フレッシュコンクリートの振動締固め過程の解析的評価[†]

帖 佐 学* 大 津 政 康**

Analysis of Vibratory Compaction Process in Fresh Concrete

by

Manabu CHOSA* and Masayasu OHTSU**

In the case of vibratory compaction of fresh concrete, it is not easy to assess the effects of insert depth, compaction time, and spacing of the vibrator. So far, compaction behavior inside fresh concrete is not theoretically elucidated yet. A vibratory compaction test by using an internal vibrator was conducted in a laboratory, and the pore-water pressures were measured. Near the surface of fresh concrete, the decrease in the pore water pressure was observed due to over-vibration. A falling-head permeability test was conducted to determine a coefficient of permeability. Comparing with the slump values, a reasonable relation between a coefficient of permeability and a slump value was observed. Applying Biot's two-phase theory, the pore-water pressure and the effective stress were theoretically analyzed by the element method (BEM). It is found that the pore-water pressures numerically determined are in reasonable agreement with those of the experiment. Thus the validity of the BEM analysis is demonstrated. The effective stress was analyzed on the basis of Drucker-Prager's equivalent stress, and stress distribution due to the internal vibrator is clarified.

Key words: Fresh concrete, Consistency, Boundary element method (BEM), Pore water-pressure, Vibratory compaction, Biot's two-phase theory

1 序 論

コンクリート構造物の施工にあたっては、土木学会コンクリート標準示方書・施工編¹⁾に従うことになる。それによれば、コンクリートの締固めには、内部振動機(バイブレータ)を用いることを原則としており、バイブレータを下層のコンクリート中に10cm程度挿入し、50cm以下の挿入間隔で、一カ所当たりの振動時間5～15秒となっている。また、内部振動機の形式、大きさおよび数は、コンクリートの全容量、部材断面の厚さおよび面積、粗骨材の最大寸法、コンクリートの配合、細骨材率、コンクリートのスランプ等を考慮して選定となっている。

コンクリート施工の締固めにおいては、締固め不足、過度な締固めが生じないように十分注意する必要がある。しかしながら、フレッシュコンクリートは、コンシステンシーにより締固め特性が変化するため、示方書に記載された程度の記述による挿入深さや締固め時間、締固め間隔などでは、締固められたフレッシュコンクリートが適切に評価されているかは明確でない。そこで、境界要素法(BEM)により解析的に検討を行うことにした。実験としては、フレッシュコンクリートのバイブレータを用いた振動締固め試験を行った。バイブレータの挿入深さを示方書に従って10cmとし、フレッシュコンクリート内部の間隙水圧の変動の測定を行った。また、解析に必要である透水係数を変水位透水試験装置を用いて測定

を行い、同時にスランプ試験によりスランプ値を計測することで、スランプ値と透水係数の関係を検討した。解析では、フレッシュコンクリートを固相-液相から成る二相混合体であると仮定して、Biotの二相混合体理論を用いたBEM解析を行い、フレッシュコンクリート内部の間隙水圧の変動と応答変位を求めた。また、BEM解析によって得られた応答変位からDrucker-Pragerの等価応力を用い、フレッシュコンクリートの振動時の有効応力の算出を行い、応力状態の検討も行った。

2 解 析 理 論²⁾

従来から、フレッシュコンクリートの振動締固めについては、レオロジー特性に着目した数値解析が一般に行われている^{3), 4)}しかし、コンクリート中を伝わる振動の、コンクリートに対する液状化作用(振動に対しての動的な間隙水圧の変化)を考慮した解析は、レオロジー理論のみでは解析できない。そこで、フレッシュコンクリートを、固相-液相をそれぞれについての釣合い式、質量保存式を連成させるBiotの二相混合体理論に基づいた定式化を行った。その際、解くべき未知数を変位 u と間隙水圧 p とする定式化を採用した⁵⁾以下の固相の釣合い式(2.1)と液相の連続式(2.2)の二式を連成させて、固相・液相の動的な二相問題を解析した。固相の釣合い式には圧力勾配 $p_{,j}$ を含んでいるので、振動荷重を与えたときの液相の圧力の影響も考慮されることになる。

$$\rho(-\omega^2)u_i = (\lambda + \mu)u_{j,j} + \mu u_{i,jj} + p_{,i} \quad (2.1)$$

[†] 原稿受理 平成18年11月13日 Received Nov. 13, 2006 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

* 熊本大学大学院自然科学研究科 〒860-8555 熊本市黒髪, Graduate School of Sci. & Tech., Kumamoto Univ., Kurokami, Kumamoto, 860-8555

** 正 会 員 熊本大学大学院自然科学研究科 〒860-8555 熊本市黒髪, Graduate School of Sci. & Tech., Kumamoto Univ., Kurokami, Kumamoto, 860-8555

$$p_{,ii} = -\left(\rho^f \omega^2 + \frac{\gamma_w}{k} i \omega\right) u_{i,i} \quad (2.2)$$

ここで, ρ はコンクリート密度, ω は振動数, λ と μ は Lamé の弾性定数, γ_w は水の密度, k は透水係数である.

3 実験概要

3・1 振動締め試験

3・1・1 配合設計 振動締め試験に用いるフレッシュコンクリートの配合表を Table 1 に示す. 普通ポルトランドセメントを使用し, 粗骨材は最大寸法 20mm, 粗粒率 6.72, 実積率 32.0%, 表乾密度 3.08 (g/cm³) であり, 細骨材は粗粒率 2.53, 表乾密度 2.64 (g/cm³) であり, スランプ 8.0cm, 空気量 5.5% であった.

3・1・2 振動締め試験 内部振動機 (バイブレータ) を用いて振動締め試験を行った. 振動締め試験に用いる鋼製モールドは 300 × 300 × 350mm であり, 高さ 320mm までコンクリートを打設した. コンクリート投入時は, 初期状態を維持するために突き棒による締めを行わなかった. バイブレータは振動数 200Hz, 振動部の径 30mm の棒状で振動部を直接コンクリートに挿入するタイプのバイブレータを使用した. 振動締め試験における間隙水圧計 (CH1, CH2, CH3) は, Fig. 1 に示すようにモールド側面壁から 75mm, 供試体表面から 20mm, 120mm, 220mm の位置に設置した. 振動締め試験は, バイブレータ振動部を 100mm 挿入した状態で固定し, 振動時間を 40 秒として試験を行った.

Table 1 Mixture proportion (Vibratory Compaction test).

Water to cement ratio W/C (%)	Volume ratio of sand (%)	Weight of unit volume (kg/m ³)				
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	AE
		(W)	(C)	(S)	(G)	(cc)
45	42.3	178	407	714	973	122

Fig. 1 Test set-up for Vibratory compaction test.

3・2 スランプー透水係数試験

フレッシュコンクリートのコンシステンシーはスランプ試験 (JIS A 1101) を行い, スランプ値の測定を行った. そして, 透水係数を, Fig. 2 の土質材料用の変水位透水試験機 (JIS A 1218) を用いて測定を行った. 直径 100mm, 高さ 127mm の透水円筒にフレッシュコンクリートを充填させ, 真空ポンプを用いて飽和状態にした後に, 変水位透水試験を行い, 式 (3.1) により透水係数を求めた. この試験には, 振動締め試験より水セメント比の大きなコンクリートを用いた. その配合表を Table 2 に示す. 3Type の配合で打設を数回行い, その時のスランプ値の実測値と透水係数を測定した.

$$k = 2.30 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (3.1)$$

4 BEM 解析

4・1 解析モデル

BEM 解析に用いたモデルを Fig. 3 に示す. 解析モデルを, 振動締め試験の状態に近づけるために, フレッシュコンクリートが打設された 300 × 320mm のモデルに, バイブレータが貫入深さ 100mm で挿入されていると想定した 2 次元モデルを作成した. なお, 側方の拘束条件は, コンクリートの粘着力とモールドの摩擦力により影響されるため, 上下方向は無拘束と完全拘束の 2 ケースを考

Table 2 Mixture proportion (Slump and permeability test).

W/C (%)	Weight of unit volume (kg/m ³)				
	W	C	S	G	AE admixture (cc)
50	168	336	748	1183	137
55	167	305	768	1183	137
60	172	288	769	1184	130

Fig. 2 Device for falling-head permeability test.

Fig. 3 Analytical model.

えた。このモデルのバイブレータとの接触部分底部には振動締め固め試験と同様、周波数 200Hz で、30Pa の振動载荷を考えた。解析には、透水係数、ヤング率、密度のフレッシュコンクリートの物性値が必要である。測定値を Table 3 に示す。ヤング率は、打設後のフレッシュコンクリートの弾性波伝播速度より決定した。そして、式 (2.1) の Lamé 定数はヤング率とポアソン比より決定した。なお、ここでのポアソン比は、フレッシュコンクリートでの測定が困難なため、硬化コンクリートの 0.2 と仮定している。

4・2 応力解析

間隙水圧を求める BEM 解析から、解析モデルの境界変位が求められる。求められた境界変位から、フレッシュコンクリート内部の有効応力 (σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{yy}) の算出を行った。ここで、応力状態における種々の成分の相互作用を考慮するために式 (4.1) に示す Drucker-Prager の等価応力 (k) を用いた。応力解析に用いる解析モデルは、BEM 解析に用いた Fig. 3 のモデルを使用し、振動周波数も BEM 解析と同様に振動締め固め試験と同じ 200Hz とした。

$$\begin{aligned} k &= I_1 + \sqrt{J_2} \\ I_1 &= \sigma_{xx} + \sigma_{yy} \\ J_2 &= \frac{1}{6} \left\{ (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{xx}^2 \right\} + \tau_{xy}^2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

5 結果および考察

5・1 実験結果

5・1・1 スランプー透水試験 3Type の配合のフレッシュコンクリートにおける、スランプ試験で測定したスランプ値と、変水位透水試験により求めたフレッシュコンクリートの透水係数の関係を Fig. 4 に示す。スランプ値が小さくなると透水係数は大きくなり、スランプ値が大きくなると透水係数が小さくなっていることが確認される。これは、スランプ値が小さなフレッシュコンクリートほど流動性が低く、間隙が多くなるために透水性が高くなり、透水係数が大きくなると考えられる。逆に、スランプ値が多くなるほど流動性が高く、フレッシュコン

Fig. 4 Relation between a coefficient of permeability and a slump value.

クリート中の間隙が少なくなり、透水性が低くなり、透水係数が小さくなると考えられる。図中には、Table 1 のコンクリートでの結果を星印で示しているが、ほぼ、この関係に従っていることが分かる。

5・1・2 振動締め固め試験 振動締め固め試験で、間隙水圧の経時変化測定を行った。間隙水圧データは、0.1 秒間隔で測定を行い、各水圧計のチャンネル (CH) ごとの値を Fig. 5 示す。CH2, CH3 では、間隙水圧の増減が認められる。これは、バイブレータの振動によるものであると考えられるが、全体を見ると大きな変化とは認められない。一方、供試体表面付近に設置した CH1 は、20 秒付近から間隙水圧の減少が始まり、30 秒付近で急激に減少していることが認められる。これは、液状化や材料流動が進むことにより、CH1 付近のコンクリート密度が過振動により低下していくため、間隙水圧が減少したと考えられる。

間隙水圧の変動は、液状化、材料流動と関係している。実験結果より供試体表面付近では、20 秒付近で完全な液状化、材料流動が起こっていると考えられることから、示方書で定められている振動時間 5 ～ 15 秒は、完全な液状化、材料流動が発生しない領域で定められていると言える。この結果からは、コンクリート表面付近の間隙水圧の変動が、適切な振動時間を決定の要因であることが分かる。解析値との比較には、初期状態の物性値を用いることから、試験開始直後の実験値を用いた。

5・2 解析結果

5・2・1 BEM 解析 BEM 解析により解析された間隙水圧の分布を Fig. 6 に示す。内部振動機の振動部先端付近から同心円を描くように、間隙水圧が減少していることが分かる。次に、間隙水圧計位置での解析結果と、

Fig. 5 Variation in the pore-water pressure with time.

Table 3 Mechanical properties.

Coefficient of permeability (cm/s)	Young's modulus (GPa)	Density(kg/m ³)
4.51×10^{-5}	1.67	2400

Fig. 6 Pore-water pressure distribution.

実験により得られた実験開始直後の間隙水圧の比較を Fig. 7 に示す。側方の境界条件を変化させた解析値、実験値ともに、内部振動機振動部先端である 10cm 付近で最も大きな値を示していることが認められる。また、それより上部では拘束解除の解析解が、それより下部では、拘束の解析が実験値とよく一致しており、解析値は全体的に実験値に近い値を示していることが分かる。以上のことから、フレッシュコンクリートの振動締め時の動的挙動を二相問題として BEM 解析により求められることが確認された。また、間隙水圧は、振動機から上方で大きく変化し、下方に向かって減少することが明らかになった。

5・2・2 応力解析 Drucker-Prager の等価応力として得られる、 k 値の応力分布を Fig. 8 に示す。ここで、正の値が圧縮、負の値が引張とする。内部振動機先端付近に引張の応力が確認され、モールド下部で圧縮の応力が発生することが認められる。このことから、パイプレータ付近では、引張の応力が発生していることから、骨材が下側に沈下していく応力が発生し、沈下した骨材によりモールド下部では圧縮の作用を受け、圧縮の応力が発生したことが考えられる。次に、せん断状態を考えるために、Drucker-Prager の等価応力の $\sqrt{J}$ の値を Fig. 9 に示す。モールドの下部にせん断応力の大きい値が分布する。このように、間隙水圧分布 (Fig. 6) において内部振動機先端付近を中心とする同心円状で間隙水圧の変動が見られること、有効応力分布 (Fig. 8) より内部振動機先端

Fig. 7 Comparison of experimental values with analytical results.

Fig. 8 Equivalent stress distribution. (Pa)

Fig. 9 Shear stress distribution. (Pa)

付近で引張の応力が発生していることから、内部振動機によるコンクリートの攪乱域が把握できるものと考えられる。

6 結 論

本研究では、パイプレータを用いた振動締め時のフレッシュコンクリート内部に発生する間隙水圧分布を実験的に求め、BEM 解析により解析的に検討した。その結果、以下のことが確認された。

- (1) スランプ値—透水係数の関係から、スランプ値が小さくなると透水係数は大きくなり、スランプ値が大きくなると透水係数が小さくなっていることが確認された。
- (2) 振動締め試験における間隙水圧の計測結果から、供試体表面付近で、振動時間 20 秒付近から大きな間隙水圧の変化が確認された。これは、過振動により液状化、材料流動が進行することにより、表面付近のコンクリートの骨材が沈降し、密度が低下するためであると考えられる。

(3) BEM 解析による間隙水圧の挙動は、振動締め試験の測定結果の挙動と一致し、パイプレータ振動部先端付近から、同心円を描くようにして間隙水圧が減少していることが明らかになった。

(4) フレッシュコンクリートのパイプレータにおける振動締め時の挙動を二相問題として BEM 解析することの妥当性が、実験値と解析値の一致により確認された。また、間隙水圧分布、有効応力分布からフレッシュコンクリートの振動締め時の攪乱域が明らかになった。

参 考 文 献

- 1) JSCE, "Standard Specification for Concrete Structures", pp.120-121 (2002).
- 2) O. C. Zienkiewicz and T. Shiomi, "Dynamic Behavior of Saturated Porous Media", The Generalized Biot Formulation and its Numerical Solution, Int. J. Numer. Anal. Method Geomech., Vol.8, pp.71-96 (1984).
- 3) Y. Kurokawa, Y. Tanikawa, H. Mori and T. Watanabe, "Fresh concrete no shindoudenpaseijou ni kansuru jikkenteki kaisekiteki kenkyu", proc. of JCI, Vol.22, No.2, pp.403-408 (2000).
- 4) H. Hatasawa, K. Sakanishi, K. Sugai and T. Endo, "Choukataneri concrete no rheology tokusei no doutei", Fresh concrete no Consistency hyouka ni kansuru gijyutsu no genjou to kadai, Concrete Gijyutsu series, Vol.37, pp.9-12 (2000).
- 5) H. Kunisue, "Quantitative Evaluation of Dynamic Compaction Process and Placing Interval in Fresh Concrete", Doctoral Thesis, Kumamoto Univ. (2004).
- 6) S. E. Chidiac, F. Habibbeigi and D. Chan, "Slump and Slump Flow for Characterizing Yield Stress of Fresh Concrete", ACI Materials Journal, Vol.103, No.6, pp.413-418 (2006).
- 7) M. Ohtsu, Y. Machigashira and M. Chosa, "Distribution of Pore Pressure in Fresh Concrete under Vibratory Compaction", proc. of JCI, Vol.17, No.2, pp.33-42 (2006).