

コンクリート内を伝播する加速度の推定方法に関する検討

俵積田 新也^{*1}・梁俊^{*1}

Keywords : compaction, acceleration, compaction energy, vibration propagation, quantitative evaluation

締固め, 振動加速度, 締固めエネルギー, 振動伝播, 定量評価

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性や景観等の品質を確保するためには、型枠内に打ち込まれたコンクリートに対して適切な締固めを実施することが必要不可欠である。適切な締固めとは、材料分離を生じさせず型枠内に密実に充填される程度の締固めと言えるが、従来、締固めの程度については作業従事者の目視等による定性的な管理が行われており、締固めの品質は作業者の技術力に左右されると考えられる。そのため、近年では熟練技術者の大量離職などに伴う締固め品質の低下が懸念されており、適切な締固め程度を定量的に示す手法の確立が必要である。この課題に対して、筆者らは締固めエネルギーを用いて、締固めの程度を定量的に評価する手法を提案^{1)~3)}している。

締固めエネルギーとは、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であり、式(1)⁴⁾により表現される。

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

ここで、 E : t 秒間にコンクリートが受けける振動エネルギー (J/L), t : 振動時間 (s), α_{max} : コンクリートが受けける最大加速度 (振幅) の平均値 (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。

これより、算出にはコンクリートが振動締固めにより受けた加速度が必要となる。振動締固めによりコンクリートが受けける加速度は、バイブレータからの距離により減衰することが知られており

⁵⁾、また、距離による減衰の程度はコンクリートの配合により変化すると考えられる。そのため、締固めエネルギーを用いた施工管理を現場へ適用するためには、適用箇所の配合やバイブルータごとに、バイブルータからの各距離でコンクリートが受ける加速度を確認することが必要であるが、振動締固めによりコンクリートが受ける加速度の測定には大掛かりな試験と工数が必要であり、より簡易に確認できる手法が望まれる。

本稿では、既往の文献や室内試験により得られた、様々な配合におけるコンクリート内を伝播する加速度の測定結果を整理し、配合条件およびバイブルータの条件から、コンクリート内での加速度の伝播挙動を推定する手法を検討した。

2. 検討概要

2.1 推定手法

振動締固めによりコンクリートが受ける加速度の伝播については、村田ら⁵⁾により、距離による減衰のほかバイブルータとコンクリートの境界で生じる減衰などを考慮した推定式が提案されている。村田らによれば、コンクリート内での加速度の減衰には 3 種類あり、コンクリート中で振動するときの負荷による減衰 (負荷減衰)、バイブルータ近傍でコンクリートが著しく液状化し加速度の伝播が妨げられることによる減衰 (境界減衰)、コンクリートの粘性などの影響により震源からの距離に応じて次第に現れる減衰 (距離減衰) である。負荷減衰と境界減衰については、負荷の無い状態で作動させたバイブルータの加速度に係数を乗じることで表現でき、距離減衰については指數

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 先端基盤研究室

関数にて表現される場合が多い。また、距離減衰についてはバイブレータの振動が360度方向に拡散する減衰（幾何学減衰）であることを考慮する必要があり、これは、バイブルーティの震源が円筒体の場合は $x^{0.5}$ に比例する。これらを整理すると、バイブルーティからの距離 x (cm)においてコンクリートが受ける加速度は式(2)の様に表現することができる。

$$\alpha_x = aa' \alpha \times \frac{1}{\sqrt{x}} \times e^{-bx} \quad (2)$$

ここで、 α_x ：バイブルーティからの距離 x におけるコンクリートが受ける最大加速度 (m/s^2)、 α ：負荷の無い状態（コンクリートへ挿入していない状態）でのバイブルーティの加速度 (m/s^2)、 a ：境界減衰を考慮した係数、 a' ：負荷減衰を考慮した係数、 b ：距離減衰の程度を決める係数である。係数 a と a' 、 b についてはコンクリートの性状や使用するバイブルーティの種類により変化する。本稿では、室内試験等を要さずに式(2)を用いることでコンクリート内での加速度伝播を推定することを目的に、各係数を配合条件や使用するバイブルーティの種類から決定する方法を検討した。

2.2 バイブルーティの加速度および負荷減衰の推定

係数 a' 、および無負荷時におけるバイブルーティの加速度 a について、これらを乗じた $a' \alpha$ はコンクリート挿入時のバイブルーティの加速度となる。既往の報告³⁾や本稿にて計測したコンクリート挿入時のバイブルーティの加速度を図-1に示す。またバイブルーティの各性能を表-1に示す。図-1に示す近似直線より、 $a' \alpha$ はバイブルーティ径と高い相関があると考えられる。複数種類のバイブルーティや配合で検討することでより正確な推定が可能ではあるが、本検討では図中に示す近似直線である式(3)により $a' \alpha$ を推定することとした。

$$a' \alpha = 17.7\phi - 175.62 \quad (3)$$

ここで、 ϕ ：バイブルーティ径 (mm) である。

2.3 境界減衰および距離減衰の推定

係数 a と係数 b については、以降に示す、コンクリート中での加速度伝播の測定結果が報告されている各種配合を用いて、それぞれ式(2)と式(3)にて測定結果を近似した際の係数 a と b を整理し、

表-1 バイブルーティ概要

Table.1 Vibrator overview

径 (mm)	コンクリート中での 加速度 (m/s^2)	振動数 (s^{-1})	消費電力 (W)
50	700.4	200	400
60	896.7	200	500
125	2035.5	130	1500

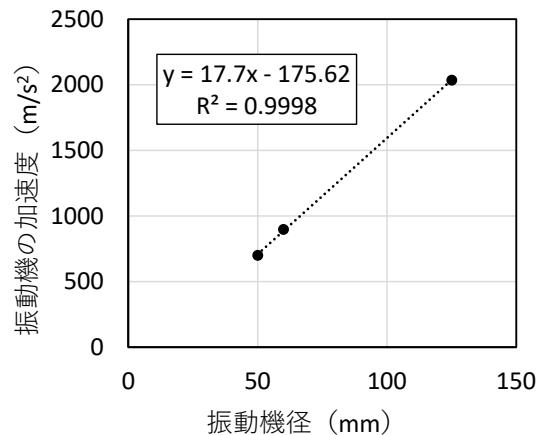


図-1 コンクリート中のバイブルーティの加速度

Fig.1 Acceleration of vibrator in concrete

配合条件との関係を確認した。表-2に今回の検討に用いた配合の一覧を示す。参考文献^{2), 3), 6)~8)}においてコンクリート中の各位置で加速度を測定した結果が報告されている。本稿ではこれらのデータに加え、表-2に示すシリーズ6の配合で新たに加速度を測定し、その結果を用いて推定方法を検討することとした。既往の文献では目標スランプ8cm～12cmの配合で検討している例多いため、シリーズ6で測定する配合は目標スランプ15cm、18cmとした。また、コンクリート中で加速度は主に粗骨材により伝播されると仮定し、細骨材率の調整により粗骨材量を変化させた配合により加速度伝播への影響を確認した。配合選定の方法は、細骨材率の増加に応じて単位水量を増加させることで目標スランプとなる様に調整した。

シリーズ1はダムコンクリートでGmax=80mm、目標スランプ3cmである。シリーズ2～6は目標スランプ5.5～18cmの普通コンクリートであり、施工性評価のために現場で使用予定の配合にて測定したシリーズ^{2), 3)}、室内試験にて同配合の混和剤添加量のみを変えスランプを調整したシリーズ⁴⁾、室内試験にて細骨材率と単位水量を調整して同スランプとしたシリーズ^{5), 6)}（本稿にて測定）がある。

シリーズ6で計測した配合を表-3に示す。配合

表-2 検討に用いた配合
Table.2 Formulations applied for consideration

シリーズ No.	配合名	振動機 径 (mm)	スランプ/ スランプ フロー- (cm)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	G (kg/m ³)	備考	文献
1	1-1	125	3.0	50.5	27.0	106	1479	・現場配合($G_{max}=80$) ・ダムコンクリート	-
	1-2		3.0	70.7	29.0	106	1476		
2	2-1	50	12.0	50.0	43.5	159	1039	・現場配合	3)
	2-2		15.0	50.0	44.0	163	1020		
3	3-1	50	17.0	41.0	47.3	169	907	・現場配合	4)
4	4-1	28	5.5	55.0	47.3	172	948	・混和剤量のみ変化 ・配合一定	5)
	4-2		8.0	55.0	47.3	172	948		
	4-3		10.5	55.0	47.3	172	948		
5	5-1	28	8.0	55.0	37.0	160	1170	・s/aとWを調整 ・スランプ一定	6)
	5-2		8.0	55.0	42.0	168	1059		
	5-3		8.0	55.0	47.0	175	952		
6	6-1	50	15.0	55.0	37.0	163	1161	・s/aとWを調整 ・スランプ一定	本稿
	6-2		15.0	55.0	40.0	165	1101		
	6-3		15.0	55.0	43.0	170	1034		
	6-4		15.0	55.0	46.0	173	973		
	6-5		15.0	55.0	49.0	177	910		
	6-6		18.0	55.0	37.0	164	1159		
	6-7		18.0	55.0	40.0	168	1093		
	6-8		18.0	55.0	43.0	173	1027		
	6-9		18.0	55.0	46.0	178	962		
7	7-1	50	45.0	50.0	55.0	170	807	・W/Cとs/aを調整 ・スランプフロー一定 ・7-5は増粘剤使用	7)
	7-2		45.0	45.9	55.0	170	797		
	7-3		45.0	54.8	55.0	170	820		
	7-4		45.0	50.0	45.0	170	951		
	7-5		45.0	54.8	55.0	170	820		
	7-6		45.0	50.0	63.0	170	664		

表-3 シリーズ6の配合

Table.3 Series 6 formulation

配合	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
6-1	15	4.5	55	37	163	296	672	1161
6-2				40	165	300	723	1101
6-3				43	170	309	768	1034
6-4				46	173	315	816	973
6-5				49	177	322	861	910
6-6	18	4.5	55	37	164	298	670	1159
6-7				40	168	305	718	1093
6-8				43	173	315	763	1027
6-9				46	178	324	807	962

は水セメント比を55%で一定とし、細骨材率を37%～49%の間で変化させ、いずれも目標スランプ15cm, 18cmとなる様に単位水量を調整することで選定した。材料に普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm²）、細骨材に君津産山砂（表間密度2.62g/cm²、吸水率2.06%、F.M.2.62）、粗骨材に

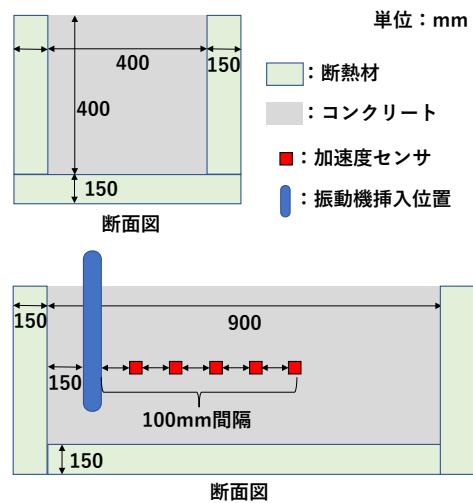


図-2 加速度の測定方法概要

Fig.2 Overview of acceleration measurement methods

青梅産砂岩碎石（表間密度2.66g/cm³、吸水率0.75%、F.M.7.09、実積率60.0%）を使用した。測定概要を

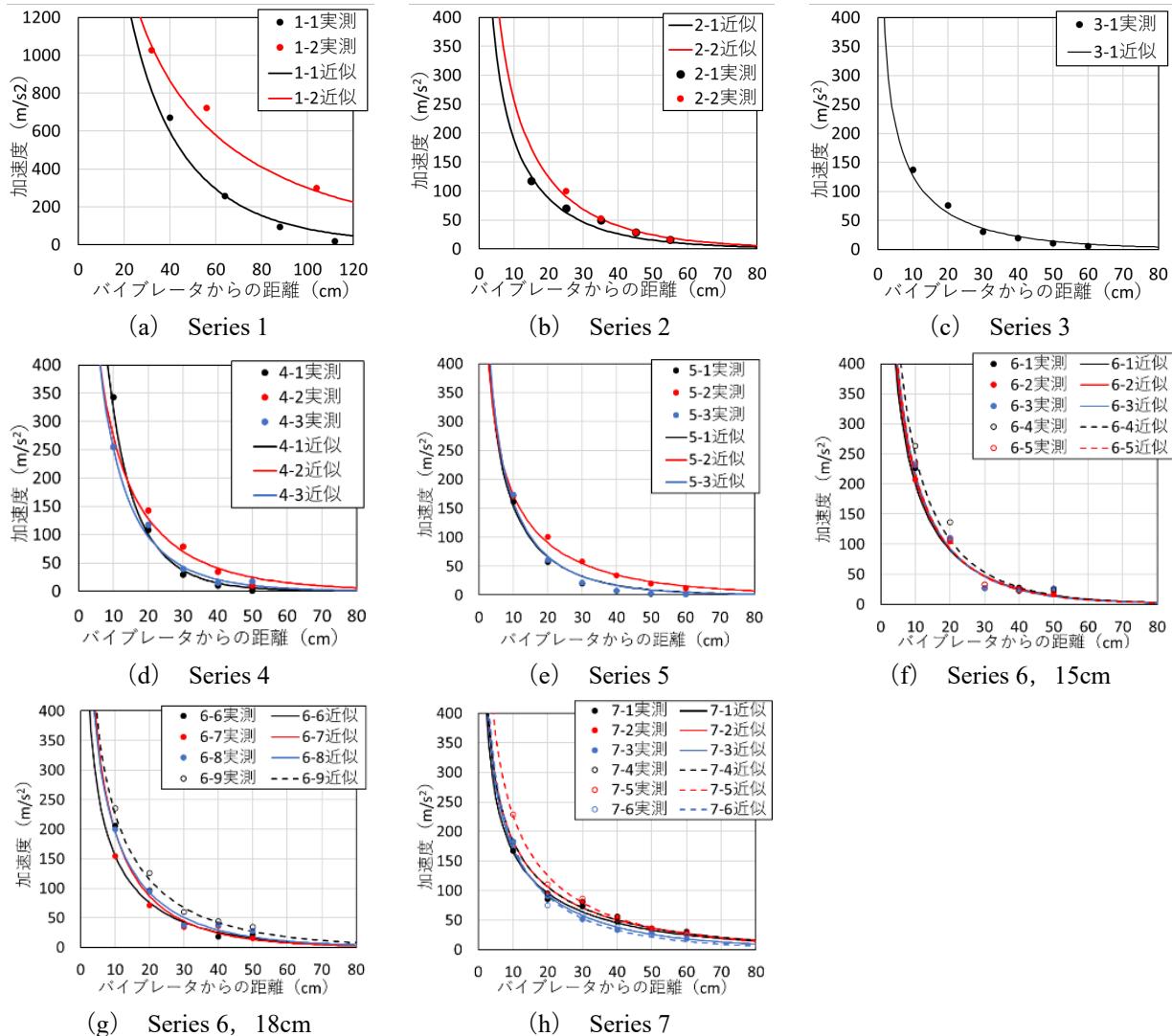


図-3 加速度伝播の測定結果と近似曲線の作成結果

Fig.3 Acceleration propagation measurements and trendline creation results

図-2に示す。使用したバイブレータは直径50mm、振動数200~240Hz、出力400Wであり、バイブルレータから10cm間隔で5箇所の加速度を計測した。型枠や、型枠で反射する振動の影響を抑える断熱材の寸法は既往の測定方法^{2), 3)}を参考した。

シリーズ7⁸⁾は締固めを必要とする高流動コンクリートであり、全て目標スランプフロー45cmであるが、水セメント比や細骨材率の調整、増粘剤の使用などの調整により粘性や分離抵抗性などの性状を変化させている。

3. 推定手法の検討

3.1 境界減衰および距離減衰の推定方法

図-3に各シリーズの加速度伝搬の測定結果と式

表-4 近似線作成結果

Table.4 Approximate line creation result

配合名	スランプ (cm)	係数 a	係数 b	決定係数 R^2	配合名	スランプ (cm)	係数 a	係数 b	決定係数 R^2
1-1	3.0	5.0	0.025	0.97	6-3	15.0	1.6	0.050	0.97
1-2	3.0	4.0	0.010	0.96	6-4	15.0	1.8	0.049	0.96
2-1	12.0	1.3	0.043	0.93	6-5	15.0	1.6	0.050	0.98
2-2	15.0	1.7	0.039	0.98	6-6	18.0	1.0	0.037	0.98
3-1	17.0	0.8	0.035	0.97	6-7	18.0	1.4	0.047	0.99
4-1	5.5	7.0	0.080	0.99	6-8	18.0	1.3	0.040	0.98
4-2	8.0	4.0	0.040	0.98	6-9	18.0	1.4	0.033	0.99
4-3	10.5	4.5	0.060	0.99	7-1	24.0	0.9	0.020	0.98
5-1	8.0	2.5	0.050	0.98	7-2	24.0	1.0	0.020	0.98
5-2	8.0	2.3	0.030	0.99	7-3	24.0	1.0	0.027	0.99
5-3	8.0	2.7	0.053	0.98	7-4	24.0	1.0	0.020	0.98
6-1	15.0	1.4	0.045	0.95	7-5	24.0	1.3	0.025	0.99
6-2	15.0	1.5	0.047	0.98	7-6	24.0	1.1	0.033	0.97

(2)・式(3)を用いて作成した近似線を、表-4に近似線作成時の係数aと係数bを示す。いずれの配合でも式(2)、式(3)にて決定係数0.9以上の精度で近

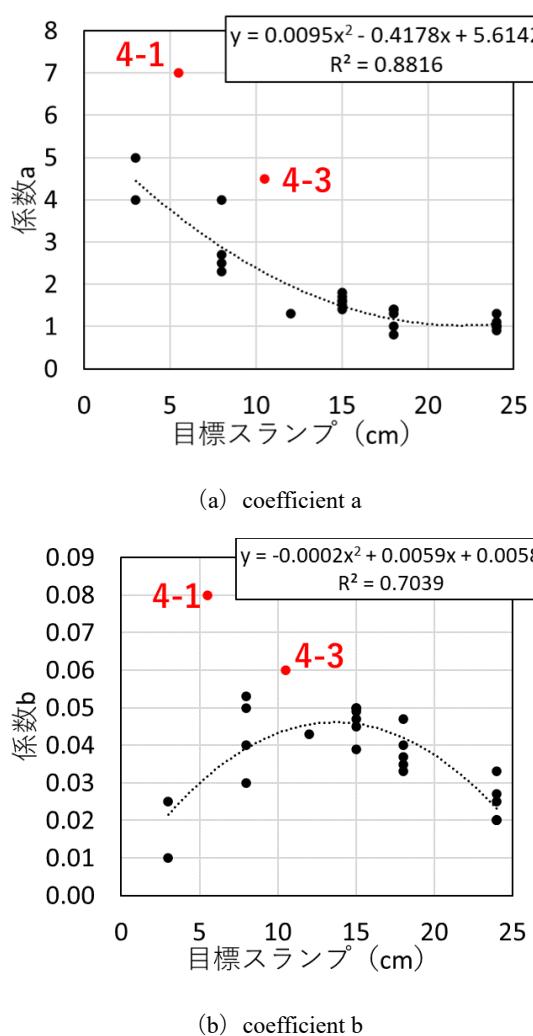


図4 目標スランプと各係数の関係
Fig.4 Relationship between target slump and each coefficient

似線を作成することが可能であった。図4に目標スランプと係数a, bの関係を示す。同図においては、スランプフロー45cmである締固めを必要とする高流動コンクリートをスランプコンクリートと同様に比較するため、スランプ試験の試料容積でフロー45cm、上面20cmの場合の高さを算出した結果であるスランプ24cmとして示した。上面の直径を20cmで仮定しているため、実際のスランプと多少異なると考えられるが、本検討ではスランプ24cmとして比較検討に用いた。

係数aはスランプが小さいほど高い傾向を示しており、スランプが小さい配合ほどバイブレータからコンクリートに伝わる際の加速度の減衰は小さい結果であった。目標スランプが低く単位水量が低下することにより、振動により液状化し加速度の伝播を妨げるペースト分が減少したことが要因の一つだと考えられる。境界減衰の程度を示す

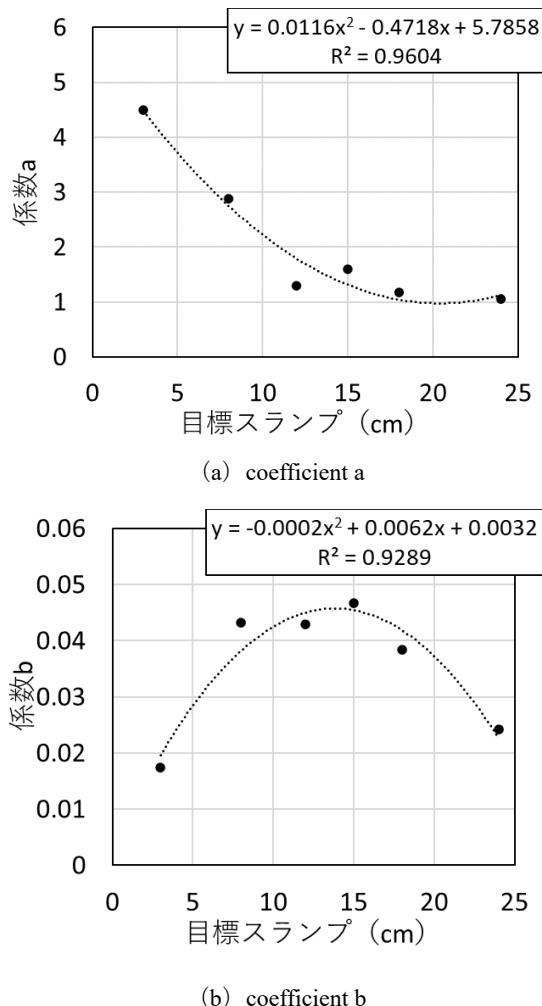


図5 目標スランプと各係数の関係式
Fig.5 Relationship between target slump and each coefficient formula

係数aが1以上の場合、加速度は増加していることになるが、バイブルレータ近傍では前述の通り著しく液状化する領域が存在するため、その領域においては同一式での表現が困難だと考えられる⁵⁾。この領域の範囲や領域内での加速度の評価については今後検討する必要がある。

係数bについては、スランプ15~22cmにおいてはスランプが低いほど大きい値を示し、スランプ5.5~12cmについてはスランプが低い程小さい値を示す結果であった。一方で図中の赤色で示している配合4-1については他と大きく異なる傾向を示している。文献6)では、スランプ8cm(本稿における配合4-2)を基準配合とし、混和剤添加量のみを変化させスランプを5.5cmに調整している。つまり、今回検討している他配合と異なり、目標スランプと細骨材率の条件に対して最適な単位水量でない配合と考えられる。この様な混和剤の添

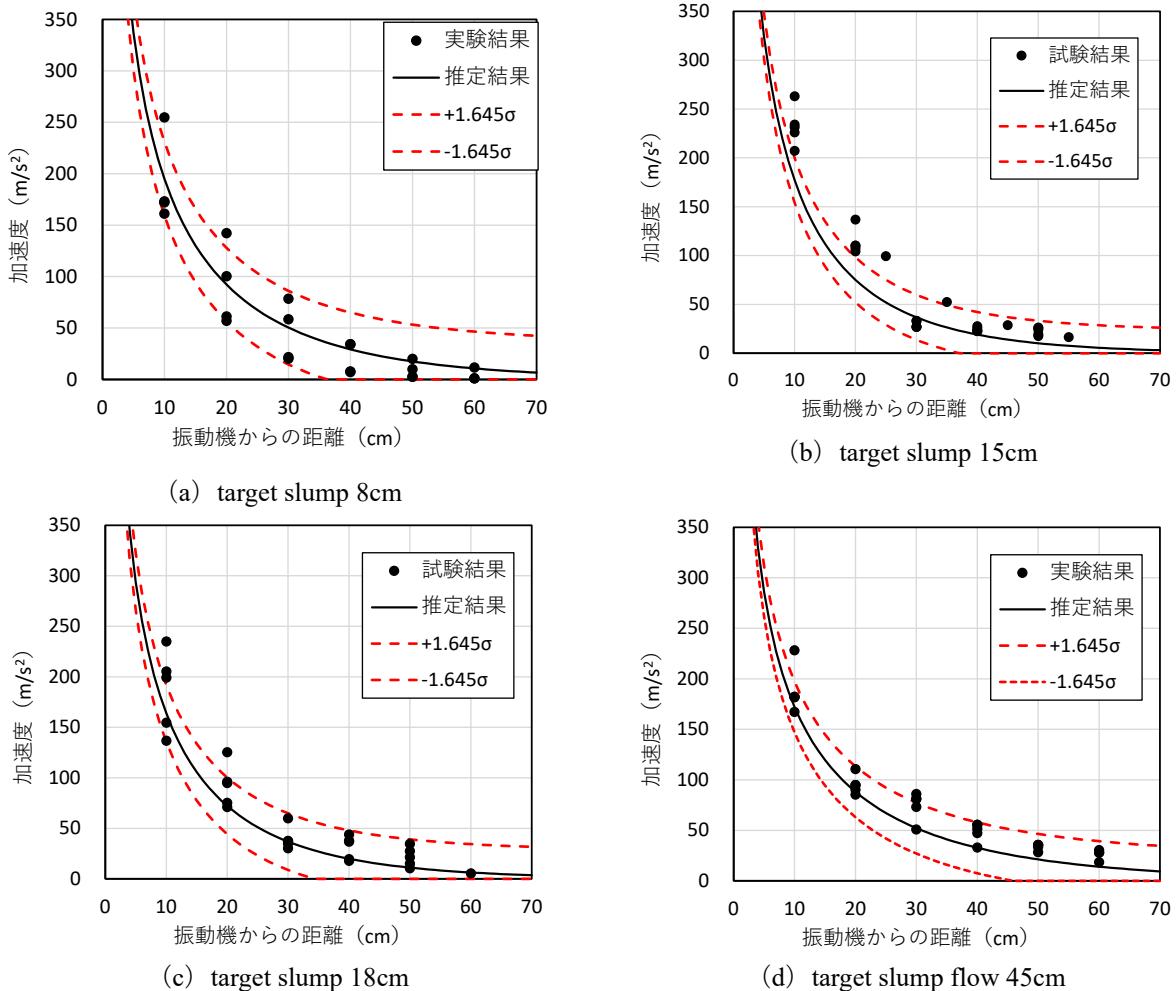


図-6 推定結果

Fig.6 Estimation results

加量のみでスランプを調整した配合のため、加速度伝播の傾向が異なる結果となったと考えられる。そこで、本稿では、以降の推定方法の検討において、配合4-1および4-3を除いた配合にて検討を進めることとした。図-3に示す近似曲線は上記2配合を除くデータから作成されているが、係数bについては目標スランプ14cmあたりで最も大きく、加速度の距離減衰の程度は大きくなる結果であった。低スランプの配合については加速度伝播の媒体となる粗骨材量が多いいため、加速度伝播の距離減衰程度が小さくなると考えられる。スランプが高く締固めを必要とする高流動コンクリートに近づく配合においても同様の傾向を示したが、この要因については今後検証する必要がある。図-3に示す通り、スランプは加速度の伝播に影響を与えるパラメータであるが、水セメント比や細骨材率等により同目標スランプ内でも多少の変化が生じると考えられる。

図-5に、各目標スランプにおける全配合の係数

a, b を平均した結果を示す。同図では、上記理由から配合4-1（目標スランプ5.5cm）と4-3（目標スランプ10.5cm）を除いたデータにて、目標スランプと各係数の関係を表す近似曲線を示した。図-5に示す近似曲線は式(4), 式(5)で表され、両式を用いることで配合の目標スランプのみから係数を設定することができる。

$$a = 0.0116SL^2 - 0.472SL + 5.79 \quad (4)$$

$$b = (-0.2SL^2 + 6.2SL + 3.2)/1000 \quad (5)$$

ここで SL : コンクリートの目標スランプ (cm) である。

以上の検討から、式(2)～式(5)を用いることで、バイブレータ径と配合の目標スランプのみからコンクリート内の各位置における加速度を推定することが可能となる。

表-5 推定結果の精度と各スランプの標準偏差
Table.5 Accuracy of the estimation results and the standard deviation of each slump

目標スランプ(cm)	係数a	係数b	R2	標準偏差 σ
8	2.88	0.040	0.868	21.82
15	1.49	0.049	0.923	17.99
18	1.17	0.047	0.856	17.82
24(SLF45)	1.06	0.032	0.899	15.98

3.2 推定精度の検証

本稿で示している推定手法はコンクリートの配合条件としては目標スランプのみを用いているため、水セメント比などのその他条件による影響が反映されておらず、これによる推定誤差が生じると考えられる。この推定誤差について、各目標スランプにて確認した。確認には、目標スランプ8cmの4配合(4-2、シリーズ5)、目標スランプ15cmの6配合(2-2、6-1~6-5)、目標スランプフロー45cmの6配合(シリーズ7)を用いた。コンクリート標準示方書⁹⁾では、バイブレータの挿入間隔の目安を50cm程度としている。そのため、締固めエネルギーを用いて充填完了範囲等を検討するうえで特に重要なのはバイブルーテタからの距離25cm前後やそれ以後と考えられる。そこで、バイブルーテタからの距離15cm以降の範囲において(バイブルーテタからの距離10cmのデータを除いた)試験結果の実測値と推定値の二乗誤差から標準偏差 σ を算出した。

各目標スランプにおいて、式(2)～式(5)を用いてコンクリート内での加速度を推定した結果を図-6に、各係数と決定係数、標準偏差 σ を表-5に示す。いずれも決定係数は0.85以上の推定精度であった。図-6には得られた標準偏差を用いて、バイブルーテタから15cm以降における測定結果の90%を網羅できる範囲として、推定値から $\pm 1.645\sigma$ の曲線を参考に示した。各目標スランプの標準偏差 σ は15.98～21.82(m/s²)であり、平均して18.40m/s²、 1.645σ の場合30.27m/s²である。これを締固めエネルギーで表すと、バイブルーテタの振動数220Hz、振動時間15秒の場合で3.6J/Lとなる。実際の施工管理に活用する場合には上記の推定誤差を考慮する必要がある。

上記の推定誤差は、水セメント比や粗骨材量など今回考慮していない配合条件の影響によるものと考えられる。これらの影響を精査することで推定の精度を向上できる可能性がある。また、本検討ではケース数が少ないため明確な傾向は確認さ

れなかったが、ダムコンクリート等の粗骨材最大粒径が異なる配合においても精査が必要である。このほか、コンクリート内での加速度測定は、加速度センサ周辺の粗骨材分布状況によりばらつくことが考えられ³⁾、これにより推定結果と差が生じたことが考えられる。

4. まとめ

本稿では各種配合のコンクリートにて測定された、振動締固めによる加速度の伝播結果を整理し、配合条件とバイブルーテタ条件から加速度の伝播を推定する手法を検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 振動締固めによりコンクリートが受ける加速度は、目標スランプにより変化する可能性が示唆された。
- (2) 目標スランプが同じ場合でも、水セメント比や粗骨材量などの影響によりコンクリート内の加速度伝播傾向は異なる。
- (3) 今回の検討の範囲では、スランプ14cmで最も距離減衰が大きくなり、スランプが小さいほど、またはスランプが大きいほど距離減衰が小さくなる傾向であった。この要因については今後検討する必要がある。
- (4) 式(2)～式(5)、使用するバイブルーテタ径と配合の目標スランプから、バイブルーテタからの各位置におけるコンクリートが受ける加速度を推定する手法を提案した。
- (5) 本稿で提案した手法は推定誤差を含むものであり、これを考慮する必要がある。目標スランプ以外の条件についても影響を検討することでより推定の精度が高まる可能性がある。

参考文献

- 1) 俵積田新也、梁俊、直町聰子、古賀快尚：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、コンクリート工学会年次論文集、Vol.45, No.1, pp.760-765, 2023.7
- 2) 梁俊、丸屋剛、坂本淳、井櫻潤二：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、Vol.75, No.2, pp.142-156, 2019.2
- 3) 俵積田新也、赤松篤、梁俊、原田拓也：締固め作業が制限される箇所における充填性評価手法の検討、コンクリート工学会年次論文集、Vol.44, No.1, pp.310-315, 2022.7
- 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) 村田二郎：コンクリート振動機の知識，コンクリート工学，Vol.33, No.8, pp.26-34, 1995.8
 - 6) 永山剛, 宇治公隆, 上野敦, 大野健太郎：振動締固め時の応答加速度に着目したフレッシュコンクリートの鉄筋間隙通過性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1393-1398, 2017.7
 - 7) 古川凌輔, 宇治公隆, 上野敦, 大野健太郎：配合が相違するコンクリートの締固め特性に及ぼす配筋ならびに締固め条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1545-1550, 2016.7
 - 8) 直町聰子, 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
 - 9) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕, pp.1-2, 2023.