

論文 異なるスランプ¹⁾に対するコンクリート施工性能の定量評価に関する研究

府川 徹^{*1}・大友 健^{*2}・新藤 竹文^{*3}・坂田 昇^{*4}

要旨：同一材料を用いたスランプ 8cm, 12cm の AE コンクリートとスランプ 18cm の高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートを対象として，異なる加速度の高周波振動を受けた状態での，コンクリートの沈下，スランプフローおよびフロータイム，U 形充てん装置による間げき通過時間，容器充てん時の締固め時間，コンクリートの応答加速度を測定した。これらの測定値を用いた評価方法によって，良好な変形性，間げき通過性および締固め性を有する配合の選定が可能であることが明らかとなった。

キーワード：ワーカビリティ，高周波振動，スランプ，締固め，間げき通過性，施工性能

1. はじめに

近年，耐震設計規準の見直し等により鉄筋量が増大し，鉄筋あきが減少する傾向にあることやポンプ打設が主流となったことなどに起因して，コンクリートの耐久性を低下させ，構造物の寿命を短くする初期欠陥の発生が問題視されている。このような初期欠陥による耐久性の低下と構造物の短命化を防ぐためには，かぶりコンクリートの品質を確保することが重要である。

そのためには，コンクリートの施工性能と打設に対する条件との適合を可能とする適切な配合の選定が必要不可欠である¹⁾が，締固めが必要なコンクリートにおいてそのような適切な配合の選定に必要な施工性能の定量評価の具体的な手法はまだ確立されていないと考えられる。

単位水量とワーカビリティが密接に関連している場合にはスランプ試験によりワーカビリティの良否を判断できたが，化学混和剤の普及や材料，特に骨材の変化等の理由により同じスランプでも異なるワーカビリティを有する場合には，スランプ試験だけでは施工性能の良否を判断することは難しいと考えられるように

なり，これまでいくつかの研究がなされてきた。

水口ら²⁾は，新しいコンシステンシー評価試験方法として「加振 Bar フロー試験によるコンシステンシー評価試験方法(案)」を提案している。梁ら³⁾は，「締固め性評価試験」について提案している。ただし，これらの評価試験方法では，加速度の大きさは可変であるが，比較的低周波の振動により加振評価試験が実施されており，現在実際の施工で主流となっている高周波振動による加振条件は考慮されていない。

筆者ら⁴⁾は，施工性能のうち主に打込み性能を対象として，高周波振動による 3 種類の加振評価試験装置により，変形性・間げき通過性・締固め性というフレッシュコンクリートの 3 種類の性能を用いて，施工性能の定量的な評価を試み，配合の違いにより同じスランプでも異なる施工性能を有する場合についてその評価の可能性を示した。

2. 本研究の目的

本研究における施工性能の定量評価は，構造条件・施工条件に適した配合選定を目的として

*1 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室主任研究員 工修(正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室主席研究員 博(学術)(正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室チームリーダー 博(工)(正会員)

*4 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造・材料グループ チーフ兼上席研究員 博(工)(正会員)

いる。そのためには、材料や配合の違いによる変形性・間げき通過性・締固め性の変化を捉え、配合の適合性を判断できる指標値を定めることが重要であると考えた。本論文においては、主に同一材料を用いたスランプの異なるコンクリートについて得られた実験結果から指標値と評価方法の提案を試みた。

3. 実験概要

3.1 加振評価試験装置および試験方法の概要

図-1に加振評価試験装置の概要を、表-1に試験方法の概要を示す。高周波内部振動機(周波数:230Hz, 遠心力:1.2kN, 径:28mm)による振動を、大きさの異なるゴムダンパを介して、試験板あるいは試験容器に与えた。ゴムダンパの大きさを変えることで試験板あるいは試験容器への入力変位を変化させ、同一周波数で大きさの異なる加速度(3または4水準)を得た。

加速度の測定には3軸加速度計を使用した。

3.2 コンクリートの仕様, 配合および使用材料

表-2に、コンクリートの仕様, 配合および使用材料を示す。配合番号の1番目の数字はスランプを, 2番目の数字はs/aを表す。スランプ試験により目視でワーカブルであると判断された8cm および 12cm の AE コンクリート (8-48, 12-48), スランプ 18cm の高性能 AE 減水剤を用いたコンクリート (18-47) について, 加振評価試験を実施した。

表-2において, 配合番号 8-42, 18-43 は, 5章で引用した既往の実験データ⁴⁾の配合を表す。

4. 施工性能の評価方法について

4.1 変形性の評価

施工性能のうち, 変形性の良否を定量的に表す指標値として 600mm フロー到達時間(以下, t_{600}) および加振による沈下量とフロー値との関

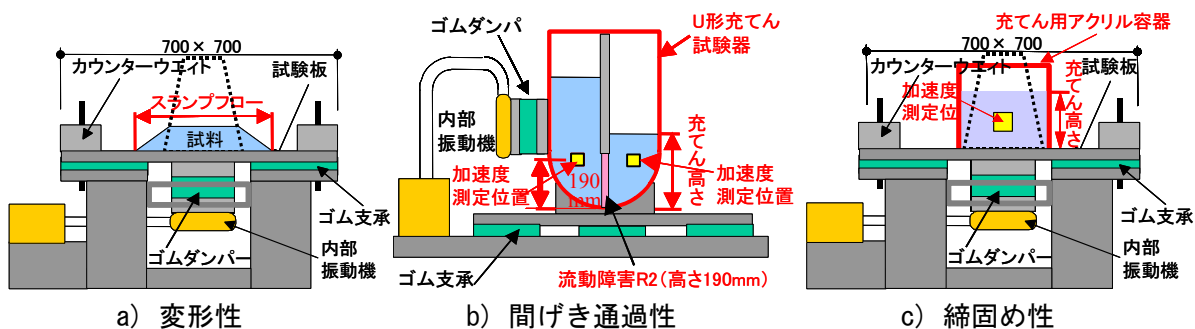


図-1 加振評価試験装置の概要

表-1 試験方法の概要

項目	加振評価試験		
	変形性	間げき通過性	締固め性
試料の量	5.5L (スランプコーン)	14L (エアメーター2杯)	5.5L (スランプコーン)
測定項目	・沈下量 ・300mmから600mmの100mm毎のフロー到達時間	・充てん高さ ・190mm (流動障害の高さ) から280mmまでの30mm毎高さ到達時間	・充てん高さ ・隅角部高さ85mm (充てん完了高さの95%) および充てん完了高さ90mm到達時間
加速度測定位置	・試験板中心と各辺中点を結ぶ線上で中心から300mm位置の4箇所 (試験板裏側)	・容器側壁外側 (下端から190mm: 試料投入側・充てん側各1箇所 計2箇所) ・試料内 (下端から190mm: 流動障害前後)	・試験板中心と各辺中点を結ぶ線上で中心から300mm位置の4箇所 (試験板裏側) ・試料内 (下端から45mm)
試験板および側壁平均加速度の定義	・試験板平均加速度測定加速度 (4箇所) の相加平均	・側壁平均加速度測定加速度 (2箇所) の重み付き総和 (投入側重み: 1.0, 充てん側重み: 0.5)	・試験板平均加速度測定加速度 (4箇所) の相加平均
加速度の算出	$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$	a : 応答加速度 (m/s^2), $a_{i=x,y,z}$: x,y,z軸方向の応答加速度 (m/s^2)	
容器	なし	U形充てん試験器 (JSCE-F511-1999) (流動障害R2使用)	アクリル容器 (250mm×250mm×250mm)
充てん完了高さ	—	280mm (計算上)	90mm (計算上)

係を選択した。

ここでは、変形のしやすさだけでなく、材料分離抵抗性やプラスティシティーを含めて変形性の定量評価を試みた。

4.2 間げき通過性の評価

施工性能のうち、間げき通過性の良否を定量的に表す指標値として I_{pu} を定義した。図-2a)に、同一の振動強さを与えた時の、異なるスランプのコンクリート応答加速度を示す。本試験においては、間げきを通過する際の抵抗が小さいほど応答加速度の変動が小さいと考えた。また、流動障害の高さ 190mm を通過する時間 (以下, t_{190})、最大応答加速度 (以下, A_{pmax})、平均応答加速度 (以下, A_{190m}) は、コンクリートの配合、振動の強さによって異なる値である。ここでは、間げきを通過する時間が短いほど、かつ、間げきを通過する際の抵抗が小さいほど間げき通過性が良いと考えて、式 (1) により I_{pu} を算出した。式(1)では、応答加速度の変動を A_{pmax}/A_{190m} により考慮した。したがって、 I_{pu} は、その値が小さいほど間げき通過性が良いことを示す指標となる。

$$I_{pu} = t_{190} \times A_{pmax} / A_{190m} \quad (1)$$

4.3 締固め性の評価

施工性能のうち、締固め性の良否を定量的に表す指標値として I_{cb} を定義した。

岩崎⁵⁾は、内部振動機による締固めを、「振動の液状化作用を受けたコンクリートが液状化し、自重による流動および沈下する現象としてとらえることにより、締固め問題の定量的な取扱いが可能となった」と述べている。

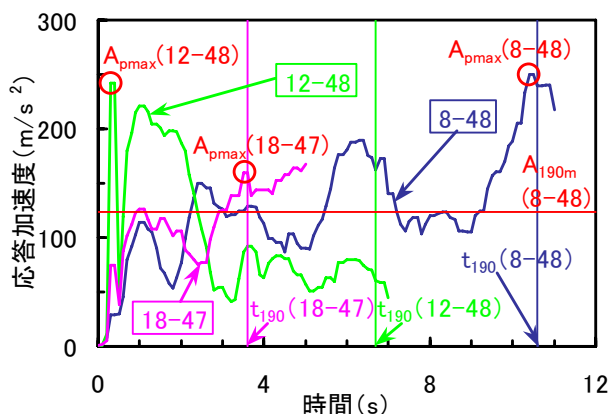
図-2b)に同一の振動強さを与えた時の、異なるスランプのコンクリート応答加速度を示す。本試験においては、コンクリートの応答加速度の低下が液状化によるコンクリートの粘性低下を表していると考えた。また、応答加速度の最大値 (以下, A_{cmax})、応答加速度の最大値以降の加振時間に対する応答加速度の低下勾配 (以下, $\tan \theta$) は、コンクリートの配合、振動の強さによって異なる値である。ここでは、コンクリートの液状化に必要な振動が弱いほど、かつ、粘性が低下するのに必要な時間が短いほど締固め性が良いと考えて、式(2)により I_{cb} を算出した。

したがって、 I_{cb} は、その値が小さいほど締固

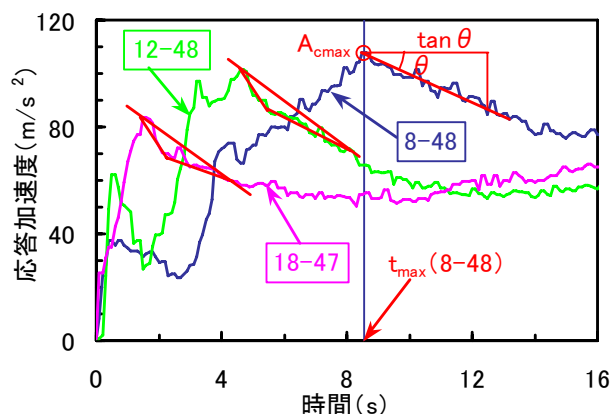
表-2 コンクリートの仕様、配合および使用材料

配合 No.	スランプ SL (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					単位粗骨材容積 (l/m ³)	単位ペースト量 (l/m ³)
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad		
8-48	8	55	48	159	289	880	972	2.89	366	250
8-42	8	55	42	152	276	782	1101	2.76	415	239
12-48	12	55	48	164	298	873	961	2.98	362	259
18-47	18	40	47	166	415	804	925	3.11	349	297
18-43	18	40	43	161	403	746	1008	3.02	380	288
No.	セメント	細骨材		粗骨材			混和剤			
8-48, 42	普通ポルトランドセメント	山砂(君津産). 砕砂(津久見産)*1		砕石(青梅産)*2			AE減水剤(リグニンスルホン酸系)			
18-47, 43	($\gamma c: 3.15$ g/cm ³)						高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)			

*1: 山砂: 砕砂 = 7:3, 密度 2.60 (2.61) g/cm³, 吸水率 2.5 (1.2)%, F.M. 2.46 (3.70) (内は砕砂)
*2: 密度 2.65 g/cm³, 吸水率 0.59%, F.M. 6.77

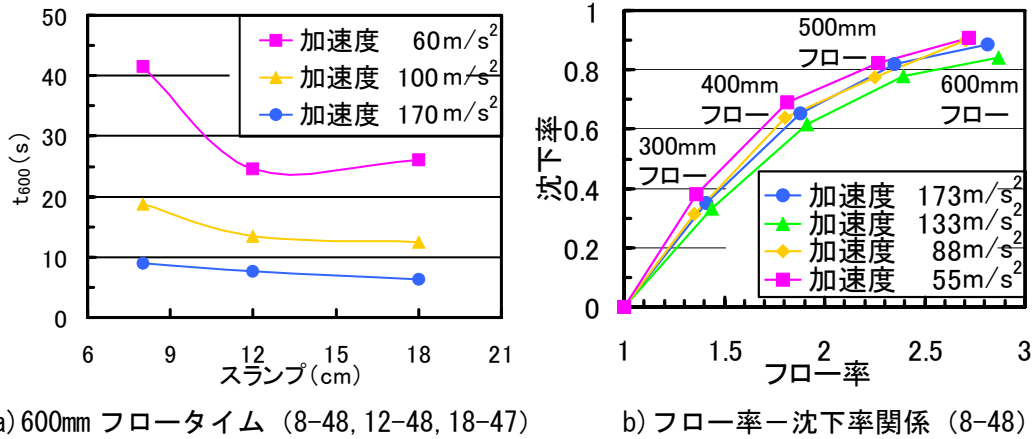


a) 加振間げき通過性評価試験



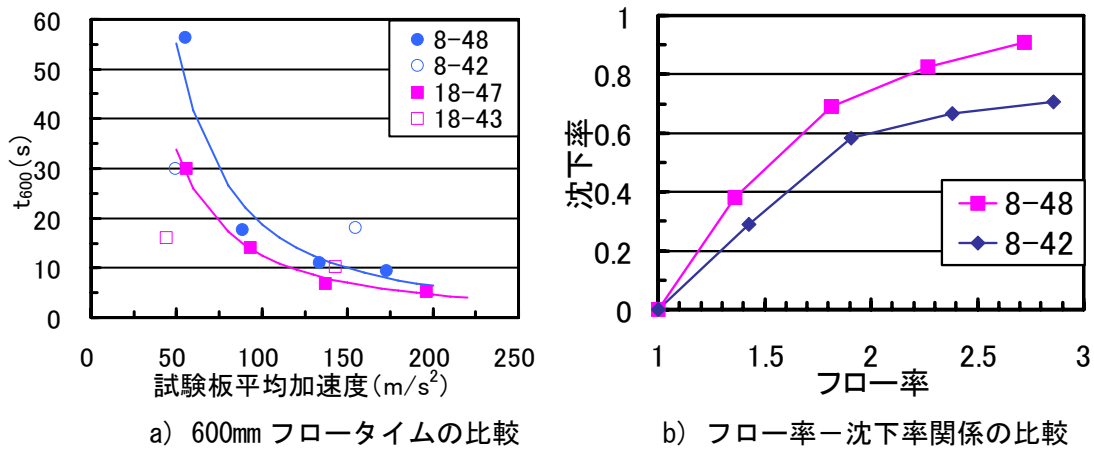
b) 加振締固め性評価試験

図-2 指標値の考え方



a) 600mm フロータイム (8-48, 12-48, 18-47) b) フロー率-沈下率関係 (8-48)

図-3 変形性の評価



a) 600mm フロータイムの比較 b) フロー率-沈下率関係の比較

図-4 配合の違いによる変形性の差異

め性が良いことを示す指標となる。

$$I_{cb} = A_{cmax} / \tan \theta \quad (2)$$

なお、図-2b)に示す配合 12-48, 18-47 のように、 $\tan \theta$ を算出する際、 A_{cmax} 発生直後に勾配の変曲点が存在する場合には、変曲点前後の勾配を用いた割線勾配により算出した。

5. 実験結果および考察

5.1 加振変形性評価試験

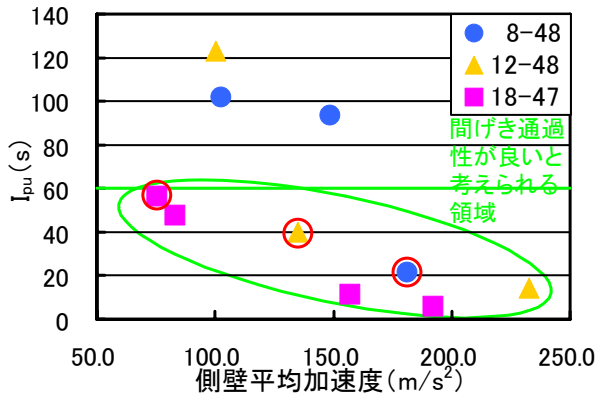
図-3a), b)は、同一の加振変形性評価試験結果について異なる指標により整理したものである。図-3a)は、測定された t_{600} を曲線近似し、近似式による計算値を用いて、異なるスランプの同一加速度における t_{600} を比較した図である。

表-1 に示した試験板平均加速度が $170m/s^2$ という振動においては、スランプ 8cm, 12cm および 18cm の間に顕著な t_{600} の差は見られない。しかし、試験板平均加速度が $60m/s^2$ という振動に

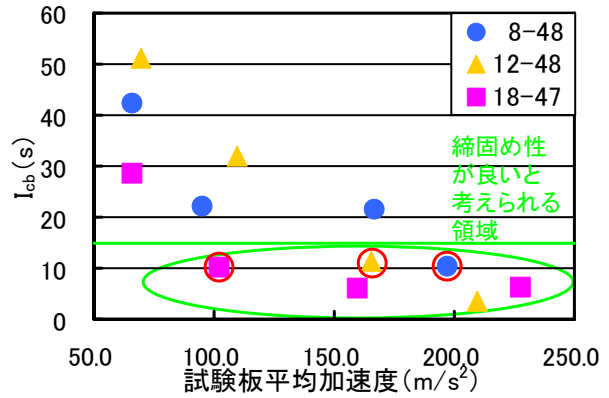
おいては、スランプ 8cm で t_{600} が 40 秒程度、スランプ 12cm および 18cm で 25 秒程度と明確な差異が見られた。このことは、スランプが小さいほど、かつ、振動が弱いほど変形性が低いということを定量的に表していると考えられる。

図-3b)に、配合 8-48 における沈下率-フロー率の関係を示す。ここに、沈下率、フロー率は、沈下量およびフロー値をスランプコン引上げ直後の各々の初期値で除した値である。本実験の範囲においては、沈下率-フロー率関係は、振動の強さによらずほぼ一定となるようであり、配合 12-48, 18-47 も同様の傾向を示した。

次に、図-4a)に、配合 8-48 と 8-42, 配合 18-47 と 18-43 における t_{600} の比較を、図-4b)に、配合 8-48 と 8-42 の沈下率-フロー率関係の比較を示す。どちらの場合も、試験板平均加速度 $50m/s^2$ 程度で加振した場合に、目視でワーカブルであると判断した配合 (8-48, 18-47) と s/a を低下さ



a) 間げき通過性



b) 締固め性

図-5 間げき通過性および締固め性の評価

せた配合 (8-42, 18-43) とに明確な差異が見られた。 t_{600} の比較では、配合 8-48 で約 60 秒、配合 8-42 で約 30 秒、配合 18-47 で約 30 秒、配合 18-43 で約 15 秒と、スランプ 8cm, 18cm とともに s/a を低下させた配合 (8-42, 18-43) で t_{600} が約 1/2 となった。また、沈下率-フロー率の関係の比較では、 s/a を低下させた配合 (8-42) で同一の沈下率 0.7 におけるフロー率が配合 8-48 で 1.8, 配合 8-42 で 2.7 と 1.5 倍となった。これらのことは、材料分離抵抗性やプラスティシティーを含めた変形性の差異を定量的に示していると考えられる。

5.2 加振間げき通過性評価試験および加振締固め性評価試験

配合 8-48, 12-48, 18-47 について、間げき通過性の指標値 I_{pu} と表-1 に示した側壁平均加速度の関係を図-5a) に、締固め性の指標値 I_{cb} と試験板平均加速度の関係を図-5b) に示す。

間げき通過性および締固め性が良いということを、実験において間げき通過および締固めが停滞することなく連続的に進行することと考えて、目視により判断した。

図-5 において、前述の判断を満たす範囲で、かつ、側壁あるいは試験板平均加速度が最も小さい測定データ (図-5 中の丸囲いデータ) を包含する領域を、間げき通過性および締固め性が良いと考えられる領域と定義した。

本実験の範囲においては、間げき通過性につ

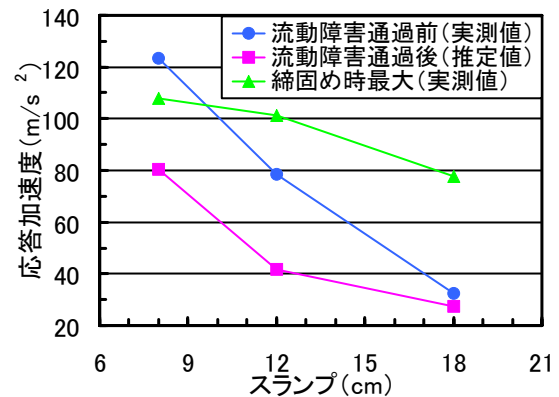


図-6 良好な間げき通過性、締固め性に必要な応答加速度

いては I_{pu} が 60 程度以下、締固め性については I_{cb} が 15 程度以下であれば、おのおの間げき通過性および締固め性が良いと判断できると考えられる。ただし、今後さらに検証する必要があると考えている。

これらの指標値は、配合・振動の強さにより異なる値となので、構造条件・施工条件に適した配合選定を行うためには、これらの指標値を用いた評価に、構造条件・施工条件を反映する必要がある。次節にその考察を述べる。

5.3 構造条件・施工条件に適した配合選定と加振評価試験の関連付けについて

室内試験である加振評価試験において測定された応答加速度は、実施工時の打設と異なった条件で測定されている。一方、実物大実験等においては、実施工時の構造条件・施工条件を反映した応答加速度の測定が可能であると考えら

れる。畑ら⁶⁾は、橋梁の実物大構造部材において、コンクリートの応答加速度の測定を試みている。畑らの測定結果によれば、内部振動機の挿入間隔300mm～900mmでのかぶりコンクリートの応答加速度は、スランプ8cmの場合で20m/s²～200m/s²の範囲であった。

図-6に、スランプとt₁₉₀に対する流動障害通過前後および締固め時最大応答加速度との関係を示す。各スランプ値に対する応答加速度値は、図-5中の丸囲いデータの実験結果から得た。スランプ8cm～18cmの範囲で、流動障害通過後の応答加速度は30m/s²～80m/s²の範囲となった。なお、t₁₉₀に対する流動障害通過後の応答加速度(A_{190a})を、加振間げき通過性評価試験における充てん完了時の流動障害前後の応答加速度(A_{280b}, A_{280a})を用いて、式(3)により算出した。

$$A_{190a} = A_{190m} \times A_{280a} / A_{280b} \quad (3)$$

応答加速度の絶対値による加振評価試験と実物大実験との関連付けについては熟慮が必要と考えるが、ここでは少なくとも両者の応答加速度範囲に大きな乖離がないことが確認できた。

このように実際の施工と同等の高周波振動を与え、コンクリートの応答加速度を測定することで、構造条件・施工条件を反映した実物大実験等における計測データ等が多数得られれば、応答加速度を間接的な指標として実物大実験等における計測値と加振評価試験結果とを関連付けられ、構造条件・施工条件に適した配合を選定できる可能性があると思われる。

6. まとめ

本実験の範囲においては、以下のことが明らかとなった。

- (1) 加振変形性評価試験では、600mmフロータイムと沈下率-フロー率関係とを指標とすることで、良好な変形性を有する配合選定が可能であること
- (2) 加振間げき通過性評価試験では、コンクリートの流動障害通過時間と、流動障害通過時の抵抗を反映した指標値により、良好な間げき通過性を有する配合選定が

可能であること

- (3) 加振締固め性評価試験では、コンクリートの液状化に関連すると考えられる最大応答加速度と液状化による粘性低下に関連すると考えられる応答加速度の低減勾配を反映した指標値により、良好な締固め性を有する配合選定が可能であること

7. おわりに

本研究は、東京大学前川宏一教授のご指導のもと、鹿島建設株式会社、大成建設株式会社が実施した2社共同研究の一部である。

参考文献

- 1) 新藤竹文, 坂田昇, 前川宏一: 初期欠陥を未然に防ぐコンクリート施工性能評価技術について, コンクリート工学, 日本コンクリート工学協会, Vol.43, No.2, pp.27～pp.34, 2005.2
- 2) 水口裕之, 橋本親典: 新しいコンシステンシー評価試験方法「加振 BAR フロー試験によるコンシステンシー評価試験方法(案) Test method for consistency of fresh concrete for passing through closely spaced obstacles on table vibrator」の提案, フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題(II), コンクリート技術シリーズ 54, 土木学会, pp.98～pp.107, 2003.7
- 3) 梁俊, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野敦: 配合の相違がフレッシュコンクリートの締固め完了エネルギーに与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.98～pp.107, 2004
- 4) 府川徹, 大友健, 坂田昇, 新藤竹文: 高周波振動を受けたコンクリートのワーカビリティに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1015～pp.1020, 2005.6
- 5) 岩崎訓明: 振動によるフレッシュコンクリートの液状化と内部振動機の作用領域に関する考察, 土木学会論文集, 第426号/v-14, 1991.2
- 6) 畑明仁, 高橋昭一, 長田光司, 大友健: スランプ21cmの高性能AE減水剤を使用したコンクリートの施工性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.1189～pp.1194, 2001.7