

論文 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

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

要旨:締固め時間や棒状振動機による締固め間隔など施工におけるコンクリートの締固め方法の設定は,経験的に行われており理論的根拠に乏しい。本研究は,変形挙動をとみなうコンクリートの締固め性評価に,超硬練りコンクリートで既に確立されている締固め性評価手法を適用し,コンクリートの配合が締固めエネルギーに与える影響について検討した。検討要因として,粗骨材の種類,細骨材率の変化,単位水量の変化およびスランプロスを取り上げ,それら要因がコンクリートの締固めエネルギーに与える影響を評価した。

キーワード:締固め性,締固めエネルギー,変形率,最適細骨材率,粗骨材形状

1. はじめに

コンクリートの締固めにあたっては,適切な時間,適切な間隔で棒状振動機により締固めを行うことが,品質確保の面から重要である。

しかしながら,実際の施工におけるコンクリートの締固めは,経験的に行われており,理論的根拠に乏しい。振動締固めに関して,ACI 309 委員会では,振動条件下におけるフレッシュコンクリートの挙動に関する既往の研究を取りまとめているが¹⁾,主に材料や配合等の影響を定性的に説明するにとどまり,エネルギーの観点からの検討はなされていない。また,山口ら²⁾,西川ら³⁾は,フレッシュコンクリートのコンシステンシーを評価する方法として,施工速度を取り上げて検討しているが,これらには流動挙動による影響が含まれており,締固めのみを評価する方法としては十分ではない。

一方,国府らは超硬練りコンクリートを対象に,コンクリートの締固め挙動をエネルギーの

観点から評価している⁴⁾。そして,筆者らは通常のコンクリートの締固め性の評価に,超硬練りコンクリートの評価手法を適用し,スランブを有するコンクリートの変形挙動を考慮した室内試験方法の確立に取り組んでいる⁵⁾。

本研究では,この室内試験方法を用い,コンクリートの配合が締固めエネルギーに与える影響について検討した。締固め試験には振動台式試験装置を用い,単位容積当たりの試料が受ける締固めエネルギーを振動台の振動条件から算出した。一方,所定の容器内に投入したコンクリートが示方配合の密度まで締固められた場合の高さと任意振動時における高さとの比を変形率と定義し,締固めエネルギーと変形率の変化の関係を求めた。検討要因は,粗骨材の種類,細骨材率の変化,単位水量の変化およびスランプロスであり,本実験結果をもとに,これらの要因がコンクリートの締固めエネルギーに与える影響について検討した。

*1 東京都立大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 博士課程(正会員)

*2 東京都立大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 助教授 博士(工学)(正会員)

*3 東京都立大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 教授 工学博士(正会員)

*4 東京都立大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 助手(正会員)

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(写真左)、データを記録するためのノート型パーソナルコンピュータ(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。



写真— 1 試験装置

3. 評価方法

コンクリートの締固めの目的は、打込み時に巻き込まれた空気泡の排除や型枠のすみずみまで充填することである。本試験では、図— 1 に示すように、円筒容器内でスランプ試験を行った直後の状態 a から安定状態 b (100%の締固めを示す高さ H_0 までは不可能と考える)までの高さ変化を経時的に測定し、それを変形率 γ と定義した。なお変形率 γ は式(1)により表すこととした。

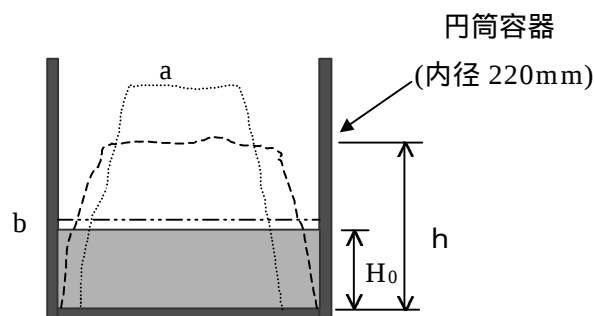
$$\begin{aligned} \gamma &= H_0/h \times 100 \\ H_0 &= (m/\rho)/A \end{aligned} \quad (1)$$

γ : 変形率(%), H_0 : コンクリートの示方配合から計算される密度まで締固められる時(100%)の試料の高さ(mm), h : 任意の時間におけるコンクリートの高さ(mm), m : 試料の質量(kg), ρ : 示方配合から計算されるコンクリートの密度(kg/L), A : 円筒容器の底面積(mm²)

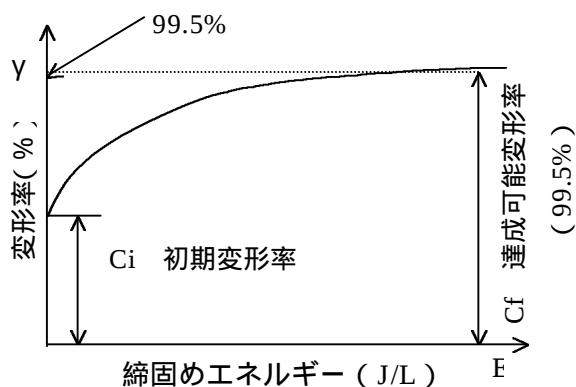
変形進行曲線を式(2)で表す。なお、式中の各係数は図— 2 の模式図に対応する。

$$\gamma_E = C_i + (C_f - C_i)[1 - \exp(-bEd)] \quad (2)$$

ここに、 γ_E : 締固めエネルギー E におけるコンクリートの変形率(%), E : 1 リットル(L)のコンクリートに与えられるエネルギー(J/L), C_i : 初期変形率(%), C_f : 達成可能変形率(%), b , d : 実験定数



図— 1 振動によるコンクリートの変形



図— 2 変形進行曲線の模式図

一方、締固めエネルギーは式(3)により求めることができる⁴⁾。

$$E_{t0} = \rho \alpha_{\max}^2 t_0 / 4 \pi^2 f \quad (3)$$

ここに、 E_{t0} : t_0 秒間に 1 リットルのコンクリートに与えられる締固めエネルギー(J/L), t_0 : 振動時間(s), $\alpha_{\max}$: 最大加速度(m/s²), ρ : コンクリートの密度(kg/L), f : 振動数(s⁻¹)

本研究では、達成可能変形率を 99.5%とし、それ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、式(4)により算出する。締固め試験条件として、加速度は後述の 5.1, 5.2, 5.3 の試験では 1g とし、5.4 の試験では 0.98 ~ 2.46 g とした。

$$E_{99.5} = \{ \ln(C_f - C_i) - \ln(C_f - 99.5) / b \}^{1/d} \quad (4)$$

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。本研究では、まず碎石を用いたコンクリート（以下、普通コンクリートと記す）について、試し練りによりスランプ8cmとなる配合を決定した。これを基本配合とし、以後の粗骨材種類、s/aの変化に関する検討のための基準とした。表—2に基本配合を示す。

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)	普通	津久井産の碎石：表乾密度 2.66g/cm ³ ，実積率 60.9%，F.M.=6.36%，吸水率 0.60%
	重量	電気炉酸化スラグ粗骨材：表乾密度 3.57g/cm ³ ，実積率 56.2%，F.M.=6.64，吸水率 0.78%
	軽量	非造粒形人工軽量骨材：表乾密度 1.65g/cm ³ ，実積率 69.8%，F.M.=6.28%，吸水率 0.02%
混和剤 (Ad)		AE 減水剤リグニンスルホン酸系：使用量 C × 0.25%

表—2 基本配合(普通コンクリート)

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	S ₁	S ₂	G	Ad
50	43	173	346	152	613	1020	0.865

5. 実験結果及び考察

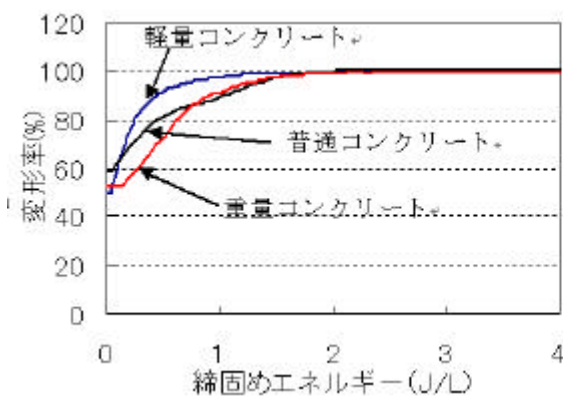
5.1 粗骨材の種類が締固め完了エネルギーに与える影響

密度および形状が相違する三種類の粗骨材（碎石（普通骨材）・人工軽量粗骨材（軽量骨材）・

電気炉酸化スラグ粗骨材（重量骨材））を使用し、粗骨材の種類の違いが締固め完了エネルギーに与える影響を検討した。なお、電気炉酸化スラグ粗骨材を用いたコンクリート（以下重量コンクリートと記す）、人工軽量粗骨材を用いたコンクリート（以下軽量コンクリートと記す）の配合は、普通コンクリートの基本配合において碎石が占める容積を電気炉酸化スラグ粗骨材、あるいは人工軽量粗骨材で置き換えることとし、モルタル量は一定とした。

各コンクリートのスランプは、普通コンクリートが8.5cm、軽量コンクリートが11cm、重量コンクリートが8cmであった。一般に、モルタル量一定の配合では、粗骨材の密度が大きい、すなわちコンクリートの密度が大きいほどスランプは大きくなると考えられるが、本試験においては軽量コンクリートのスランプが他に比べて大きくなった。これは表—1に示した各骨材の実積率からも推測されるように、人工軽量粗骨材が丸みを帯びており、変形に対する抵抗が小さかったためと考えられる。図—3に各コンクリートの変形率と締固め完了エネルギーの関係を示す。碎石コンクリート、軽量コンクリート、重量コンクリートの締固め完了エネルギーはそれぞれ2.08J/L、1.31J/L、1.24J/Lである。重量コンクリートの締固め完了エネルギーは普通コンクリートより小さい。両者の違いの理由として粗骨材の密度の違いが考えられる。すなわち、電気炉酸化スラグ粗骨材は碎石に比べて実積率が小さく、骨材の形状としては角張っているが、発生する慣性力が大きく、振動を与えた状態では密度が大きいことにより効率的に締固めが成されたことになる。

ところで、軽量コンクリートの変形は、他の二種類のコンクリートと比較して初期段階で大きい。これより人工軽量粗骨材は実積率が大きく、粒子の角張りが顕著ではないため、変形中の骨材の摩擦によるエネルギーロスが少なくなり、小さなエネルギーで変形が進行するものと考え



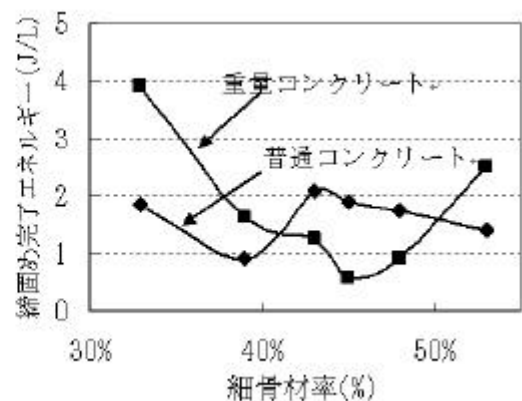
図—3 変形率と締固め完了エネルギーの関係
(粗骨材の種類の影響)

られる。ただし、締固め完了エネルギー($E_{99,5}$)に着目すると、重量コンクリートとほぼ同じ値となり、十分な締固めを達成するにはコンクリートの密度が影響することが分かる。

5.2 細骨材率が締固め完了エネルギーに及ぼす影響

コンクリートの締固めには粗骨材同士の噛み合わせによる変形抵抗性が大きく影響する。そこで、細骨材率の変化、ならびに粗骨材の種類が締固め性に及ぼす影響について、締固めエネルギーの観点から検討した。なお粗骨材には碎石および電気炉酸化スラグ粗骨材を用いた。普通コンクリートの基本配合において碎石が占める容積を電気炉酸化スラグ粗骨材で置き換えた配合を重量コンクリートの基本配合とした。試験では $W = 173\text{kg/m}^3$, $W/C = 50\%$ 一定とし、普通コンクリート、重量コンクリートの基本配合における $s/a = 43\%$ を中心として s/a を33, 39, 43, 45, 48, 53%の6水準に変化させた。

図—4に締固めエネルギーと細骨材率の関係を示す。図より、普通コンクリート、重量コンクリートとも締固めエネルギーが最小となる細骨材率、すなわち締固めに関する最適細骨材率が存在することが分かる。なお、最適細骨材率は、普通コンクリートの場合39%、重量コンクリートの場合45%であった。これは、電気炉酸化スラグ粗骨材の実積率が56.2%で、碎石の実積率60.9%より若干小さいこと、電気炉酸化スラグ



図—4 締固めエネルギーと細骨材率の関係

粗骨材の表面には凹凸が存在し、粗骨材粒子間の見かけのペースト量が減少したことにより、電気炉酸化スラグ粗骨材を用いた場合には細骨材率を大きくする必要があることを示していると考えられる。表—3は各コンクリートのスランプの測定結果であり、それぞれの最適細骨材率はスランプが最も大きい場合に概ね対応している。

以上のことから、粗骨材種類ならびにコンクリートの単位容積質量が締固め性に大きく影響することが明らかとなった。

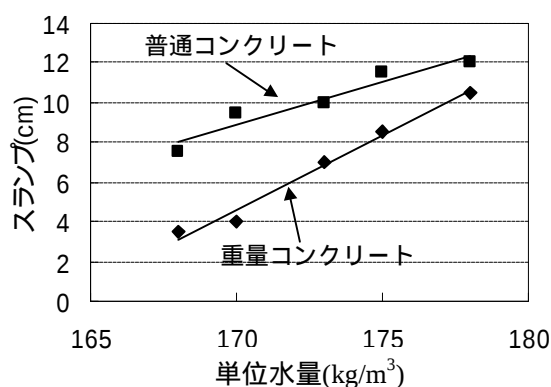
表—3 スランプ測定値

s/a	碎石コンクリート	酸化スラグコンクリート
33%	12.0cm	15.0cm
39%	11.5cm	6.5cm
43%	9.0cm	8.0cm
45%	8.5cm	11.5cm
48%	6.0cm	8.5cm
53%	5.5cm	7.5cm

5.3 単位水量が締固め完了エネルギーに及ぼす影響

粗骨材として碎石および電気炉酸化スラグ粗骨材を用い、 $s/a = 43\%$ 一定、 $W/C = 50\%$ 一定の条件のもと、単位水量の変化によるコンクリートの締固め性の違いについて検討した。

重量コンクリートの基本配合は、普通コンクリートの基本配合において碎石が占める容積を電気炉酸化スラグ粗骨材で置き換えたものであ

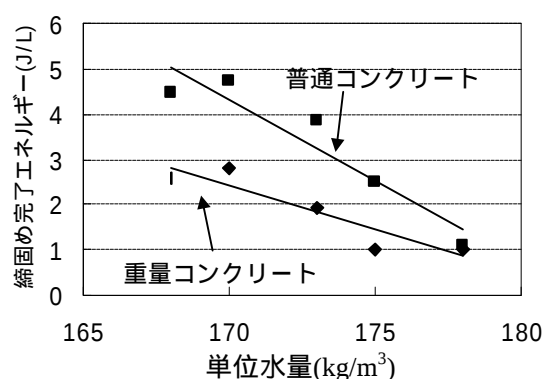


図—5 スランプと単位水量の関係

る。普通コンクリートおよび重量コンクリートの基本配合 ($W = 173\text{kg/m}^3$) をもとに、単位水量を変化させて締固め性状を把握した。試験では、単位水量を 168, 170, 173, 175, 178 の 5 水準に変化させた。

図—5 にスランプと単位水量の関係を示す。同一単位水量において、普通コンクリートのスランプは重量コンクリートのスランプよりも大きい。図 - 6 に締固め完了エネルギーと単位水量の関係を示す。単位水量の増加にともない締固め完了エネルギーは減少する。これは単位水量の増加によってコンクリート中のペースト量が増加し、反対に、骨材の量が減少して骨材粒子間の噛合せの影響が小さくなったためである。また、普通コンクリートの勾配が $0.36(\text{J/L})/\text{kg}$ で重量コンクリートの勾配 $0.20(\text{J/L})/\text{kg}$ に比べて小さいことが分かる。すなわち、普通コンクリートの粗骨材粒子間の噛合せの影響は、重量コンクリートに比べて単位水量の大小により大きく変化することを意味している。

ところで、図—5 に示したようにスランプは普通コンクリートの方が重量コンクリートより大きいにもかかわらず、締固め完了エネルギーも普通コンクリートの方が重量コンクリートより大きくなっている。これは、「5.2 の細骨材率が締固め完了エネルギーに及ぼす影響」で述べた、粗骨材の種類により最適細骨材率に違いがあることに対応している。すなわち、 $s/a = 43\%$ においては、重量コンクリートが普通コンクリート



図—6 締固め完了エネルギーと単位水量の関係

よりも締固めエネルギーが小さいこと、および電気炉酸化スラグ粗骨材の単位容積質量が碎石より大きいことと関係しているものと考えられる。これらのことから、スランプは骨材の噛合せに大きく影響され、一方、締固め完了エネルギーは単位容積質量に大きく影響され、結果的にはスランプの大小のみによって、締固め完了エネルギーの大小を評価することは適当ではないと言える。

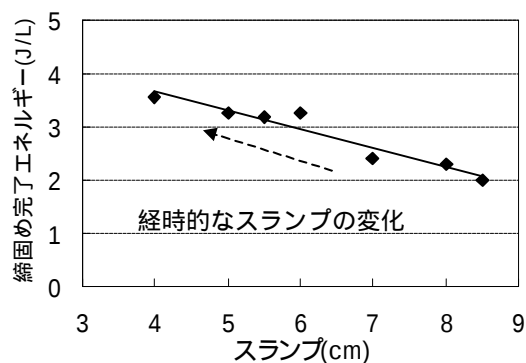
5.4 スランプロスによる締固め完了エネルギーの変化

コンクリートは練り混ぜ直後から水和反応が進行し、時間の経過にともなってスランプの低下を生じる。一方、施工計画においては、通常、事前に設定された標準的スランプをもとに打設計画が作成されている。しかしながら、実際には気温の変化、運搬時間の相違などにより打設時におけるスランプは変化する。

本研究では、スランプロスにともなう締固めエネルギーの変化を明らかにするため、経時的にスランプを測定するとともに振動締固め試験を行い、変形率と振動時間の関係から締固めエネルギー ($E_{99.5}$) を求めた。試験には普通コンクリートを用い、配合は表—2 に示す基本配合

表—4 スランプの変化と締固め特性

スランプ (cm)	8.5	8.0	7.0	6.0	5.5	5.0	4.0
$E_{99.5} (\text{J/L})$	2.0	2.3	2.4	3.3	3.2	3.3	3.5
完了時間 (s)	11.5	3.6	15.2	10.5	10.5	17.2	7.2
加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)	1.47	2.46	0.98	1.55	1.49	1.09	1.99



図—7 経時的なスランブの変化と締固めエネルギーの関係

とした。表—4に、経時的に変化するスランブ、その時の締固めエネルギーおよび締固めに要する時間を示す。また、図—7にスランブと締固めエネルギーの関係を示す。締固め完了エネルギーはスランブの低下にともない、比例的に増大することが分かる。スランブの経時変化を考慮して、締固め完了エネルギーは式(5)で表現できる。

$$E_s = E_0 + K(8 - SL) \quad (5)$$

E_s ：対象とするスランブ(SL)における単位容積あたりの締固め完了エネルギー、 K ：試験定数、 E_0 ：スランブ8cmにおける単位質量あたりの締固め完了エネルギー、 SL ：コンクリートのスランブ(cm)

本試験条件では $E_0 = 2.08 \text{ J/L}$, $K = 0.50$ であった。これらの値については、今後さらにデータを蓄積することで汎用性を高める必要があるが、この締固めエネルギーを用いて、式(3)により、スランブが低下したコンクリートの締固め完了時間を計算することができる。

6. まとめ

本試験は粗骨材の種類、細骨材率の変化、単位水量の変化およびスランブロスを検討要因として取り上げ、締固めエネルギーに及ぼす影響を検討した。

1) 碎石、人工軽量粗骨材および電気炉酸化スラグ粗骨材を用いたコンクリートの締固め性の検

討より、骨材粒子間の噛合せが締固め完了エネルギーに大きく影響することを明らかにした。

2) 普通コンクリート、重量コンクリートとも締固め完了エネルギーに関係する最適細骨材率を有している。最適細骨材率は普通コンクリートの場合39%、重量コンクリートの場合45%であった。これは主に骨材の形状の違いによる噛合せの影響の相違が原因と考えられる。

3) 単位水量の増加によって締固め完了エネルギーは減少する。なお、スランブは骨材の噛合せに大きく影響され、締固め完了エネルギーは単位容積質量に大きく影響されるものと推察される。

4) 基準となるスランブ8cmのコンクリートの締固め完了エネルギー E_0 ならびにスランブのロスを考慮する定数 K をもとに、スランブが低下した場合の締固めに要する時間を計算から求めることができることを明らかにした。

参考文献

- 1) ACI309 report1 R93 : Behavior of fresh concrete during vibration, 1993
- 2) 山口 悟, 橋本親典, 水口裕之, 高島信博: 鉄筋近傍を流れるフレッシュコンクリートの流動解析に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vo1.22, No.2, pp385-390, 2000
- 3) 西川隆之, 橋本親典, 山地功二, 水口裕之: 加振装置を用いたフレッシュコンクリートのコンシステンシー評価試験方法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vo1.22, No.2, pp397-402, 2000
- 4) 国府勝郎, 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, 109-118, 1996.2
- 5) 梁俊, 宇治公隆, 国府勝郎, 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) pp2—39 ~ 2 - 48