜まるブリーディング水や、経時変化による影響なども考えられる。

3.2.1 調合の影響

(a) 降伏値の影響

降伏値の大きな試料No.1～No.3では、降伏値の小さな試料No.4～No.6に比べ、特に1回目の加振時において加速度が大きく現れており、加振点に近いほどその傾向が強い。降伏値が大きな試料ほど内部摩擦が大きくなり、その摩擦によって振動の一部が伝わっているためと思われる。本実験では、高性能AE減水剤の添加量によって降伏値を調整しているため、降伏値の小さな試料ではエントレインドエアが多く、それによって振動のエネルギーが吸収されて振動が伝わりにくくなった可能性もある。

Table 2 Mix Proportion of Mortar, Results of Consistency Tests and Estimated Bingham's Constants

No..	W/C	s/m	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	HAE/C (%)	Sl. (mm)	Mf ₀ (mm)	Mf ₁₅ (mm)	τ_y (Pa)	η (Pa·s)
1	0.35	0.50	263	750	1,300	0.8	87.0	104.1	160.6	1,150	155
2	0.40	0.50	279	698	1,300	0.4	103.0	114.3	182.0	1,100	87
3	0.45	0.50	294	652	1,300	0.1	105.5	101.5	171.6	1,100	75
4	0.35	0.50	263	750	1,300	1.0	246.0	110.9	196.6	210	130
5	0.40	0.50	279	698	1,300	0.7	229.0	109.6	204.1	293	89
6	0.45	0.50	294	652	1,300	0.3	227.0	107.3	199.5	295	84

[Notes] W/C: Water-cement ratio, s/m: Volumetric fine aggregate-mortar ratio, W: Water, C: Cement, S: Fine aggregate, HAE: High-range water-reducing AE agent, Sl.: Slump value, Mf: Mortar flow value, τ_y : Yield value, η : Plastic viscosity.

(b) 塑性粘度の影響

降伏値の大きな試料では、塑性粘度が大きいもののほど、加速度の測定値も大きくなっている。塑性粘度が大きいほど、せん断ひずみ速度が大きな領域においてせん断抵抗が増し、加速度が伝わりやすくなるためであると思われる。

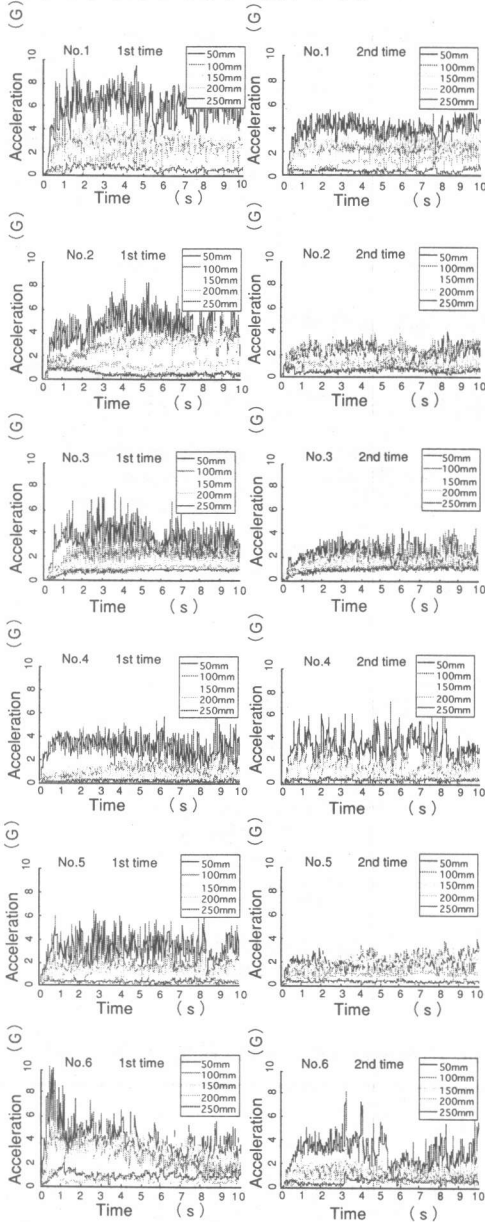


Fig.3 Results of Transmission of Vibration in Fresh Mortar

一方、降伏値の小さな試料では、若干ではあるが、降伏値の大きな試料とは逆の性状を示し、塑性粘度が小さいほど、加速度の測定値は大きい。しかし、加速度の変化は非常に小さく、誤差の範囲内であると判断している。

3.2.2 加速度の距離減衰

一般に、コンクリート中を伝わる加速度の距離減衰は、次式(1)で表される。

$$\alpha_x = \alpha \exp(-\beta x) \quad (1)$$

ここに、 x ：加振点からの距離 [m], α_x ：加振点から x 離れた位置での加速度 [G], α ：加振点近傍での加速度 [G], β ：材料減衰定数 [1/m]

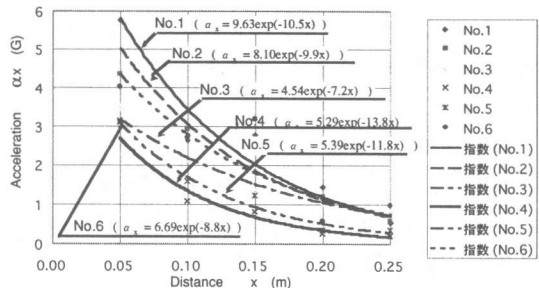


Fig.4 Damping of Mean Acceleration in Fresh Mortar

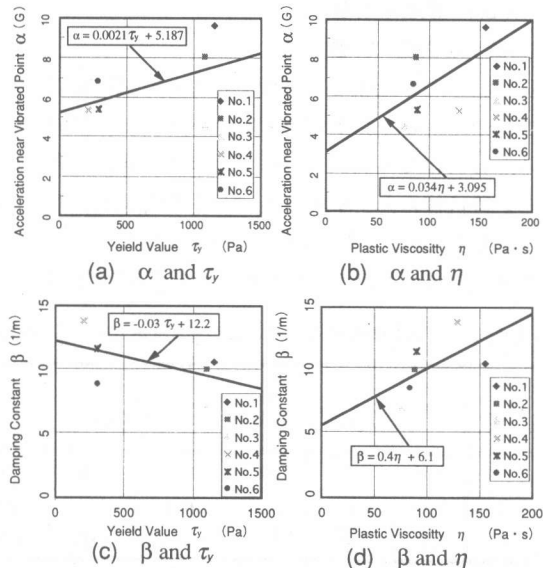


Fig.5 Relationship between α , β and Bingham's Constants

Fig.4に、1回目の加振時の各調合の10s間の平均加速度を式(1)の指数関数で近似した結果を示す。また、各調合の近似式より得られた α および β と、降伏値 τ_y および塑性粘度 η の関係をFig.5に示す。振動力の伝達性状には、降伏値、塑性粘度ともに大きく影響し、それぞれの値の増加にともない、加振点近傍での加速度 α は増加する。また、材料減衰定数 β は塑性粘度の影響が強く、塑性粘度の増加に伴って顕著に増加する傾向を示す。

4. フレッシュコンクリートの振動伝播性状

4.1 調合およびコンシステンシー試験結果

Table 3に、コンクリート試料の調合およびコンシステンシー試験結果を示す。試料No.1を基準として、試料No.2は降伏値が大きい試料、試料No.3は塑性粘度が小さい試料である。

4.2 振動伝播実験

Fig.6に、各コンクリート試料の測定結果を示す。測定方法および図の表示方法はモルタルの場合と同様である。

4.2.1 調合の影響

(a) 降伏値の影響

試料No.1と比較して降伏値の大きい試料No.2では、試料No.1よりも加速度が小さくなっている。これはモルタルシリーズとは逆の傾向である。降伏値の大きい試料は、より粉粒体に近い性状となるため、コンクリート全体として伝わる加速度が減少したものと思われる。また、降伏値の

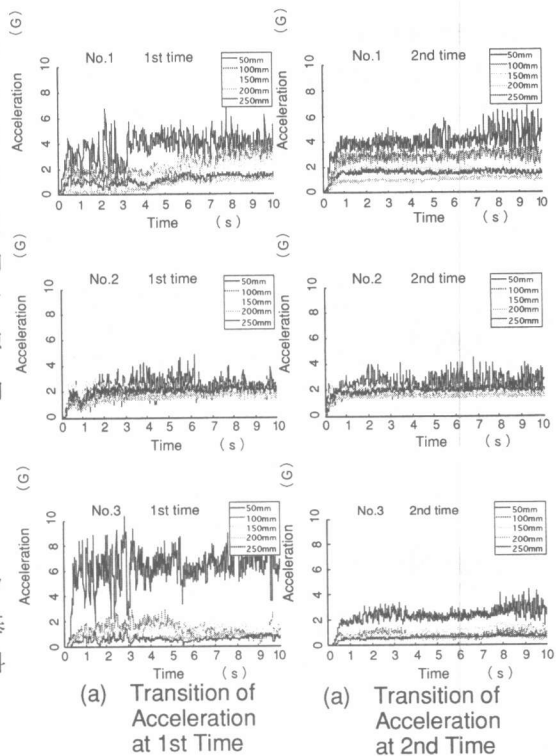


Fig.6 Results of Transmission of Vibration in Fresh Concrete

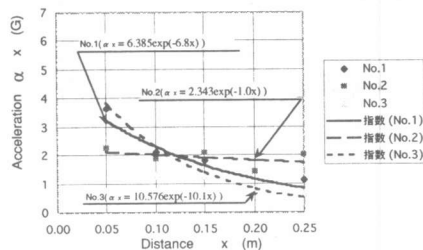


Fig.7 Damping of Mean Acceleration in Fresh Concrete

Table 3 Mix Proportion of Concrete, Results of Consistency Tests and Estimated Bingham's Constants

No.	W/C	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	V _g (l/m ³)	S/(S+G)	HAE/C (%)	Sl. (mm)	Cf ₁₅ (mm)	τ_y (Pa)	η (Pa·s)
1	0.35	175	500	653	980	377	0.40	1.1	205.0	493.0	390	160
2	0.35	175	500	653	980	377	0.40	0.8	85.0	355.0	900	320
3	0.45	186	421	653	980	377	0.40	0.9	191.0	502.3	400	130

[Notes] W/C: Water-cement ratio, s/m: Volumetric fine aggregate-mortar ratio, W: Water, C: Cement, S: Fine aggregate, G: Coarse aggregate, V_g: Volume fraction of coarse aggregate, S/(S+G): Sand-coarse aggregate ratio, HAE: High-range water-reducing AE agent, Sl.: Slump value, Cf: Concrete flow value, τ_y : Yield value, η : Plastic viscosity.

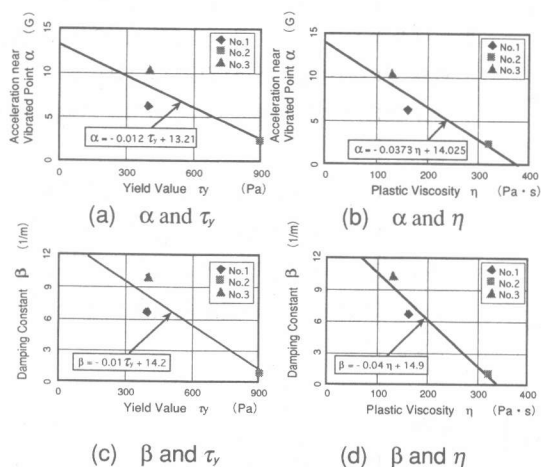


Fig.8 Relationship between α , β and Bingham's Constants

小さなコンクリートでは、粗骨材の移動が容易になるため、粗骨材同士の接触による振動の伝播が大きくなる可能性も考えられる。

(b) 塑性粘度の影響

試料No.1と比較して塑性粘度の小さい試料No.3では、特に加振点付近での加速度が大きくなっている。これは、パイプレータの運動に対する試料の拘束が低下したためと考えられる。

4.2.2 加速度の距離減衰

Fig.7に、1回目の加振時の各調合の10s間の平均加速度を指数関数で近似した結果を示す。また、Fig.8には、各調合の近似式より得られた α および β と、降伏値 τ_y および塑性粘度 η の関係を示す。

加振点近傍での加速度 α および材料減衰定数 β には、降伏値、塑性粘度ともに大きく影響し、それぞれの値の増加にともない、加振点近傍での加速度は小さくなり、減衰も少なくなる。これは、モルタル試料の場合とは逆の傾向である。

5. 粘塑性有限要素法²⁾による振動解析

5.1 解析の概要

Fig.9に解析に用いた要素分割を示す。実験結

果と比較するため、実験に用いた型枠を上から見た平面ひずみ問題として解析とした。なお、対称問題として半分の領域を計算した。Table 4に解析の入力値を示す。振動伝播性状に与えるビンガム定数の影響を見るため、降伏値 τ_y を10Paと1000Paに固定して塑性粘度 η を変化させたシリーズ、塑性粘度 η を10Pa $\cdot$ sと1000Pa $\cdot$ sに固定して降伏値 τ_y を変化させたシリーズの合計4シリーズとした。入力加速度は加振点から0.05m離れた点での加速度を実験値と同程度にするため、540Gとした。振動数は、実験に用いたパイプレータと同じ200Hz、加振方向はx方向とした。

5.2 解析結果とその考察

Fig.10に、解析結果の一例を示す。また、Fig.11は、実験と同様に解析結果を式(1)の指数関数で近似し、得られた α および β とビンガム定数との関係を示したものである。図から明らかに、 α , β はともに、降伏値では $\tau_y=100\sim 500$ Paにおいて、塑性粘度では $\eta=100\sim 500$ Pa $\cdot$ sにおいて、それぞれ極大値が存在している。また、Fig.5, 8のモルタルおよびコンクリートの実験結果から得られた傾向は、この極大値よりも小さい領域と大きい領域における解析結果とそれぞれ類似している。このことは、コンクリートに比べ、モルタルのビンガム定数が振動の影響により大きく低下していることを示唆するものである。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) フレッシュモルタルにおいては、加振点近傍での加速度 α と、材料減衰定数 β は、ビンガム定

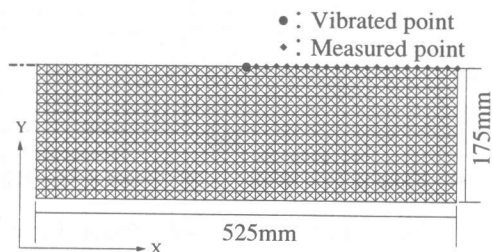


Fig.9 Finite Element Idealization

Table 4 Input Value of Analysis

Series	Bingham's constants		Vibration A
	η	τ_y	
$\tau_y = 10$	10, 50, 100, 500, 1000, 1500, 2000	10	540
$\tau_y = 1000$	10, 50, 100, 500, 1000, 1500, 2000	1,000	
$\eta = 10$	10	10, 50, 100, 500, 1000, 1500, 2000	
$\eta = 1000$	1,000	10, 50, 100, 500, 1000, 1500, 2000	

[Notes] τ_y : Yield value (Pa), η : Plastic viscosity (Pa·s),
A: Acceleration (G)

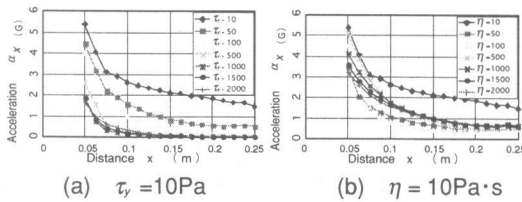


Fig.10 Examples of Analytical Results

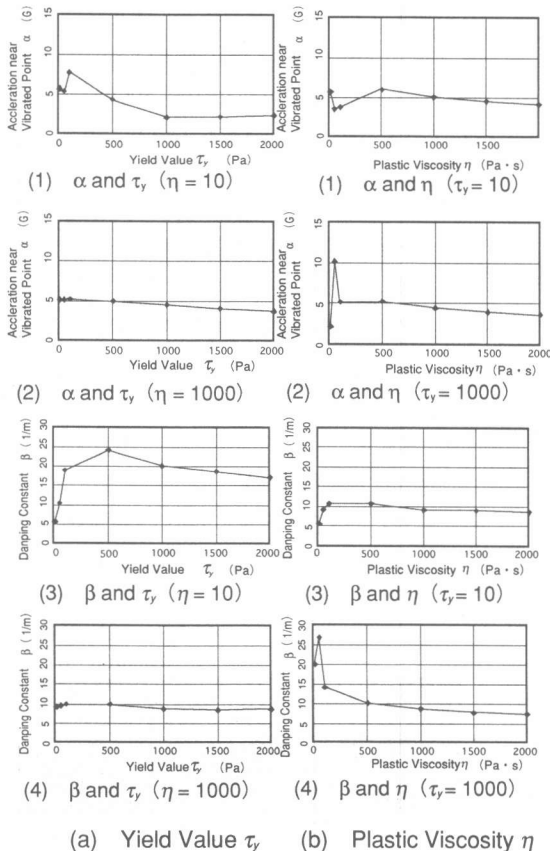


Fig.11 Relationship between α , β and Bingham's Constants

数の増加にともなって、顕著に増加する。

- フレッシュコンクリートにおいては、加振点近傍での加速度 α と、材料減衰定数 β は、ビンガム定数の増加にともなって、減少する傾向がある。
- 粘塑性有限要素法による振動伝播解析結果は、ビンガム定数が小さな領域ではモルタルの実験結果と、また、ビンガム定数が大きな領域ではコンクリートの実験結果と同様の傾向を示す。

謝辞

本研究費の一部は、平成11年度日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(B)によった。また、実験に際して安井孝文君（名古屋大学大学院生）の助力を得た。付記して謝意を表する。

参考文献

- 村田二郎・川崎道夫・関史郎：振動締固めによるコンクリートの挙動，フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.107-112, 1986.3.
- 森博嗣・谷川恭雄：粘塑性有限要素法によるフレッシュコンクリートの流動解析，日本建築学会構造系論文報告集，No.374，pp.1-9, 1987.4.
- 渡辺貴樹・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・北大路洋：内部振動機による振動力を受けるフレッシュコンクリートの振動伝播性状に関する解析的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)，A-1，pp.1021-1022, 1998.9.
- 谷川恭雄・森博嗣・瀧田安浩・筒井一仁・伊藤瑞子：フレッシュコンクリートのレオロジー定数簡易推定法に関する一考察，日本建築学会東海支部研究報告集，No.30，pp.1-4, 1992.2.