

締固めを必要とする高流動コンクリートの充填性に関する検討

俵積田 新也*1・梁 俊*1

Keywords : compaction energy, material separation, fillability, quantitative evaluation, high flow concrete requiring compaction
 締固めエネルギー, 材料分離, 充填性, 定量評価, 締固めを必要とする高流動コンクリート

1. はじめに

近年、コンクリート打設の合理化や省力化に向けて締固めを必要とする高流動コンクリートの活用が推進されている。締固めを必要とする高流動コンクリートは、自己充填性を有する高流動コンクリートよりも安価で、かつ普通コンクリートに比べ軽微な締固めによって充填性が確保できる材料である。しかし軽微な締固めについてはその程度が明確でなく、従来の普通コンクリートに比べて必要な締固め量がどの程度異なるのか定量的に比較した例は少ない。定量的な評価については、直町らにより締固めエネルギーを用いた配合選定フローが提案¹⁾されている(図-1)。本稿では、同フローを用いて締固めを必要とする高流動コンクリートおよび普通コンクリートの配合を選定し、得られたデータから両者の締固め程度を比較することで、締固めを必要とする高流動コンクリートの締固め程度について検討した。

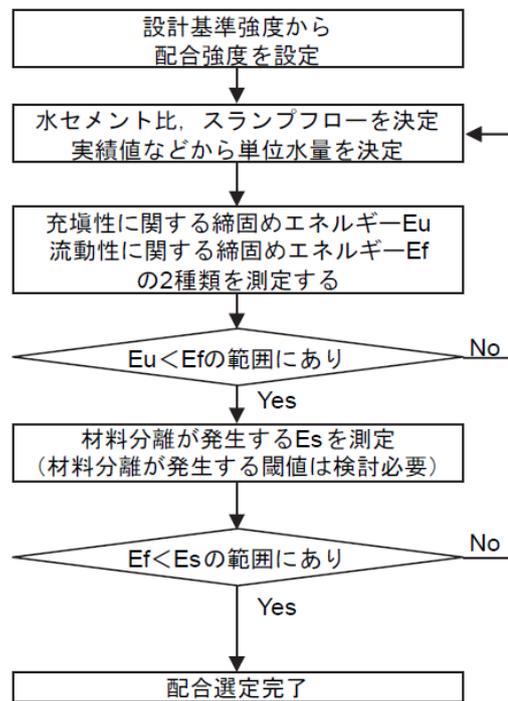


図-1 配合選定フロー¹⁾

Fig.1 Composition selection flow

2. 試験概要

2.1 使用材料および配合選定手法

本稿では、締固めを必要とする高流動コンクリートとして目標スランプフロー $45.0 \pm 5.0\text{cm}$ 、普通コンクリートとして目標スランプ $18.0 \pm 1.5\text{cm}$ 、および $21.0 \pm 1.5\text{cm}$ の普通コンクリートの3配合を作製した。空気量はいずれも $4.5 \pm 1.5\%$ とした。表-1に使用材料を示す。セメントに普通ポルトランドセメント、混和剤にポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤を使用し、AE 剤を用いて空気量を調整した。

表-1 使用材料

Table.1 Materials used

記号	材料名	品質等
C	セメント	普通ポルトランドセメント 密度: $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
S	細骨材	千葉産山砂, 高知産砕砂, 三重産砕砂の混合砂 密度: $2.62\text{g}/\text{cm}^3$ 粗粒率: 2.50
G	粗骨材1	東京都八王子市産, 密度 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ 実積率60.0%
	粗骨材2	山梨県大月市産, 密度 $2.62\text{g}/\text{cm}^3$ 実積率60.0%
	粗骨材3	埼玉県秩父郡産, 密度 $2.70\text{g}/\text{cm}^3$ 実積率60.0%
Ad	混和剤	ポリカルボン酸エーテル系 高性能AE減水剤

充填性を確保した配合を選定するためには、型枠内の隅々までコンクリートが行き渡るための流動性を与

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 先端基盤研究室

えるエネルギー（以降、本稿では E_f と称す）と、鉄筋間隙を材料分離せずに通過する鉄筋間隙通過性を与えるエネルギー（以降、本稿では E_u と称す）が必要となる。加えて過振動により材料分離を生じる締固めエネルギー（以降、本稿では E_s と称す）を測定し大小関係を確認することで、適切な充填性を有した配合の選定が可能となる。

E_f より E_u が大きい場合、鉄筋間隙前後にてブロッキング等による材料分離を生じて充填されることが懸念される。この場合、内部の充填状況を目視で判断することは困難であるため、 E_f より E_u が小さくなる必要がある。また、過振動による材料分離を生じずに充填を完了するためには E_f および E_u は E_s より小さい値でなければならない。これらを考慮して配合を選定した。

2.2 締固めエネルギーの測定方法

締固めエネルギーは、ある振動時間内にコンクリートが受けた振動エネルギーの累積として式(1)²⁾を用いて評価した。

$$E = \frac{\rho \alpha_{max}^2}{4\pi^2 f} t \quad (1)$$

ここで、 E : 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/s^2)、 f : 振動数 (s^{-1})、 ρ : コンクリートの単位容積質量 (kg/L) とする。

それぞれの締固めエネルギーについては、梁ら³⁾の手法を参考にして評価した。式(1)により締固めエネルギーを算出する場合、コンクリートの単位容積質量と振動時間に加え、振動数および最大加速度が必要となる。本稿では、振動数が既知で、振動加速度が計測可能である、図-2 に示すような専用の大型振動台を用いることで締固めエネルギーを算出した。 E_f 、 E_u 、 E_s の試験方法の概要を図-3、4、5 にそれぞれ示す。 E_f は、自己充填性を有する高流動コンクリートの性状を参考に、スランプフローが 600mm となるまでに要するエネルギーとした。図-2 に示す大型振動台の上でスランプ・スランプフロー試験を実施し、フロー停止した段階から振動を開始した。振動を受けた試料がスランプフロー600mm となるまでの振動時間および振動加速度を用いて、式(1)より算出した締固めエネルギーを E_f とした。 E_u についても自己充填性を有する高流動コンクリートの性状を参考に、ボックス・U 形充填性評価試験において充填高さ 350mm となるまでに要するエネルギーとした。 E_f と同様に大型振動台の上で U 形充填性

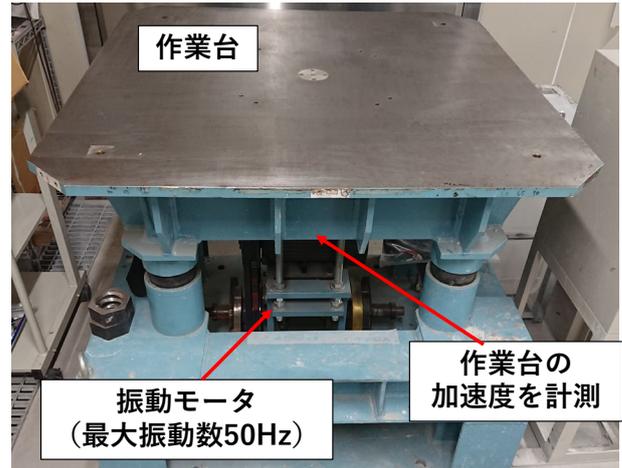


図-2 大型振動台

Fig.2 Large shaking table



図-3 E_f (流動性) 評価試験

Fig.3 E_f evaluation test



図-4 E_u (間隙通過性) 評価試験

Fig.4 E_u evaluation test

試験を実施し、試料が停止した段階から振動を開始した。充填高さ 350mm となるまでの振動時間と振動加速度を用いて式(1)より算出した締固めエネルギーを E_u とした。

材料分離を生じる締固めエネルギーについては、JSCE-F 702-2022 : 加振を行ったコンクリート中の粗骨材量試験方法 (案)⁴⁾を参考に、円筒容器内で振動を加

えた試料上層部の粗骨材残存率を用いて、粗骨材の材料分離程度を測定することで評価した。大型振動台の上に図-5に示すφ300mm、高さ500mmの円筒容器を設置し、容器内に試料を締固めせずに投入する。試料上面を軽く均した後に一定時間振動を加え、振動後に上層から2Lの試料を採取し、JIS A 1112に準じて洗い分析により単位粗骨材量を求めた。計測した単位粗骨材量を配合における単位粗骨材量で除した比率を粗骨材残存率として算出した。各配合で、振動時間を0秒～120秒に変えて同様の試験を実施し、得られた結果から締固めエネルギーと粗骨材残存率の関係を表す近似式を作成した。コンクリートライブラリー161：締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針⁴⁾では、スランプ12cmの普通コンクリートをコンクリート標準示方書〔施工編〕にて定められる振動時間の上限である15秒間振動を加えた試料に対して実施した沈下量評価試験にて粗骨材残存率は70%程度と示されている。これを参考に、本稿では振動締固めを実施した試料の粗骨材残存率が70%以上となる場合を、材料分離を生じず締固めが実施された状態として検討した。これより、上記試験により得られた近似式から粗骨材残存率が70%となるときの振動時間を推定し、その振動時間を用いて式(1)より算出した締固めエネルギーを E_s とした。

上記の試験により締固めに関するエネルギー E_f 、 E_u 、 E_s を測定した後、図-1に示す配合選定フローに準じてそれぞれの締固めエネルギーを比較し、配合を評価した。

3. 試験結果

3.1 配合選定結果

図-1のフローにより選定した配合を表-2に示す。普通コンクリートについては、横浜市内にあるレディーミクストコンクリート工場において用いられている配合を参考に、それぞれ目標スランプとなるように混和剤量を調整して作成した。締固めを必要とする高流動コンクリートは、締固め性が良好となるように単位水量や細骨材率、混和剤量を調整して配合を選定した。

表-3にそれぞれの配合の締固めエネルギー E_f 、 E_u 、 E_s の計測結果を示す。 E_s は図-6に示す粗骨材残存率と締固めエネルギーの関係から推定した。同図には締固めエネルギーと粗骨材量比率の関係から作成した近似直線を示している。近似直線は切片である締固めエネルギー0J/L（振動時間0秒）における粗骨材残存率を



図-5 E_s (分離抵抗性) 評価試験

Fig.5 E_s evaluation test

表-2 選定配合

Table.2 Selected compound

配合	スランプ / フロー (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				Ad (C×%)
					W	C	S	G	
SL18	18±1.5	4.5	51.1	48.8	170	333	870	924	1.00
SL21	21±1.5	4.5	51.1	48.8	170	333	870	924	1.05
SLF45	45±5.0	4.5	50.0	55.0	170	340	977	810	1.20

表-3 締固めエネルギーの測定結果

Table.3 Measurement result of compaction energy

締固めエネルギー (J/L)	E_f	E_u	E_s
	流動性	間隙通過性	材料分離抵抗
SL18	6.38	3.22	39.41
SL21	4.82	2.61	26.96
SLF45	3.35	2.37	13.24

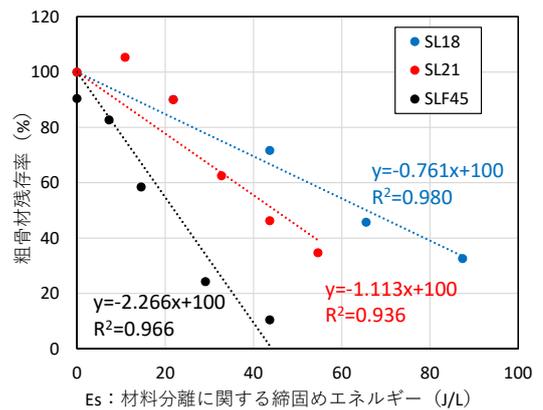


図-6 締固めエネルギーと粗骨材残存率の関係

Fig.6 Relationship between compaction energy and residual coarse aggregate

100%として作成した。いずれも決定係数 R^2 は0.9以上であり、締固めエネルギーと粗骨材残存率は線形関係であることが考えられる。図-6の近似直線より粗骨材残存率が70%となる締固めエネルギーを推定し、表-3に示すように各配合の E_s を設定した。それぞれの E_s を

比較すると、SL18, SL21, SLF45 の順に大きな値を示す結果であり、流動性および間隙通過性が高い配合程材料分離抵抗性が低い結果であった。この要因として、SL21 および SLF45 では目標の流動性を得るために高性能 AE 減水剤の添加量を増加させている影響で、材料分離抵抗性が低下したと考えられる。

図-7 にそれぞれの配合の締固めに関するエネルギー E_f , E_u , E_s を整理した結果を示す。横軸に E_f , 縦軸に E_u を示している。また、各配合において $E_f = E_s$ となる位置を x 軸と直交する直線で示している。同図にて、 $y = x$ の直線より下に試験結果が来た場合、 $E_f > E_u$ の条件を満たしていることを示しており、鉄筋間隙を通過して充填される流動性、および間隙通過性を有していることを表している。すべての配合において、配合選定により $E_f > E_u$ となる配合を作成できた。また、それぞれの E_f を比較すると、SLF45, SL21, SL18 の順に大きな値を示す結果となり、スランプ・スランプフローが大きいほど、充填に必要な締固めエネルギーは小さくなるのが定量的に示された。

次に E_f および E_s の大小関係を図-7 および表-3 より確認すると、全ての配合において $E_s > E_f$ となることが分かる。これより、充填が完了するまでの振動締固めにより材料分離が生じることは無く、適切な材料分離抵抗性を有していると考えられる。図-1 のフローを満たすには、図-7 において、 $y = x$ の直線より下でかつ、 E_s を表す直線より左側に測定結果が来る必要がある。本稿で選定した各配合の様に、締固めに関するエネルギーを測定し図-7 の上述の範囲に E_f - E_u の測定結果が来ることで、適切な配合であると判断することができる。

3.2 締固め程度の検討

E_f および E_s を用いることで適切な締固めエネルギーの範囲を決定することができ、SL18 では 6.38 ~ 39.41J/L, SL21 では 4.82 ~ 26.96J/L, SLF45 では 3.35 ~ 13.24J/L であった。この結果から、締固めを必要とする高流動コンクリートは、普通コンクリートに比べて材料分離を生じる締固めエネルギーが小さく、充填完了から材料分離を生じるまでの振動時間の範囲が、普通コンクリートに比べて小さいことが分かる。締固めを必要とする高流動コンクリートの締固め時間設定においては、過振動による材料分離に注意する必要があり、定量的な評価手法による評価が有効だと考えられる。

4. まとめ

本稿では、締固めエネルギーを用いて流動性、間隙

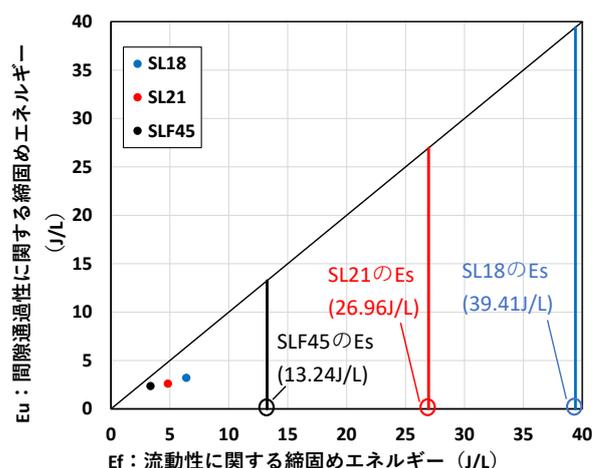


図-7 締固めエネルギー測定結果

Fig.7 Measurement result of compaction energy

通過性、材料分離抵抗性を定量的に測定することで、適切な充填性を有した目標スランプの異なる配合を作製し、それぞれの締固め程度を比較した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 締固めエネルギーを用いることで、適切な締固め程度の範囲を定量的に示すことができた。
- 2) 目標スランプ・スランプフローが大きく、高性能 AE 減水剤の添加量が多い配合ほど、充填に必要な締固めエネルギーと材料分離を生じる締固めエネルギーは小さい値となった。
- 3) 適切な締固めエネルギーの範囲を比較すると、目標スランプが大きい配合ほど、適切な締固めエネルギーの範囲は狭くなる傾向であった。締固めを必要とする高流動コンクリートの締固め程度の設定には、締固めエネルギーを用いた定量的な評価が有効だと考えられる。

参考文献

- 1) 直町聡子, 梁俊, 坂本淳, 丸屋剛: 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合選定に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.826-831, 2022.
- 2) 國府勝郎, 上野敦: 締固め仕事量の評価に基づく超固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
- 3) 梁俊, 坂本淳, 丸屋剛, 太田貴士: 締固めを必要とする高流動コンクリートの締固め性に関する基礎研究, 大成建設技術センター報, 第53号, 06-1, 2020.
- 4) 土木学会: 「コンクリートライブラリー161, 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針(案)」, 土木学会基準, pp.7, および資料編, pp.28, 2022.