

論文 コンクリートのフレッシュ性状が締固め完了エネルギーに与える影響

梁 俊^{*1}・宇治 公隆^{*2}・國府 勝郎^{*3}・上野 敦^{*4}

要旨: コンクリートのフレッシュ性状はコンクリートの締固め性に大きく影響する。本研究では、W/C40%およびW/C50%でスランプ5~15cmのコンクリートを取り上げ、 K_p 値および K_m 値、セメントペーストの塑性粘度、流動化剤の添加とフレッシュ性状の関係を把握するとともに、これらの要因が締固め完了エネルギーに与える影響について検討した。本研究により、締固め完了エネルギーはスランプの増加にともない減少し、コンクリートのスランプが同じでもW/Cの相違により締固め完了エネルギーは相異なることを明らかにした。

キーワード: 締固め性, 締固めエネルギー, ペーストの塑性粘度, K_p 値, K_m 値

1. はじめに

コンクリートは、締固めの良否により品質が大きく変動するので、適切な配合を選定し、十分に締固めを行うことが重要である。一般に、コンクリートの単位水量を増加させることにより、締固めしやすくなるが、品質確保のために、施工が可能な範囲でスランプを小さく、すなわち単位水量を少なくしなければならない。従来、フレッシュコンクリートのコンシステンシーの評価はスランプ試験によって行われ、施工に適するコンシステンシーの標準値が示されているが¹⁾、これらの方法では必ずしもコンクリートの締固めのしやすさを適切に評価することができない。

これまでも、コンクリートの締固めに関して、加速度の大小やスランプの変化による検討など、数多くの研究が行われているが²⁾³⁾、コンクリートのフレッシュ性状がコンクリートの締固め性に与える影響を締固めエネルギーの観点から検討した研究は見られない。なお、國府らは、超硬練りコンクリートの配合要因および使用細骨材の変化による締固め性

状を試験し、締固めしやすい配合の選定方法について検討しているが⁴⁾⁵⁾、通常の硬練りコンクリートまでは言及していない。

コンクリートの締固めは、振動機により励起される振動エネルギーによりフレッシュコンクリートが内部摩擦抵抗に打ち勝ち変形を生じる現象である。筆者らは、これまでに、コンクリートのフレッシュ性状が通常の硬練りコンクリート(スランプ5cm~12cm程度)の締固め性に与える影響を締固めエネルギーの観点から定量的に評価することを目的とし、超硬練りコンクリートの評価手法を適用し、スランプ5cm~12cm程度のコンクリートの変形挙動を評価できる室内試験方法を提案している⁶⁾。

本研究では、この室内試験方法を用い、 K_p 値、 K_m 値、セメントペーストの塑性粘度、流動化剤の添加に着目して、フレッシュ性状が締固め完了エネルギーに与える影響を検討した。

2. 試験装置

試験装置を写真-1に示す。逆回転偏心モータ2台を備え、一定振幅により振動する振動台

*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 博士(工学)(正会員)

*2 首都大学東京 都市環境学部 都市基盤環境コース 准教授 博士(工学)(正会員)

*3 首都大学東京 都市環境学部 都市基盤環境コース 教授 工学博士(正会員)

*4 首都大学東京 都市環境学部 都市基盤環境コース 助手 博士(工学)(正会員)

(写真左), データを記録するためのコンピュータ(写真右), 振動台の振動数を変化させて加速度を調節するための制御盤(写真中央)の3点から構成されている。本加振装置は, 振幅一定であるが, 振動数は可変で, これにより加速度を変化させるようになっている⁶⁾。

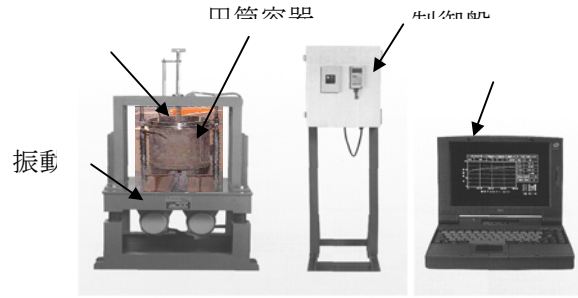


写真-1 締固め装置及び容器の設置

3. 締固め性の評価方法

締固め性は, コンクリートのコンシステンシーに応じた締固め前における型枠中のコンクリートの見掛けかさ密度から, コンクリートの示方配合の理論密度に至る変形の容易さを表すものと考えることができる。そこで, 締固めの程度は, 円筒容器中の試料の最も高い部分を高さとする円筒体積に対するコンクリート試料の真の体積の比として捉え, これを締固め度 γ と定義する。締固め度 γ は式(1)により表すことができる。

$$\gamma = H_0/h \times 100 = ((m/\rho)/A)/h \times 100 \quad (1)$$

ここに, γ : 締固め度(%), H_0 : 示方配合から計算される単位容積質量まで締め固められた時の試料の高さ(mm), h : 任意の締固め時間における試料の高さ(mm), m : 試料の質量(kg), ρ : 示方配合から計算される試料の単位容積質量(kg/L), A : 円筒容器の底面積(mm²)

変形進行曲線を式(2)に示す。なお, 式中の各係数は図-1の模式図に対応する。

$$\gamma = C_i + (C_f - C_i) [1 - \exp(-bE^d)] \quad (2)$$

ここに, γ : 締固めエネルギー E におけるコンクリートの締固め度(%), C_i : 初期締固め度(%), C_f : 締固めエネルギーを無限大とした時の達成可能な締固め度(%)(硬練りコンクリートの場合は必ず締固めることができるので, C_f は100%と考えてよい), b, d : 実験定数

一方, 締固めエネルギーは式(3)により求める

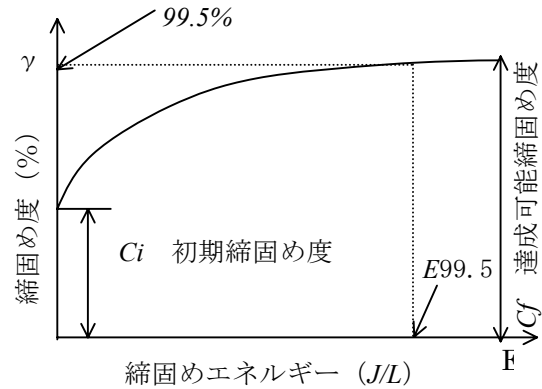


図-1 変形進行曲線の模式図

ことができる⁴⁾。

$$E_t = \rho \alpha_{max}^2 t / 4\pi^2 f \quad (3)$$

ここに, E_t : t 秒間にコンクリートが受ける締固めエネルギー(J/L), t : 振動時間(s), α_{max} : 最大加速度(m/s²), f : 振動数(s⁻¹), ρ : 示方配合から計算される試料の単位容積質量(kg/L)

本研究では, 締固めを終了してもよいとされる締固め度を, 実務的に99.5%と設定し, 締固め度99.5%までに与えられたエネルギーを締固め完了エネルギー($E_{99.5}$)と定義した⁶⁾。なお, 実験は振動数35Hz, 締固め加速度1.0Gで行った。

4. 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表-1に示す。本実験では, まず, 水セメント比50%でスランプ8cmとなる配合, および水セメント比40%でスランプ8cmとなる配合を決定した。その結果, 水セメント比50%に対しては, 単位水量169kg/m³, 細骨材率42%, また, 水セメント比40%に対しては, 単位水量166kg/m³,

細骨材率 38%を得た。なお、コンクリートの適切な状況を確保するため、W/C40%と W/C50%では細骨材率は相違している。そして、これらを基本

配合とし、それぞれ単位水量の調整によりスランプ 5, 12, 15cm の配合を決定した。表-2 に各配合を示す。

表-1 使用材料

種類	性質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント: 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3370cm ² /g
細骨材	細砂 (S ₁) 富津産山砂: 表乾密度 2.63g/cm ³ , 実積率 59.9%, F. M. =1.55, 吸水率 1.58%
	粗砂 (S ₂) 津久井産砕砂: 表乾密度 2.65g/cm ³ , 実積率 64.4%, F. M. =2.87, 吸水率 1.06%
粗骨材 (G)	津久井産砕石: 表乾密度 2.66g/cm ³ , 実積率 60.9%, F. M. =6.36, 吸水率 0.60%
混和剤 (Ad)	AE 減水剤; リグニンスルホン酸系 流動化剤; メラミンスルホン酸系

表-2 コンクリートの配合

	目標スランプ (cm)	単分量 (kg/m ³)				
		W	C	S ₁	S ₂	G
W/C=50% (s/a=42%)	5	169	338	74	675	1040
	8	172	344	73	670	1032
	12	180	360	72	657	1012
	15	188	376	70	644	992
W/C=40% (s/a=38%)	5	166	415	64	592	1076
	8	172	430	63	582	1059
	12	183	458	61	564	1027
	15	190	475	60	553	1006

注) 全ての配合が AE 減水剤を C×0.25%使用

表-3 スランプと締固め完了エネルギー

目標 スランプ (cm)	W/C=50% (s/a=42%)		W/C=40% (s/a=38%)	
	実測スランプ (cm)	E99.5 (J/L)	実測スランプ (cm)	E99.5 (J/L)
5	5.0	4.31	5.0	7.09
8	8.5	3.12	7.5	5.97
12	12.0	1.62	10.5	3.74
15	15.0	0.51	15.0	0.62

5. 実験結果及び考察

5.1 スランプと締固め完了エネルギー

本実験では、W/C=40%および 50%のそれぞれにおいて、スランプを変化させ、締固め完了エネルギーを測定した。実験結果を表-3 に、また、スランプと締固め完了エネルギーの関係を図-2 に示す。

W/C=40%について見てみると、締固め完了エネルギーはスランプの増加にともない低下し、スランプ 15cm では締固め完了エネルギーが 0.62J/L となり、スランプ 5cm の場合の 1/10 程度である。また、コンクリートのスランプが同じでも水セメント比の相違により、締固め完了エネルギーは異なることが分かる。ただし、スランプの増加により、W/C=40%と W/C=50%の同一スランプのコンクリートにおける締固め完了エネルギーの差は次第に小さくなり、スランプが 15cm ではほぼ同じ値となる。

以上のことから、コンクリートのコンシステンシーの指標であるスランプが同一でも硬練りコンクリートの締固め性は相違し、スランプ以外の要因が締固め完了エネルギーに影響を及ぼしていると言える。

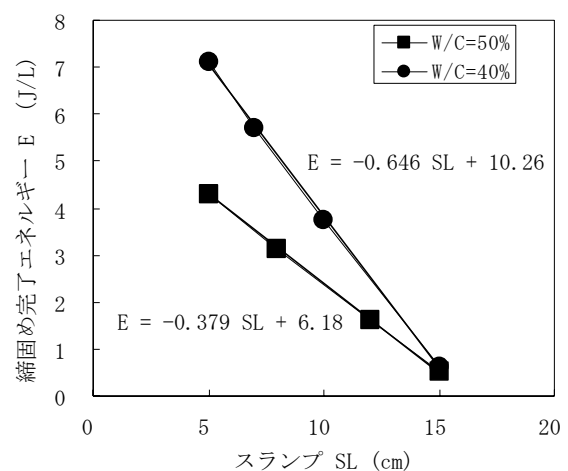


図-2 スランプと締固め完了エネルギーの関係

5.2 締固め性に及ぼす要因

本研究では、コンクリートの各配合において、粗骨材空隙量に対するモルタル容積の比 (K_m) を式(4)で表し、また、細骨材空隙量に対するペースト容積の比 (K_p) を式(5)で表すこととする。

$$K_m = m/G \times (1/T_g - 1/\rho_g) \quad (4)$$

$$K_p = P/S \times (1/T_s - 1/\rho_s) \quad (5)$$

ここに、 K_m ：モルタル粗骨材空隙比、 K_p ：ペースト細骨材空隙比、 m ：単位モルタル容積 (L/m^3)、 P ：単位ペースト容積 (L/m^3)、 G 、 S ：粗骨材および細骨材の単位量 (kg/m^3)、 ρ_s 、 ρ_g ：細骨材および粗骨材の表乾密度 (kg/L)、 T_s 、 T_g ：吸水率を考慮した細骨材および粗骨材の単位容積質量 (kg/L)

コンクリートのコンシステンシーの検討において、余剰ペースト膜厚に着目した研究が数多く行われている⁷⁾⁸⁾。この場合、基本的に粒子の比表面積が必要となり、この決定方法が実用上の課題となる。一方、 K_m 、 K_p は細・粗骨材を一括した余剰ペースト膜厚を用いてはいないが、粗骨材および細骨材に対して余剰ペースト膜厚に相当する指標を与えている。すなわち、それらの値が1の状態は骨材が相互に接している状態であり、余剰ペースト膜厚が0に相当する。

そこで以下では、 K_m 、 K_p を用い、骨材による内部摩擦抵抗が締固めエネルギーに与える影響を検討するとともに、B型粘度計によりペースト（配合を基に、別途、ペーストのみを練り混ぜた）の塑性粘度を測定し、ペーストの粘性が締固めエネルギーに与える影響を検討する。

K_m 、 K_p および塑性粘度を表-4に示す。コンクリートの締固め完了エネルギーはコンクリートの内部摩擦抵抗と粘性抵抗によって支配されると考えられる。細・粗骨材の種類が一定の場合、コンクリートの配合における、単位水量と細骨材率の変化は、コンクリート中の骨材粒子間距離を支配するので、コンクリートの内部摩擦抵抗に影響を与える。したがって、単位水量と細骨材率の

表-4 コンクリートの K_m 、 K_p および塑性粘度

配合	目標スランプ (実測スランプ) cm	K_m	K_p	塑性 粘度 Pa·s
W/C=50% (s/a=42%)	5 (5.0)	2.16	1.71	0.443
	8 (8.5)	2.18	1.75	
	12 (12.0)	2.26	1.87	
	15 (15.0)	2.33	1.99	
W/C=40% (s/a=38%)	5 (5.0)	2.03	2.10	1.860
	8 (7.5)	2.09	2.21	
	12 (10.5)	2.20	2.42	
	15 (15.0)	2.28	2.57	

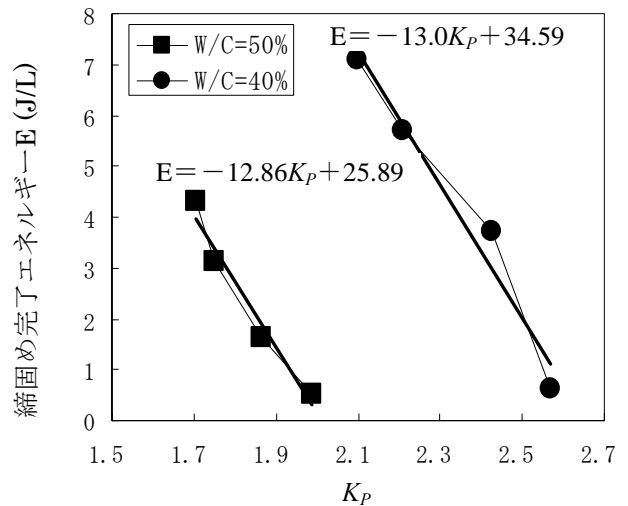


図-3 K_p と締固め完了エネルギーの関係

変化がコンクリートの締固め完了エネルギーに与える影響は K_m 、 K_p を用いて評価することができる。 K_m 、 K_p が大きいほど骨材粒子間距離が大きくなるため、内部摩擦抵抗が小さくなり、コンクリートの締固め完了エネルギーは小さくなる。一方、水セメント比および混和剤の変化は、ペーストの塑性粘度を左右し、コンクリートの締固め完了エネルギーに影響を与える。ペーストの塑性粘度が大きくなるほど粘性抵抗が大きくなり、締固め完了エネルギーは大きくなる。

表-4に示すように、スランプが同一の場合、 K_p と塑性粘度はW/C=50%の方がW/C=40%より小さいが、 K_m はW/C=50%の方がW/C=40%より大きい。 K_p と締固め完了エネルギーの関係を図-3に示

す。図から分かるように、W/C=50%のコンクリートとW/C=40%のコンクリートの締固め完了エネルギーは傾きはほぼ同じであるが全く相違したものとなっている。したがって K_m ならびに塑性粘度などが影響しているものと推察される。

K_m と締固め完了エネルギーの関係を図-4に示す。図から分かるように、W/Cに関係なく、 K_m と締固め完了エネルギーは直線関係にある。なお、W/C=40%のコンクリートは、W/C=50%のコンクリートに比べて K_p 、塑性粘度がともに大きい。 K_p と塑性粘度は変形性、締固め完了エネルギーに対して相反する影響を及ぼすことから、締固めエネルギーに与える K_p と塑性粘度の影響の程度が概ね同じであったものと考えられる。

本研究で用いたコンクリートに対して、 K_m が締固め完了エネルギー(E99.5)に与える影響を式(6)によって表すことができる。 K_m が0.1単位増減する場合、締固め完了エネルギーは2.34J/L減増する。

$$E_{99.5} = -23.4 K_m + 54.6 \quad (6)$$

5.3 セメントペーストの粘性が締固め完了エネルギーに与える影響

単位水量 166kg/m³、細骨材率 38%、W/C=40%の配合で練り混ぜた目標スランプ8cmのコンクリートに流動化剤を後添加し、 K_m および K_p を変化させることなくペーストの粘性だけを変化させた。

流動化剤の添加量はセメント質量の0.53%、0.66%の2水準とした。その結果、コンクリートのスランプは7.5cmからそれぞれ10.5cm、14cmとなった。なお、B型粘度計により求めたセメントペーストの流動曲線は直線であった。流動化剤の添加によるコンクリートの特性を表-5に示す。また、流動化剤の添加によるスランプの変化と締固め完了エネルギーの関係を図-5に示す。なお、図には前出のW/C=40%の結果を合わせて示している。図からわかるように、流動化剤を添加したことによってコンクリートの流動性は高まり、スランプが大きくなる。スランプ7.5cm

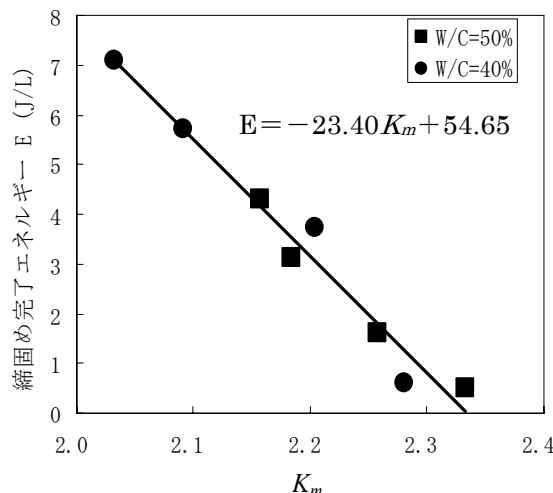


図-4 K_m と締固め完了エネルギーの関係

表-5 流動化剤を添加したコンクリートの特性

流動化剤 添加率	塑性粘度 (Pa·s)	K_m	K_p	スランプ (cm)	E99.5 (J/L)
C×0.53%	1.153	2.09	2.21	10.5	3.46
C×0.66%	0.604			14.0	3.34

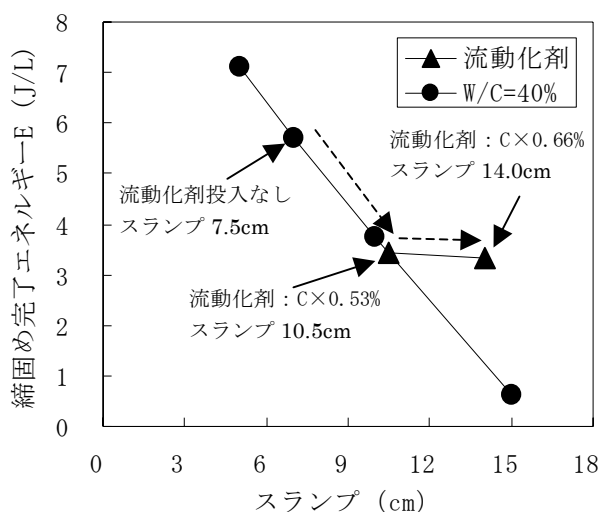


図-5 流動化剤の添加による締固め完了エネルギーの変化

のコンクリートが流動化剤の添加によってスランプ10.5cmとなったコンクリートの締固め完了エネルギーは、目標スランプ12cmで実測10.5cmであったコンクリートの締固め完了エネルギーにほぼ等しい。これは、通常的配合修正の方法でスランプ7.5cmのコンクリートからスランプ10.5cmのコンクリートとすることによる K_m の増加に対応した締固め完了エネルギーの減少量と、スランプ7.5cmのコンクリートから流動化剤の添加によって塑性粘度が減少し、スランプ10.5cm

となったコンクリートの締固め完了エネルギーの減少量がほぼ一致していたことを意味している。式(6)より求めた K_m の増加による締固め完了エネルギーの減少量は2.57J/Lで、表-5の実験値から求めた塑性粘度の減少による締固め完了エネルギーの減少量2.51(=5.97-3.46)J/Lとほぼ同じである。すなわち、単位水量166kg/m³、細骨材率38%、水セメント比40%でスランプ8cmのコンクリートに流動化剤をC×0.53%添加した場合、塑性粘度が0.707Pa・s低下し、粘性抵抗に消費する締固めエネルギーが2.51J/L減少したことになる。したがって、塑性粘度が1Pa・s増減する場合、締固め完了エネルギーは3.64J/L増減すると言える。

なお、目標スランプ8cmのコンクリートにC×0.66%の流動化剤を添加してスランプ14cmとしたコンクリートの締固め完了エネルギーは、目標スランプ15cmのコンクリートの締固め完了エネルギーと相異し、スランプ10.5cmのコンクリートの締固め完了エネルギーに近い値を示している。すなわち、流動化剤の添加量をC×0.66%に増やし、ペーストの粘性・スランプがC×0.53%の場合と異なっても締固め完了エネルギーにはほとんど差異がみられない。このことから、変形のための潤滑剤として作用するセメントペーストの塑性粘度が1.15程度以下の場合、塑性粘度の変化が締固め完了エネルギーに与える影響は小さいと考えられる。

6. まとめ

本研究では、W/C=40%およびW/C=50%で、目標スランプを5, 8, 12, 15cmとしたコンクリートの締固め完了エネルギーについて実験的に検討し、以下の事柄が明らかとなった。

- (1) 締固め完了エネルギーはスランプの増加にともない減少し、スランプ15cmの締固め完了エネルギーはスランプ5cmの場合の1/10程度であった。
- (2) コンクリートのスランプが同じでもW/Cが相違すると締固め完了エネルギーは異なる。

- (3) W/C=40%, W/C=50%のコンクリートにおいて、 K_m が0.1単位増減する場合、締固め完了エネルギーは2.34J/L減増する。
- (4) セメントペーストの塑性粘度が1Pa・s増減する場合、締固め完了エネルギーは3.64J/L増減する。セメントペーストの塑性粘度が1.15程度以下になると、塑性粘度の変化が締固め完了エネルギーに与える影響は小さい。

[謝辞]本研究を実施するにあたり、学部4年生の遠藤智恵さんの協力を得た。ここに深謝します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート標準示方書[施工編]
- 2) 福留和人ほか：最適含水比近傍で練り混ぜたフライアッシュセメント混合物の振動締固め特性に関する研究，土木学会論文集，No.627/V-44，pp.55-66，1999.8
- 3) 中原康夫，平田重信：細骨材の微粒分量が超硬練りコンクリートのコンシステンシーに及ぼす影響について，セメント・コンクリート論文集，No.33，pp.204~207，1979
- 4) 國府勝郎，上野敦：締固め仕事量の評価に基づく超硬練りコンクリートの配合設計，土木学会論文集，No.532/V-30，pp.109-118，1996.2
- 5) 國府勝郎，上野敦，早川健司，鈴木一雄：防護柵に用いるフレッシュコンクリートの性質に対する使用骨材の影響，セメント・コンクリート論文集，No.48，pp.872-877，1994
- 6) 梁俊，宇治公隆，國府勝郎，上野敦：フレッシュコンクリートの締固め性評価試験法に関する研究，コンクリート技術シリーズ，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(2) pp.2-39~2-48，2003.7
- 7) 松下博通，田中邦博，近田孝夫：砕砂コンクリートの細骨材率に関する考察，セメント技術年報，No.42，pp.88-91，1988
- 8) 岩崎訓明：コンクリート配合の原点，セメント・コンクリート，No.564，pp.20-27，Feb.1994