

# 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

直町 聡子\*1・梁 俊\*1

Keywords : high performance concrete requiring compaction, fillability, liquidity, material segregation resistance

締固めを必要とする高流動コンクリート, 流動性, 充填性, 材料分離抵抗性

## 1. はじめに

近年, 高流動コンクリートが有する自己充填性のみで構造体コンクリートの充填性を確保するのではなく, 打込み時に補助的に振動を加え, 軽微な締固めによりコンクリートを密実に充填するコンクリートの活用が推進され始めている。土木学会「高流動コンクリートの配合設計・施工指針<sup>1)</sup>」では, 自己充填性を有する高流動コンクリートと区別し, このようなコンクリートを「締固めを必要とする高流動コンクリート」と呼称している。締固めを必要とする高流動コンクリートは, 自己充填性を有しておらず, 構造体コンクリートとして密実な充填を確保するためには外力による軽微な振動・締固めを必要とするが, 現状では軽微な締固めの程度が明確になっていないことが施工計画の策定および施工の懸念事項となっている。これに対して, 土木学会の締固めを必要とする高流動コンクリートの施工に関する研究小委員会(256委員会)では, 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合に対する評価方法試験案の検討がなされている。一般のコンクリート構造物に適用することを目的として, 締固めを必要とする高流動コンクリートに対するフレッシュ性状の試験手法構築が行われており, 流動性, 充填性, および材料分離抵抗性の評価方法を検討している。例えば材料分離抵抗性を評価する試験としては, 円筒容器に試料を打込み, 棒状バイブレータで 0~20 秒間加振後に, 粗骨材の沈下量を測定する。これにより, 振動締固めによる材料分離抵抗性(骨材沈下)を定量評価する。また, 土木学会の「高流動コンクリートの配合設計・施工指針<sup>1)</sup>」には, U形またはボックス形充填高さ

から自己充填性を評価する試験方法が記載されている。この試験は U 形およびボックス形容器を使用して, 試料を棒状バイブレータで加振し流動させることで, 充填性と材料分離抵抗性を評価する。このような試験項目で, 締固めを必要とする高流動コンクリートの流動性, 充填性, および材料分離抵抗性を評価する。また, 梁ら<sup>2)</sup>は, 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締固め完了エネルギー, および流動性に関する締固めエネルギーの定量評価方法を提案している。この試験方法では締固めを必要とする高流動コンクリートエネルギーの観点から, 締固め性を検討することが可能である。

そこで本研究では, 締固めを必要とする高流動コンクリートに求められるフレッシュ性状に対して, 流動性, 充填性, 材料分離抵抗性, および締固め性を評価し, 適切な配合選定手法を提案することを目的としている。

## 2. 実験概要

### 2.1 配合条件

表-1 に, 配合表を示す。使用材料として, セメント C は普通ポルトランドセメント(密度 3.16 g/cm<sup>3</sup>), 細骨材 S は千葉県君津産山砂(表乾密度 2.62 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.56%, FM2.44), 粗骨材は青梅産石灰石砕石(最大寸法 20mm, 表乾密度 2.66g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.86%, FM6.39, 実績率 62%)を用いた。混和剤は, ポリカルボン酸エーテル系化合物の高性能 AE 減水剤(以下, SP), とポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物の複合体の増粘剤含有型高性能 AE 減水剤(以

\*1 技術センター 社会基盤技術研究部 先端基盤研究室

表-1 配合

Table 1 Concrete mix

配合 番号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	S	G	SP	VSP
1	50.0	55	170	340	961	807	5.44	-
2	45.9	55	170	370	948	797	5.37	-
3	54.8	55	170	310	975	820	5.58	-
4	50.0	45	170	340	786	951	4.25	-
5	54.8	55	170	310	975	820	-	6.36
6	50.0	63	170	340	1100	664	8.84	-

表-2 目視触感評価試験

Table 2 Visual tactile test

判定値	判定基準
+2	明らかに粘性が高く施工に支障がある
+1	粘性がやや高い、締固めにより施工可能
0	適切な性状なもの
-1	粘性が低い、締固めにより材料分離が生じる
-2	粗骨材の沈降等が顕著、明確な材料の分離

下、VSP) を使用し、一般的に使用されるアルキルエーテル系の AE 剤により空気量を調整した。表-1 に示す配合 1 は、梁ら<sup>2)</sup> が流動性と充填性を考慮した締固め完了エネルギーを評価した際に良好と判断した配合であり、これを基準配合とした。配合 2 は、粘性が大きくなると予想される配合である。配合 3 および配合 4 は、粘性が少なく、材料が分離気味と予想される配合である。配合 5 は、配合 3 に対して混和剤を一液増粘タイプに変更した配合であり、締固め性が良好と予想される配合である。配合 6 は、s/a が極端に高く粘性が大きくなると予想される配合である。

## 2.2 試験項目

### 2.2.1 目視触感評価試験概要

表-2 に、目視触感評価試験の判定基準を示す。これは締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術研究小委員会(358委員会)委員会報告書<sup>3)</sup>内の、目視触感評価の判定基準を参照した。JIS A 1101 に準拠しスランプ試験後の状態を目視により判定する。評価は各配合で練上がり時に、コンクリートに精通する技術者で実施し、その内訳は施工者、コンクリート製造者、化学混和剤製造者である。

### 2.2.2 簡易粗骨材残存率試験概要

簡易粗骨材残存率試験は、円筒容器(内径 30cm、深さ 38cm) に試料を打込み棒状バイブレータにより所定の時間振動後、上層部のコンクリートを 2L 採取し JIS A 1112 に準拠して洗い分析により単位粗骨材量を求め、

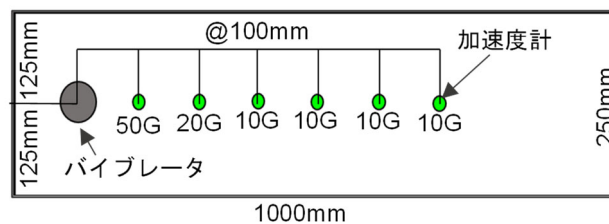


図-1 加速度伝播試験

Fig.1 Acceleration propagation test

配合に対する粗骨材残存率を算出する試験である<sup>3)</sup>。本研究では、φ28mm の棒状バイブレータを使用し、締固め時間は 0, 10, 20 秒とした。本試験により、振動締固めによる材料分離抵抗性を評価する。

### 2.2.3 加振動 U 形/ボックス形充填試験概要

試験装置は、高流動コンクリートの配合設計・施工指針<sup>4)</sup>に示されている U 形およびボックス形容器である。試料を容器の一室に打込み、試料中央にバイブレータを挿入し始動後、障害 R2 を通過し高さ 190mm および 300mm に到達した時間をストップウォッチで測定する。間隙通過速度は、式(1)により算出した。また、障害 R2 を通過した試料を 2L 採取し JIS A 1112 に準拠し洗い分析により単位粗骨材量を求め、配合に対する粗骨材残存率を式(2)より算出した。

$$V_{pass} = \frac{110}{t_{300} - t_{190}} \quad (1)$$

ここに、 $V_{pass}$  : 間隙通過速度(mm/s),  $t_{300}$  : 300mm 到達時間(s),  $t_{190}$  : 190mm 到達時間(s)

$$\delta_B = \frac{G_B}{G_0} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 $\delta_B$  : 粗骨材残存率(%),  $G_B$  : 鉄筋障害通過後の単位粗骨材量(kg/m<sup>3</sup>),  $G_0$  : 表-1 の単位粗骨材量 G(kg/m<sup>3</sup>)

詳細な試験方法は、358 委員会報告書<sup>3)</sup>の IV-35 に記載されている通りに実施した。加振動 U 形/ボックス形充填試験により、充填性と材料分離抵抗性を評価する。

### 2.2.4 加速度伝播試験概要

加速度伝播試験装置を、図-1 に示す。図-1 の様に加速度センサーが配置されている容器にコンクリートを打込み、バイブレータ(直径 50mm、振動数 200~240Hz、出力 400W)により 30 秒間振動した。所定の時間締め固めた際の各測点の累積エネルギーを、式(3)に

より算出した<sup>4)</sup>。また試験体サイズは、1000×250×600mmである。

$$E_{t15} = \frac{\rho \alpha_{max}^2 t}{4\pi^2 f} \quad (3)$$

ここに、 $E_{t15}$  :  $t$  秒間にコンクリートが受ける累積エネルギー(J/L),  $t$  : 振動時間(s),  $\alpha_{max}$  : 最大加速度(m/s<sup>2</sup>),  $f$  : 振動数(/s),  $\rho_0$  : 単位容積質量(kg/L)

この試験により、締固めを必要とする高流動コンクリートの振動の伝播性を評価することで、流動性および充填性を評価する。

### 2.2.5 大型振動台 U 形 350mm 到達試験概要

大型振動台 U 形 350mm 到達試験状況を、図-2 に示す。梁ら<sup>2)</sup>が報告している、流動障害 R2 の U 形充填試験で充填高さ 350mm に達するために要する振動エネルギーを、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締固めエネルギー（以下、 $E_u$ ）と定義する。JSCE-F 511 に準拠した U 形試験機を振動台に固定し、U 形充填試験後、振動台で振動を与えて高さが 350mm に到達する時間を式(4)の  $t$  に代入して  $E_u$  を算出した。

$$E_u \text{ または } E_f = \frac{\rho \alpha_{max}^2 t}{4\pi^2 f} \quad (4)$$

ここに、 $E_u$  または  $E_f$  :  $t$  秒間にコンクリートが受ける締固めエネルギー(J/L),  $\rho$  : 試料の単位容積質量(kg/L),  $\alpha_{max}$  : 最大加速度(m/s<sup>2</sup>),  $t$  : 振動時間(s),  $f$  : 振動数(/s)

### 2.2.6 大型振動台フロー600mm 到達試験概要

大型振動台フロー600mm 到達試験状況を、図-3 に示す。梁ら<sup>2)</sup>が報告している、高流動コンクリートと同等のスランブフロー600mm（ランク 2 のスランブフローの最下限値）に達するために要する振動エネルギーを、締固めを必要とする高流動コンクリートの流動性に関する締固めエネルギー（以下、 $E_f$ ）と定義した。振動台の上でスランブフロー試験を行った試料に加振し、非接触型変位計の測定データからスランブフローが 600mm に到達するまでの時間を読み取り、その時間を式(4)の  $t$  に代入して  $E_f$  を算出した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 目視触感評価試験結果

図-4 に、JIS A 1101 に準拠しスランブ試験後の写真を

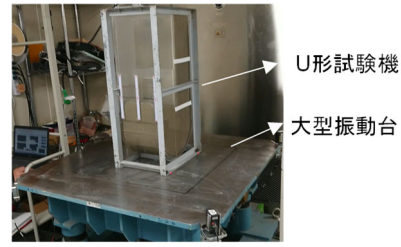


図-2 大型振動台 U 形 350mm 到達試験  
Fig.2 U-shaped 350mm achievement Vibration test

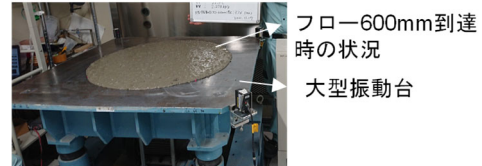


図-3 大型振動台フロー600mm 到達試験状況  
Fig.3 Flow 600mm achievement Vibration test

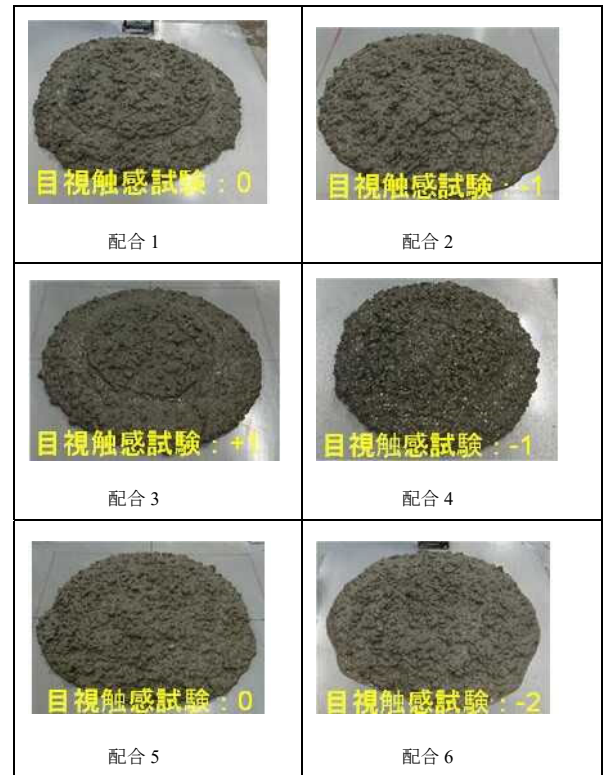


図-4 スランブ試験および目視触感試験結果  
Fig.4 Results of Visual test

示す。5名で目視触感評価試験をし、全員同じ回答であった。配合 1 および配合 5 は、目視触感評価として良好な性状であった。配合 2 は、粘性が高く施工に支障が生じる配合であった。配合 3, 4 は、粘性が少なく材料が分離気味であった。配合 6 はコンクリートの粘性を大きくするため、s/a を極端に高めた配合であるが、スランブフローを目標値内にするために多量の混和剤を使用したことで、粉体と水の分離が発生した。

### 3.2 簡易粗骨材残存率試験結果

図-5 に、簡易粗骨材残存率試験の締固め時間と粗骨

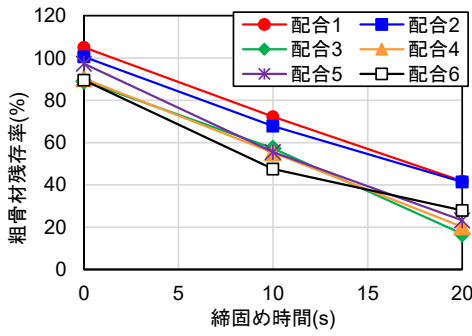


図-5 簡易粗骨材残存率試験結果  
Fig.5 Results of coarse aggregate residual rate

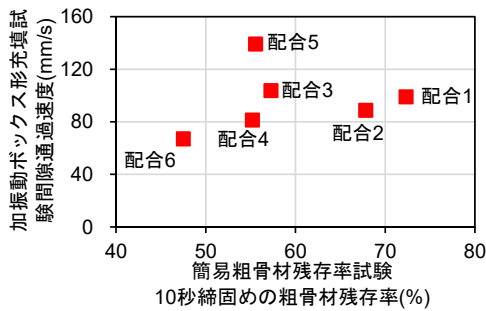


図-6 間隙通過速度と粗骨材残存率  
Fig.6 Gap passage speed and coarse aggregate residual rate

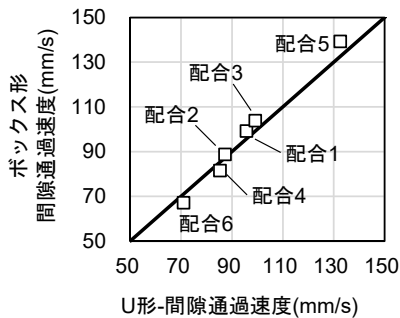


図-7 加振動充填試験の容器形状の違い  
Fig.7 Difference in container shape in vibration filling test

材残存率の測定結果を示す。6つの配合が2組に分類できる結果となった。基準配合1、および目視触感評価で粘性が大きいと評価された配合2は、粗骨材残存率が高い。目視触感評価試験で分離気味と判断された配合3、4、6は、配合1、2に比較して粗骨材残存率が小さくなっている。目視触感評価試験で良好と評価された配合5は、加振前（締固め時間0秒）は配合1、2と大きな差が無いが、加振後の粗骨材残存率が配合3、4、6と同程度となった。配合3と配合5は混和剤以外の材料は同じであり、配合5は混和剤の増粘剤添加による材料分離抵抗性の向上を期待したが、今回の実験結果では加振時間が10秒前後では増粘剤添加型の混和剤による材料分離抵抗性向上効果は確認されていない。また、コンクリートの材料分離抵抗性を練上がり状況の目視

触感試験結果のみで判断することが難しいと考えられる。配合6は、ペーストの粘性と量は基準配合1と同じであり、s/aを大きくして減水剤の量でスランプフローを調整した配合である。コンクリートの材料分離抵抗性は、ペーストの粘性と量だけでなく、細骨材量、粗骨材量、混和剤量のバランスが総合的に影響を及ぼすことが示唆される。簡易粗骨材残存率試験による結果は、配合選定時の予想性状と概ね一致していたため、材料分離抵抗性が異なる配合は分別できると考えられる。なお、簡易粗骨材残存率試験における振動時間は実施工時の締固め時間とは異なる振動時間であると考えられる。これは、バイブレータ種類が異なることで、加速度および振動数が異なるためである。今後は実施工時の締固め時間との関係性を定量的に評価する必要がある。

### 3.3 充填性と間隙通過速度について

図-6に、加振動ボックス形充填試験により算出した間隙通過速度と、簡易粗骨材残存率試験の締固め10秒時の粗骨材残存率の関係について示す。配合1~4は、間隙通過速度が同程度であるが、粗骨材残存率が配合3、4は60%以下で、配合1、2は70%程度と異なる傾向であった。間隙通過速度が同等であっても、加振時間10秒の粗骨材残存率は大きく相違している。粗骨材残存率が、目視触感試験で分離気味であると判断された配合3、4と、概ね同程度であった配合5は、基準配合1より間隙通過速度が大きくなっている。間隙通過速度の大きさが必ずしも材料分離抵抗性に左右されていないと考えられる。また、土木学会358委員会報告書<sup>3)</sup>ではボックス形試験機の190mmと300mm到達時間が短くストップウォッチによる目視および手動による正確な測定が困難であり測定誤差が生じることを課題として挙げている。今回の試験でも、全ての結果が2.4秒以下と非常に短い通過時間であった。この手法を充填性と材料分離抵抗性の評価として採用する場合は、測定誤差が生じないような指標を適用する必要があると考えられる。

### 3.4 加振動U形/ボックス形充填試験結果

図-7に、U形とボックス形容器を用いた加振動充填試験の間隙通過速度を示す。単位粗骨材量が相対的に多い配合4および単位細骨材量が他の配合と比較して多い配合6の間隙通過速度は、U形がボックス形より若干早い。配合1、2、3、5の間隙通過速度はボックス形がU形よりも若干早いものの、容器形状によらず間隙通過速度は同程度であると考えられる。また、図-8に、加振動U形/ボックス形充填試験の鉄筋障害を移



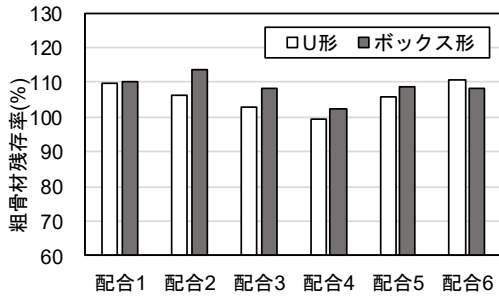


図-8 Results of coarse aggregate residual rate of vibration filling test

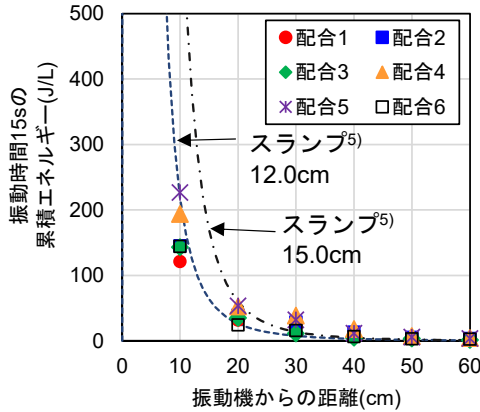


図-9 加速度伝播試験から求めた締固めエネルギー  
Fig.9 Compaction energy of acceleration propagation test

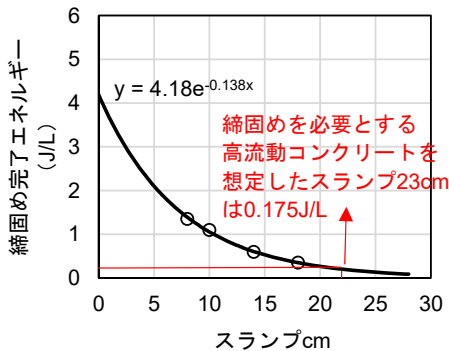


図-10 スランプと締固め完了エネルギーの関係<sup>6),7)</sup>  
Fig.10 Relationship between slump and compaction energy

動したコンクリートの粗骨材残存率を示す。配合 1~5 は、U 形がボックス形よりも粗骨材残存率が小さく、間隙通過後の粗骨材の分離程度が U 形の方がボックス形よりも厳しい結果であると考えられる。また、全ての配合で粗骨材残存率が 100%以上となった。これは、加振により粗骨材が沈降する仮定とは一致しない。その詳細な原因については今後の検討課題である。

### 3.5 加速度伝播試験結果

図-9 に、加速度伝播試験結果を用いて振動時間 15 秒の累積エネルギーを式(3)から算出した結果を示す。梁<sup>9)</sup>が報告している、スランプ 12cm および 15cm の試験結果も併せて示した。スランプ 12cm および 15cm の

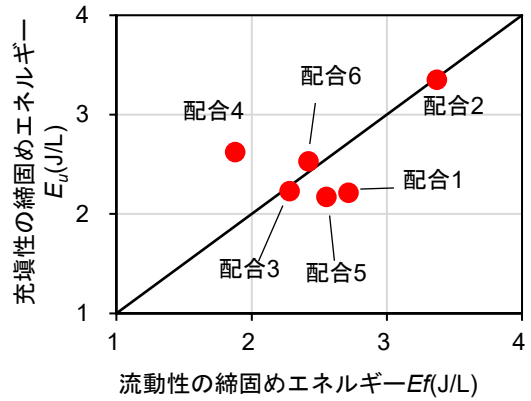


図-11 充填性および流動性に関する締固めエネルギー測定結果  
Fig.11 Energy related to filling and liquidity

普通コンクリートと比較して、締固めを必要とする高流動コンクリートがエネルギーの伝播が若干し易いことがわかる。そこで、締固めを必要とする高流動コンクリートの締固めが完了するエネルギーについて、既往の文献で報告されている普通コンクリートの締固め完了エネルギーから推定を行った<sup>6),7)</sup>。この締固め完了エネルギーは、配合密度から締固めが完了したと考えられる高さを求め、その高さになるまで加振した際のエネルギーである。図-10 に、既往の文献<sup>6),7)</sup>で報告されているスランプと締固め完了エネルギーの関係を示す。図-10 より、締固めを必要とする高流動コンクリートのスランプを 23cm と仮定すると、締固め完了エネルギーは 0.175J/L と推定される。本研究で実施した配合 1~6 のコンクリートで 15 秒間締固めた際に、締固めが完了するエネルギーが伝播する距離を図-9 から推定すると、156~351cm であった。普通コンクリートよりも振動が伝播すると思われるが、詳細については更なる検討が必要である。このように、締固めエネルギーの伝播性は加速度伝播試験で測定可能であるが、締固め完了エネルギーの測定は別途検討が必要であると考えられる。

### 3.6 充填性および流動性に関する締固めエネルギーの測定結果

図-11 に、充填性に関する締固めエネルギー $E_u$ と流動性に関する締固めエネルギー $E_f$ の結果を示す。締固めを必要とする高流動コンクリートの締固めの目的は、空隙排除と鉄筋間隙の通過のほかに、流動性の向上がある。コンクリートが鉄筋間隙に閉塞または未充填部を生じることなく確実に流動するために、所定の流動性を確保すれば必要な充填性も確保できると考えられる<sup>8)</sup>。つまり、流動性に関する締固めエネルギー $E_f$ が充填性に関する締固めエネルギー $E_u$ よりも大きければ良

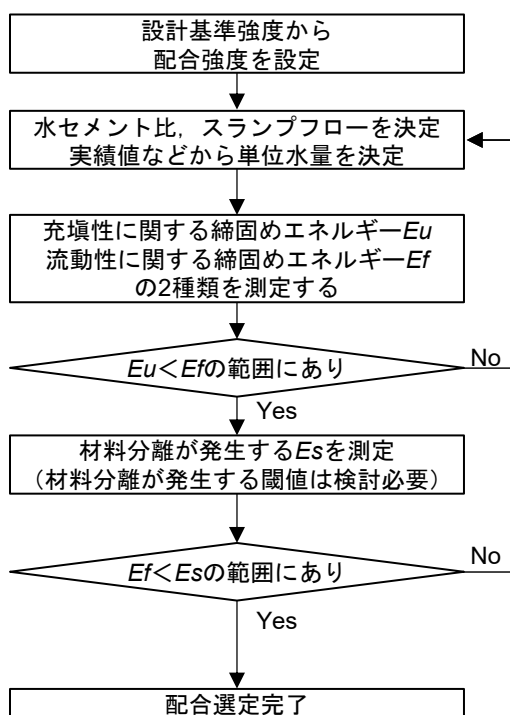


図-12 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合選定フロー案

Fig.12 Flow of selecting the optimum formulation

好な配合であると判断できる。図-11より、配合1および配合5に着目すると、目視触感試験による判断で材料分離抵抗性が良いと判断された結果と同様に、 $E_f > E_u$ であった。配合2, 3, 4, 6は、 $E_f$ と $E_u$ が同程度もしくは $E_u > E_f$ となっている。施工中、コンクリートの流動は目視により確認できるが、コンクリートの間隙通過状況を目視により確認することは困難である。施工の便益を図る場合、配合2, 3, 4, 6は適切な配合であるとは言い切れない。

### 3.7 充填性、流動性、材料分離抵抗性が良好な配合選定手法案

図-12に、配合選定手法フロー案を示す。実施工で使用する配合に対して、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 $E_u$ を測定し、 $E_u < E_f$ であれば材料分離抵抗性の評価へ進む。材料分離が発生する締固めエネルギー（以下、 $E_s$ ）を測定し、 $E_f < E_s$ であることを確認する。なお、材料分離の判定方法は、今後の課題である。充填性、流動性、および材料分離抵抗性の3つの指標を評価することで、締固めを必要とする高流動コンクリートの配合選定を実施する。

## 4. まとめ

- (1) 締固めを必要とする高流動コンクリートの充填性、流動性、および材料分離抵抗性を評価する試験方法を検討した。
- (2) 簡易粗骨材残存率試験により、材料分離抵抗性の異なる配合の分別ができることがわかった。なお、簡易粗骨材残存率試験の振動時間は実施工時の締固め時間とは全く異なる数値であるため、実施工時の締固め時間との関係性を定量的に評価する必要がある。
- (3) 締固め完了範囲の判定には、締固めの伝播だけではなく、締固め完了エネルギーと組み合わせて評価する必要がある。
- (4) 充填性、流動性、および材料分離抵抗性の3つの指標を評価することで締固めを必要とする高流動コンクリートの配合選定が可能であることが示唆された。

## 参考文献

- 1) 土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針、コンクリートライブラリー136、資料-85、2012
- 2) 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
- 3) 土木学会：締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技术研究小委員会（358委員会）委員会報告書、コンクリート技術シリーズ123、2020
- 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) 梁俊、丸屋剛、坂本淳、井櫻潤示：鉄筋間隙を通過するコンクリートにおける締固めエネルギーに基づいた締固め性に関する研究、土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）、Vol.75、No.2、pp.142-156、2019.
- 6) 梁俊、丸屋剛、坂本淳、宇治公隆：締固め完了エネルギーによる同一スランプコンクリートの施工性評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、pp.1393-1398、2009
- 7) 日本コンクリート工学協会：施工の確実性を判定するためのコンクリートの試験方法とその適用性に関する研究報告書、pp.120-121、2009.7
- 8) 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配合選定に関する基礎的な研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.42、No.1、pp.905-910、2020