

論文 準高流動コンクリートの振動締固め方法に関する研究

安田 正雪^{*1}・榊田 佳寛^{*2}・三好 征夫^{*3}・荒金 直樹^{*4}

要旨：目標スランプフローが450mmの準高流動コンクリートの流動性状や強度性状へ及ぼす振動締固めの影響を把握するため、高流動コンクリートおよび軟練りの普通コンクリートへの加振の影響と比較検討した。その結果、U型容器を用いた間隙通過試験では、準高流動コンクリートは高流動コンクリートよりも充填高さはやや小さいが、若干の時間加振することで十分な充填性が得られることが明らかとなった。また、柱模擬部材におけるコアの圧縮強度試験では、準高流動コンクリートの棒形振動機による振動締固めの有効範囲や振動時間5～15秒の強度に及ぼす影響は、普通コンクリートと大差がないことが明らかとなった。

キーワード：準高流動コンクリート、振動締固め、充填性、圧縮強度、加速度

1. はじめに

近年、スランプフローが500～700mmで自己充填性を有し、締固めがほとんど不要の高流動コンクリートが開発され、仕様が建築学会や土木学会の指針に取り入れられた。高流動コンクリートは、締固め作業が困難な箇所や不可能な箇所へ適用する場合には不可欠なコンクリートであるが、厳しい品質管理を必要とすることやコストが高いという欠点がある。そこで、自己充填性は期待しないが普通コンクリートよりは良好な施工性を有し、一般の部位・部材に適用する通常の軟練りコンクリートと高流動コンクリートとの中間の流動性を有し、製造や品質管理の容易なコンクリートの出現が期待され、実験研究がなされている^{1)・2)}。このいわゆる準高流動コンクリートは、スランプフローが400～500mmで若干の締固めは必要とするが、流動性に優れ、じゃんかななどの施工欠陥を作りにくいという長所をもっている。しかし、準高流動コンクリートの振動締固めが及ぼす流動性状や強度性状への影響に関する研究は極めて少なく、不明な

点が多い。

本実験は、分離低減剤や石灰石微粉末を用いた水セメント比50%および40%の準高流動コンクリートについて、U型容器の間隙通過試験を用いて振動締固めの流動性の評価を行うとともに、柱模擬部材の型枠内に打ち込んだコンクリートの流動勾配ならびに振動締固め時間および加速度とコア供試体の圧縮強度との関係についての検討を行ったものである。なお、比較のために、普通コンクリート、高流動コンクリートおよび高強度コンクリートについても試験した。

2. 実験計画

実験の水準と要因を表-1に示す。

表-1 実験の要因と水準

要 因	水 準
コンクリートの種類	準高流動, 高流動, 高強度, 普通
セメントの種類	普通セメント, 低熱セメント
水セメント比(%)	50, 40, 33.3, 25
スランプフロー(cm)	45±5, 60±5, 30±3 (スランプ18cm)
間隙通過性試験	流動障害あり, 流動障害なし
柱部材振動締固め時間(秒)	0, 5, 15, 30

*1 東洋建設(株)美浦研究所材料研究室主任研究員 (正会員)

*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)

*4 東洋建設(株)美浦研究所材料研究室研究員 工修 (正会員)

2.1 使用材料およびコンクリートの調合

使用材料と物性を表-2に、コンクリートの調合を表-3に示す。荷卸し時の目標スランプフローは準高流動コンクリートおよび高強度コンクリートが450±50mm、高流動コンクリートが600±50mm、普通コンクリートが300±30mm（スランプで18±1.5cm）とした。目標空気量は4.5±1.5%とし、W/C=25%のもののみ3.0±1.0%とした。

2.2 試験項目と試験方法

コンクリートの製造はレディーミクストコンクリート工場の3m³の水平型2軸強制ミキサを用いて行い、練混ぜ量は2m³とした。練混ぜ時間はミキサ負荷電流値がほぼ一定となるまでとし、60～270秒とした。コンクリートの運搬には容量3m³のアジテータ車を使用した。荷卸し時のスランプおよび空気量は、目標の値が得られるように荷卸し時直前に混和剤を適宜投入し攪拌して微調整した。荷卸し時のフレッシュコンクリートの試験は、スランプフローおよび空気量が所定の品質が得られていることを確認した後、①Oロート落下時間、②間隙通過試験（流動障害あり[R2:D13を3本配置したもの]と流動障害なしのU型容器）③ウェットモルタルのレオロジー定数を測定した。また、図-1に示す柱部材を模した合板型枠内にコーナーからコンクリートをアジテータ車のシュートを用いて打ち込み、その際の流動勾配を測定するとともに、棒形振動機をコンクリートに所定の位置（下面から上方10cm）まで挿入し、所定の時間（0～30秒間）コ

ンクリートに振動を与えた。なお、同一調合で振動時間を最も長く設定した柱部材では、予め加速度計をセットし、加速度を計測した。ただし、加速度計用治具を取り外した後、さらに15秒間振動を与えコンクリートの締固めを行った。試験方法を表-4に示す。

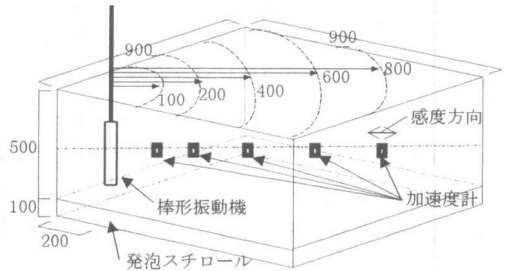


図-1 加速度の測定方法

表-2 使用材料

項目	物 性
セメント	普通ポルトランドセメント(C _N) 密度3.16g/cm ³ , 比表面積3300cm ² /g
	低熱ポルトランドセメント(C _L) 密度3.24g/cm ³ , 比表面積3260cm ² /g
石灰石微粉末	(LS)密度2.70g/cm ³ , 比表面積3600cm ² /g
水	上水道水(W)
細骨材	鹿島産陸砂(S1): 表乾密度2.57g/cm ³ , 吸水率2.42%, FM 2.49
	笠間産砕砂(S2): 表乾密度2.62g/cm ³ , 吸水率1.62%, FM 2.90
粗骨材	笠間産砕石(G): 表乾密度2.66g/cm ³ , 吸水率0.69%, 実積率60.4%, FM6.64
混和剤	分離低減剤(V): セルローズエーテル系
	高性能AE減水剤(SP): ホリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体
	AE剤(AE): アルキルカルボン酸系

表-3 コンクリートの調合

No.	コンクリートの種類	W/C (%)	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	目標スランプフロー (mm)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)										荷卸し時コンクリート温度 (°C)	σ _c (N/mm ²) 標準養生	
						W	C _N	C _L	LS	S1	S2	G	V (Wx%)	SP (Px%)	AE (Px%)		28日	56日
1	準高流動	50	0.57	450	48.4	175	350	-	-	669	167	914	0.1	1.40	.0020	21.0	39.6	43.9
2	準高流動	50	0.57	450	45.8	175	350	-	88	601	150	914	-	1.20	.0050	21.0	36.9	40.8
3	準高流動	40	0.57	450	46.2	175	438	-	-	611	153	914	-	1.40	.0050	23.5	48.0	53.3
4	普通	50	0.62	300	44.7	175	350	-	-	617	154	981	-	1.00	.0035	23.5	37.7	42.1
5	高強度	33.3	0.57	450	43.7	175	526	-	-	553	138	914	-	1.60	.0050	23.5	61.4	65.2
6	高強度	33.3	0.57	450	44.1	175	-	526	-	562	140	914	-	1.40	.0040	21.0	59.6	73.2
7	高流動	33.3	0.54	600	47.0	175	526	-	-	594	149	867	-	1.60	.0040	21.0	57.8	65.0
8	高流動	33.3	0.54	600	47.3	175	-	526	-	602	151	867	-	1.55	.0050	19.5	53.7	68.5
9	高流動	25	0.54	600	45.9	165	-	660	-	570	142	867	-	1.80	-	19.5	76.6	91.2

注) P: C_N+C_L+LS

表-4 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランプフロー	JASS 5 T-303 に従った。
空気量	JIS A 1128 に従った。
0ポート流下時間	土木学会高流動コンクリート施工指針（漏斗を用いた流下試験方法）に従った。
間隙通過試験 [U型容器] 1) 流動障害あり R2:D13を3本 配置したもの 2) 流動障害なし	土木学会高流動コンクリート施工指針（充てん装置を用いた間隙通過試験方法）に準じて行った。ゲートを開放し、B室への充填が停止するまでの時間と充填高さを測定した。その後、棒形振動機（振動部φ25×380mm、振動数240Hz）をA室に挿入し、A室とB室が同じ高さとなるまで加振し、その加振時間を測定した。流動障害ありの容器では、各室のコンクリートを取出し、呼び径5mmのフルイで洗い試験を行って、コンクリートに対する粗骨材質量比を求めた。
モルタルの塑性粘度と降伏値	呼び径5mmのフルイでウェットスクリーニングしたモルタルを、内円板回転型粘度計を用いてロータ（半径13.65mmまたは8.25mm）の回転速度10, 20, 40, 80rpmにおける30秒間のトルクを測定し、ずり応力とずり速度に変換した後、両者の関係を回帰直線に近似し、傾きを塑性粘度とし、切片の値を降伏値とした。
柱模擬部材のコンクリート締め時の加速度	加速度計（容量20G、0.5msecで測定）設置位置は棒形振動機から10, 20, 40, 60, 80cm 棒形振動機：振動部φ42×380mm、200Hz、部材寸法：900×900×500mm
圧縮強度	材齢28日、材齢56日標準養生-各3本（材齢2日脱型、20℃水中養生）
コア強度	材齢56日（試験材齢の約2週間前にφ100×300mmのコアを採取し、中央部約20cmを供試体とし、試験まで封緘養生した。コアは、振動機から10, 20, 40, 60, 80cmの位置で各2本採取した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性質

スランプフローと0ポート流下時間の関係を図-2に示す。0ポート試験では普通コンクリートは閉塞したが、スランプフロー450mm程度の準高流動コンクリートは閉塞することなく全量流下し、その流下時間は高流動コンクリートよりも早いものもあった。ウェットスクリーニングしたモルタルの塑性粘度と降伏値の関係を図-3に示す。モルタルの塑性粘度は調査の種類の違いが認められるものの、降伏値は一部の調査を除いて大差は認められなかった。

(1) 間隙通過性試験

スランプフローとU型容器のゲート開放時におけるB室充填高さの関係を図-4に示す。A室とB室が同じ高さとなるまでに要した棒形振動機の加振時間とスランプフローの関係を図-5に示す。充填高さはスランプフローと

記号	No.	W/C(%)	主な材料	記号	No.	W/C(%)	主な材料
●	1	50	分離低減剤	▲	2	50	石灰石微粉
■	3	40	普通セメント	×	4	50	普通セメント
○	5	33.3	普通セメント	△	6	33.3	低熱セメント
□	7	33.3	普通セメント	◇	8	33.3	低熱セメント
*	9	25	低熱セメント				

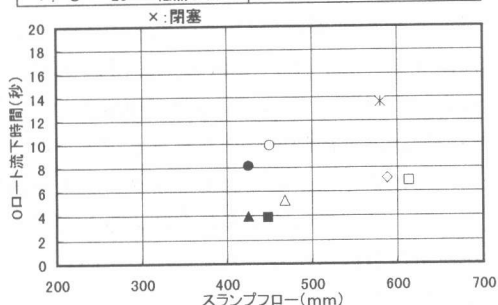


図-2 スランプフローと0ポート流下時間の関係

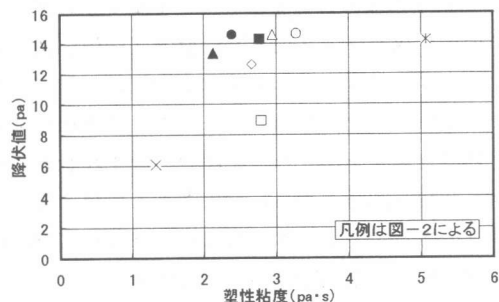


図-3 塑性粘度と降伏値の関係

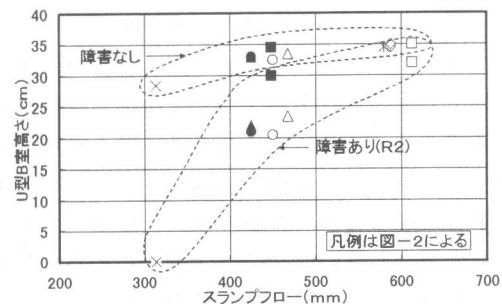


図-4 スランプフローと充填高さの関係

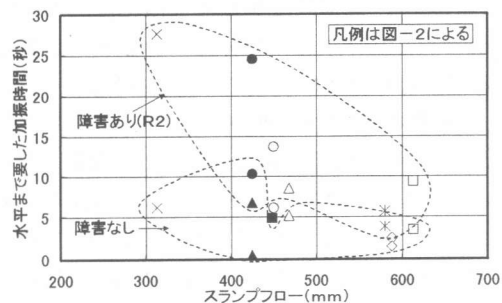


図-5 スランプフローと加振時間の関係

相関が高く、R2容器における準高流動コンクリートは20cm以上であった。特に水セメント比40%のものは高流動コンクリートと同等の充填高さであった。分離低減剤を用いた準高流動コンクリートの加振時間は普通コンクリートと同程度要したが、石灰石微粉末を用いた準高流動コンクリートや水セメント比40%のものの加振時間は、高流動コンクリートと大差がなかった。このことは、準高流動コンクリートの実施工において若干の時間振動を加えることで十分な充填性が得られることを示唆しているものと考えられる。

(2) レオロジー定数と間隙通過性

U型容器のB室充填高さと同モルタルの塑性粘度の関係を図-6に、降伏値との関係を図-7に示す。モルタルのレオロジー定数と充填高さの関係については明らかでなく、障害なしの場合は普通コンクリートを除いていずれも充填高さは30cm以上となり、障害ありの場合は粗骨材量に応じて充填高さはほぼ同じとなるので、粗骨材量の影響が大きいものといえる。

U型容器R2においてA室の粗骨材量に対する障害を通過したB室の粗骨材比率について、B室充填高さとの関係で示すと図-8のようであり、振動時間との関係で示すと図-9のようになる。加振時間が長くなると粗骨材比率が小さくなる傾向はあるが、準高流動コンクリートのその比率は90%を超えている。なお、加振した後のB室では、普通コンクリートの場合上部2cm程度は粗骨材が認められず材料分離していたが、その他のコンクリートの場合材料分離は生じていなかった。これらのことより、本実験の加振時間内では、準高流動コンクリートの材料分離は生じず、必要な材料分離抵抗性を有しているといえる。

(3) 柱模擬部材の流動勾配

打込み開始からの流動勾配の範囲を表-5に示す。準高流動コンクリートの流動勾配は普通コンクリートと比較して、No.3の割合では明らかに小さくなったが、逆にNo.1の割合ではやや大きくなった。本試験体の形状、寸法では準高

記号	No.	W/C(%)	主な材料	記号	No.	W/C(%)	主な材料
●	1	50	分離低減剤	▲	2	50	石灰石微粉
■	3	40	普通セメント	×	4	50	普通セメント
○	5	33.3	普通セメント	△	6	33.3	低熱セメント
□	7	33.3	普通セメント	◇	8	33.3	低熱セメント
*	9	25	低熱セメント				

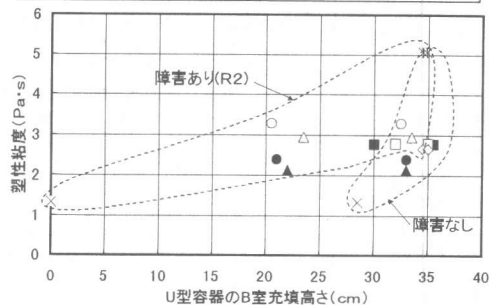


図-6 充填高さと塑性粘度の関係

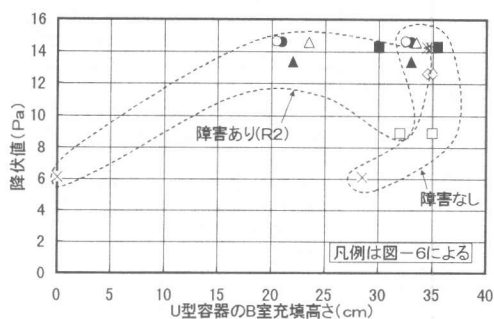


図-7 充填高さと降伏値の関係

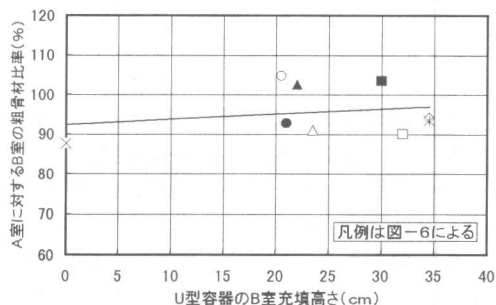


図-8 充填高さと粗骨材比率の関係

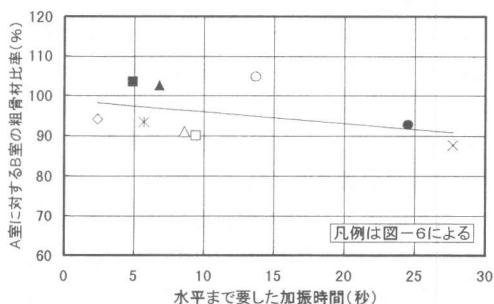


図-9 加振時間と粗骨材比率の関係

流動コンクリートの流動勾配が普通コンクリートより明確に小さくなるという結果が得られなかった。準高流動コンクリートのセルフレベリング性については、今後の実際の施工状況での評価が必要であり、課題としたい。

(4) 振動機からの距離と加速度

振動機からの距離と振動開始から15秒間の最大加速度の平均値の関係を図-10に示す。また、振動開始から5, 10, 15および30秒間の最大加速度の平均値を図-11に示す。

これらより、加速度は振動機から遠くなると減衰するが、分離低減剤の準高流動コンクリートを除くと、振動機から近い位置では高強度のものほど加速度が大きい傾向にある。また、水セメント比が同じ場合、低熱ポルトランドセメンを用いた調合は普通ポルトランドセメンのものよりも小さい傾向にある。振動開始から5, 10, 15, 30秒間の最大加速度の平均値を振動源から近い位置でみると、時間経過とともに準高流動コンクリートでは若干小さくなっていく。一方、水セメント比が小さいものでは大きくなり、普通コンクリートでは小さくなっている。このことは、粘性の小さいコンクリートでは振動で液状化し、さらに加振すると分離し骨材の沈降が起り水に近づいて減衰が大きくなることを示しているともと思われる。

3.2 硬化コンクリートの性質

図-12に、高流動コンクリートの打込み位置からの流動距離とコア強度の関係を示す。打込み位置から80cmの位置でも打込み位置のコア強度に対して、95%以上の強度を有していることがわかる。次に、各種コンクリートについて、振動機から10cm位置のコア強度に対する各位置のコア強度比を求めた結果を、図-13、図-14に示す。ここで、振動機から10cm位置のコア強度を基準としたのは、振動機の位置におけるコアはコンクリートの構成要素のばらつきが大きいと考えたためである。高流動コンクリートの無振動時の80cm位置におけるコア強度比95%を目安に締固めの有効範囲を評価した場合、振動締固め5秒および15秒では、普通コンクリートや

表-5 流動勾配と加振時間

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
流動勾配 (°)	6 ~ 15	7 ~ 12	3 ~ 5	8 ~ 12	5 ~ 10	2 ~ 5	2 ~ 3	1 ~ 2	2 ~ 4
振動後水平と なったおおよ その時間(秒)	15	3	2	2	10	4	1	1	3

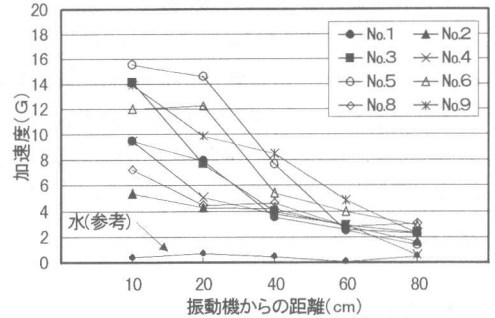


図-10 振動機からの距離と加速度の関係

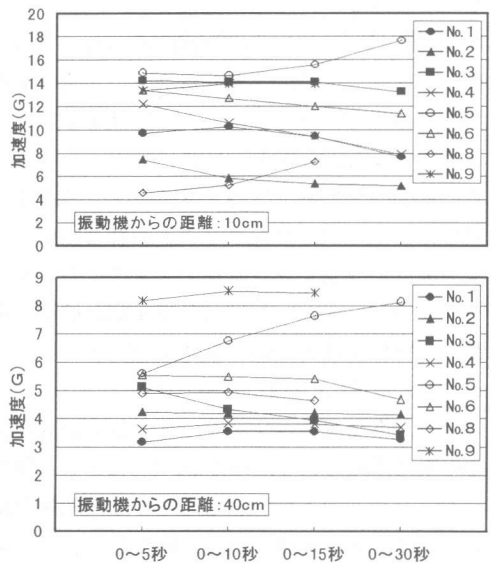


図-11 加振時間と加速度の関係

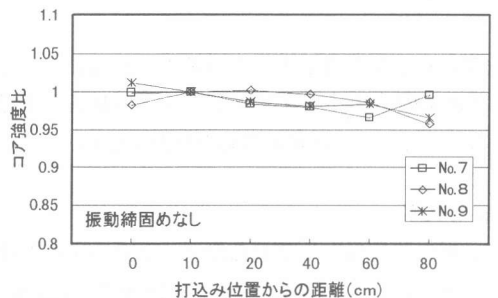


図-12 流動距離とコア強度の関係

部の準高流動コンクリートについては振動機から60cmと80cm位置ではコア強度比が95%を下回っており、締固めの有効範囲は棒形振動機の棒径の10倍程度といえる。加速度でみると、図-15に示すようであり、加速度が約4G以下となると、振動機からの10cmのコア強度に対するコア強度比が95%未満となる場合もある。

一方、振動時間の影響についてみると、図-16に示すようであり、振動機から60cm位置における振動時間5～15秒でのコア強度はいずれのコンクリートについても標準養生を施したものと同等程度であり、振動時間でいえば強度に及ぼす影響はないといえる。

4. まとめ

本実験の範囲で得られた試験結果は、以下のとおりである。

- (1) U型容器を用いた間隙通過試験では、準高流動コンクリートは高流動コンクリートよりも充填高さはやや小さいが、若干の時間加振することで十分な充填性が得られる。
- (2) 無筋の柱模擬部材におけるコアの圧縮強度試験では、準高流動コンクリートの棒形振動機による締固め有効範囲は普通コンクリートと大差がなかった。また、強度に及ぼす振動時間の影響は、振動時間5～15秒の範囲では普通コンクリートと大差がなかった。

なお、準高流動コンクリートの振動締固めの優位性は認められなかったが、3.1に示した準高流動コンクリートの間隙通過性などの結果を踏まえると、RC部材への打込みでは、普通コンクリートより施工欠陥を少なくできることが示唆される。

(謝辞) 宇都宮大学工学部卒論生宮野氏、ポゾリス物産横山氏、宇部三菱セメント小島氏、千葉氏、三光生コン石井氏の協力を得ました。

参考文献

- 1) 梶田佳寛ほか：準高流動コンクリートの基礎研究，日本建築学会大会学術講演梗概集A-1，pp.975～978，1998

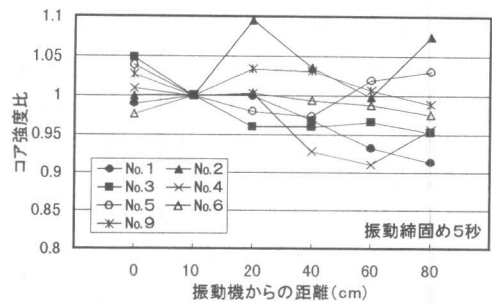


図-13 振動機からの距離とコア強度比の関係(その1)

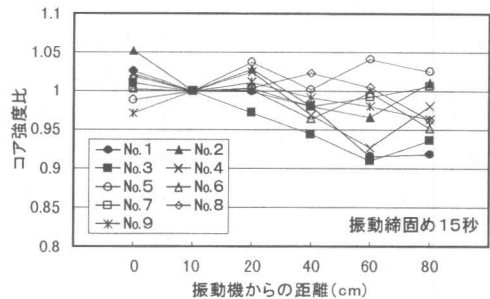


図-14 振動機からの距離とコア強度比の関係(その2)

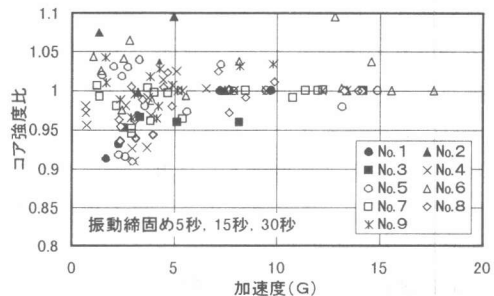


図-15 加速度とコア強度比の関係

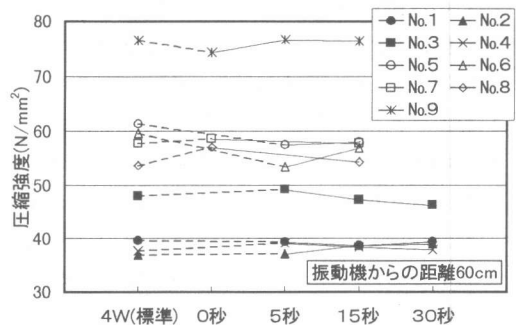


図-16 加振時間と圧縮強度の関係

- 2) 松藤泰典ほか：中流動コンクリートに関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集A-1，pp.971～974，1998