

論文 締固め完了エネルギーによるコンクリートの締固め性の評価方法に関する研究

梁 俊^{*1}・丸屋 剛^{*2}・坂本 淳^{*3}・吉澤 崇幸^{*4}

要旨：内部振動機の挿入間隔及び振動時間はコンクリートの締固めに大きく影響する。また、コンクリートのスランプの変化、鉄筋の配置状況などにより締固めに必要な振動時間と挿入間隔は相違する。本研究では、実構造物をモデル化した要素試験体を用いて、コンクリートのスランプをパラメータとし、内部振動機をコンクリート中で振動させることにより累積された振動エネルギーが、コンクリートの締固めを完了するのに必要なエネルギー以上となった範囲を締固め完了範囲とすることで鉄筋コンクリートの締固め完了範囲を評価し、施工に使用したコンクリートが必要とする内部振動機の挿入間隔と振動時間を定量的に評価する方法を提案した。

キーワード：スランプ、締固め完了エネルギー、加速度、挿入間隔、振動時間

1. はじめに

内部振動機の挿入間隔及び振動時間はコンクリートの締固めに大きく影響する。一般に、同一配合のコンクリートにおいて、振動時間を長くするほど締め固めされる範囲は大きくなると言われるが、振動時間と締固め範囲が線形的な関係ではないため、内部振動機を一箇所に挿入して締固めを行う場合、締め固められる範囲には限度がある。したがって、施工計画で、内部振動機の種類と振動時間が決められた場合、内部振動機の挿入間隔を決める必要がある。土木学会コンクリート標準示方書を含む、日本におけるコンクリートの締固めに関する主な基準では、内部振動機を使用する場合の締固め時間や締固め間隔、締固め終了の目安が記述されている¹⁾。しかしながら、それらは、いずれも振動時間、有効範囲、打ち込み方法についての定性的表現に止まっており、理論的根拠に乏しいので、多くの施工現場においては現場作業員の経験的判断にゆだねられているところが多く、施工欠陥を引き起こす場合がある。

内部振動機の締固め効果に関する研究はこれまでも数多く行われており、振動機の周波数、振動時間、コンクリートの性質など、さまざまな要因と締固め特性との関係が研究されている^{2), 3)}。Kolek は、締固めを支配する要因として加速度、締固め時間およびワーカビリティを指摘し、締固め率と締固め時間との関係を締固め関数と称して定式化している⁴⁾。村田は、最大運動エネルギーと締固め時間の積を締固め仕事量の指標として、圧縮強度との関係を締固め関数として表している⁵⁾。また、岩崎は、内部振動機によるコンクリートの締固めを

液状化として捉え、振動時間と締固め完了域、さらに型枠や鉄筋などが液状化作用に及ぼす影響を理論的に検討している⁶⁾。

一方、國府らは、超硬練りコンクリートを対象に、コンクリートの締固めをエネルギーの観点から評価する方法 (JSCE F 508) を提案している⁷⁾。しかし、超硬練りコンクリートに比べて流動性の高い通常のコンクリートでは、打ち込んだ時点である程度の充填性があるため、JSCE F 508 に規定されている方法では、振動を与えると直ちに空隙が排除されて締固めが完了し、通常のコンクリートには適用できない。そこで、梁らは、超硬練りコンクリートの評価手法をもとに、締固め度を締固めの進行程度の指標として、スランプ 5cm~15cm 程度のコンクリートの変形挙動を締固めエネルギーの観点から定量的に評価できる室内試験方法を提案している^{8), 9)}。

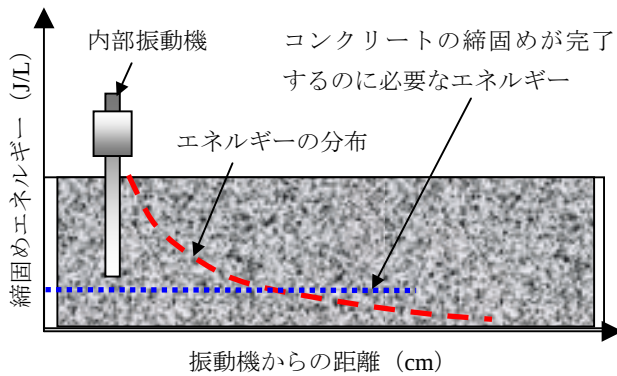
本研究では、実構造物をモデル化した要素試験体を用いて、コンクリートのスランプをパラメータとし、コンクリートの締固め完了エネルギーから施工に使用したコンクリートが必要とする内部振動機の挿入間隔と振動時間を定量的に評価する方法を検討した。

2. 検討方法および試験装置

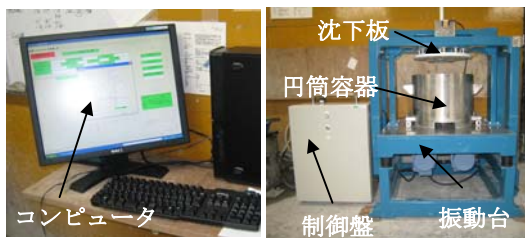
2.1 締固め完了範囲の判断

コンクリートを締め固めるにはエネルギーが必要であり、一般には内部振動機をコンクリート中で振動させることにより、そのエネルギーは与えられる。振動機による振動をコンクリートに与え続けると、そのエネルギーは累積されるが、振動機から距離が遠い程、累積され

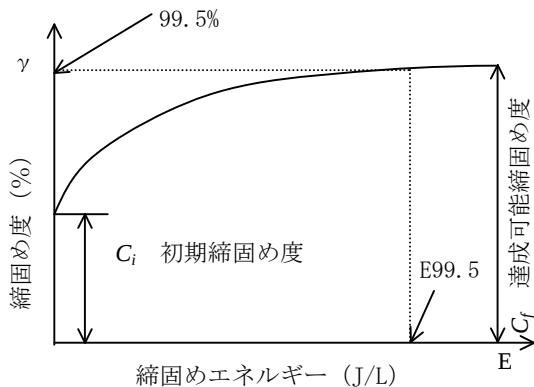
*1 大成建設 (株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 副主任研究員 博士 (工学) (正会員)
 *2 大成建設 (株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 室長 博士 (工学) (正会員)
 *3 大成建設 (株) 技術センター 土木技術開発部 土木技術開発プロジェクト室 主任研究員 工修 (正会員)
 *4 大成建設 (株) 土木本部 プロジェクト部 第三プロジェクト室 課長



図－１ 検討方法の概念図



図－２ 締固め試験装置



図－３ 変形進行曲線の模式図

るエネルギーは小さくなるので、振動機からの距離によるエネルギーの分布は図－１のように示すことができる。累積されたエネルギーが、コンクリートの締固めを完了するのに必要なエネルギー以上となる範囲を締固め完了範囲とする。

2.2 締固め完了エネルギー

コンクリートの締固め完了エネルギーを測定する試験装置を図－２に示す。逆回転偏心モータ２台を備え、一定振幅により振動する振動台、データを記録するためのコンピュータ、振動台の振動数を変化させて加速度を調節するための制御盤の３点から構成されている。直径が240mmの試験容器の中でスランブ試験を行い、振動台にセットして振動をかける。その際に試料の上面の沈下量と振動台の加速度、振動数を記録する。

コンクリートの締固め性は、コンクリートのコンシス

テンシーに応じた締固め前における型枠中のコンクリートの見掛けのかさ密度から、コンクリートの配合の理論密度に至る変形の容易さを表すものと考えることができる。そこで、締固めの程度は、円筒容器中の試料の最も高い部分を高さとする円筒体積に対するコンクリート試料の真の体積の比として捉え、これを締固め度 γ と定義する。締固め度 γ は式(1)により表すことができる⁶⁾。

$$\gamma = H_0/h \times 100 = ((m/\rho)/A)/h \times 100 \quad (1)$$

ここに、 γ ：締固め度(%), H_0 ：配合に基づく理論上の単位容積質量まで締め固められた時の試料の高さ(mm), h ：任意の締固め時間における試料の高さ(mm), m ：試料の質量(kg), ρ ：試料の単位容積質量(kg/L), A ：円筒容器の底面積(mm²)

変形進行曲線を式(2)に示す。なお、式中の各係数は図－３の模式図に対応する。

$$\gamma = C_i + (C_f - C_i)[1 - \exp(-bE^d)] \quad (2)$$

ここに、 γ ：締固めエネルギー E におけるコンクリートの締固め度(%), C_i ：初期締固め度(%), C_f ：締固めエネルギーを無限大とした時の達成可能な締固め度(%)(硬練りコンクリートの場合は必ず締固めることができるので、 C_f は100%と考えてよい), b, d ：実験定数
一方、締固めエネルギーは式(3)により求めることができる⁵⁾。

$$E_t = \rho \alpha_{max}^2 t / 4\pi^2 f \quad (3)$$

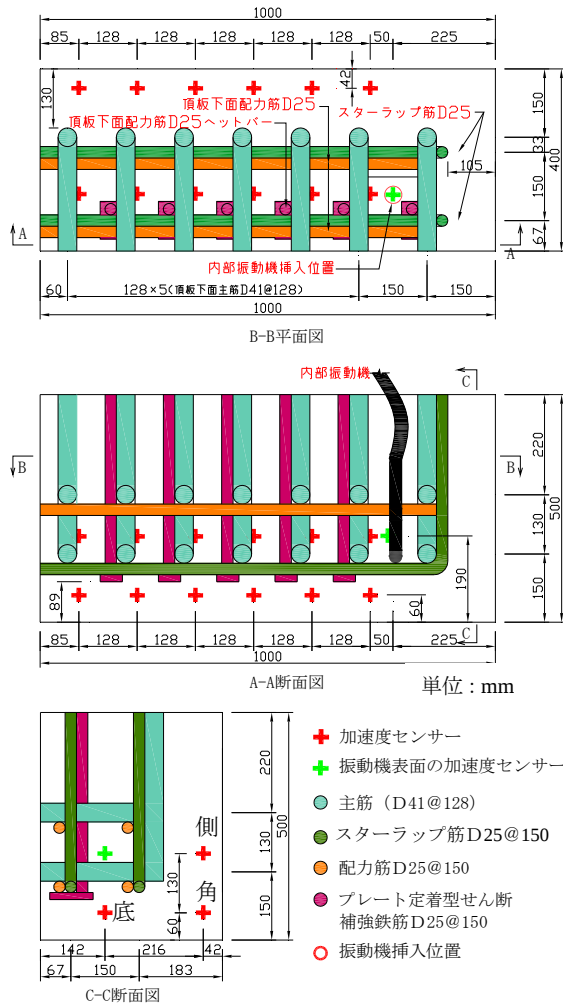
ここに、 E_t ： t 秒間にコンクリートが受ける締固めエネルギー(J/L), t ：振動時間(s), α_{max} ：最大加速度(m/s²), f ：振動数(s⁻¹), ρ ：試料の単位容積質量(kg/L)

本研究では、締固めを終了してもよいとされる締固め度を、締固めが十分になされたと見なしてよい99.5と設定し、締固め度99.5%までに与えられたエネルギーを締固め完了エネルギー(E99.5)と定義した⁸⁾。

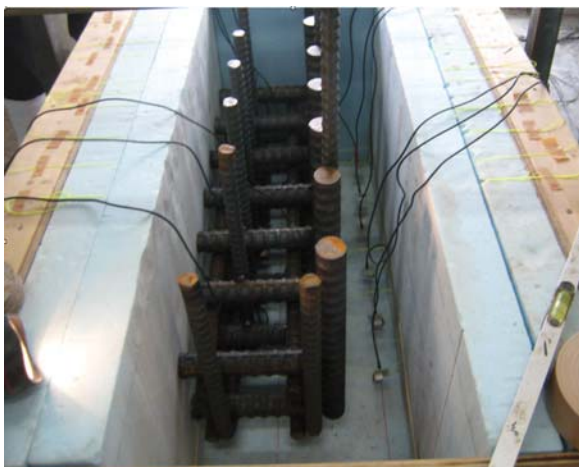
2.3 加速度伝播の測定

コンクリートに累積されるエネルギーは式(3)により求めることができる。既往の研究によると⁵⁾、伝播中の振動波の振動数はほとんど変化しないので、振動時間を一定にした場合、エネルギーは加速度 α_{max} の関数である。したがって加速度の分布を求めるとエネルギーの分布を求めることができる。

図－４に示す実構造物の高密度配筋部材と同等の配



図－４ 鉄筋の配置および加速度センサーの配置



写真－１ 配筋および加速度センサー配置状況

筋条件にした模擬試験体を用いて、内部振動機からの距離における加速度の分布を測定した。写真－１に鉄筋の配置および加速度センサーの設置状況を示す。実構造物と同じ配筋条件となるように、型枠内には、主鉄筋 D41@125 の二段配筋，配力筋 D25@125 の鉄筋に加えて、

表－１ 使用材料

種類		品質
セメント(C)		高炉B種:密度 3.04g/cm ³
細骨材	S1	千葉県君津産山砂:表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 1.58%
	S2	高知県鳥形山産石灰砕砂:表乾密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 1.06%
粗骨材	G	高知県鳥形山産石灰砕石 (G _{MAX} 20): 表乾密度: 2.70g/cm ³ , 吸水率 0.60%
混和剤(Ad)		AE 減水剤 (標準型)

表－２ コンクリートの配合

配合 (スラン プ)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m³)					AE 減水 剤 (C×%)
			水 W	セメ ント C	細骨材 S		粗骨材 G	
					S1	S2		
8cm	50	44.9	150	300	490	338	1050	0.85
12cm	50	45.3	156	312	488	335	1029	0.50
15cm	50	45.5	162	324	482	333	1010	0.85

D25 のスターラップ筋，D25 の配力筋，スターラップ筋である D25 のプレート定着型せん断補強鉄筋を設置した。かぶりの厚さは側面が 130mm，底面が 89mm である。加速度センサーの取付け位置として，図－４に示すように，加速度の減衰が著しいと思われる底面のかぶり部，側面かぶり部および側面と底面角部に設置した。加速度センサーは 128mm 間隔で配置した。加速度センサーの寸法は L14.0×W14.0×H17.4mm で，加速度センサーの容量は，内部振動機表面のが 200G，内部振動機から 10cm 離れた箇所のが 50G，20cm 離れた箇所のが 20G，その他の箇所のが 10G である。なお，測定軸方向は振動機からの水平方向を測定軸方向とした。φ60mm の内部振動機の先端を型枠の底面から 90mm の位置まで挿入して締固めを 15 秒間行なった。締固め時間の設定においては，コンクリート標準示方書に決められた締固め時間の最大値である 15 秒¹⁾に設定した。内部振動機の先端から 100mm の位置に加速度センサーを取り付けて，振動機表面の加速度も測定した。

3. 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表－１に示す。水セメント比を 50%一定とし，細骨材率を 45%程度として単位水量を変化させてスランプ 8，12，15cm の配合を選定した。なお，コンクリートの状態を最適にするため，細骨材率は微調整を行った。コンクリートの配合を表－２に示す。

4. 締固め完了エネルギーによる模擬試験体の締固め完了範囲の評価結果

図-2に示す締固め試験装置を用いて、各配合のコンクリートの締固め完了エネルギーを測定した。試験結果を示す測定装置のモニター画面の写真を図-5に示す。緑色の曲線がスランプ15cm、赤色の曲線がスランプ12cm、紺色の曲線がスランプ8cmの変形進行曲線である。また、コンクリートのフレッシュ性状と単位容積質量、およびコンクリートの締固め完了エネルギーを表-3に示す。締固め完了エネルギーがスランプの増加により小さくなっていることがわかる。配筋および型枠の形状の影響により、試験体内部の各部位に伝わってくる加速度は相違する。特に伝わってきた加速度の減衰が大きいかぶり部では、側面、底面、角部に着目し、測定された加速度と振動時間から振動時間内で累積された締固めエネルギーを計算することで内部振動機からの距離と締固めエネルギーの関係を評価した。以下に、スランプ8cmのコンクリートを用いた場合の底面における締固め完了範囲の評価を一例として、コンクリートの配合に固有な締固め完了エネルギーと振動機からの距離による締固めエネルギーの分布から締固め完了範囲を求める方法を説明する。

内部振動機は振動機内部の偏錘の回転により振動するため、鉛直線を中心に回転しながら振動する。したがって、一定の方向に対しての加速度の変化は、sin 曲線で示すことができる。しかしながら、フレッシュコンクリートの材質の不均一さ、加速度センサーと粗骨材の衝突などにより、実測した sin 曲線の振幅は一定ではなく乱れがある。本研究では、15 秒間の sin 曲線の振幅を平均した sin 曲線の平均振幅を各加速度計が測定した最大加速度とした。底部にセットした各加速度センサーが測定した加速度から計算した内部振動機の中心からの距離に応じた最大加速度の分布を図-6に示す。内部振動機からの距離による加速度の分布はコンクリートのスランプの大小により明らかに変化しているとは言えない。

そこで、式(3)により、スランプ8, 12, 15cmのコンクリートを用いた場合の加速度センサーがセットされている各点における締固めエネルギーを求めた。図-7に底部におけるエネルギーの分布を示した。図-7の点線が示すように、締固め完了エネルギー相当の累積エネルギーを受けた位置までを締固め完了範囲とした。同様の手法により、型枠の側部および角部について各スランプの締固め完了範囲を評価した結果を表-4の計算値欄に示す。各スランプにおいて、締固め完了範囲が最小である底部の締固め完了範囲をその配合の締固め完了範囲とした。

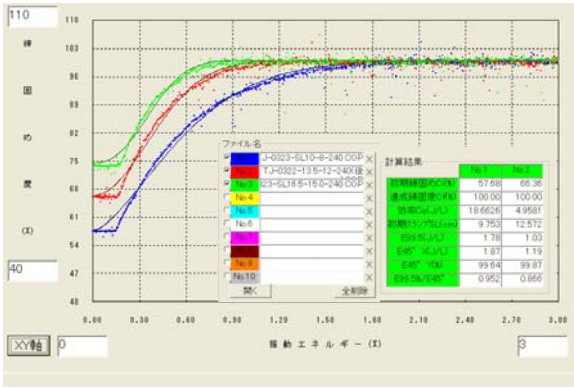


図-5 測定結果を示すモニタの画面

表-3 フレッシュ性状と締固め完了エネルギー

配合区分	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	単位容積質量 (t/m ³)	締固め完了エネルギー (J/L)
スランプ 8cm	9.0	5.1	20	2.317	1.78
スランプ 12cm	12.0	4.8	19	2.321	1.03
スランプ 15cm	15.0	4.5	20	2.324	0.78

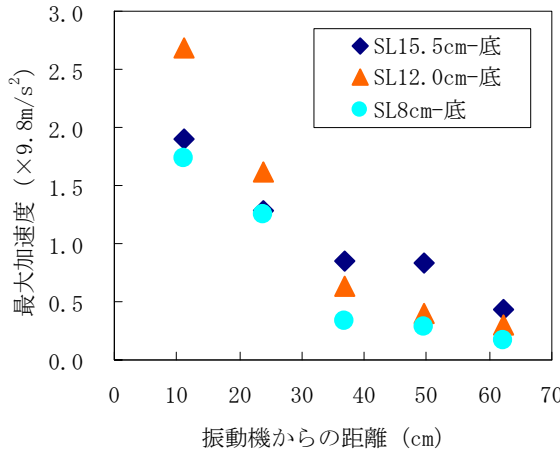


図-6 最大加速度の分布

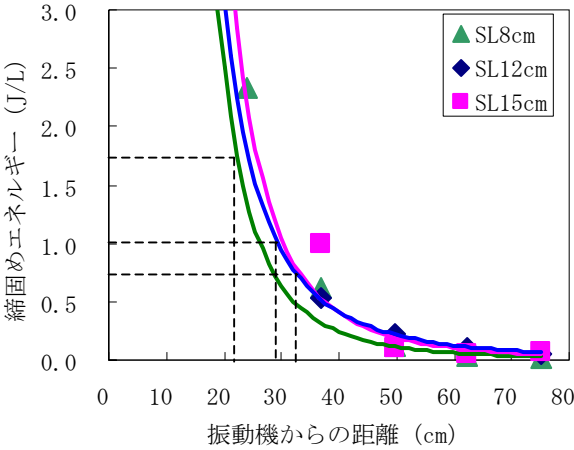


図-7 締固めエネルギーの分布（底部）

5. 硬化試験体による締固め完了範囲の確認

前章で述べたように、測定された最大加速度により求めた内部振動機からの距離に応じた締固めエネルギーの分布と使用したコンクリートの締固め完了エネルギーから、任意のスランブのコンクリートと一定の振動時間における内部振動機の締固め完了範囲を計算することができる。この計算方法で計算した締固め完了範囲と実際の締固め完了範囲を比較するため、加速度センサーを設置せずに前章と同様な型枠・配筋・締固め条件で試験体を作製し、硬化後の試験体の締固め状況を確認した。

現実の打込みに近い状態でコンクリートを型枠内に打設するため、φ100mm のポンプ配管先端を想定し、写真-2 の写真 A に示すように、先端をカットして開口が φ100mm としたカラーコーンを使用して打設を行った。カットしたコーン端面(φ100 側)は型枠底面から 500mm 程度の高さにセットしてコンクリートを打設した。140L

のコンクリートをバケツにより 11 回に分けて(約 13L/回) カラーコーンを通じて型枠内に投入した。本研究では、投入したコンクリートが締固められて配合から理論的に計算した密度に達した状態を締固め完了と定義している。したがって、140L のコンクリートを L1000×W400×H350 の型枠に投入した場合、完全に締固めができて配合から理論的に計算した密度に達したとすれば、鉄筋の体積を考慮してもその高さは 36.5cm になるべきである。一例として、スランブ 8cm のコンクリートを使用した場合の試験体の打設状況を写真-2 に示す。

試験体に対して、側面充填状況、カット面状況、および上面の試料盛り状況から締固め完了範囲を以下、考察する。なお、試験体はセンターラインに近い線に沿ってカットした。写真 B が投入後の状況、写真 C が締固め後の上面状況、写真 D が脱型後側面の状況である。側面の充填状態から見ると振動機の挿入位置からの水平距離で 45cm、直線距離 49cm のところまで充填されたように見える。また、硬化後試験体のカット面の状況を写真-3 に示す。写真 A がカット面の状況である。カットされたかぶり部を振動機からの距離の 12.8、25.6、38.4、51.2cm の位置で横断方向に切断して試験体かぶり部の充填状況を確認した。切断したかぶり部を写真 B にその詳細を写真 C に示す。振動機からの距離の 12.8cm までの断面には、不充填部が発現されなかったが、写真 C に示すように、振動機からの距離の 25.6cm の断面には、明らかな不充填部が発現された。これは、締固め十分と締固め不十分の境が 12.8～25.6cm の間である可能性が

表-4 締固め完了範囲の計算値および実測値

スランブ(cm)		8.0	12.0	15.0
計算値	計算値(底)(cm)	22.2	29.3	33.1
	計算値(角)(cm)	24.2	32.3	39.0
	計算値(側)(cm)	26.5	34.7	36.3
測定値	側面充填状態(cm)	45.0	50.0	75.0
	上面盛り状態(cm)	21.0	30.0	37.5
	カット面充填状態(cm)	12.8～25.6	25.6～38.4	38.4～51.2

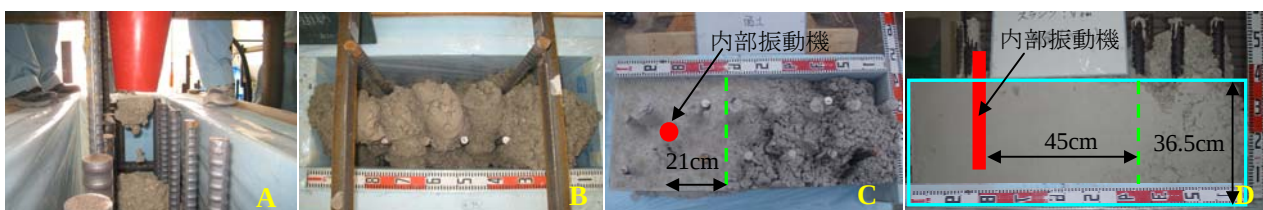


写真-2 コンクリートの投入状況および硬化後の側面状況

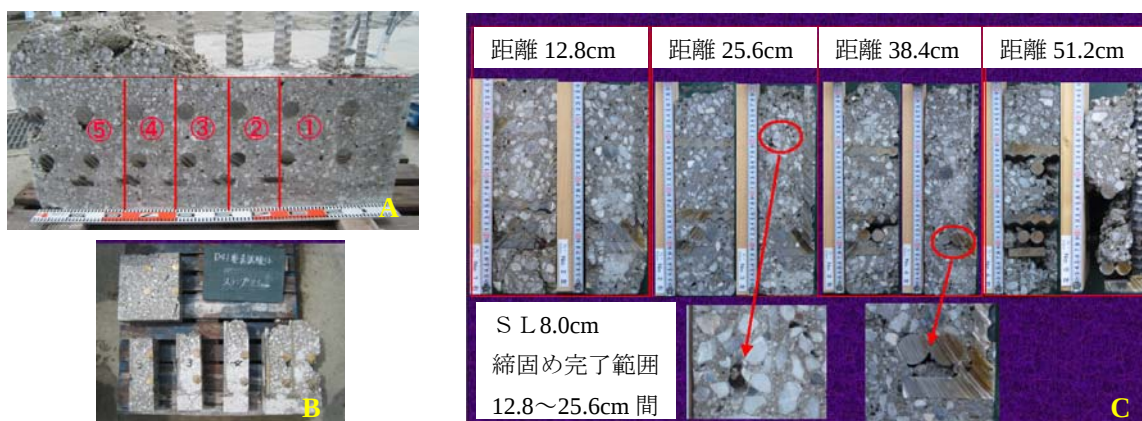
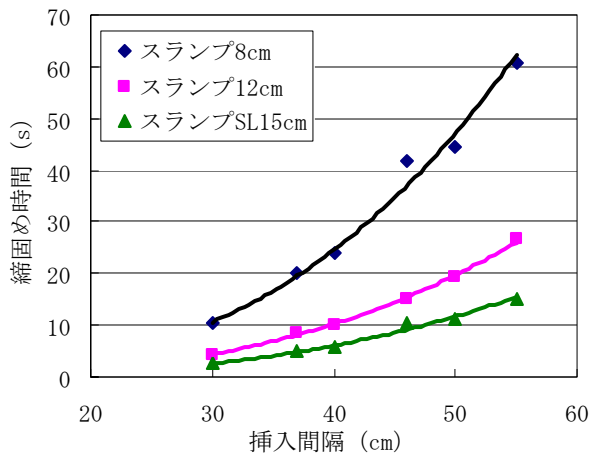


写真-3 硬化後の試験体カット後の状況



図－８ 内部振動機の挿入間隔と締固め時間の関係

大きいことを示す。また、側面の充填状態から判断した締固め完了範囲 49cm よりかはるかに小さいことから、側面の充填状態の目視による判断だけで、締固めの程度を判断することは難しく、危険側の判断になりやすいことを意味する。前述したように、型枠に投入したコンクリートが完全に締固めができたとすれば、その高さは 36.5cm になるべきである。しかし、写真－３の写真 A からわかるように、試験体の上面には、36.5cm 以上に盛り上がった部分がある。したがって、盛り上がった部分以下のコンクリートは理論密度に達しているとはいえないため、締固め完了とは言えない。高さが 36.5cm になった範囲を測定すると、振動機からの距離は 21cm である。この位置はかぶり部をカットして確認した締固め範囲は 12.8～25.6cm の間であることとほぼ合致しており、また、前章で求めた締固め完了範囲は表－４に示す通り 22.2cm であるため、計算値ともほぼ一致する。表－４に示すように、スランプ 12、15cm の場合も計算値と測定値ほぼ一致している。これは、締固めエネルギーによる締固め範囲の計算は可能であることを意味する。

本研究での試験体と同じ配筋状態において、 $\phi 60\text{mm}$ の内部振動機を使用した場合、締固めエネルギーにより算出したスランプ 8、12、15cm のコンクリートが十分締固められるのに必要な内部振動機の挿入間隔と締固め時間の関係を図－８に示す。スラブの施工を想定した場合、内部振動機の締固め範囲は円形である。締固めが不十分の領域を残さないためには締固め範囲が重なるようにするしかないので内部振動機の挿入間隔は締固め範囲の 2 倍ではなく、それより小さくなる。図－８により、施工計画段階で、施工に使用するコンクリートのスランプによって内部振動機の挿入間隔と振動時間を決めるか、あるいは決められた挿入間隔と振動時間によって、コンクリートの十分な締固めが保障することができるコンクリートのスランプを選定することができる。

6. まとめ

実構造物をモデル化した要素試験体を用いて、コンクリートのスランプをパラメータとし、コンクリートの締固め完了エネルギーから施工に使用したコンクリートが必要とする内部振動機の挿入間隔と振動時間を定量的に評価する方法を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 累積された内部振動機による振動エネルギーが、コンクリートの締固めを完了するのに必要なエネルギー以上となった範囲を締固め完了範囲とすることで、鉄筋コンクリートの締固め完了範囲を評価することができる。
- (2) 締固めエネルギーにより締固め完了と評価した範囲の計算結果と実構造物をモデル化した要素試験体における締固め完了範囲はほぼ一致する。
- (3) 型枠面の充填状態を目視して評価するだけでは締固めの程度を判断することは難しく、危険側の判断になる可能性がある。

参考文献

- 1) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書[施工編]，pp. 121-122，2008.3
- 2) 国島正彦，渡辺泰充：コンクリート構造物の耐久性に及ぼす設計過程の影響，土木学会論文集，No. 421/V-13，pp. 165-174，1990.9
- 3) 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. 67-72，2009.7
- 4) J. Kolek：The Internal Vibration of Concrete, *Civiling and Public Works Review*, vol. 54, No. 640, pp. 1286-1290, 1959.3
- 5) 村田二郎：フレッシュコンクリートの挙動に関する研究，土木学会論文集，No. 378/V-6，pp. 21-33，1987.11
- 6) 岩崎訓明：振動によるフレッシュコンクリートの液状化と内部振動機の作用領域に関する考察，土木学会論文集，No. 426/V-14，pp. 1-18，1991.11
- 7) 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
- 8) 梁俊，國府勝郎，宇治公隆，上野敦：フレッシュコンクリートの締固め性試験法に関する研究，土木学会論文集 Vol. 62, No. 2, pp. 416-427，2006.6
- 9) 梁俊，宇治公隆，國府勝郎，上野敦：スランプの相違がフレッシュコンクリートの締固め性に与える影響，セメント・コンクリート論文集 No. 59，pp. 146-151，2005.2