

# 論文 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

梁 俊\*1・坂本 淳\*2・丸屋 剛\*3・太田貴士\*4

**要旨:** 締固めを必要とする高流動コンクリートは、打込み時に補助的に振動を加え、軽微な締固めを行うことで型枠内に充填できるコンクリートとして扱われている。しかし、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を立てるうえでの懸念事項である。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が振動を受けて分離することなくスランプフロー60cm に達するために要する振動エネルギーと流動障害 R2 の U 形充填試験の充填高さ 350mm に達するために要する振動エネルギーを比較することで、締固めを必要とする高流動コンクリートの締固め性および適正配合の評価方法を検討した。

**キーワード:** 締固めを必要とする高流動コンクリート、締固め完了エネルギー、スランプフロー、充填高さ

## 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、構造物の施工条件に応じて、打込み時に補助的に振動を加え、軽微な締固めを行うことでコンクリートを密実に充填させる方法が提案されている。

例えば、トンネルの覆工では、打込み時に施工性の改善と品質の向上を目的に、従来の覆工コンクリートより流動性を高めた「中流動覆工コンクリート」が提案されている。「中流動覆工コンクリート」は、普通コンクリートと高流動コンクリートの中間の流動性を持つスランプフロー35~50cm 程度のコンクリートとして、「NEXCO 中流動覆工コンクリート技術のまとめ平成 23 年 12 月（株）高速道路総合技術研究所」に取り纏められており<sup>1)</sup>、平成 20 年頃からトンネル覆工コンクリートを中心に適用事例が増えている。また、合成構造沈埋函の施

工、港湾用のプレキャストケーソンや栈橋の SRC 構造部材、形状が複雑で断面が狭い建築構造物にも同種のコンクリートが用いられている。

土木学会「高流動コンクリートの配合設計・施工指針」では、自己充填性を有する高流動コンクリートと区別し、これらのコンクリートを「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<sup>2)</sup>。締固めを必要とする高流動コンクリートは、棒状バイブレータで締め固める一般のコンクリートより流動性が高く、流動性の指標としてスランプフローが用いられるコンクリートである。ただし、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を立てるうえでの懸念事項である。例えば、締固めを必要とする高流動コンクリートの施工において、締固めの程度を適切に把握しなければ、図-1 のように、過振動による砂すじなどが発生しやすいのが大きな問題である。

締固めを必要とする高流動コンクリートに関する試験方法はいくつか検討されている<sup>3) 4)</sup>。例えば、東・中・西日本高速道路株式会社の「トンネル施工管理要領（中流動覆工コンクリート編）」では、加振変形試験により配合選定を行い、実施中では、型枠に与えられる振動エネルギーが約 3.7 J/L になるように型枠バイブレータの間隔を調整するように決められている<sup>5)</sup>。なお、「振動エネルギー3.7 J/L」は、3.7J/L の振動エネルギーを受けたコンクリートの硬化後の品質を確認することで決めた数値で、必ずしも締固めに最適な締固め完了エネルギーで

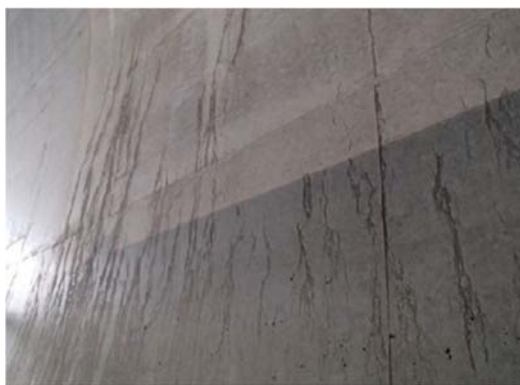


図-1 締固めを必要とする高流動コンクリートの砂すじ発生事例

*1 大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部材工研究室	主任研究員	博(工)	(正会員)
*2 大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部	主幹研究員	博(工)	(正会員)
*3 大成建設（株）技術センター	主幹研究員	工博	(正会員)
*4 大成建設（株）技術センター都市基盤技術研究部構造研究室	研究員	修士	(正会員)

あるとは言い切れない。また、配合選定方法における加振変形試験による 10 秒加振と「振動エネルギー3.7J/L」の相関も明確に示されていない。

著者らは、普通コンクリートにおいて締固め完了エネルギーにより、コンクリートに必要とされる締固めの程度を評価する方法を提案しているが<sup>6)</sup>、締固めを必要とする高流動コンクリートまで評価の対象に至っていない。

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の締固め完了エネルギーの評価方法を確立し、締固めエネルギーの観点から締固めを必要とする高流動コンクリートの締固めおよび適正配合を評価する方法を検討した。

## 2. 試験装置および締固め性の評価方法

本研究で用いた振動試験装置を図-2 に示す。上部の振動台はスランプフローを測定することを考慮して 1.0×1.0m とし、振動台の横揺れを最小とするために単軸ぶら下げ式モーターを用いた。振動台の中心下部には加速度センサーを設置し、振動台上の四隅にはスランプフロー測定用の非接触型変位計を設置した。

本研究では、締固めを必要とする高流動コンクリートが振動を受けて、分離することなく、自己充填性を有する高流動コンクリートと同等の状態となれば、十分な充填性を発揮できると考えた。このため、図-3 に示すように、高流動コンクリートと同等のスランプフロー60cm（ランク 2 のスランプフローの最下限値）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完了エネルギー（以下、 $E_f$ ）と定義した。同様に、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間隙通過性に関する締固め完了エネルギー（以下、 $E_u$ ）と定義した。

振動台の上でスランプフロー試験を行った試料に振動を与え、非接触型変位計の測定データからスランプフローが 60cm に到達するまでの時間を読み取り、その時間を式(1)の  $t$  に代入して求めた  $E_t$  を  $E_f$  とした<sup>6)</sup>。なお、測定時には、スランプフローが 60cm に到達するまで、試料中央部に粗骨材が露出した状態を呈することなく周囲部に 2cm 以上のペーストや遊離した水の帯がないことを確認した。

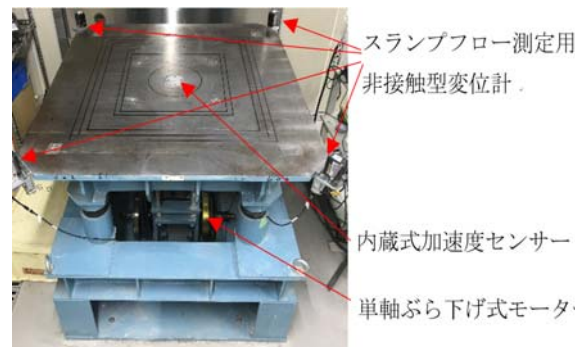


図-2 振動試験装置



図-3  $E_f$  および  $E_u$  の概要

表-1 コンクリートの配合

配合 No.	W/C (%)	細骨材率 (%)	粗骨材絶対容積 (L/m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				W	C	S	G	SP	VSP
1	50.0	49.3	360	150	300	917	958	9.90	-
2	50.0	48.7		155	310	895	958	6.82	-
3	50.0	48.2		160	320	876	958	5.76	-
4	50.0	47.5		165	330	855	958	4.62	-
5	50.0	46.8		170	340	831	955	1.25	-
6	50.0	46.2		175	350	809	958	3.15	-
7	50.0	48.7	360	155	310	895	958	-	6.82
8	50.0	46.2		175	350	809	958	-	3.50
9	50.0	45.1	390	150	300	839	1037	6.60	-
10	50.0	44.5		155	310	818	1037	5.27	-
11	50.0	43.8		160	320	797	1037	4.48	-
12	50.0	43.1		165	330	775	1037	3.47	-
13	50.0	42.4		170	340	752	1037	3.06	-
14	50.0	41.7		175	350	732	1037	2.80	-
15	50.0	54.6	315	160	320	994	838	10.88	-
16	50.0	52.4	330		320	953	878	7.20	-
17	50.0	48.2	360		320	876	958	5.76	-
18	50.0	43.8	390		320	797	1037	4.48	-
19	50.0	41.6	405		320	757	1077	3.84	-
20	50.0	39.5	420		320	719	1117	3.52	-
21	50.0	50.9	345	155	310	935	912	2.25	-
22	50.0	50.3		160	320	914	912	1.80	-
23	50.0	49.7		165	330	893	912	1.50	-
24	50.0	49		170	340	870	912	1.30	-
25	50.0	48.4		175	350	849	912	1.00	-

※SPはポリカルボン酸エーテル系化合物の高性能 AE 減水剤, VSPは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

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

ここに,  $E_t$ :  $t$ 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<sup>-1</sup>)

また, JSCE-E 511 に準じた U 形充填試験器を振動台に固定して U 形充填試験を行った後, 振動を与えて充填高さが 350mm に到達するまでの時間を式(1)の  $t$  に代入して求めた  $E_t$  を  $E_u$  とした。

### 3. 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料として, セメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm<sup>3</sup>), 細骨材は千葉県君津産山砂 (表乾

密度 2.62g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.56%, FM 2.44), 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%, F.M.6.39, 実積率 62.0%) 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 減水剤とポリカルボン酸エーテル系化合物 (SP) 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 (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。

コンクリートの配合を表-1 に示す。粗骨材絶対容積が一定の場合, 単位水量の変化に伴う  $E_f$  と  $E_u$  の変化を確認するため, 単位水量を 150~175kg/m<sup>3</sup> の間で 5kg/m<sup>3</sup> ずつ変化させ (配合 1~6, 9~14), 試験を行った。単位粗骨材量は 360 L/m<sup>3</sup>, 390 L/m<sup>3</sup> の 2 水準にした。なお, ペーストの粘性が  $E_f$  と  $E_u$  に与える影響を確認するために, 単位水量 155kg/m<sup>3</sup> と 175kg/m<sup>3</sup> の配合の混和剤を高

性能 AE 減水剤（以下，SP）から増粘剤含有型高性能 AE 減水剤（以下，VSP）に変えた配合に関しても検討を行った（配合 7～8）。その後，単位水量を  $160 \text{ kg/m}^3$  一定で，

粗骨材絶対容積を  $315 \sim 420 \text{ L/m}^3$  の間で変化させて最適な粗骨材絶対容積を検討し（配合 15～20），求めた最適な粗骨材絶対容積をもとに，単位水量を  $155 \sim 175 \text{ kg/m}^3$  の間で振って，最適な単位水量を決めた（配合 21～25）。詳細は，4. 試験結果及び考察で述べる。

コンクリートの練混ぜおよび試験は  $20^\circ\text{C}$  の恒温試験室で行い，練混ぜには水平 2 軸型強制練りミキサを用いた。混和剤の添加量は各バッチでスランプフローが  $42 \pm 2 \text{ cm}$ ，空気量が  $4.5 \pm 1.0\%$  となるよう調整した。

表-2 各配合の  $E_f$  と  $E_u$  測定値

配合 No.	粗骨材絶対容積 ( $\text{L/m}^3$ )	W ( $\text{kg/m}^3$ )	$E_u$ (J/L)	$E_f$ (J/L)
1	360	150	14.38	10.04
2		155	11.92	7.82
3		160	6.4	7.92
4		165	4.82	7.08
5		170	8.92	8.04
6		175	5.38	7.3
7	360	155	9.5	9.44
8		175	4.22	7.92
9	390	150	13.24	8.14
10		155	10.5	7.58
11		160	7.68	6.64
12		165	7.34	6.28
13		170	7.62	5.96
14		175	7.28	5.62
15	315	160	9.9	9.16
16	330	160	6.24	9.46
17	360	160	6.4	7.92
18	390	160	8.7	7.24
19	405	160	12.2	6.94
20	420	160	12.6	9.48
21	345	155	11.13	6.37
22	345	160	8.99	6.28
23	345	165	5.85	5.6
24	345	170	2.59	5.38
25	345	175	3.09	4.79

#### 4. 試験結果及び考察

##### 4.1 配合の相違による $E_f$ と $E_u$ の変化

各配合の  $E_f$  と  $E_u$  の測定結果を表-2 に示す。単位水量の変化による  $E_f$  の変化を図-4 に示す。同図に示した近似直線からその傾向を考察すると，単位水量の増加により  $E_f$  が小さくなっている。水セメント比一定の条件下で，単位水量が増えるとペースト量が増えることからスランプフローを  $60 \text{ cm}$  にするのに必要なエネルギー  $E_f$  が小さくなったと考えられる。粗骨材絶対容積が  $360 \text{ L/m}^3$  の配合の  $E_f$  は， $390 \text{ L/m}^3$  の配合の  $E_f$  より大きくなっている。ペースト量が一定の条件下で，粗骨材絶対容積  $360 \text{ L/m}^3$  の配合は，粗骨材絶対容積が少ないにもかかわらず， $E_f$  が大きくなっていることは，粗骨材絶対容積の減少によって増えた細骨材の噛み合わせが影響したと考えられる。

単位水量の変化による  $E_u$  の変化を図-5 に示す。単位水量の増加により  $E_u$  は小さくなり，その傾向は  $E_f$  よりも  $E_u$  で顕著となっている。これは，単位水量の増加に伴い粗骨材を取り巻くペースト量が増えることにより，間隙通過性が改善されたためと考えられる。また，粗骨材絶対容積を少なくした場合に， $E_f$  の変化の傾向は同傾向であったことに対して， $E_u$  は単位水量  $155 \sim 160 \text{ kg/m}^3$  を境に増減傾向が異なる結果となった。このことは，細骨材量と粗骨材量のバランスが間隙通過性に大きく影響することを説明している。以上より，間隙通過性の検討に

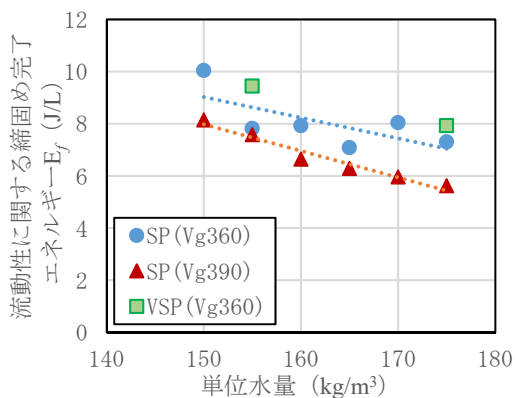


図-4 単位水量の変化が  $E_f$  に与える影響

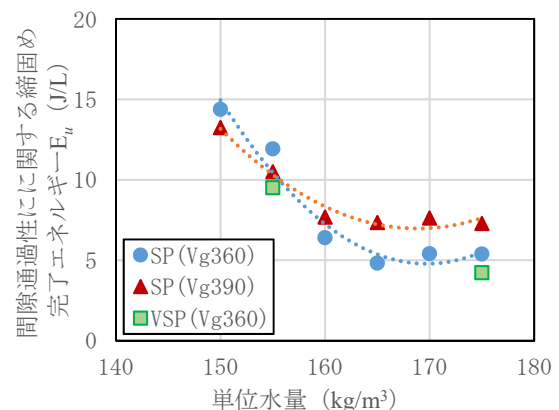


図-5 単位水量の変化が  $E_u$  に与える影響

においては、粗骨材絶対容積のみでなく、細骨材量と粗骨材量のバランス、単位水量などと併せて検討する必要があることを示している。

図-4と図-5に示すように、VSPを用いた配合はSPを用いた配合と比べて、 $E_f$ は大きく、 $E_u$ は小さくなる傾向となり、差は小さいものの、ペーストの粘性の増大による影響が確認された。

#### 4.2 $E_f$ と $E_u$ の変化による締固めを必要とする高流動コンクリートの配合選定方法の検討

4.1で検討したように、スランプフローが同じ締固めを必要とする高流動コンクリートであっても、単位水量や粗骨材絶対容積、混和剤種類の違いによって $E_f$ および $E_u$ が異なることが分かる。また、配合の相違によって、 $E_f$ と $E_u$ の大きさとその大小関係が変わる場合がある。

配合の相違による $E_f$ と $E_u$ の大きさとその大小関係の変化を確認するため、 $E_f$ を横軸に、 $E_u$ を縦軸にして、締固め完了エネルギーの測定結果を図-6にプロットする。図-6に示す斜めの分割線は、 $E_f$ と $E_u$ が等しい場合を示している。したがって、分割線より上方にプロットされる配合は、コンクリートの流動性を確保する締固めエネルギー( $E_f$ )ではコンクリートの間隙通過性を確保できない配合である。施工中、コンクリートの流動は目視により確認できるが、流動中のコンクリートが確実に鉄筋間隙を通過しながら流動しているかを目視により確認することは困難である。コンクリートが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、必要な間隙通過性も確保できる配合を選定するのが合理的である。したがって、図-6の分割線以下にプロットされる配合を選定した方がよいと考えられる。

$E_f$ を横軸に、 $E_u$ を縦軸にして、締固め完了エネルギーの測定結果をプロットすると、単位水量や粗骨材絶対容積、混和剤添加量が配合に与える影響も確認できる。図-6に示すように、粗骨材絶対容積 $360\text{ L/m}^3$ の配合が粗骨材絶対容積 $390\text{ L/m}^3$ の配合に比べて右側にプロットされていることがわかる。また、単位水量が多くなることによって、下の方にプロットされている。粘性を大きくしたVSPを使用した配合は、SPを使用した配合より右下にプロットされている。これらは、締固めを必要とする高流動コンクリートの合理的な配合を選定するためには、単位水量を適切に大きくしてペーストの量を増やす、粘性を適切に大きくして分離抵抗性を大きくする、粗骨材絶対容積を適切に選定して間隙通過性を改善する必要があることを示している。

表-1に示す、粗骨材絶対容積を $315\sim 420\text{ L/m}^3$ の間で変化させた配合15~20の締固め完了エネルギーを図-7に示す。図-6では、粗骨材絶対容積 $360\text{ L/m}^3$ の配合が

粗骨材絶対容積 $390\text{ L/m}^3$ の配合に比べて右側にプロットされていて、粗骨材絶対容積を減らすことで施工に合理的な配合を選定できるようにみえる。しかし、図-7に示すように、スランプフローを一定として、粗骨材絶対容積を少なくすることは、必ずしも配合が合理的になるとは言い切れない。したがって、 $E_f$ を横軸に、 $E_u$ を縦軸にして、締固め完了エネルギーの測定結果をプロットする方法は、施工に合理的な配合の範囲は判断できるが、この方法によって、施工に最適な配合を選定することは難しい。

締固めを必要とする高流動コンクリートの施工に最適な配合を選定する方法として、横軸を粗骨材絶対容積とし、縦軸を締固め完了エネルギーとして、 $E_f$ と $E_u$ を同じグラフにプロットして比較することを試した。表-1

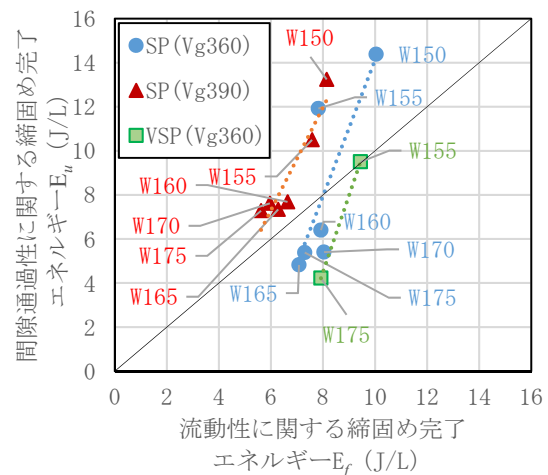


図-6 配合の相違による $E_f$ と $E_u$ の大きさとその大小関係の変化

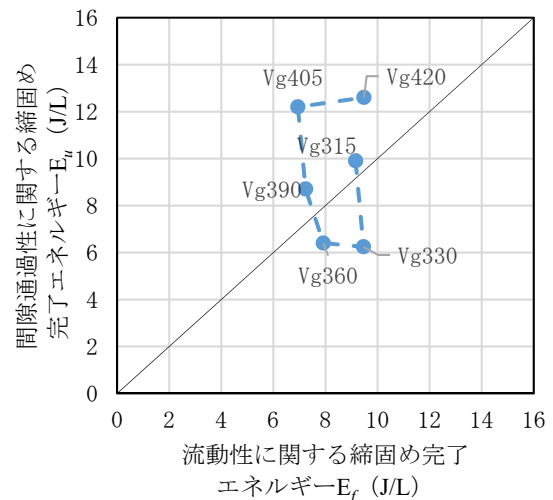


図-7 粗骨材絶対容積の相違による $E_f$ と $E_u$ の大きさとその大小関係の変化

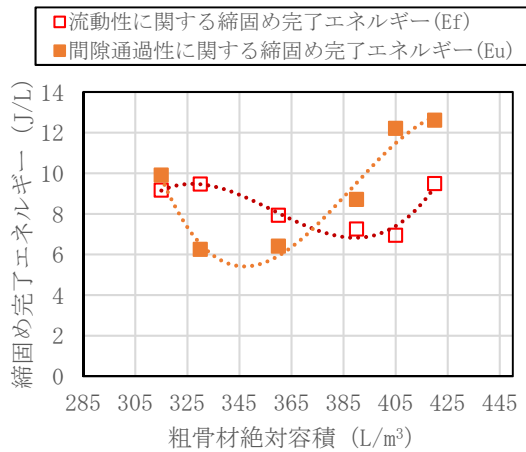


図-8 粗骨材絶対容積の相違による  $E_f$  と  $E_u$

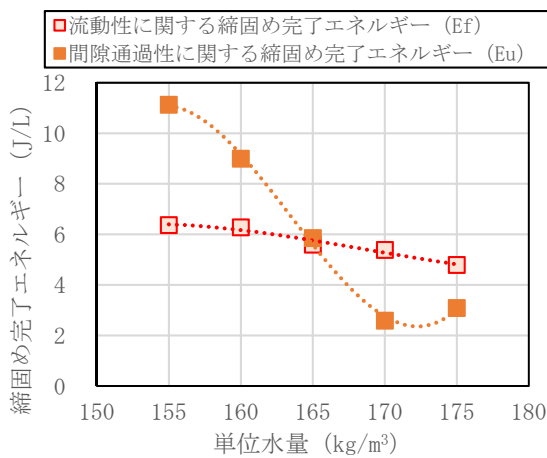


図-9 単位水量の相違による  $E_f$  と  $E_u$

に示す、粗骨材絶対容積を  $315 \sim 420 \text{ L/m}^3$  の間で変化させた配合 15~19 の  $E_f$  と  $E_u$  を図-8 に示す。粗骨材絶対容積が約  $315 \sim 375 \text{ L/m}^3$  の範囲にプロットされた配合が  $E_f > E_u$  の範囲で、コンクリートの流動性を確保する締固めエネルギー ( $E_f$ ) でコンクリートの間隙通過性を確保できる配合であることがわかる。確実な間隙通過性を確保するためには、 $E_f$  と  $E_u$  の差が一番大きい配合を選定することが安全である。したがって、図-8 からわかるように、コンクリートの最適粗骨材絶対容積は  $E_f$  と  $E_u$  の差が一番大きくする  $345 \text{ L/m}^3$  である。

コンクリートの配合選定において、一般に、先に最適細骨材率あるいは粗骨材絶対容積を選定して、最適細骨材率あるいは粗骨材絶対容積のもとに最適な単位水量を決めている<sup>7)</sup>。したがって、本研究では、最適粗骨材絶対容積を  $345 \text{ L/m}^3$  として、単位水量を  $155 \sim 175 \text{ kg/m}^3$  の間で変化させた配合 20~24 の  $E_f$  と  $E_u$  を求めた。測定結果を図-9 に示す。単位水量が約  $165 \sim 175 \text{ kg/m}^3$  の範囲にプロットされた配合が  $E_f > E_u$  を満足させる配合の範囲で、コンクリートの流動性を確保する締固めエネルギー ( $E_f$ ) を与えれば、間隙通過性も十分に確保できる配合

であることがわかる。確実な間隙通過性を確保するためには  $E_f$  の変動が大きくない場合、 $E_f$  と  $E_u$  の差が大きい配合を選定することが安全である。したがって、図-9 に示すように、コンクリートの単位水量は  $E_f$  と  $E_u$  の差を一番大きくする  $170 \text{ kg/m}^3$  近傍にした方が安全である。

構造物として必要な圧縮強度と耐久性からコンクリートの水セメント比が決めるので、最適粗骨材絶対容積と最適単位水量が決められたら、混和剤の混入量によりスランプフローを調整することで、締固めを必要とする高流動コンクリートの最適な配合を決定することができる。なお、本研究で提案した配合選定方法により選定したコンクリートの締固め完了エネルギーは  $5 \text{ J/L}$  程度で文献 5) に示されている値  $3.7 \text{ J/L}$  よりは大きくなっている<sup>5)</sup>。本研究では施工の便益を図って  $E_f > E_u$  となるよう締固め完了エネルギーを選定したため、このような差異が生じたものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、流動および間隙通過に必要な締固め完了エネルギーを評価することで、締固めを必要とする高流動コンクリートの適切な配合選定の方法を検討した。その結果、スランプフローが  $60 \text{ cm}$  に到達するのに必要なエネルギー  $E_f$  を、U 形充填試験において充填高さが  $350 \text{ mm}$  に到達するのに必要なエネルギー  $E_u$  より大きくすること、また、 $E_f$  と  $E_u$  の差が一番大きい配合を選定することで、締固めを必要とする高流動コンクリートの最適な配合の選定を実現できる可能性が示唆された。

## 参考文献

- 1) (株) 高速道路総合技術研究所：NEXCO 中流動覆工コンクリート技術のまとめ、2011
- 2) 土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工、コンクリートライブラリー136、資料-85、2012
- 3) 桜井邦昭，その他：中流動コンクリートの合理的な配合設計方法に関する一提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1225-1230，2013
- 4) 小山田英弘，その他：中流動コンクリートの配合法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.463-468，2000
- 5) 東・中・西日本高速道路株式会社：トンネル施工管理要領，p.44，2013.
- 6) 梁俊，その他：締固めエネルギーに基づくコンクリートの締固め完了範囲の評価方法に関する研究，土木学会論文集，Vol.69，No.4，pp.438-449，2013
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書(施工編)，p.73，2017