

論文 締固めエネルギーに基づいた覆工コンクリートの自動施工に適した配合の検討

俵積田 新也*1・梁 俊*2・直町 聡子*3・古賀 快尚*4

要旨：山岳トンネル工事における覆工コンクリート施工では、狭隘な作業空間内でのコンクリート施工となり、作業従事者への負担が大きい。この課題に対して、型枠バイブレータのみでコンクリートを締固めることで省力化・省人化が期待される。本稿では、型枠バイブレータのみの振動締固めにより密実な充填を可能とすることを目的に、締固めエネルギーを用いたコンクリートの配合選定手法の提案、および配合選定時のデータから適切な締固め程度を決定した。その結果、締固めエネルギーの観点から配合を選定することで、型枠バイブレータのみの覆工コンクリート施工の可能性が示唆された。

キーワード：覆工コンクリート、締固め、型枠バイブレータ、締固めエネルギー、自動化施工

1. はじめに

山岳トンネル工事における覆工コンクリート施工では、狭隘な作業空間内でコンクリートの打込みや締固め作業を実施する場合が多く、特に配管の切替作業やインナーバイブレータを用いた締固め作業は作業従事者への負担が大きい。また、近年では熟練技術者の離職や若手技術者の減少という課題もあり、施工の省人化や省力化に向けた技術開発が必要である。

この課題に対して、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を活用し、締固め作業を省力化することが有効だと考えられる。従来では普通コンクリートに対してインナーバイブレータを用いて人力で行っていた振動締固めを型枠バイブレータのみで締固め可能とすることで、大幅な作業人員の削減となる。しかし高流動コンクリートの適用は材料コストの増加や品質管理に技術を要する等の課題があるほか、締固めを必要とする高流動コンクリートや普通コンクリートでは型枠バイブレータによる振動締固めで密実な充填を確保するために、設置間隔や振動時間を適切に決定する必要がある。型枠バイブレータのみで適切に締固めを実施するためには、使用するコンクリートの締固め性について定量的な評価が必要となる。

そこで、本稿では、覆工コンクリート施工において型枠バイブレータのみで密実な充填を確保することを目的に、締固めエネルギーを用いた配合の選定を実施した。また、配合選定時に得られる締固めエネルギーのデータを用いることで、適切な締固め条件の設定が可能だと考えられる。配合選定時に得られた締固めエネルギーのデータから振動締固めの条件を決定する手法について検討

した。

2. 実験概要

2.1 締固めエネルギーを用いた配合の評価手法

コンクリートを型枠内に充填させるための適切な振動時間は、型枠内に試料を密実に充填させ、かつ過振動による材料分離を生じない程度の振動時間と考えられる。そこで本稿では、振動時間の下限値となる充填性を確保するための締固めエネルギー、および振動時間の上限値となる材料分離を生じる締固めエネルギーをそれぞれ計測することで配合を評価した。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)¹⁾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)、 $\alpha_{\max}$: 最大加速度 (m/s²)、 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。

充填性を確保するためには、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充填性（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。さらに、 E_f より E_u が大きい場合、未充填部を残し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、本稿では E_f より E_u が小さ

*1 大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部 先端基盤研究室 研究員 修士（正会員）

*2 大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部 先端基盤研究室 主任研究員 博士（工学）（正会員）

*3 大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部 先端基盤研究室 研究員 博士（工学）（正会員）

*4 大成建設（株）技術センター生産技術開発部 地下空間技術開発室 研究員 修士

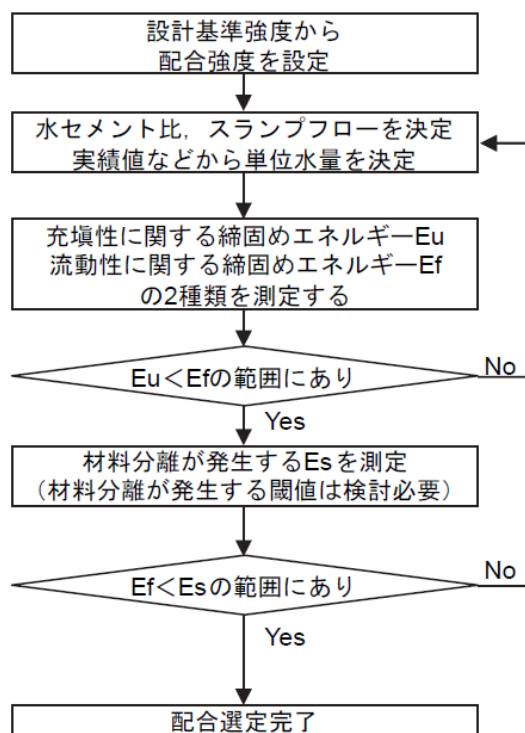


図-1 配合選定フロー²⁾

くなるように配合を選定することとした。さらに、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）より小さい値でなければならない。これらを考慮した配合選定のフローを図-1²⁾ に示す。本稿では図-1 に示す配合選定フローの条件を満たすように配合を作成した。

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 および E_u の試験方法の概要を図-3、4 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 60cm 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 60cm 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 形充填性試験を実施し、試料が停止した段階から

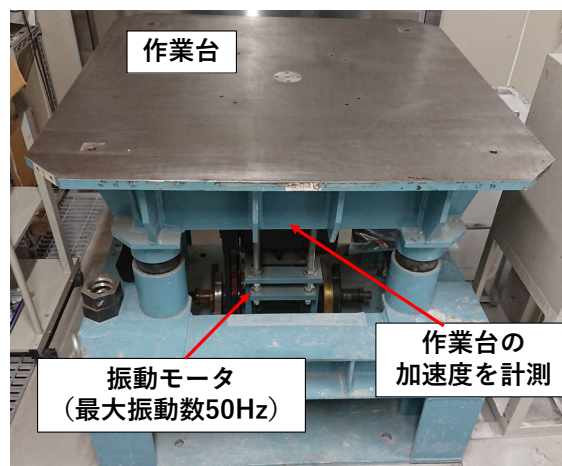


図-2 大型振動台

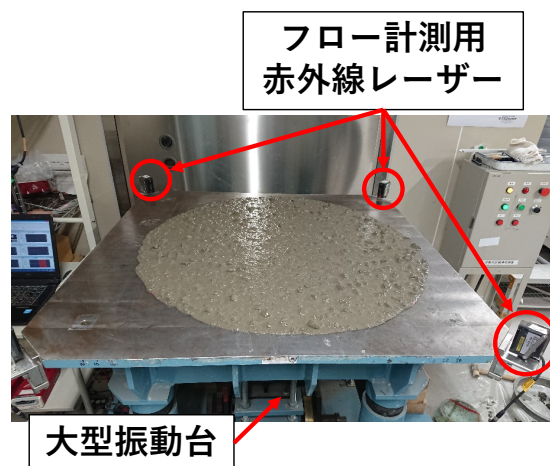


図-3 E_f (流動性) 評価試験

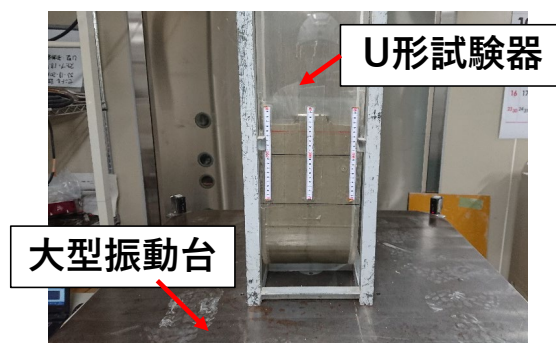


図-4 E_u (充填性) 評価試験

振動を開始した。充填高さ 350mm 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_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、直町ら²⁾の手法を参考に、円筒容器内で振動を加えた試料上層部の単位粗骨材量を用いて、粗骨材の材料分離程度を測定することで評価した。 E_s の測定方法の概要を図-5 に示す。大型振動台の上に図-5 に示す $\phi 300$ mm、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。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）の委員会報告書⁴⁾では、高流動コンクリートを用いた粗骨材の沈下量評価試験において、振動時間 0 秒時の粗骨材残存率は 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。図-1 のフローを満たす配合の E_f および E_s を参考にする

2.2 配合選定

本稿では、スランプ・スランプフローが締固めエネルギーに与える影響を確認するため、スランプフロー 45cm $\pm$ 5.0cm の締固めを必要とする高流動コンクリート、スランプ 18.0 $\pm$ 1.5cm、および 21.0cm $\pm$ 1.5cm の普通コンクリートの 3 配合を作成した。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 剤を用いて空気量が 4.5 $\pm$ 1.5% となるように調整した。

3. 試験結果

図-1 に示す締固めエネルギーを用いた配合選定フローにより、締固め性が良好だと判断した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完了エネルギー E_f , E_u , E_s の計測結果を示す。 E_s の算出には図-6 に示す粗骨材残存率測定試験の結果を用いた。同図には締固めエネルギーと粗骨材残存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 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

表-1 使用材料

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: 3.16g/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: 2.62g/cm ³ 粗粒率: 2.50
G	粗骨材1	東京都八王子市産, 密度2.65g/cm ³ 実積率60.0%
	粗骨材2	山梨県大月市産, 密度2.62g/cm ³ 実積率60.0%
	粗骨材3	埼玉県秩父郡産, 密度2.70g/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



図-5 E_s (材料分離抵抗性) 評価試験

表-2 配合表

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

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、流動性および充填性が高い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 E_u および E_f の関係を示す。図-7 では $y = x$ 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、および充填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ことが定量的に示された。

次に E_f および E_u の大小関係を表-3 の値より確認すると、全ての配合において $E_f > E_u$ 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。

4. 振動締固め試験計画の検討

4.1 適切な締固め条件の設定

図-8 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。図-1 のフローより、材料分離を生じずに充填完了するために、 $E_f > E_u$ の条件に加えて、 $E_s > E_f$ となる必要がある。これらの条件を満たすには、図-8 においては、 $y = x$ 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-8 の上述の範囲に E_f および 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。また、 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を決定することができ、適切な締固めエネルギーの範囲はそれぞれ、SL18 では 6.38～39.41J/L、SL21 では 4.82～26.96J/L、SLF45 では 3.35～13.24J/L となる。トンネル施工管理要領（中流動コンクリート編）⁹⁾ では、中流動覆工コンクリート（本稿における締固めを必要とする高流動コンクリート）の最適な振動エネルギーは 3.0～4.0J/L としており、今回の試験結果はこれと概ね一致する結果であった。また、同文献では、振動エネルギー 4.0J/L を与えるための平均振動時間の算出例を示しており、型枠バイブレータの振動数が 80～100Hz、設

表-3 締固め完了エネルギーの測定結果

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

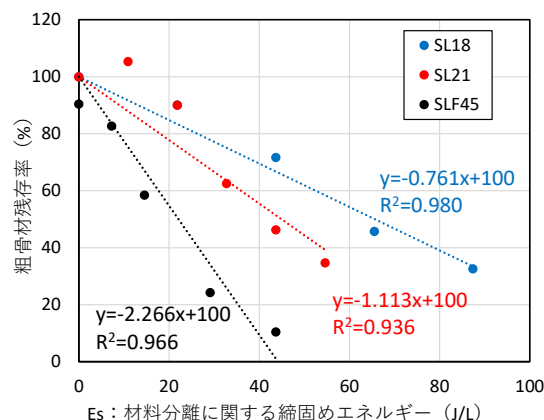


図-6 振動時間と粗骨材残存率の関係

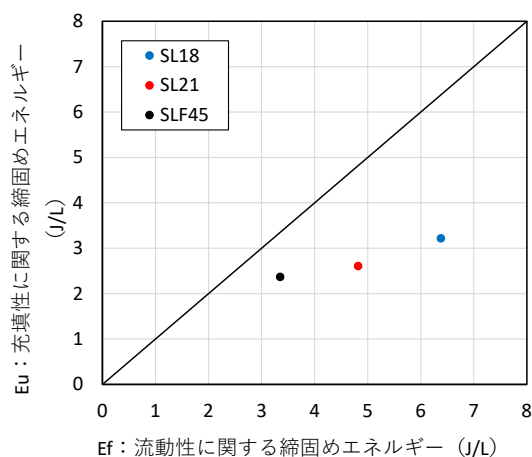


図-7 E_f および E_u の測定結果

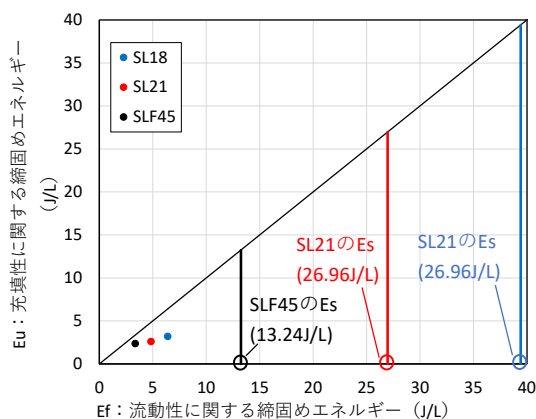


図-8 締固めエネルギーの測定結果

置間隔 3m 程度以下の条件では 15 秒と算出している。本稿で選定した配合についても、同様の算定をした場合平均振動時間は SL21 で 20 秒、SLF45 で 14 秒という結果であり、型枠バイブレータのみでの充填が可能なが示唆される。

以上の結果より、締固めエネルギーを用いた配合の締固め性評価により適切な振動エネルギーの範囲を設定することができた。これに加えて型枠バイブレータでの振動締固めによりコンクリートが受ける振動エネルギー、および型枠バイブレータの距離によるコンクリートが受ける振動エネルギーの減衰を把握することで、設置間隔および振動時間を設定することが可能と考えられる。

4.2 今後の課題

材料分離を生じる締固めエネルギーに関して、今回の検討では粗骨材残存率の閾値を 70%としたが、耐久性や収縮特性など硬化後の品質との関係を把握した上で適切な閾値を設定する必要がある。

今後は、覆工コンクリート施工において、セントルに設置した型枠バイブレータの振動エネルギー、および振動エネルギーの距離減衰を把握することで本稿の検討結果と合わせて適切な振動締固め条件を設定し、実大規模の試験により今回提案した締固め計画の妥当性を検証する必要がある。

5. まとめ

本稿では、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を締固めエネルギーを用いて評価した。また、評価結果より適切な締固めエネルギーの範囲を決定する手法を考案した。得られた成果を以下に示す。今回の検討結果を考慮した実大規模の試験により、粗骨材の分離程度や表層品質、美観を確認することで、妥当性を今後検証する必要がある。

- 1) 今回の試験結果の範囲では、締固めエネルギーと粗骨材残存率は線形関係であった。簡易な試験により任意の振動時間における粗骨材残存率を推定できる可能性がある。

- 2) スランプ・スランプフローが大きいほど、型枠内を充填するために必要な締固めエネルギーは小さくなることを、締固めエネルギーを用いることで定量的に示すことができた。
- 3) 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に対して締固めエネルギーを用いた評価を実施することで、材料分離を生じずに充填可能な締固めエネルギーの範囲を設定することができた。
- 4) セントルに取り付けた型枠バイブレータがコンクリートにあたえる振動エネルギーおよび距離減衰を把握することで、型枠バイブレータの設置間隔および振動時間を設定することが可能だと考えられる。
- 5) 締固めエネルギーの観点から適切な締固め計画を立案することで、型枠バイブレータのみでも適切な締固めを行うことが可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 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：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，コンクリート技術シリーズ 123，2020
- 5) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：トンネル施工管理要領（中流動コンクリート編），2011.7

