

論文 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

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

要旨：配合と材料の異なるスランプ 8cm 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、コンクリートのスランプフロー、U 形充てん装置による充てん高さ、容器充てん時の締固め度を測定した。その結果、高周波振動下でのコンクリートの変形状況とこれに及ぼす加速度の大きさの影響は 3 種類の評価方法では異なること、単位水量などが支配するコンクリートの状態が、これらの評価指標に、各々に異なった影響を及ぼしてい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

構造物の形状や内部の鋼材配置は、耐震設計手法の変更、部材の薄肉化等に応じて複雑になってきており、配筋条件や構造条件に対して、打設するコンクリートのワーカビリティが適合していないことが施工時の充てん不良の原因になると考えられている¹⁾。また、骨材の品質が非常に低下していることもコンクリートの品質設計を難しくしていると考えられてもいる²⁾。

性能照査型の考え方を取入れたコンクリート標準示方書[施工編]³⁾では、「ワーカビリティの照査は、構造物の構造条件や実際の施工条件を考慮した適切な試験などで確認することにより行うことを原則とする」と規定しているが、現状では、このワーカビリティはスランプによってのみ判断されている。材料分離しないことが基本とされているが、これを考慮した配合設計法が確立しているとは言い難い。同じスランプのコンクリートであっても状態の悪いコンクリートは明らかに存在する^{4) 5)}が、施工の困難さを定量的に表現することは難しい。そのため、著者らの一部は、高スランプコンクリートの配合選定過程における状態の変化をプラスティシティーの相違として目視区別するなどの

間接的評価方法についても検討してきた⁶⁾。

コンクリートの耐久性を確保する上では、所要のワーカビリティが得られる範囲で単位水量を最小にすることが必要とされているが、材料分離に対する抵抗性やプラスティシティーの確保には一定のペースト量(粉体量)が必要^{5), 6)}であり、これらのことを含めての評価は難しい。

本研究は、コンクリートの打込み・締固め過程における加振変形を考慮できる試験装置を考案し、設計スランプや配合の異なるコンクリートの高周波加振条件下での変形挙動を測定し、その結果からコンクリートのワーカビリティ評価の可能性を検討したものである。

2. 打込み時のコンクリートの挙動の評価方法

前述の課題を検討する方法については、土木学会コンシステンシー評価指標小委員会により最新の提案がまとめられている⁷⁾。たとえば、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では、テーブルバイブレータ上に障害物を設置した状態でスランプフロー変形速度などを評価している。また大野らの研究⁸⁾では、高流動コンクリート用の充てん装置を用いた間げき通過性試験装置³⁾の A 室に直接棒状バイブ

*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(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任研究員 博(学術)(正会員)

*3 鹿島建設(株)技術研究所材料・LCE グループチーフ兼上席研究員 博(工)(正会員)

*4 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)

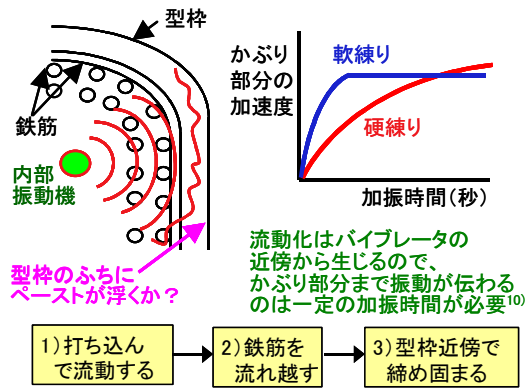


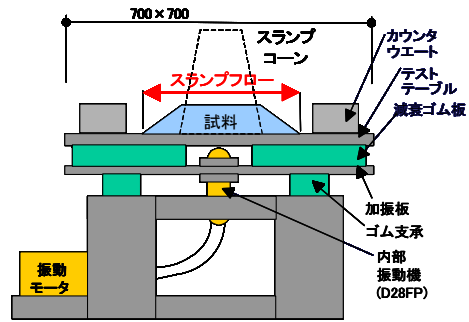
図-1 構造物内での振動の伝播状態の模式図

レータを差し込み加振する方法をとっている。一方、宇治ら⁹⁾は、振動台テーブル上の容器を充実するコンクリートの性質を評価し締め固め挙動を考察している。

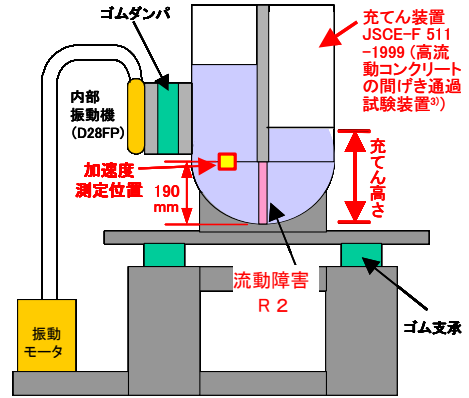
これらのうちテーブルバイブレータを使用する試験では、実施工で使用する高周波バイブレータと異なる振動数の上下方向振幅をコンクリートに与えている。バイブレータによる加振も含めて、実際に構造物内のコンクリートの特に型枠面近傍に作用する加速度(畑らの研究¹⁰⁾では $1\sim 30\text{m/s}^2$ が測定されている)に比べて相当に大きい加速度が作用する状態での試験である。

実際のコンクリートの施工においては、図-1に示すように、構造物の内側で作用させた水平振動がコンクリートを流動化させながら減衰して伝播し、型枠際のコンクリートを密実化させる。その過程は、1)自重+振動による拡がり、2)鉄筋の流れ越し、3)型枠際の締め固め の3種の挙動であると考えられる。

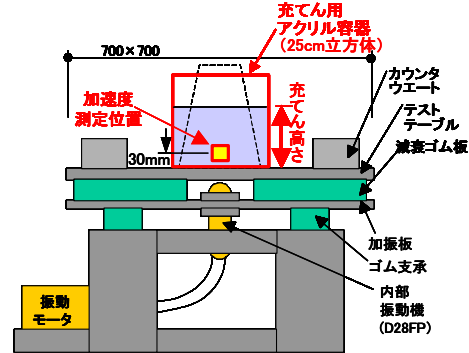
本研究では、これらの挙動を図-2に示す3種類の装置(以下装置(a),(b),(c)と称する)によって表現した。ここで振動は実際にコンクリートの打込みに使用する内部振動機(出力:280W,遠心力:0.9kN~1.5kN,周波数:230Hz程度)により作用させ、構造物内の任意の位置での振動作用状態の再現を試みて、ゴムダンパにより試験台上の振動を減衰し、張り糸により設置した加速度計によりコンクリート内部の応答加速度を測定した。



(a)加振変形性評価試験



(b)加振間けき通過性評価試験



(c)加振締め固め性評価試験

図-2 3種類の加振試験装置の概要

3. コンクリートの仕様と配合・使用材料

実験に使用したコンクリートの仕様と配合・使用材料を表-1に示す。設計スランブ8cmのAEコンクリートと設計スランブ18cmの高性能AE減水剤を用いたコンクリートを検討した。各々について十分ワーカブルであると目視で判定した配合(8-0, 18-0)に対して、8-1,8-2では細骨材率を小さくして、18-1,18-2では高性能AE減水剤量を大きくすることによって、18-3ではs/aを変えることによって単位水量を低減した。これらに使用した骨材は首都圏で一般に使用されている碎石と山砂+砕砂である。8-3には文献

表-1 コンクリートの仕様・配合と使用材料

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 (/m ³)	単位ペースト量 (/m ³)
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad		
8-0	8	55	48	159	289	880	972	2.89	366	250
8-1	8	55	45	154	280	834	1040	2.80	392	243
8-2	8	55	42	152	276	782	1101	2.76	415	239
8-3	8	48	43	158	333	773	1052	3.33	394	263
18-0	18	40	47	166	415	804	925	3.11	349	297
18-1	18	40	47	160	400	817	940	3.60	354	287
18-2	18	40	47	154	385	830	955	4.04	360	276
18-3	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				
8-0~8-2	普通ポルトランドセメント (γc:3.15 g/cm ³)	山砂(君津産), 砕砂(津久見産)*1		砕石(青梅産)*3		AE減水剤(リグニンスルフォン酸系)				
8-3		山砂(星山産)*2		山砂利(星山産)*4						
18-0~18-3		山砂(君津産), 砕砂(津久見産)*1		砕石(青梅産)*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)%, FM2.46(3.70) ()内は砕砂,
 *2: 密度2.68g/cm³, 吸水率2.4%, FM2.80, *3: 砕石1: 砕石2=4:6, 密度2.66(2.65)g/cm³,
 吸水率0.5(0.7)%, F.M.7.10(6.54) ()内は砕石2, *4密度2.67g/cm³, 吸水率1.8%, F.M.6.59

10において使用した骨材(静岡地区)を用いた。

4. 締固め振動の減衰程度の調整と試験方法

振動の減衰程度を加速度比により表した。ここでは、試験装置の加速度比を「ボルト等により加震盤と試験テーブルを締結することにより減衰ゴム板を介さずに加震盤から伝達された試験テーブルの加速度を基準に、減衰ゴム板を使用し減衰させた試験テーブルの加速度を無次元化した値」と定義した。加速度は直交する3方向で計測した各加速度成分の2乗の総和の平方根により算出した。装置(a), 装置(c)では加速度比が0.25~1.0の範囲で、装置(b)では加速度比が0.37~1.0の範囲で振動を作用させた。装置(b)の減衰の程度が小さいのは、一定値以下の振動であると、コンクリートが流動障害近傍で閉塞し、充てんができないためである。

装置(a)では、あらかじめ定めたフロー値に到達する時間を、装置(b)では、あらかじめ定めた高さ到達する充てん時間(一般の間げき通過性試験装置と同様の定義)を測定した。装置(b)の試験に供した試料は14Iであるので、最大の充てん高さは290mmとなる。装置(c)では、スランプ高300mmに対する沈下量の時間変化を測定した。充てん容器の大きさは250×250×250mmであるので、最大の沈下量は210mmとなる。

図-2に示す試験装置においては、コンクリートに作用する振動を加速度計によって測定して

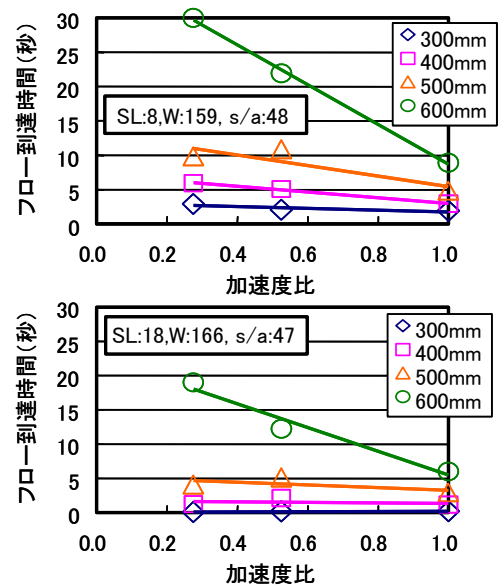


図-3 異なる加速度比におけるフロー変化

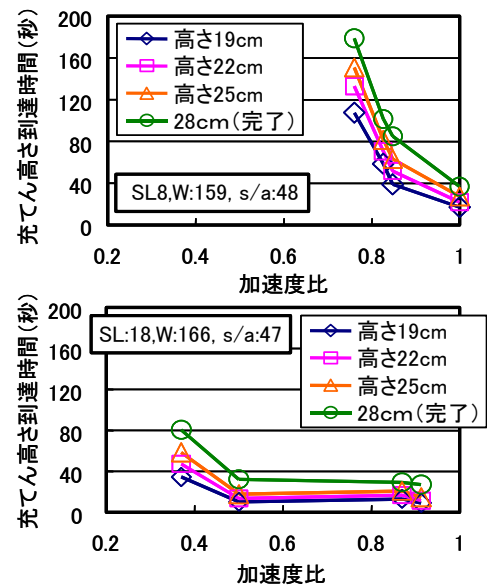


図-4 異なる加速度比における充てん状態

いる。これは、コンクリートの応答加速度がコンクリートの配合により変化する¹⁰⁾ためである。

5. 実験結果

5.1 振動下でのコンクリートの変形挙動

図-3には、加振変形性試験で得られた、異なる加速度比条件下でのスランプフローの増大状況(配合8-0および配合18-0)を示す。スランプ8cm・スランプ18cmのいずれの配合においても、スランプフローが500mmまでは、加速度の大きさの影響がそれほど顕著ではない。障害が

なくフローが広がる条件では、わずかな振動によっても相当な範囲まで、コンクリートが変形できることを示唆していると考えられる。

図-4には、加振間げき通過性試験で得られた、異なる加速度比条件下での充てん高さの変化状況（配合 8-0 および配合 18-0）を示す。スランプ 8cm の配合では加速度比が 0.76 以下では充てんが不可能であったが、スランプ 18cm の場合には、加速度比 0.5 は加速度比 1.0 と変わらない充てん性状を示し、加速度比 0.37 の時にやや充てんが難しくなる傾向を示した。充てんが困難な状況では、障害の通過に多くの時間を要するが、いったん障害部分を通過すれば、充てん高さは比較的大きくなるようである。このことは、スランプコンクリートでも高流動コンクリートの間隙通過と同じようにアーチング現象が生じており、この解消に高周波振動の大きさが寄与しているのではないかと考えられるものである。

図-5は加振締固め性試験の結果である。スランプ 8cm で加速度比が 0.26 の場合を除けば、沈下変形の大方は、加振 8 秒までのほぼ瞬時に生じ、加速度比は沈下量 180~210mm の変化に要する時間に影響するようである。すなわち、コ

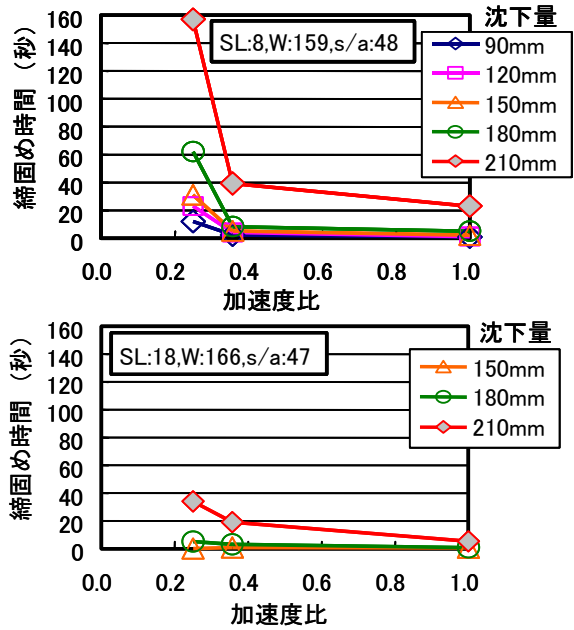


図-5 異なる加速度比における締固め挙動

ンクリートがおおむね充てんするためには比較的小さい加速度比でよいが、さらに密実化するためには、どのくらいの加速度をどのくらいの時間作用させるかが影響してくると考えられる。

このように高周波振動下でのコンクリートの変形状況とこれに及ぼす加速度の大きさの影響は、3つの評価試験では著しく異なる。したがって、実際のコンクリート打込み・締固め作業の

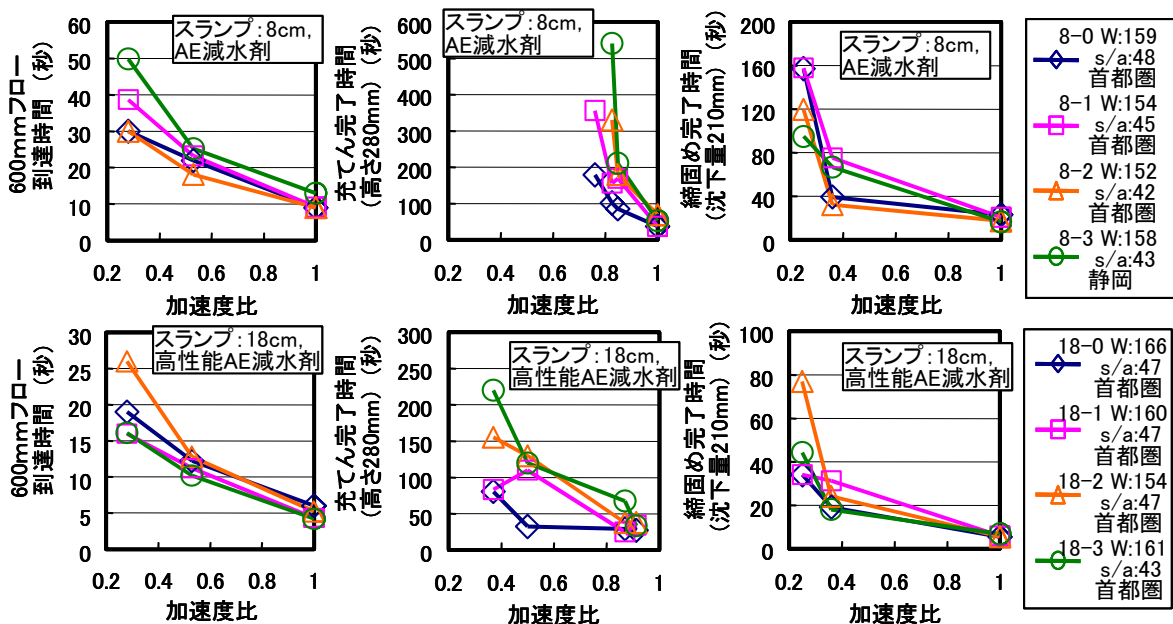


図-6 配合および材料種類が変形性・充てん性・締固め性に及ぼす影響

解析では、これらの異なった現象による変形の複合効果を考えることが必要と思われる。

5.2 配合が振動下での変形挙動に及ぼす影響

図-6 に、異なる配合および材料に対して行った加振変形性試験・加振間げき通過性試験・加振締固め性試験の結果を示す。図-7 は、この図から、加速度比が0.40の場合と0.80の場合の各評価値を読み取って、単位水量の影響として相対的に比較できるようにしたものである。

図-7 に示すように、スランプ8cmの配合について8-0(s/a=48%), 8-1(s/a=45%), 8-2(s/a=42%)と細骨材率を小さくし単位水量を減らし

ていった場合には、減水程度に応じて充てん完了時間が長くなり間げき通過性が明らかに低下しているが、フロー到達時間と締固め時間には一定した変化傾向がない。単位水量を小さくすれば、変形しにくく締固めに時間がかかることが予想されるが、加速度比が小さい場合には、むしろ変形が早くなり締固め完了時間が早くなる傾向が見受けられる。

高性能 AE 減水剤を使用したスランプ18cmの配合においても単位水量の低減によって充てん時間が相当に大きくなるが、フロー到達時間や締固め完了時間が必ずしも大きくなることはスランプ8cmの場合と同様である。また使用する骨材が異なる性質の場合にも、加速度比が小さい場合には影響が大きくなるようである。このように、スランプの大きさそのものによる相違は明確であり、スランプ18cmの配合は8cmのそれに比べて変形性・間げき通過性・締固め

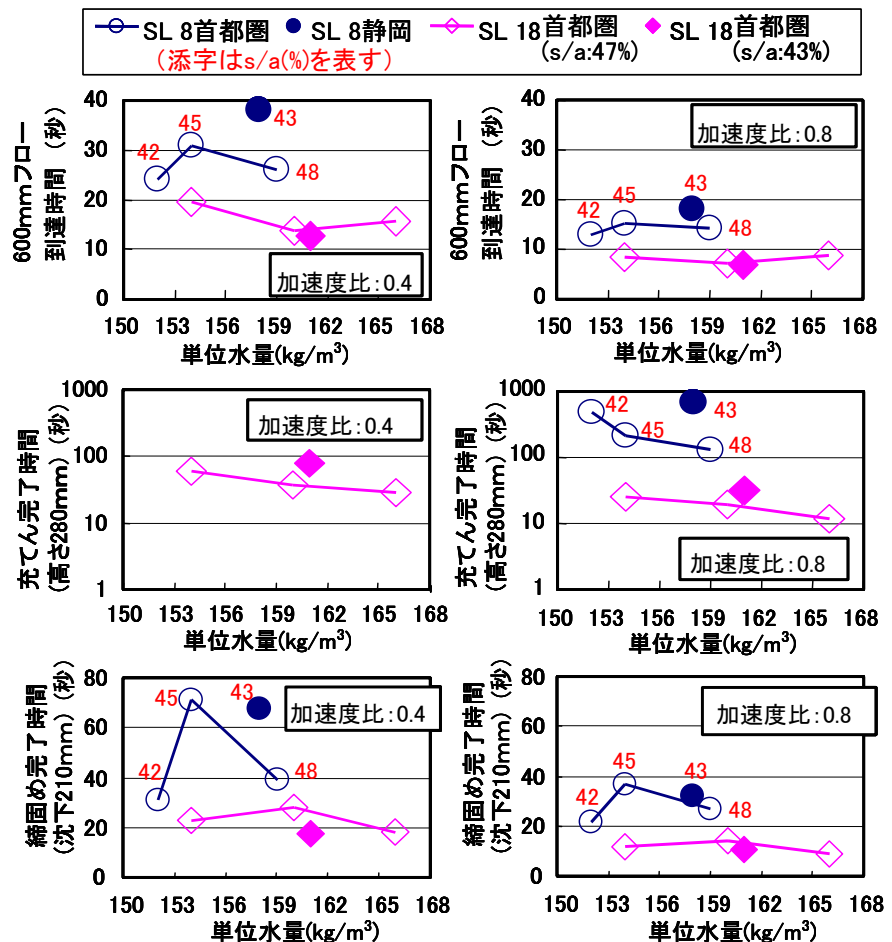


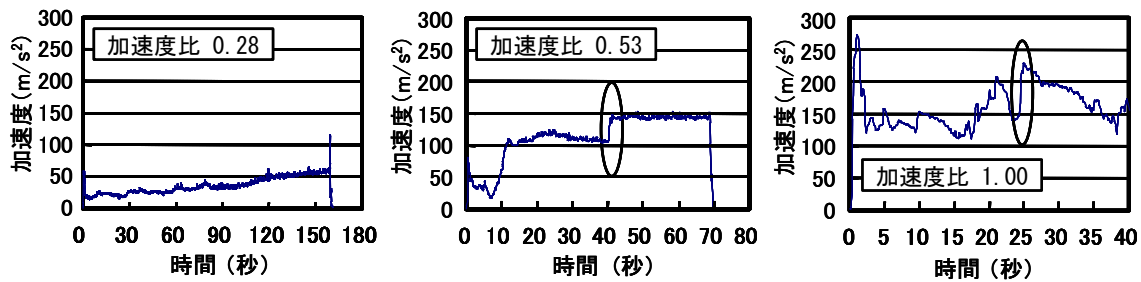
図-7 加速度比0.4, 0.8の時の変形性・充てん性・締固め性

性ともに良好である。

単位水量を減じた場合にはコンクリートは明らかに荒々しくなっておりプラスチックな性質が減じている。高性能減水剤コンクリートに関する既往の研究^{4), 5)}においても、単位ペースト量が減ることで、コンクリートのプラスチックティーが変化し、スランプ(フロー)の挙動が変化することが示唆されており、本実験においても、単位水量低減にともなうペースト量の変化がフロー変形や締固め挙動を不安定とする現象を引き起こしている可能性も考えられる。

5.3 加速度の測定結果

図-8には、締固め性試験において測定した、スランプ8cmのAEコンクリート(8-0配合)の加速度の履歴を示す。加速度比が小さい場合には、コンクリートの応答加速度は徐々に増大し、相当な時間振動を与えた状態でも締固め途上である可能性がある。一方で、加速度比が大きい



図—8 締固め試験における異なる加速度比条件下でのコンクリートの応答加速度の履歴

場合には、ある時点において加速度が急増する時間があり、これが最大加速度となっている(図中○で示した部分)。この点は、目視による観察では、容器内でレベル状態となった天端と容器内面の接触部にペーストの線が浮き出る状態(コンクリート標準示方書において締固め完了の目安として記載されていることのひとつ)ととれるものである。加速度は、このように試験中の試料形状の変化や状態の変化、またスランプなどコンクリート自体の性質によっても変わる¹⁰⁾ので、絶対値として、これを評価するためには更なる検討が必要と考えている。

6. まとめ

コンクリートの打設過程をモデル化した3種類の加振試験器(加振変形性・加振間げき通過性・加振締固め性)を製作し、これによりスランプ8cmおよび18cmのコンクリートの挙動を検討したところ、以下の結果が明らかとなった。

- (1) 高周波振動下でのコンクリートの変形状況とこれに及ぼす加速度の大きさは、変形(フロー到達時間)・間げき通過(充てん完了時間)・締固め(締固め完了時間)の3種類の評価値に各々異なった影響を及ぼす。
- (2) コンクリートがおおむね充てんするためには比較的小さい加速度でよいが、さらに密実化するためには、その後と与える加速度とその作用時間が影響すると考えられる。

このように、単位水量の大小は変形性・間げき通過性・締固め性に各々影響するが、変形性と締固め性にはコンクリートのプラスティシティーが影響している可能性があると考えている。

参考文献

- 1) 松岡康訓ほか:コンクリート技術への需要—現状と展望—/3.施工技術への需要 現状と展望(土木),コンクリート工学, Vol.42, No.9, pp.82~pp.89, 2004.9
- 2) 松岡康訓:フレッシュコンクリートの施工性評価の重要性,コンクリート工学, Vol.42, No.12, pp.1, 2004.12
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書[施工編](2002年制定), pp.55~pp.58, 2002.3
- 4) 山田一夫ほか:高性能AE減水剤を用いたペースト-モルタル-コンクリートの流動性の相関関係とその関係の作用機構,化学混和剤の性能と規格 シンポジウム論文集, pp.II-11~pp.II-20, 2002.12
- 5) 土木学会:コンクリート用化学混和剤の性能評価, pp. I -75~pp. I -81, 2002.12
- 6) 坂本淳ほか:高スランプコンクリートのプラスティシティーの評価方法に関する研究,コンクリート工学年次学術論文集, Vol.26, No.1, pp.1203~pp.1208, 2004.6
- 7) 土木学会: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現状と課題(II), pp.1~pp.21, 2003.7
- 8) 大野誠彦ほか:ボックス形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,フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価指標に関する現状と課題(II) シンポジウム論文集, pp.26~pp.28, 2003.7
- 9) 梁俊ほか: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.1221~pp.1226, 2004.6
- 10) 畑明仁ほか: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学術論文集, Vol.23, No.2, pp.1189~pp.1194, 2001.7