

論文 コンクリートの振動充てん性能に及ぼすフレッシュ性状の影響

伊達 重之^{*1}・御領園 悠司^{*2}・渡辺 健^{*3}・橋本 親典^{*4}

要旨：コンクリートの振動充てん性能に及ぼすフレッシュ性状の影響について評価した。その結果、塑性粘度が低下するにつれて振動伝搬効率が向上し、短い時間で充てんが可能となることがわかった。一方、細骨材率が小さい配合に関しては、塑性粘度が低くなると粗骨材のかみ合わせの影響によって振動充てん性能が低下することが確認された。また、同一配合のコンクリートにおいて、練混ぜ方法が異なれば振動締固め効率も異なることが確認された。

キーワード：コンクリート，分割練混ぜ，塑性粘度，振動締固め

1. はじめに

近年，コンクリート構造物におけるジャンカやはく落などの不具合が社会的に注目されている。これらは，ほとんどが施工段階における充てん作業の適否と深い関わりがある。一般に，コンクリートの充てん方法は，特殊な場合を除いて現場打ち，プレキャストコンクリートの製造のいずれにおいても，振動締固めが主流である。この作業を確実に行うことが重要である。しかしながら，振動締固めを必要以上に施すと，骨材分離や内部気泡の露出¹⁾といった別の不具合を引き起こす。密実で均一な構造物の構築のためには，対象構造物ならびにコンクリートの特性にあわせた適切な締固めを行う必要があることは論を待たない。

一方，建設コストダウンや，騒音による周辺環境への負荷低減といった社会的要請に応えるために，少ないエネルギーで素早い充てんが可能なコンクリートが求められている。このようなコンクリートの施工性能に基づく配合設計を可能とするためには，振動締固め性能とコンクリート特性の関係を把握しておく必要がある。

本研究の目的は，コンクリートを構成するモルタルの塑性粘度に着目し，振動締固め性能に

及ぼすフレッシュ性状の影響を定量的に評価することである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表－1に示す。細骨材の拘束水率(β_{OH})は，辻ら²⁾によって提案された遠心力試験によって求めた。

2.2 実験条件

実験要因と水準を表－2に示す。練混ぜには容量が60リットルの二軸強制練りミキサを用いた。練混ぜ方法は一括練混ぜ・分割練混ぜの2種類とし，練混ぜ時間は105秒で一定とした(図－1参照)。なお，W1やW2の設定等は既往の文献³⁾による方法に従った。

各配合条件におけるコンクリートは，混和剤

表－1 使用材料

材料	記号	種類	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	拘束水率 (β_{OH} ；%)
セメント	C	早強ポルトランドセメント	3.16	—	—
細骨材	S	静岡県大井川産砕砂	2.64	1.31	1.42
粗骨材	G	静岡県大井川産碎石	2.65	0.83	—
混和剤	Ad	ポリカルボン酸系 高性能減水剤	1.04	—	—

*1 石川島建材工業（株） 技術研究所 主任研究員 博(工) (正会員)

*2 徳島大学大学院 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻 博士前期課程1年 (正会員)

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部助教 博(工) (正会員)

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部教授 工博 (正会員)

表－２ 実験要因と水準

実験要因	水準
練混ぜ方法	一括練混ぜ, 分割練混ぜ
単位セメント量 (kg/m ³)	350, 380, 410
単位水量 (kg/m ³)	135, 145, 155
s/a (%)	41, 45, 49
スランプ (cm)	0.5～21

添加量を調整して練上りスランプを調整した。練混ぜ直後に、一部は5mmのふるいを用いたウェットスクリーニングによって粗骨材を除去して塑性粘度の測定を行い、残りは振動伝搬試験および振動ボックス充てん試験を行った。

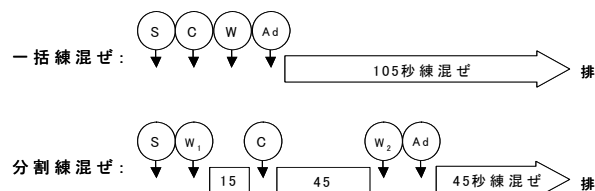
2.3 モルタルの塑性粘度の測定

ウェットスクリーニングによって得られたモルタルの粘度の測定については、比較的水セメント比が小さく、漏斗もしくは管方式では閉塞して測定できない高粘性のモルタルにも適用可能で操作が簡便な羽根沈入型粘度計⁴⁾を用いた。本粘度計は、図－２に示すとおり、3枚の羽根を有する治具をモルタルに自重で沈入させて粘性を測定するものである。1試料について、沈入羽根の質量Wを段階的に変えて沈入速度を測定し、図－３に示すせん断速度($=L/T$)とせん断応力度 τ ($=W/A$)の関係から、塑性粘度を求めるものである。本粘度計によって得られた結果を図－３に示すグラフ上にプロットし、それらのデータから求めた回帰線の傾きの逆数を塑性粘度とし、X切片の値を降伏値とした。実際の測定においては、別途行った、粘度が既知の流体（シリコンオイル；塑性粘度が10～300Pa・s）を用いた結果を検量線として用いた。

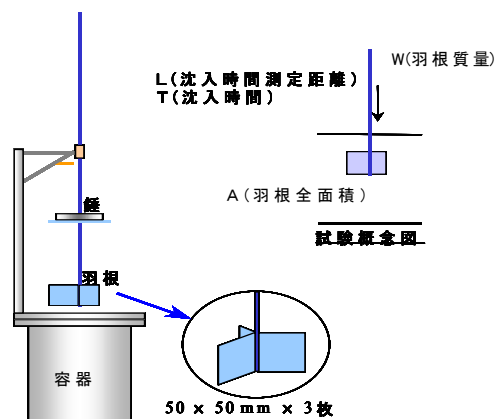
2.4 振動下におけるボックス充てん時間の測定

コンクリートを振動締固めにより鉄筋間隙を通過させて十分充てんすることができるか否かを判定するために、ボックス型容器⁵⁾を用いて振動下での充てん性能を評価した（図－４参照）。流動障害には障害R2を用いた。

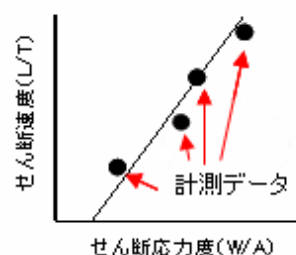
充てん試験における加振源として、容器内部に棒バイブレータを挿入し、充てん高さと累積



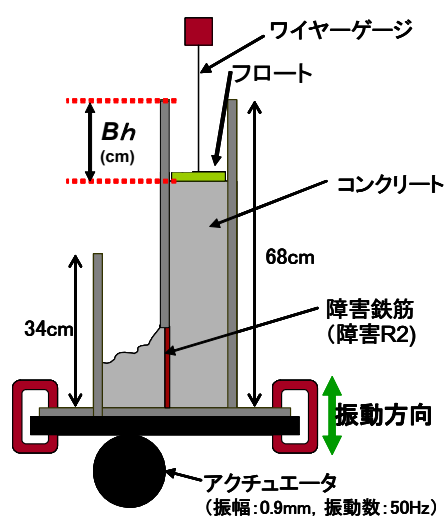
図－１ 練混ぜ方法



図－２ 羽根沈入式粘度計

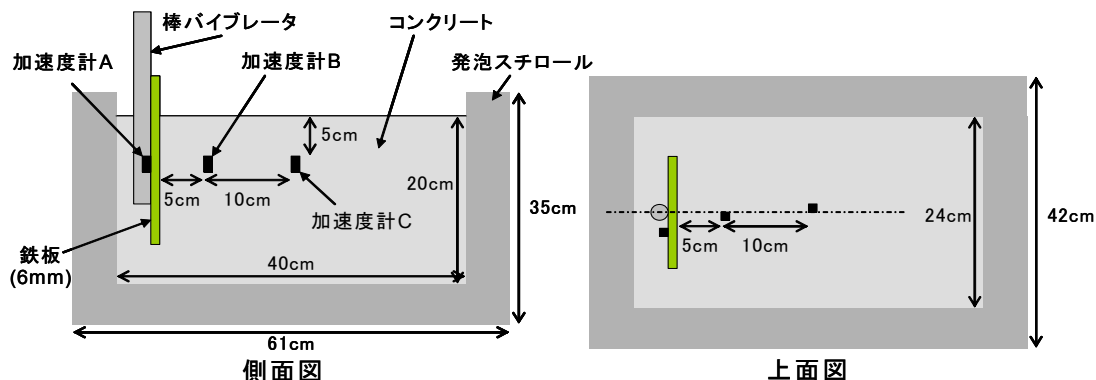


図－３ 塑性粘度と測定値の関係⁴⁾



図－４ ボックス型容器を用いた振動締固め試験装置の概念図

加速度で充てん性を評価する事例⁶⁾が報告され



図－５ 振動伝搬性能の評価装置の概念図

ている。しかしながら本研究では、コンクリート二次製品の充てんを想定し、型枠全体へ振動を与える機構を採用した。充てんに要する時間の長短によって振動締固め性能の評価を行った。製品工場の振動レベルを想定して、振動条件は周波数 50Hz、振幅約 0.9mm に設定した。容器に作用する加速度と振動台上面における加速度をほぼ等しくさせるために、ボックス型容器は振動台と剛結させた。

2.5 振動伝搬性能の測定

コンクリートの振動締固め作業においては、与えた振動エネルギーが広範囲に伝わる条件において優れた充てん性を呈する。本研究では、図－５に示す装置を用いて、バイブレータから所定の距離における加速度を測定することによって、コンクリート中の振動エネルギーの伝搬性能を評価した。既往の研究によれば、バイブレータをコンクリートへ挿入する場合、挿入前後およびコンクリートの物性の違いによって、モータの負荷トルク値が変化すること⁷⁾や、挿入深さによって振動効率が異なること⁸⁾が報告されている。実際に本研究で用いた金属板を装着したバイブレータの空運転時における加速度は概ね 2.4G であった。コンクリート中での加速度は、配合の変化にともなって 9～16G の範囲で変動した。したがって、振動伝搬性能をコンクリート中における加速度の絶対値のみで評価することは適切でないと考えられる。本研究では、振動エネルギーの減衰を式(1)によって

表－３ 実験結果

練混ぜ方法	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	s/a (%)	SL (cm)	振動下での ボックス 充てん時間 (sec)	塑性 粘度 (Pa・s)	降伏値 (Pa)	振動エネルギー減衰率 (%)
一括	380	135	49	1.5	31.5			
一括	380	135	49	6.0	28.9	533	1,183	12.3
一括	380	135	49	17.0	22.0	444	463	10.0
一括	380	145	49	1.0	30.2			
一括	380	145	49	6.5	19.3	282	573	4.1
一括	380	145	49	18.0	16.8	242	331	4.3
一括	380	155	49	0.5	26.1			
一括	380	155	49	5.0	20.3	103	597	5.8
一括	380	155	49	7.0	20.1	89	437	4.3
一括	380	155	49	10.0	17.4	107	220	6.2
一括	380	155	49	12.0	15.1	87	158	4.0
一括	380	155	49	17.0	14.1	96	207	2.1
一括	380	155	49	20.5	12.1	58	89	0.5
一括	380	155	41	3.0	22.7	53	229	0.4
一括	380	155	41	10.0	15.4	26	180	0.2
一括	380	155	41	18.5	17.1	26	133	2.8
一括	380	155	45	3.0	23.1	123	559	3.1
一括	380	155	45	7.0	19.6	88	216	2.3
一括	380	155	45	17.0	13.6	62	148	1.6
一括	350	155	49	1.5	14.0			
一括	350	155	49	6.5	12.8	69	405	4.0
一括	350	155	49	13.5	12.8	63	386	4.1
一括	350	155	49	19.0	8.8	55	328	2.4
一括	410	155	49	7.5	16.7	132	226	2.2
一括	410	155	49	16.0	17.3	68	193	3.9
一括	410	155	49	21.0	16.0	71	137	4.0
分割	380	155	49	0.5	17.8			
分割	380	155	49	5.0	16.8	70	762	3.6
分割	380	155	49	8.0	10.8	47	626	1.8

算出し、コンクリート中における振動の伝わりやすさで評価した。

$$\Delta E = \frac{a_B - a_C}{a_A} \cdot 100 \quad (1)$$

ΔE : バイブレータから 5cm から 15cm までの間の振動減衰率 (%)

a_A : 金属板の加速度 (G)

$a_{B(C)}$: 金属板から 5cm(10cm)の距離における加速度 (G)

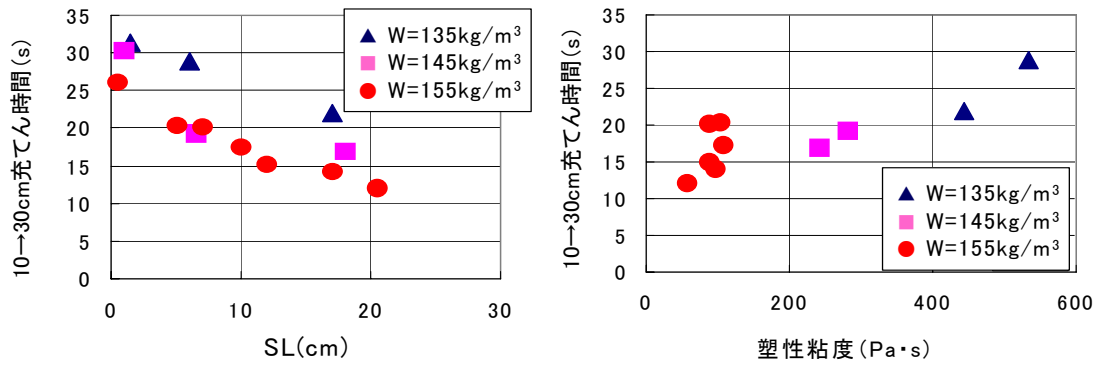


図-6 コンクリートの振動下でのボックス充てん時間に及ぼす単位水量の影響

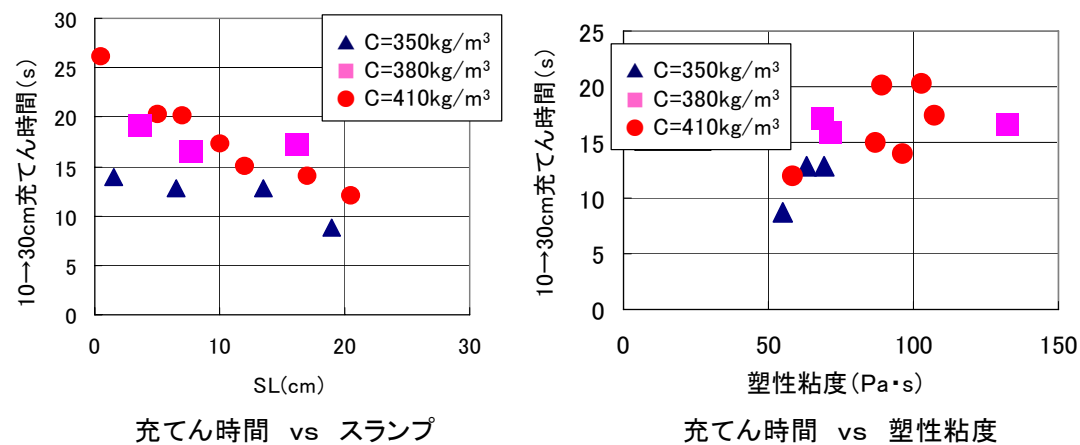


図-7 コンクリートの振動下でのボックス充てん時間に及ぼす単位セメント量の影響

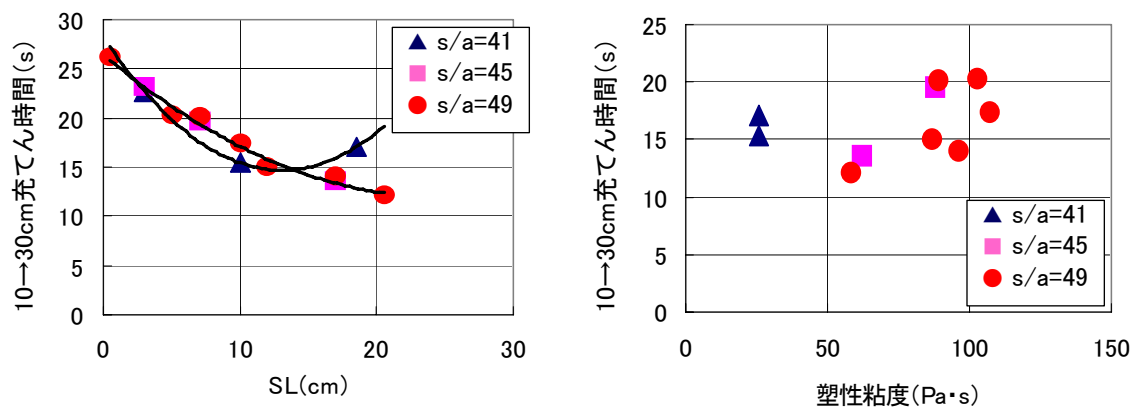


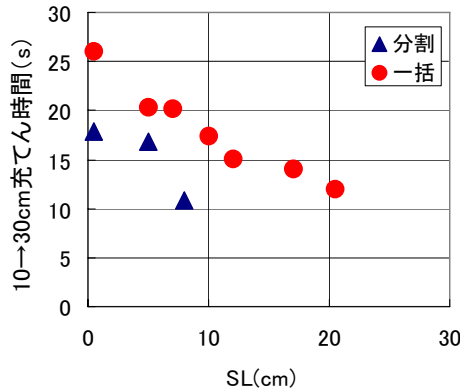
図-8 コンクリートの振動下でのボックス充てん時間に及ぼす細骨材率の影響

3. 実験結果および考察

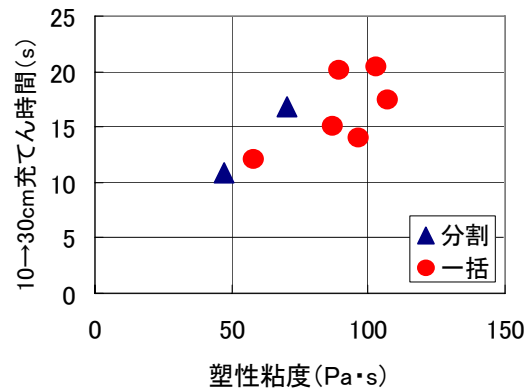
すべての実験結果を表-3に一覧表にして示す。スランプが $0.5 \sim 1.5 \text{ cm}$ の範囲のコンクリートは、ウェットスクリーニングしたモルタルの降伏値が大きすぎて塑性粘度の計測ができなかった。これらの試料に関しては、振動伝搬性能の測定を実施しなかった。

3.1 コンクリートの振動締固め性能に及ぼす配合条件の影響

本研究において評価の対象とした配合のうち、スランプ 1.8 cm 以下のものは無振動では障害 R2 の間隙を通過できなかった。逆にそれ以上のスランプの配合については、無振動でも 1.0 cm 未満の充てん高さ（以後、単に B_h 記す）を計測



充てん時間 vs スランプ



充てん時間 vs 塑性粘度

図－9 コンクリートの振動下でのボックス充てん時間に及ぼす練混ぜ方法の影響

した。したがって加振後にフロート（図－4 参照）が $B_h = 10 \text{ cm}$ に到達した時間を充てん開始時刻とした。一方、 B_h が 30 cm を超えると、いずれの配合のケースにおいてもコンクリート面へのフロートの埋没の影響を受けるため、計測の再現性に問題があった。そこで、 $B_h = 30 \text{ cm}$ に到達した時点を実験における充てん完了時刻とした。

この方法によって求められた充てん時間を振動締固め性能の指標値とし、充てん時間に及ぼすフレッシュ性状の影響について評価した。配合要因ごとに、充てん時間とスランプ・塑性粘度との関係を求めた。さらに、練混ぜ方法の違いの影響について評価した。

(1) 単位水量および単位セメント量の影響

既往の研究によれば、振動締固め性能（効率および影響範囲）はスランプと相関性があるとの報告⁹⁾がある。一方、同一スランプでも締固め性能が異なるとの報告⁶⁾もある。前者の研究では、スランプ調整を基本配合に対する単位水量の増減のみで行って評価している。これに対して後者では、スランプと単位水量以外はすべて異なる配合を対象に検討を行っている。このように、スランプの調整方法の相違によって、振動締固め性能に及ぼす影響も異なることが考えられる。

図－6、7 に振動締固め性能に及ぼす単位水量ならびに単位セメント量の影響を示す。なお、

本研究においては単位水量もしくは単位セメント量の増減の際、混和剤添加量も同時に変更してスランプ調整を行った。

この結果、単位水量が異なった場合、スランプが等しいにもかかわらず、充てん時間に差異が見られ（図－6、7 左）、振動締固め性能をスランプのみで必ずしも予測することはできないことが確認された。これに対して、充てん時間を塑性粘度との関係で整理した（図－6、7 右）。この結果、単位水量および単位セメント量の違いに拘わらず、振動締固め性能は塑性粘度との相関が高いことが確認された。

(2) 細骨材率の影響

図－8 に振動締固め性能に及ぼす細骨材率の影響を示す。この結果、細骨材率が最も低い配合は、他の実験結果と異なる傾向を示した。細骨材率が低下すると砂／モルタル比率も低くなり、あわせてモルタルの塑性粘度も低下することが知られている¹⁰⁾。塑性粘度が低くなるのは振動締固めに有利であるが、降伏値とも著しく低い配合のケース（図－8 左の SL18.5 のプロット）は、骨材同士のアーチアクションの影響によって間隙通過性能が逆に低下したものと推察される。

(3) 練混ぜ方法の影響

図－9 に振動締固め性能に及ぼす練混ぜ方法の影響を示す。この場合、前項までと異なり、同一配合で塑性粘度のみ異なる¹⁰⁾ ケースの比較

が可能である。一括練混ぜより分割練混ぜの方が、同一スランプでの充てん時間が短い。塑性粘度が小さくなったためである。(1)の実験結果と同様に、締固め性能はスランプよりも塑性粘度の影響を強く受ける。

3.2 コンクリートの振動伝搬性能に及ぼす塑性粘度の影響

図-10 に振動エネルギー減衰率に及ぼす塑性粘度の影響を示す。コンクリート中で伝搬する振動エネルギーは、塑性粘度が大きくなるにつれて減衰率も増大することが確認された。

以上の結果より、合理的な振動締固めの実現が可能なコンクリートには、塑性粘度が低く、かつ骨材のアーチアクションを防ぎうる適度な降伏値を併せ持つフレッシュ性状が求められることがわかった。

4. まとめ

コンクリートの振動締固め性能に及ぼすフレッシュ性状の影響について実験した結果、以下の知見を得た。

- (1) 振動締固め性能を左右する因子としては、コンクリートのスランプ値よりも塑性粘度の影響のほうが大きい。
- (2) 細骨材率が小さいほど塑性粘度の低減に有効であるが、過度に小さい配合は粗骨材のかみ合わせの影響を受け、スランプの高い配合においては振動締固め効率が逆に低下する。
- (3) コンクリート中で伝搬する振動エネルギーは、塑性粘度が大きくなるにつれて減衰率も増大する。
- (4) コンクリートの練混ぜ方法に分割練混ぜを採用することによって、塑性粘度は低減され、振動締固め性能が向上する。

参考文献

- 1) 大竹淳一郎ほか：製品向け中流動コンクリートの振動締固め成形に関する実験，第 55 回セメント技術大会講演要旨，pp.240-241，2001.5

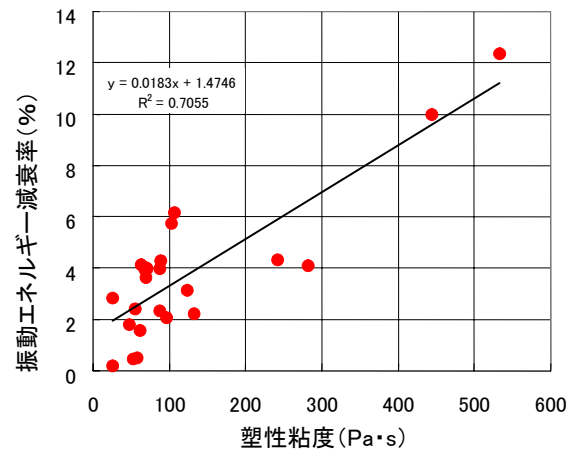


図-10 振動エネルギー減衰率に及ぼす塑性粘度の影響

- 2) 辻幸和ほか：遠心力を利用した細骨材の保有水試験方法，土木学会論文集，No.384，pp.103-109，1987.2
- 3) 土木研究センター：性能向上のために分割練り混ぜをしたコンクリート「SEC コンクリート」，2003.8
- 4) 室賀陽一郎ほか：モルタルの粘性評価試験装置の開発，土木学会年次学術講演概要集 (CD-ROM)，Vol.55，V-406，2000.9
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書「基準編」pp.197-199，2005
- 6) 大野誠彦ほか：ボックス型充てん装置を用いた加速度計測による普通コンクリートの締固め性評価，コンクリート技術シリーズ，No.54，pp.Ⅱ 49-Ⅱ 54，2003.7
- 7) 岡本寛昭ほか：棒状バイブレータを用いたフレッシュコンクリートの振動締固めにおける挙動とその評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.421-426，2000.6
- 8) 坂本信義：コンクリートの締固め作業の実施方法が締固め結果に及ぼす影響，第 48 回セメント技術大会講演集，pp.410-415，1994.5
- 9) 梁俊ほか：コンクリートのスランプの相違が振動伝搬特性に及ぼす影響，土木学会年次学術講演概要集，Vol.55，pp.541-542，2005.9
- 10) 伊達重之ほか：モルタルの粘性に及ぼす分割練混ぜの効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.991-996，2005.6