論文　流動性の高いコンクリートの加振時における挙動に関する考察と締固め作業負荷の低減効果に関する検討

倉田　和英[1]・松本　修治[2]・坂井　吾郎[3]・加藤　佳孝[4]

要旨：異なる流動性を有するコンクリートについて，締固め作業負荷を加振時の間隙通過性，流動性の観点から間接的に評価するための各種試験を行った。その上で，スランプあるいはスランプフローで管理するコンクリートのそれぞれに要する締固め作業負荷を，代謝当量 METs（Metabolic Equivalents）という身体活動の強度を示す指標を用いることで消費カロリーに換算して比較した。その結果，締固めに要する作業負荷は，スランプ 10cm のコンクリートを用いた場合と比較して，スランプ 20cm で約 58%，スランプフロー44cm で約 89%の低減になると試算された。

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，材料分離抵抗性，作業負荷，消費カロリー

1. はじめに

近年の建設工事における技能労働者の不足や，猛暑で過酷な作業環境となる頻度の増加を鑑みると，更なる省力化，省人化による生産性向上が求められてくる。また，経験が浅い若手入職者や外国人労働者の割合が増えていくことを考慮すると，作業者の技能に依らずに品質確保できる生産手段が望まれてくる。一方で，現状の土木分野におけるコンクリート工事では，入念な締固めを必要とするスランプで管理するコンクリートが多く用いられる。締固め作業については，コンクリート標準示方書[施工編] [1)]（以降，示方書と称する）では，バイブレータの挿入間隔が 50cm 以下，締固め時間の目安が 5～15 秒と示されている。これらに対応しながら，配筋を避けて 5.8～11.2kg のバイブレータを適切な位置でコンクリートに抜き挿しする作業を長時間行うことは，技能労働者にとって多大な作業負荷となり，種々の異なる構造条件や施工条件に対応して締固めを行うには体力と経験や技能を要する。締固めの作業負荷が大きく，疲労が蓄積すると，注意力の欠如による締固め箇所の見落としや省略行為などのヒューマンエラーが発生しやすくなり，また，高密度な配筋箇所や特殊な形状の締固め作業において作業者の経験や技能が不足する場合は，コンクリートの未充填等の初期欠陥による品質の低下が懸念される。さらに，不注意行動による重大事故などの安全性の低下につながる恐れがあることや，1 人あたりの作業負荷が大きくなると，モチベーションの低下から離職につながり，人手不足を助長する可能性がある。

これに対して，流動性の高いコンクリートの活用は，バイブレータによる締固め時間を短くすることが期待できる。特に，締固めを必要とする高流動コンクリート [2)] においては，締固め間隔も大きくできるため，締固めに要する作業負荷の低減に有効と考えられている。また，軽微な締固めにより構造物の品質確保が可能となれば，作業者の技能への依存度の軽減につながることも期待できる。しかし，流動性の高いコンクリートを用いることによる作業負荷の低減効果を定量的に示した知見は少ない。

そこで，スランプ 10cm からスランプフロー62cm までの幅広い流動性を有するコンクリートについて，加振時における間隙通過性，流動性に着目した各種試験を実施して，加振時の挙動について考察を加えるとともに，締固め時間の目安を求めた。また，目安とした締固め時間で加振したコンクリートの均質性を評価し，締固め時間の妥当性を確認した。その内容に基づいて，流動性の異なるコンクリートの締固めに要する作業負荷を定量的に比較した結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 締固め作業に関する評価試験の位置付け

流動性の異なるコンクリートに対し締固め作業負荷を評価するためには，実構造物に近いサイズの型枠，配筋を有する試験体を用意し，実際に打込み・締固めを行い，その際の作業負荷を比較することが好ましい。しかしながら，そのような試験には多大な労力を必要とするため，本論文では，室内試験において締固め作業負荷を締固め時間から間接的に評価することとした。

十分な締固めの目安の一つとして，加振によりコンクリートの体積が減っていくのが認められず，表面がほぼ水平となることと示方書 [1)]に示されている。そこ

*1 鹿島建設株式会社　技術研究所　土木材料グループ　副主任研究員　(正会員)
*2 鹿島建設株式会社　技術研究所　土木材料グループ　主任研究員　(正会員)
*3 鹿島建設株式会社　技術研究所　主席研究員　博士(工学)　(正会員)
*4 東京理科大学　創域理工学部　社会基盤工学科　教授　博士（工学）（正会員）

表－1　使用材料

材料名	記号	摘要
水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント， 密度:3.15g/cm^3，比表面積:3,110cm^2/g
細骨材	S1	硬質砂岩砕砂，東京都八王子市美山産， 表乾密度:2.65 g/cm^3，粗粒率 3.24，吸水率 0.95%
	S2	山砂，千葉県君津市吉野産， 表乾密度:2.60 g/cm^3，粗粒率 1.67，吸水率 1.90%
粗骨材	G	硬質砂岩砕石 2005，東京都青梅産， 表乾密度:2.65 g/cm^3，実積率 62.3%，吸水率 0.59%
混和剤	Ad	AE 減水剤， リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	SP	高性能 AE 減水剤，ポリカルボン酸エーテル化合物
	AE	AE 剤，変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表－2　配合一覧

No.	目標 SL,SF※ (cm)	目標 Air※ (%)	W/C※ (%)	s/a※ (%)	Gvol※ (L/m^3)	$V_{0.6}$ (%)	単位量 (kg/m^3)					混和剤添加率 (C×%)		
							W	C	S1	S2	G	Ad	SP	AE
1	SL12±2.5	4.5±1.5	55.0	45.2	377	41.1	170	309	556	262	998	0.25	-	0.001
2	SL18±2.5		55.0	47.2	363	41.2	170	309	581	273	962	-	0.80	0.002
3	SF55±5.0		46.0	50.0	330	43.0	175	380	591	278	874	-	1.00	0.001
4	SF65±5.0											-	1.15	0.002
5	SF45±5.0		49.0	52.0	320	49.0	175	360	436	473	847	-	1.40	0.0005
6	SF55±5.0											-	2.00	0.002

※SL：スランプ，SF：スランプフロー，Air：空気量，W/C：水セメント比，s/a：細骨材率，Gvol：単位粗骨材絶対容積

で，本論文においては，棒状バイブレータを用いた U 形容器への充填試験[2]（以降，加振 U 形試験と称する）を行い，コンクリートがほぼ水平に充填するまでの加振時間を，ある一定の構造条件における十分な締固め時間の目安とした。次に，締固めによるコンクリートの広がりやすさは作業性に影響を及ぼす要素であることから，振動台を用いたスランプの加振変形試験[3]（以降，加振変形試験と称する）にて，加振時のスランプフローが広がる挙動から，締固め時間への影響を評価した。

以上で求めた目安の時間で締め固めたコンクリートについて，均質性を評価し，締固め時間の妥当性を確認した。具体的には，加振 U 形試験後の A 室と B 室において，円筒貫入試験[4]を実施した。さらに，目安の時間で締め固めたコンクリートの粗骨材量試験[2]を行い，締固め時間が過剰となっていないことを確認した。

2.2 使用材料および配合

締固め作業に関する評価試験に供したコンクリートの使用材料を**表－1**，配合を**表－2** に示す。No.1 および No.2 は，スランプで管理するコンクリートとし，No.1 のスランプの目標値は 12±2.5cm，No.2 は 18±2.5cm とした。これらは，水セメント比 55%，単位水量 170kg/m^3 と一般的な土木構造物に用いられる配合といえる。No.3～6 は，スランプフローで管理するコンクリートとした。これらの配合は，「締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針（案）[2]」（以降，締固め高流動指針と称する）を参考に，単位水量を 175kg/m^3 一定とし，単位粉体量を 350～450kg/m^3，単位粗骨材絶対容積を 300～330L/m^3 の範囲内で定めた。No.3 および No.4 は，同じ配合で，高性能 AE 減水剤（以降，SP と称する）の添加率を変えることでスランプフローを変化させた。それぞれのスランプフローの目標値は，No.3 で 55±5.0cm，No.4 で 65±5.0cm とした。No.4 は，材料分離抵抗性をあえて不足させるため，SP の添加率を増やすことにより，単位粉体量に対して流動性を大きくした。No.5 および No.6 は単位セメント量を 360kg/m^3 と No.3，4 に対して減らすかわりに，細骨材の混合比率を変えて微粒分を増やすことによって材料分離抵抗性を確保したものである。No.5，6 は同じ配合とし，SP の添加率を変えることでスランプフローを変化させた。それぞれのスランプローの目標値は 45±5.0cm および 55±5.0cm とした。ここで，細骨材の微粒分については，著者ら[5]の知見を参考にモルタル中のセメントおよび 0.6mm 以下の細骨材粒子の容積割合（以降，$V_{0.6}$ と称する）を指標とした。$V_{0.6}$ が高いほど，材料分離抵抗性の増大が期待されるものである。No.1～No.4 は，細骨材の標準粒度の中心となるように S1（粗目）と S2（細目）の混合比率を 67.6 : 32.4 とし，その場合，$V_{0.6}$ が 41～43%となる。No.5 および No.6 は，S1 と S2 の混合比率を 47.5 : 52.5 にとし，$V_{0.6}$ が 49% となるようにした。なお，既往の知見では，$V_{0.6}$ を 47～49%にすることで，単位粉体量を過剰に増やすことなく，高い充填性が得られること確認している[5]。

2.3 試験項目および方法

各配合についてスランプ試験（JIS A 1101）およびスランプフロー試験（JIS A 1150），空気量試験（JIS A 1128），コンクリート温度の計測（JIS A 1156）を行った後，以下の締固め作業に関する評価試験を実施した。

(1) 間隙通過性の観点からの作業性の評価試験

加振時における間隙通過性の評価として，JSCE-F701-2022「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）」[6]を参考に，加振 U 形充填試験を行った。加振時における全量のコンクリートの間隙通過性を評価する目的で充填容器は U 形容器を使用し，流動障害は通常の RC 構造物の構造条件への締固めによる充填を想定して流動障害 R2 とした。また，棒状バイブレータの仕様は，直径 φ28mm，長さ 706mm，振動数は 220～270Hz である。コンクリートを A 室に詰めたあと，バイブレータをその先端が U 形容器の底から 10cm の高さの位置になるように挿入した。バイブレータによる加振は充填高さ 350mm に到達するまで行い，その加振時間を計測した。なお，U 形容器の A 室と B 室が平衡する際の充填高さは 365mm とされている[7]が，A 室にコンクリートを詰める際に生じる空隙量の違いや容器の寸法誤差や仕切り板の厚みの影響を考慮して，本試験では充填高さ 350mm で評価

することとした。この試験では，加振して充填高さが350mm に到達する時間を配合ごとに比較することで，間隙通過性の観点から締固めにおける作業性を間接的に評価しつつ，締固め完了までの時間の目安を求めた。

(2) 加振時の流動性の観点からの作業性の評価試験

加振時における流動性の評価として，試験法 733-2008「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」[3] を参考に，試験を実施した。振動台の上でスランプ，またはスランプフロー試験を実施した後，振動台の下部に設置された棒状バイブレータにてスランプフローが 70cm に到達するまで加振した。スランプフロー50cm，55cm，60cm，65cm および 70cm の到達を振動板上に張り付けたメジャーで読み取り，それぞれの加振時間を計測した。また，各スランプフローに到達した際の材料分離の有無や程度についても目視確認した。なお，試験前に振動台の中央部における最大加速度は約 40m/s^2 とした。この試験では，後述の通り，加振してスランプフローが 60cm に到達する時間を配合ごとに比較することで，流動性の観点から締固め時間への影響を評価した。

(3) 締固め後のコンクリートの均質性の評価試験

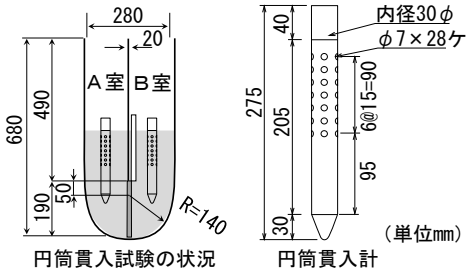
加振 U 形充填試験における流動障害の通過前後のコンクリートの均質性を評価して，締固め時間の妥当性を確認するために充填高さ 350mm に到達後の A 室，B 室のコンクリートに対し，日本建築学会「高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針（案）・同解説」に示される円筒貫入試験[4] を行った。U 形容器の A 室，B 室における円筒貫入試験の模式図を**図－1** に示す。円筒貫入計をコンクリートに挿入し，試験器の孔から流入したモルタルの円筒管底部からの高さを測定した（以降，流入モルタル値と称する）。間隙通過前後のコンクリートの均質性の評価として，A 室，B 室の流入モルタル値を比較した。

加えて，加振時における材料分離抵抗性の評価として，JSCE-F702-2022「加振を行ったコンクリート中の粗骨材量試験方法（案）」[2] を行った。棒状バイブレータによる加振時間が 0 秒，5 秒，10 秒および 20 秒における粗骨材量比率を計測し，材料分離抵抗性について評価した。また，棒状バイブレータは，加振 U 形充填試験と同じものを用いた。この試験では，締固め高流動指針に示される材料分離の限界の目安である粗骨材量比率が 40%になる加振時間を，材料分離を生じる締固め時間の目安とみなした。

3. 実験結果および考察

3.1 スランプおよびスランプフロー

フレッシュコンクリートの試験結果を**表－3** に示す。

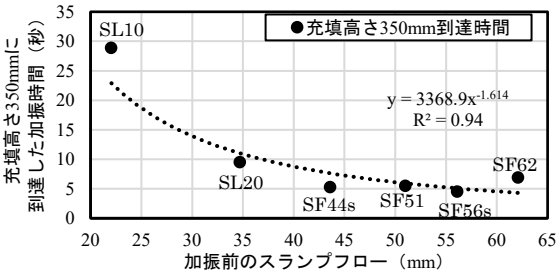


図－1 U 形充填試験器 A, B 室の円筒貫入試験の模式図

表－3 フレッシュコンクリートの試験結果

No.	記号	W/C (%)	s/a (%)	Gvol (L/m^3)	$V_{0.6}$ (%)	SL※ (cm)	SF※(cm)		Air※ (%)	C.T.※ (℃)
								平均		
1	SL10	55.0	45.2	377	41.1	10.0	22.1×22.0	22.0	3.4	19.1
2	SL20	55.0	47.2	363	41.2	20.0	35.6×33.8	34.5	5.3	19.1
3	SF51	46.0	50.0	330	43.0	－	52.0×50.0	51.0	3.0	－
4	SF62					－	62.7×61.5	62.0	3.0	19.2
5	SF44s	49.0	52.0	320	49.0	22.0	43.7×43.5	43.5	3.0	20.2
6	SF56s					－	57.2×55.0	56.0	3.0	20.0

※SL：ｽﾗﾝﾌﾟ，SF：ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ，Air：空気量，C.T.：ｺﾝｸﾘｰﾄ温度



図－2 充填高さ 350mm 到達の加振時間と加振前のスランプフローの関係

スランプで管理するコンクリートにおいて，No.1 はスランプが 10cm，No.2 は 20cm（以降，SL10 および SL20 と称する）であった。スランプフローで管理するコンクリートにおいて，No.3 はスランプフローが 51cm，No.4 は 62cm，No.5 は 44cm，No.6 は 56cm（以降，SF51，SF62，SF44s および SF56s と称する。なお，$V_{0.6}$ を増加させた配合は記号の語尾に s を付けて識別する。）であった。空気量はすべての配合で 4.5±1.5%以内であった。これらの計 6 水準のコンクリートを締固め作業に関する評価試験に供した。

3.2 加振時の間隙通過性の観点からの作業性の評価

充填高さが 350mm に到達するまでの時間（以降，350mm 到達時間と称する）とそれぞれの配合における加振前のスランプフローとの関係を**図－2** に示す。350mm 到達時間は，SL10 で 28.9 秒，SL20 で 9.5 秒であり，SF51 で 5.5 秒，SF62 で 6.9 秒，SF44s で 5.3 秒，SF56s で 4.5 秒であった。350mm 到達時間は，SL10 と比較して，SL20 は締固め時間を 1/3 程度，SF44s は 1/6 程度に短くなった。この結果から，加振時のコンクリートの間隙通過性の観点においては，スランプ 20cm 程度以上において特に締固め時間の短縮効果が大きいも

のと考えられた。これらの時間を締固め時間の目安とすることとした。なお，SF51，SF62 と比べて，スランプフローが小さい SF44s, SF56s の時間が短くなったのは，$V_{0.6}$ を増加させたことにより材料分離抵抗性の向上に伴い，間隙通過性が大きくなったものと考えられる。また，流動性が高い SF62 が SL20 と近い値であったのは，SF62 において，加振による材料分離の程度が大きく，間隙通過性が低下したためと考えられた。

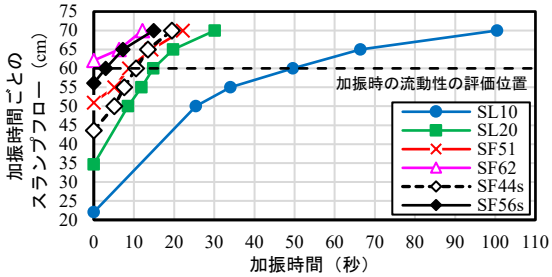
3.3 加振時の流動性の観点からの作業性の評価

それぞれの配合における加振によるスランプフローの推移を**図－3** に示す。SL10 は，加振によりスランプフローが大きくなるにつれて，その大きくなる速度が徐々に低下する傾向が確認された。なお，流動性が大きい配合ほどその傾向はみられず，加振時間とスランプフローは直線的な関係を示した。このスランプフローの広がる速度が減衰していく傾向は，流動距離の増加につれて粗骨材を置いてモルタルのみが流動し，モルタルの絶対容積の小さい配合ほど広がりに限界が生じていくためと考えられる。SL10 の広がりを踏まえて，締固め時間の目安をスランプフローが 60cm に到達する時間と仮定して評価した。また，SF44s の加振時間ごとのスランプフローの広がりは，初期のスランプフローがより大きい SF51 よりも早く，SF56s でも SF62 に対し同様の傾向が確認されたことから，$V_{0.6}$ の増加により，材料分離抵抗性が向上し，それに伴って加振時の流動性が向上した可能性が示唆された。

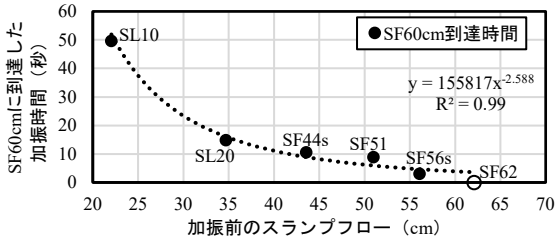
ここで，加振前のスランプフローとスランプフローが 60cm に到達した時間の関係を**図－4** に示す。なお，すべての配合で，スランプフローが 60cm に到達した時点において，試料中央部に粗骨材が露出した状態や，周囲部に 2cm 以上のペーストや遊離した水の帯が確認されなかったことから [3]，材料分離はないものと判断した。スランプが 10～20cm の範囲は，スランプが小さくなるにつれて加振時間が特に増加する領域であることが確認された。加振変形試験にてスランプフローが 60cm に到達するまでの時間は，SL10 と比較して，SL20 は締固め時間を 1/3 程度，SF44s は 1/5 程度（≒1/6）に短くなることが確認できた。この結果から，加振時のコンクリートの広がりの観点においても，スランプ 20cm 程度以上において，前述の間隙通過性の観点とほぼ同等の締固め時間の短縮効果が示された。

3.4 締固め後のコンクリートの均質性の評価

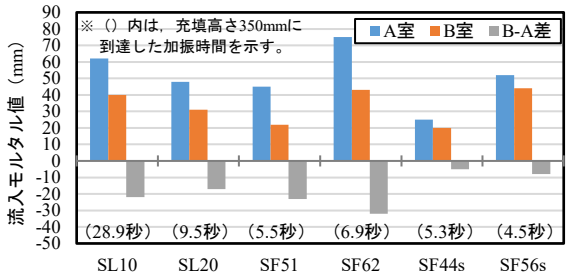
充填高さ 350mm 到達後の A 室，B 室における円筒貫入試験の結果を**図－5** に示す。すべての配合において，加振を行った A 室の流入モルタル値は，間隙通過後の B 室よりも大きくなった。これは，直接加振される A 室において，粗骨材が沈み，モルタル分が多くなったためと考えられる。スランプで管理するコンクリートにおいて，SL10 は，SL20 に対して，A 室，B 室の流入モルタル量の差がやや大きくなった。SL10 は，流動性および間隙通過性が他の配合より低くいため，流動障害を通過して充填高さが 350mm に到達するまでに，加振時間が 28.9 秒と長くなったことで間隙通過前後の均質性が低下したものと考えられる。また，スランプフローで管理するコンクリートでは，同一配合を比較した場合，流動性が高いものほど，A 室と B 室の流入モルタル値の差が大きくなる傾向が確認された。スランプフローで管理するコンクリートでは，流動性が高くなるほど加振箇所と間隙通過後の箇所の性状に不均質が生じやすいものと考えられる。細骨材の微粒分量を増やすことで材料分離抵抗性を確保した SF56s は，比較的流動性の近い SF51 と比較して A 室，B 室の流入モルタル値の差が小さくなった。SF56s と SF51 の加振時間の差が 1.0 秒と短かったこともあるが，$V_{0.6}$ の増加は，加振箇所と間隙通過後の箇所の均質性を保つのに有効である可能性が示唆された。一方で，目視や触診で材料分離はないものと判断したものの，SF56s において，A 室，B 室の両方で材料分離が大きくなり



図－3　加振によるスランプローの推移



図－4　スランプフロー60cm 到達の加振時間と加振前のスランプフローの関係



図－5　U 形充填試験 A, B 室の流入モルタル値

同程度の流入モルタル値となった可能性も考えられるため，今後，定量的な分析が必要と考える。

次に，加振時間と粗骨材量比率の関係を**図－6** に示す。併記の締固め高流動指針に示される材料分離の限界の目安である粗骨材量比率 40%を下回る加振時間は，SL10 で 20 秒以降，SL20 で約 20 秒，SF44s で約 20 秒，SF51 で約 14.5 秒，SF56s で約 20 秒，SF62 で約 8.8 秒であった。また，加振 U 形充填試験において充填高さが 350mm に到達するまでの時間から求めた締固め時間の目安を，白抜きの丸の凡例で併記しており，すべての配合において，40%以上を確保できることが確認された。この結果より，充填高さが 350mm に到達する時間から求めた締固め時間は，粗骨材の残存率の観点から均質性を確保する上でも必要十分なものであると判断した。それ以上の締固めは過剰な作業であり，均質性を低下させるものと考えられる。また，細骨材の微粒分量を増加することで材料分離抵抗性を確保した SF56s は，単位セメント量が 20kg/m^3 多い SF51 と比較して，粗骨材量比率 40%以下となるまでの加振時間が長くなった。加振 U 形充填試験における円筒貫入試験の結果も踏まえると，$V_{0.6}$ の増加は，加振に対する材料分離の抑制に有効であるものと考えられる。

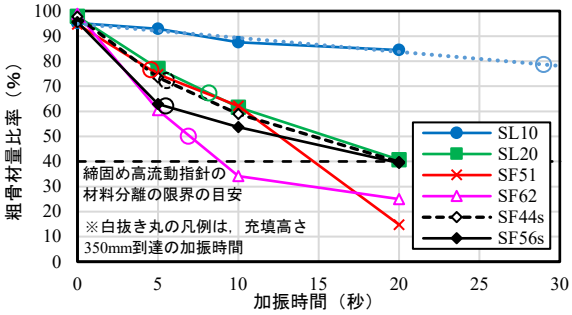
4.締固めに要する作業負荷の軽減効果の試算

スランプ 10cm，20cm およびスランプフロー44cm のコンクリートの締固め作業に要する作業負荷を，身体活動の強度の指標を用いて算出した。そして，流動性の高いコンクリートの締固めに要する作業負荷の低減効果を評価した。

4.1 METs を用いた締固めの作業負荷の算出方法

締固めの作業負荷を算出するための指標として，国際的に広く使用される身体活動の強度を示す単位である代謝当量METs[8] (Metabolic Equivalents)に着目した。METs は，身体活動時の酸素消費量が安静時の何倍に相当するかを示すものであり，安静時座位の酸素消費量を 1METs として，その 2 倍の酸素を消費する身体活動を 2METs と表現する。また，JIS Z 8504「人間工学-WBGT（湿球黒球温度）指数に基づく作業者の熱ストレスの評価－暑熱環境」では，種々の作業をエネルギー代謝率に区分しており，赤川ら[9] はこの区分に相当する METs の推定値を**表－4** のように整理している。消費カロリーは，METs を用いることで式(1)[7] により計算することができ，この式によって締固め作業に要する消費カロリーを換算して求めるものとした。

$$\text{消費カロリー} = \text{METs} \times \text{体重} \times \text{運動時間} \qquad (1)$$



図－6　加振時間と粗骨材量比率の関係

表－4　METs と作業内容の目安 [7]

ｴﾈﾙｷﾞｰ代謝率の区分		METs	作業の内容
1	低代謝	1.7	組立て，軽い材料の区分け，運転
2	中代謝	2.8	釘打ち,しっくり塗り,軽量手押し車移動
3	高代謝	4.0	ｼｬﾍﾞﾙ作業,のこぎり,ｺﾝｸﾘｰﾄﾌﾞﾛｯｸ積み
4	極高代謝	5.0	激しくｼｬﾍﾞﾙ使用,階段を上る,走る

ここに，消費カロリー（kcal）：締固め作業に要する消費カロリー，METs：締固め作業に相当する代謝当量，体重：作業者の体重（kg），運動時間：締固め作業に要する作業時間（hour）を表す。

締固め作業に相当する METs は，締固め作業が棒状バイブレータ（5.8～11.2kg）をコンクリートに抜き挿しする動作であり，**表－4** の高代謝から極高代謝の間に該当する作業であると考え，4.5METs と仮定した。体重は，締固め作業を行う技能者の体重として，次のように設定した。平成 28 年の建設業就業者の平均年齢 44.2 歳であり，政府統計におけるその年齢の男性の平均体重より 72.8kg とした。

運動時間は，締固めに要する作業時間として，式(2)により算出した。

$$Tc = (T_V + H_{total}/V_{Vdown} + H_{total}/V_{Vup}) \times Pv / 3600 \qquad (2)$$

ここに，Tc：締固めに要する作業時間（hour），T_V：1 箇所あたりの締固め時間（sec），H_{total}：1 箇所あたりの各層における締固め作業高さの合計（m），V_{Vdown}：作業者がバイブレータを降ろす速さ（m/s），V_{Vup}：作業者がバイブレータを引き上げる速さ（m/s），Pv：締固め箇所数を表す。

1 箇所あたりの締固め時間 T_V は，配合ごとに締固め時間の差を設けるために，便宜的に，前述の加振 U 形充填試験における充填高さ 350mm までの加振時間の結果を用い，SL10 は 28.9 秒，SL20 は 9.5 秒，SF44 は 5.3 秒を作業時間とした。なお，バイブレータをコンクリートへ挿入した後の上下動作も含むものとした。バイブレータを降ろす作業および引き上げる作業に要する時間は，各層の締固め作業高さの合計 H_{total} をバイブレータの降ろす速度と引き上げる速度で除することで

表－5　流動性の異なるコンクリートの締固め作業に要する時間および消費カロリーの試算

構造条件および施工条件								配合条件および締固め方法				締固め作業※1に要する消費カロリー		
対象構造物	寸法・配筋	打込み面積	打込み数量	打込み作業高さ	作業速度	作業時間	締固め人員数	配合	締固め時間	締固め間隔	締固め箇所数	総締固め作業時間	総消費カロリー	一人あたりの消費カロリー
スラブ	L10*B10*H2m 任意箇所から投入可能 鋼材量 100～150kg/㎥ 鉄筋の最少あき 60 ㎜以上	100 ㎡	200 ㎥	2m	50 ㎥/h	4h	4 名	SL 10cm	28.9 秒	50cm	1600 箇所	14.4hour (3.6h/人)	4717kcal	1,179kcal/人
								SL 20cm	9.5 秒	50cm	1600 箇所	5.8hour (1.5h/人)	1900kcal	491kcal/人
								SF 44cm	5.3 秒	75cm	712 箇所	1.7hour (0.4h/人)	557kcal	131kcal/人
壁	L10*B1*H4m 鋼材量 200～350kg/㎥ 鉄筋の最少あき 60 ㎜以上	10 ㎡	40 ㎥	4m	20 ㎥/h	2h	4 名	SL 10cm	28.9 秒	50cm	640 箇所	6.2hour (1.6h/人)	2031kcal	524kcal/人
								SL 20cm	9.5 秒	50cm	640 箇所	2.8hour (0.7h/人)	917kcal	229kcal/人
								SF 44cm	5.3 秒	75cm	288 箇所	0.9hour (0.2h/人)	295kcal	66kcal/人

※1：バイブレータの抜き挿しおよび締固め時間のみで，打込みの準備，休憩および締固め作業中の移動は含めない。

算出した。バイブレータを降ろす速度 V_{Vdown} を 1.5m/s，引き上げる速度 V_{Vup} を 0.5m/s と仮定した。また，締固め箇所数 Pv については，スランプで管理するコンクリートでは締固め間隔を 50cm 間隔以下，締固めを必要とする高流動コンクリートでは 50～100cm 間隔を目安とすることから，SL10，SL20 の締固め間隔を 50cm，SF44 は 75cm とし，打込み面積当たりの締固め箇所数を算出した。対象とする RC 構造物は，示方書の目安を参考に打込みの最小スランプが 12cm に該当するスラブと壁について構造条件および施工条件を設定した。スラブは，幅 10m，奥行き 10m，高さ 2m，鋼材量 100～150kg/m^3，最小の鉄筋あき 60mm 以上，締固め作業高さ 2m，コンクリートの 1 層の打込み高さは 50cm とした。施工条件は，打込み・締固め速度 50m^3/h とし，締固め作業人数は 4 人とした。壁は，幅 1m，奥行き 10m，高さ 4m，鋼材量 200～350kg/m^3，最小の鉄筋あき 60mm 以上，締固め作業高さ 4m，1 層あたりの打込み高さ 50cm とした。施工条件は，打込み・締固め速度 20m^3/h とし，締固め作業人数は 4 人とした。

4.2 締固めに要する作業負荷の比較

前節にて算出した締固め作業に要する消費カロリーを構造物ごとに**表－5** に示す。SL10 の締固め作業に要する消費カロリーは，スラブで 1,179kcal/人，壁で 491kcal/人となった。SL10 に対し，スラブでは一人あたりの締固め作業時間および消費カロリーは，SL20 では 58.4%，SL44 では 88.9% 低減できる試算となった。また，壁は一人あたりの締固め作業時間および消費カロリーは，SL20 では 56.3%，SF44 では 87.4%低減できる試算となった。それぞれの流動性のコンクリートの締固め作業に要する消費カロリーを，8.3METs 相当とされる時速 8.0km/時のランニングの距離に換算すると，SL10 ではスラブで 15.6km，壁で 6.9 km に相当するのに対して，SL20 ではスラブで 6.5km，壁で 3.0km，SF44 の場合はスラブで 1.7km，壁で 0.8km と，大幅な距離の短縮となり，流動性の高いコンクリートの活用は作業負荷の低減に寄与することが定量的に示された。

5. まとめ

スランプおよびスランプフローで管理するコンクリートについて，加振時における間隙通過性，流動性を統一の試験で評価した。また，身体活動の強度を示す単位 METs を用いて締固めの作業負荷を消費カロリーに換算して，流動性が高いコンクリートの締固め作業負荷について試算した。その結果，締固め作業に要する消費カロリーは，スランプ 10cm の場合と比較して，スランプ 20cm では最大 58%程度，スランプフロー44cm は最大 89%程度の低減となり，流動性の高いコンクリートの活用は締固め作業負荷の低減効果を定量的に示すことができた。

なお，本研究は，土木学会 368 コンクリートの打込みに関わる品質の定量的評価に関する研究小委員会の活動で行ったものであること付記しておく。

参考文献

1) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編],2023 年制定
2) 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・施工指針（案）,2023,2
3) NEXCO 試験方法 第 7 編ﾄﾝﾈﾙ関係試験方法,2017.7
4) 日本建築学会 : 高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針（案）・同解説,1991.1.
5) 松本修治，倉田和英，柳井修司，坂井吾郎 : 生産性向上に資する締固め不要コンクリートの配合設計手法に関する検討, コンクリート工学, Vol.42, No.1, pp.1037-1042，2020.
6) 土木学会：施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針，2016.
7) 土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針，2012.
8) 岩根紳治,水田敏彦:用語解説 METs,栄養－評価と治療 Vol.28,No.4,pp63-65,2011
9) 赤川宏幸ら：暑熱環境下における建設作業員の心拍数の特徴に関する研究，大林組技術研究所報,No84,2020.