

流動性の異なるコンクリートの充填性評価に関する検討

俵積田 新也^{*1}・梁 俊^{*1}・直町 聡子^{*1}

Keywords : compaction energy, flowability, quantitative evaluation, high flowable concrete requiring compaction
締固めエネルギー, 流動性, 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、建設業界においては少子高齢化による人手不足が課題であり、この課題に対応するためには施工の合理化や省力化が必要である。コンクリート施工においては、自己充填性を有する高流動コンクリートや締固めを必要とする高流動コンクリートなど、流動性の高いコンクリートを活用することが有効だと考えられる。コンクリートの流動性を活用することで、軽微な締固めによって充填性を確保できるほか、未充填箇所の防止等も期待される。また、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に比べて材料コスト面で優れており、活用の促進が期待される。しかし、これらの流動性を有したコンクリートを活用する上では、施工性の評価方法が明確でないことが課題である。

本稿では、普通コンクリートから締固めを必要とする高流動コンクリート対象として、締固めエネルギーを用いて、流動性の異なるコンクリートの施工性の評

価を試みた。また、締固めエネルギーの測定には専用の試験機¹⁾が必要であり、プラント等で同評価手法を活用する上での課題となる。同評価手法をより簡易に行うことを目的に、汎用的な装置での締固めエネルギー推定方法について検討した。

2. 試験概要

2.1 使用材料および配合

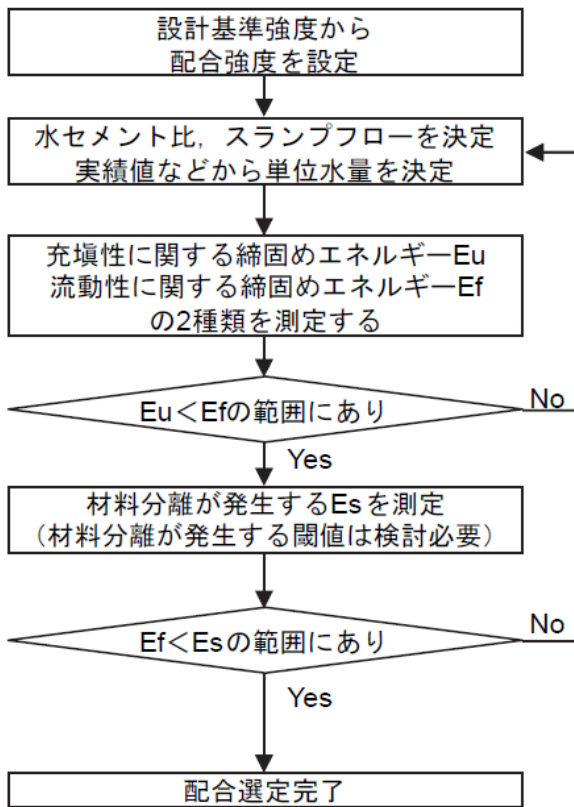
本稿では、流動性の異なるコンクリートとして、スランプ 10cm からスランプフロー42cm までの 7 配合のコンクリートに対して締固めエネルギーの測定を行った。なお、いずれの配合も目標空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲内であることを確認して実施した。単位水量や細骨材率、混和剤種類や添加量を適宜調整して配合選定を実施した。表-1 に使用材料を示す。セメントに普通ポルトランドセメント、混和剤に AE 減水剤および高性能 AE 減水剤を使用し、空気量は AE 剤により調整した。

表-1 使用材料

Table 1 Properties of materials

材料名	記号	種類	品質等
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 : $3270\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S	千葉県産山砂と東京都産砕砂の混合砂	表乾密度 : 2.62g/cm^3 粗粒率 : 2.62
粗骨材	G	東京都産砂岩碎石	表乾密度 : 2.65g/cm^3 粗粒率 : 6.94 実績率 : 60.0%
混和剤	Ad1	AE剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
	Ad2	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	Ad3	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室

図-1 配合選定フロー¹⁾Fig.1 Flow of mixture selection¹⁾

2.2 締固めエネルギーを用いた施工性の評価方法

本文流動性を考慮した施工性の評価には、直町ら¹⁾の提案する、締固めを必要とする高流動コンクリートの配合選定手法を用いた。同手法は、流動性に関する締固めエネルギー（以降、本稿では E_f と称す）、充填性に関する締固めエネルギー（以降、本稿では E_u と称す）、材料分離が発生する締固めエネルギー（以降、本稿では E_s と称す）の3種類の締固めエネルギーを測定し、図-1に示すフローにより施工性の良好な配合を選定する手法である。本手法により得られる締固めエネルギーは、図-2の様に整理され、 $E_u < E_f$ により流動時の確実な充填を、 E_f 、 $E_u < E_s$ により振動締固め時の材料分離抵抗性を確保していると評価できる。図中の赤枠内に分布する配合は本フローで選定された施工性の良好な配合であると判断できる。本稿では、流動性（スランプ）の異なる配合に対して、図-2の整理方法を適用し、一貫した評価を試みた。

2.3 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として式(1)²⁾を用いて評価

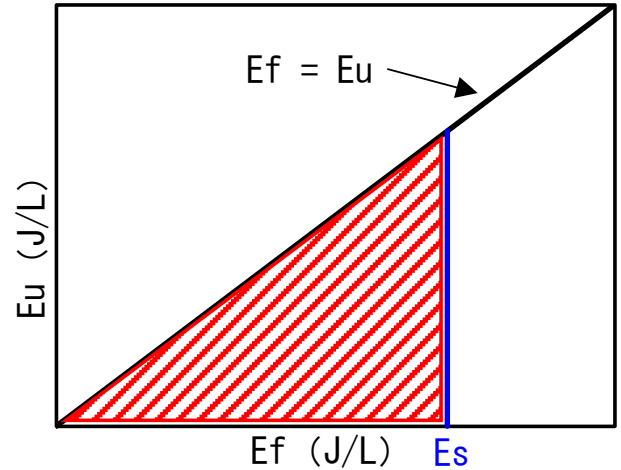


図-2 締固めエネルギーによる性状評価手法

Fig.2 Overview of property evaluation method using compaction energy

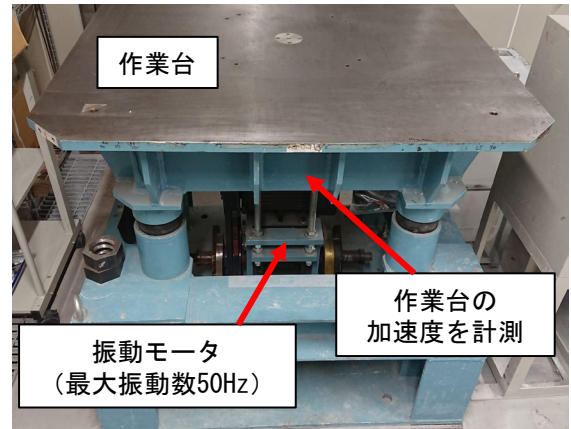


図-3 大型振動台

Fig.3 Large vibration device

される。

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

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。

締固めエネルギーの算出にはコンクリートが振動締固めにより受ける最大加速度と振動数、振動時間が必要となる。本稿では、最大加速度や振動数を任意に設定し測定できる図-3に示す専用の大型振動台（以降、本稿では大型振動台と称す）を用いて測定した。

締固めエネルギーの測定方法については直町らの手法を参考に、それぞれ下記の要領で測定した。 E_f は、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状態から振動を加え、試料がフロー60cmとなるまでに要したエネルギーとした。 E_u については、大型振動台上に設置した U 形充填試験器において、仕切りゲート解放後、自重による流動が停止した状態から棒状バイブレータを挿入して加振し、充填高さ 300mm となるまでに要したエネルギーとした。 E_s については、大型振動台上に設置された円筒容器に試料を投入後に加振を行い、振動後上層の粗骨材量比率を測定し、粗骨材量比率が 70%³⁾となるエネルギーとした。円筒容器はφ250mm、高さ 350mm のプラスチック製の容器を用い、振動時間を、0 秒を含む 3 ケースに振り、得られる振動時間と粗骨材量比率の関係から、粗骨材量比率 70%となる振動時間および締固めエネルギー (E_s) を算定した

2.4 簡易な締固めエネルギーの測定方法

本文締固めエネルギーの測定について、一般に流通している振動装置は、振動波形が一樣でないため、最大加速度と振動数の抽出が困難である。これに対して、大型振動台では単軸ぶら下げ式の振動モータで加振することで振動台の横揺れを最小にし、振動波形を一定にすることでデータ整理を可能にした試験機である⁴⁾。しかし、大型振動台は大がかりで持ち運びが難しく、また、一般に流通している装置ではないため汎用性に劣り、各現場や各機関での測定は困難な状況にある。

本稿では、締固めエネルギーの簡易な測定を可能にすることを目的に、一般に流通している振動装置を用いた測定手法を検討した。上述の通り、一般の振動装置は、最大加速度と振動数を抽出することが困難となる。そこで、本稿では、一般の振動装置において、2.3 の締固めエネルギーの測定方法と同様の状態となる振動時間に着目した。 E_f では、スランプ試験実施後からフロー60cmとなるまでの振動時間、 E_u では、U 形充填試験器において仕切りゲート解放後から充填高さ 300mm となるまでの振動時間、 E_s では、円筒容器に投入された状態から上層の粗骨材量比率が 70%となるまでの振動時間である。一般の振動装置での振動時間と、同じ配合・材料にて大型振動台で測定した締固めエネルギーを用いて、一般の振動装置の測定困難な部分である、式(1)の α_{max}^2/f (以降、本稿では振動係数と称す) を推定した。各装置・試験方法における振動係数を明らかにすることで、一般の振動装置で締固めエネルギーの推定を可能とすることを目的にデータを採取した。



写真-1 加振変形試験機

Photo.1 Vibration deformation testing machine

2.4.1 E_f の一般の振動装置での測定方法

一般の装置での E_f の測定については、NEXCO 試験法 733 (中流動覆工コンクリートの加振変形および充填性試験方法) により規格されている加振変形試験器を使用した (写真-1)。従来の E_f の測定方法と同様に、加振変形試験器の振動台上でスランプ試験を実施後、スランプフロー60cm となるまでの振動時間を測定した。

2.4.2 E_u の一般の振動装置での測定方法

E_u の測定は、JSCE-F 701 (ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験方法案) を参考に、棒状バイブレータ (φ28×450mm) での加振にて実施した。試験器には U 形充填試験器を使用し、規格の要領で試料を投入した後、仕切りゲートを解放後に A 室へバイブレータを挿入して充填高さ 300mm となるまで加振を行った。バイブレータの挿入深さは配合によらず容器上端から 450mm で一定とした。

2.4.3 E_s の一般の振動装置での測定方法

E_s の測定は、JSCE-F 702 (加振を行ったコンクリート中の粗骨材量試験方法案) に従い実施した。規格では振動時間は 10 秒であるが、本稿では粗骨材量比率 70%となる振動時間を推定するため、振動時間を 0 秒～40 秒までの間で適宜変化させデータを採取した。振動時間 0 秒は、容器に試料を投入後、バイブレータを挿入せずに試料を採取した。得られた振動時間と粗骨材量比率の関係を直線で近似し、粗骨材量比率 70%となる振動時間を推定した。

3. 試験結果

3.1 締固めエネルギーの測定結果および流動性の評価

写真-2 に測定に用いた配合のスランプ試験の状態を

表-2 配合選定結果と締固めエネルギー測定結果

Table 2 Mixture selection results and compaction energy measurement results

スランプ [°] /フロー (cm)	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 種類	骨材 ロット	測定結果 (J/L)		
				W	C	S	G			E _f	E _u	E _s
10	55	42	3.8	170	309	756	1056	AE減水剤	A	9.89	16.90	34.28
13	55	46	5.3	175	318	819	972	AE減水剤	A	9.85	10.03	48.78
15	55	46	4.2	173	315	813	977	AE減水剤	B	6.14	6.57	31.47
18	55	43	3.6	175	318	757	1026	AE減水剤	B	5.70	4.51	23.64
20	55	48	4.6	175	318	854	936	高性能	A	6.53	5.97	45.17
20	55	48	3.8	175	318	854	936	高性能	B	7.22	7.59	37.87
42	50	50	5.1	175	350	867	887	高性能	B	3.04	0.68	21.36

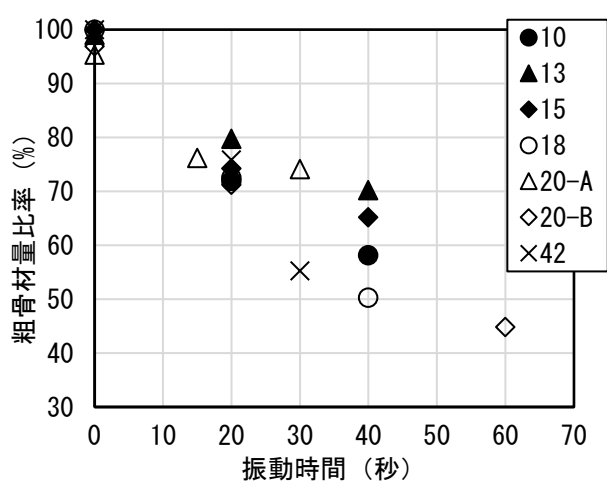


図-4 大型振動台による粗骨材量比率の測定結果

Fig.4 Measurement results of coarse aggregate ratio using a large vibration device

示す。また、表-2 に配合と締固めエネルギーの測定結果を示す。

表-2 に示す E_s は図-4 に示すように、加振時間と粗骨材量比率の測定結果から求めた。本稿ではいずれの配合でも直線で近似し、粗骨材量比率 70%となる振動時間を求めたが、近似方法については、よりデータを蓄積して正確な方法を検討する必要がある。

表-2 より、いずれの配合も E_f および E_u は E_s 以下であり、通常の振動締固め時における材料分離抵抗性は確保されていると考えられる。

図-5 に各配合の締固めエネルギーの E_f と E_u を比較した結果を示す。スランプ 10～15cm の 3 配合については $E_u < E_f$ を満足しない結果であった。スランプ 15cm 以下の配合は、流動させて充填させようとした場合に間隙通過時等に充填の不具合を起こすことが懸念され配合



スランプフレッシュ性状
写真-2 フレッシュ性状
Photo.2 Slump test results

と判断できる。加振による流動の活用を考慮しないコンクリート標準示方書「施工編」の施工標準⁵⁾は、スランプ 16cm 程度以下の普通コンクリートを想定していることを考慮すると、今回の試験結果は従来の定性的な評価基準と近い結果だと考えられる。したがって、スランプ 15cm 以下のコンクリートは型枠内に投入されたコンクリートを横流しせずに充填させることが適切であると判断される。

また、スランプ 20cm でも配合によっては $E_u < E_f$ を満足しない結果であり、流動させた際に充填の不具合を起こすことが懸念される。スランプが 20cm を超える場合においても、締固めを必要とする高流動コンクリートの範疇に入っても流動性を十分活用するためには適切な配合選定が必要であることを示唆している。

以上の試験結果より、締固めエネルギーを活用することで、スランプ 10cm～スランプフロー42cm のコンクリートまでの流動性を一貫して評価できる可能性が示唆された。今後は、異なる材料や強度の配合でのデータや、実際の施工との関係性を確認する必要がある。た締固めエネルギー (J/L), t' : 一般の振動装置で測定された振動時間 (s) である。

3.2 一般の振動装置での測定結果と推定方法の検討

振動係数は一般の振動装置における α_{max}^2/f であるため、大型振動台より得られる締固めエネルギーを用いて式(2)により算出される。

$$k = \frac{4\pi^2 E}{\rho t'}$$

(2)

ここで、 k : 振動係数、 E : 大型振動台により測定された締固めエネルギー (J/L), t' : 一般の振動装置で測定された振動時間 (s) である。

表-3 に、各締固めエネルギーの測定結果および一般の振動装置の振動時間から算定した一般の振動装置での振動係数と、大型振動台内部に取り付けた加速度センサの測定結果より算出した大型振動台の振動係数を示す。また、以降に示す試験結果では、比較を簡単にするためスランプフロー42cm の配合をスランプ 24cm として表記する。スランプ 10cm の配合では、一般の振動装置での試験結果が、振動時間 120 秒を超えても、 E_f ではフロー60cm 未到達、 E_u では充填高さ 300mm 未到達であったため、測定不可と判断した。

図-6 に、大型振動台と一般の振動装置における E_f 測定時の振動係数とスランプの関係を示す。結果より、一般の振動装置の振動係数は配合によらず 2.3 程度で、

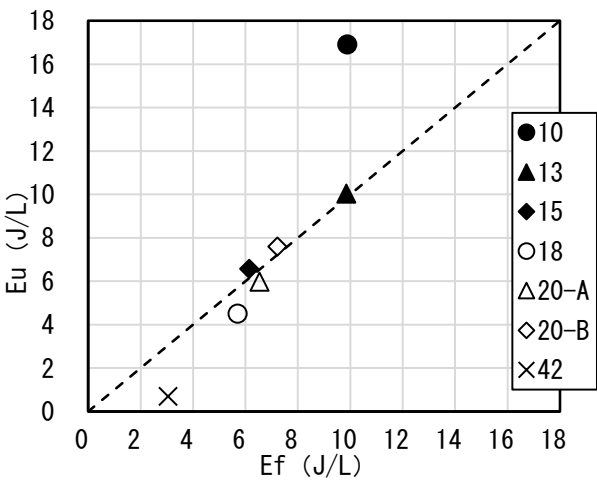


図-5 締固めエネルギー測定結果

Fig.5 Compaction energy measurement results

表-3 振動係数

Table 3 Vibration coefficient

配合	Ef		Eu		Es	
	大型振動台	一般装置	大型振動台	一般装置	大型振動台	一般装置
10	20.9	測定不可	28.1	測定不可	22.1	24.6
13	20.4	2.1	26.1	16.6	22.2	51.2
15	20.6	2.2	23.8	22.8	21.7	25.9
18	20.5	2.5	24.9	8.2	22.5	48.6
20-A	21.4	2.2	25.3	10.9	23.0	50.3
20-B	21.3	2.0	25.2	6.3	22.9	43.3
42	20.6	2.6	27.3	2.7	23.1	59.7

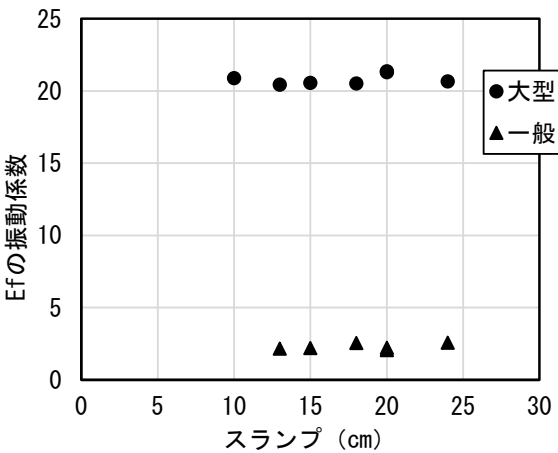


図-6 E_f の振動係数

Fig.6 E_f vibration coefficient

2.0～2.6 の範囲内に収まる結果であり、大型振動台の平均値である 20.8 に比較して小さい結果であった。一般の振動装置は大型振動台と比較して、振動数が多い反面、振動台下部の中央に取り付けられた棒状パイプ

レータにより台を起振させる構造のため、振動台中央から離れるほど振幅が小さくなることにより平均加速度は小さくなる。そのため、一般の振動装置の振動係数（見かけの α_{max}^2/f ）が小さい値となったと考えられる。

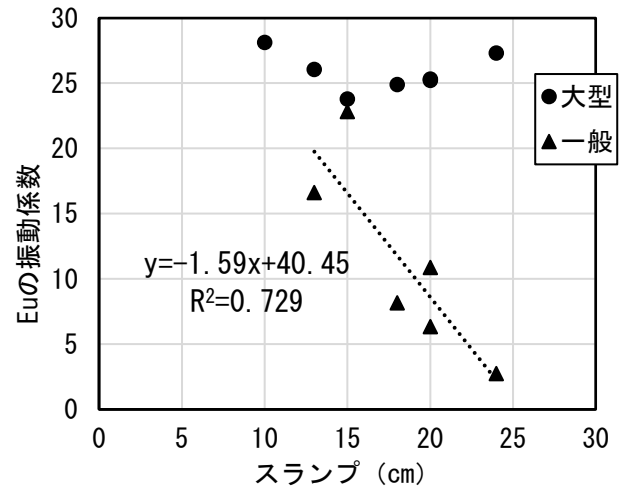
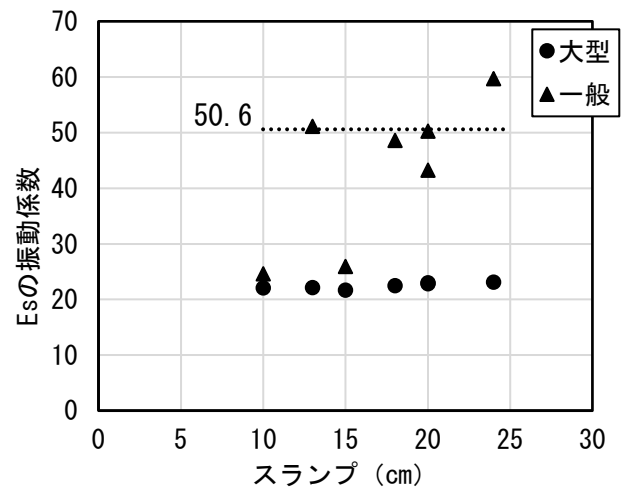
図-7 に、大型振動台と一般の振動装置での E_u 測定時の振動係数とスランプの関係を示す。試験結果より、スランプが大きい程、一般の振動装置の振動係数は小さい値を示す結果であり、最も振動係数の大きい場合で 22.8 と、大型振動台の平均値である 25.8 に対して全ての配合で小さい結果であった。パイプレータの挿入深さを配合によらず容器上端から 450mm で一定としたため、スランプが大きくなることにより、コンクリートへのパイプレータの挿入深さは小さくなる。したがって、コンクリートに与えられる平均加速度はスランプが大きくなることにより小さくなる。大型振動台と比較して、振動数が大きい反面、平均加速度はスランプの増加により小さくなるので、振動係数（見かけの α_{max}^2/f ）はスランプの増加に伴い小さい値となったと考えられる。

図-7 に示すスランプと一般の振動装置の E_u の振動係数の関係を近似式で示すと式(3)のようになる。

$$k_u = -1.59SL + 40.45 \quad (3)$$

ここで、 k_u : E_u 測定時の一般の振動装置の振動係数、 SL : スランプ (cm) である。

図-8 に E_s 測定時の振動係数と、スランプの関係を示す。一般の振動装置の振動係数は、スランプ 10cm、15cm で 25 程度であるのに対して、その他の配合では 50 程度に分布している結果であった。大型振動台の平均値である 22.5 に対して全ての配合で振動係数は大きい結果であった。スランプ 10cm、15cm の 2 点については、ペースト量およびモルタル量が相対的に少ない配合であり、上層に材料分離を生じていない領域が存在することが考えられる。大型振動台では専用の容器を用いて、上層 2 リットルを均質な深さから採取できるが、JSCE-F 702（加振を行ったコンクリート中の粗骨材量試験方法案）では、上層 2 リットルを上面から掬う様に採取するため、試料を採取する深さが多少ばらつく。この試料採取時のばらつきにより、上記 2 配合については粗骨材量比率の測定結果が大きくなり、振動係数が小さくなったことが考えられる。上記配合を除いたデータで平均をとると、一般の振動装置の振動係数は 50.6 となる。

図-7 E_u の振動係数Fig.7 E_u vibration coefficient図-8 E_s の振動係数Fig.8 E_s vibration coefficient

以上の結果より、 E_f の振動係数については2.3程度、 E_s の振動係数については50.6程度、 E_u の振動係数については式(3)を用いることで、汎用的な振動装置の振動係数を推定できる。この振動係数と式(4)を用いることで、簡易的に締固めエネルギーを測定できることが示唆された。

$$E = \frac{\rho k}{4\pi^2} t' \quad (4)$$

E_u と E_f については、試験方法の影響を受けることが示唆されるため、試験方法を修正することで、より正確な推定が可能になると考えられる。

4. まとめ

本稿では、流動性の異なるコンクリートを一貫して評価できる手法の検討と、その手法の一つと考えらえる締固めエネルギーについて、簡易に推定する手法を検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 流動性に関する締固めエネルギー： E_f と、充填性に関する締固めエネルギー E_u を用いた評価により、コンクリートの流動性を評価できることが示唆された。本稿で得られた結果の範囲では、スランプ 15cm 以上で流動性の活用を検討するのが適切であると考えられる。
- (2) 本稿で得られた振動係数を活用することで、一般的な振動装置にて締固めエネルギーを推定できることが示唆された。
- (3) 一般の振動装置の振動係数をスランプによる関係式で示したが、試験方法の影響を受けることが示唆されるため、試験方法を修正することで、より正確な推定が可能となると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、土木学会コンクリート委員会、コンクリートの打込みに関わる品質の定量評価に関する研究小委員会（368 委員会）において貴重なご助言をいただきました。ここに感謝の意を示します。

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.826-831，2022.7
- 2) 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
- 3) 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）資料編，pp.28-29，2023
- 4) 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
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編：施工標準〕9 章コンクリート工，pp.120-121，2023