

締固め完了エネルギーを用いた充填性を確保する締固め作業計画の検討

大成建設（株）	正会員	○俵積田	新也
同 上	正会員	梁	俊
同 上	正会員	赤松	篤
中日本高速道路（株）	正会員	原田	拓也

1. はじめに

コンクリート打設では、十分な耐久性の確保や景観面の質を確保するため、型枠内へコンクリートを密実に充填する必要がある。充填不具合を避けるためには、配筋条件とコンクリートのフレッシュ性状を考慮して適切な締固め計画を立てなければならない。しかし、配筋条件とコンクリートのフレッシュ性状は現場ごとに異なるほか、コンクリートを打込む際に、満足な作業が行える環境を常に整えることは困難である。そのため、それぞれの現場に応じた、打設作業が制限される状況で効率的に充填を完了させる締固め計画を検討する必要がある。この課題に対して、コンクリートがバイブレータから受ける振動エネルギーを用いて、配筋部にコンクリートを充填させるために必要な振動エネルギー（以下、締固め完了エネルギーと呼ぶ）を定量的に評価する手法が開発されている。本稿では、締固め完了エネルギーを用いた評価手法により、新東名高速道路河内川橋工事におけるコンクリート打設の締固め計画の検討を行った。また検討結果を考慮して実施した試験施工・実打設の結果から本技術の効果を確認した。

2. 打設概要

(1) 現場概要

新東名高速道路は神奈川県海老名市を起点とし、東名高速道路と並走しながら、静岡県を經由して愛知県豊田市へ至る約 270km の高速道路である。新東名高速道路河内川橋は、急峻な山岳地帯に位置し、二級河川である河内川および観光地である丹沢湖へのアクセス道路を横過する、橋長 771m の鋼・コンクリート複合バランスドアーチである（図-1、図-2）。工事用の道路として左岸側には日本最大級のインクライン（積算荷重 90t）を配置し、右岸側には工事用トンネルを設け、厳しい地形の中で動線を確保している。アーチ部はコンクリート部材であるアーチリブと、鋼部材である補鋼桁からなる複合橋である。また、P2・P3 橋脚間のアーチスパン長は 220m であり、同種橋梁型式において国内最大規模となる。

アーチリブ部材の施工に関して、図-2 に黄色の網掛け



図-1 河内川橋完成予想パース図

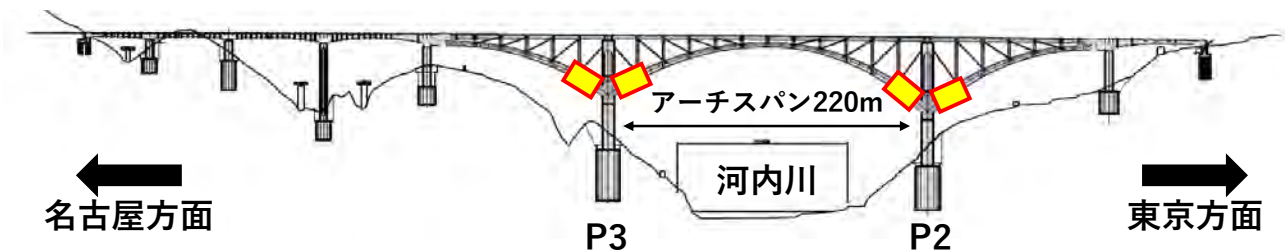


図-2 新東名高速道路 河内川橋構造一般図（上り線）

キーワード 締固め、締固め完了エネルギー、アーチスプリング部、鉄筋間隙通過性、加速度伝播
連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター
TEL070-2653-0146

で示したスプリング部においては、ウェブと上床版の境界部に鋼板が配置されるため、コンクリートの振動締固めの際のバイブレータ挿入が制限される。また、目視での充填状況確認も困難になるため、実打設においてはコンクリートの充填が確保されるバイブレータの振動締固め時間および挿入間隔を適切に設定する必要がある。本稿では、このウェブ部コンクリート打設の締固め計画を検討するため、実際の配筋条件とコンクリート配合における締固め完了エネルギー、およびコンクリート内での振動エネルギーの伝播を室内試験により測定した。

(2) 打設条件

P2・P3 橋脚間のアーチスプリング部の構造概要を **図-3** に示す。配筋状況は主筋が D25、帯筋が D32 で、鉄筋間隔は芯間隔で 150mm である。ウェブの打設は上床版鋼板部の開口部からコンクリートを打込み、締固めについても鋼板に空けた $\phi 80\text{mm}$ の挿入口からバイブレータを挿入することで実施する。バイブレータを深部まで挿入するため、鉄筋間に丸鋼で作製した **写真-1** に示すスパイラル鋼ガイドを配置し、ガイド内部に沿ってバイブレータを挿入する計画とした。そのため、挿入口およびガイドの位置によりバイブレータの挿入間隔は **図-4** に示す位置に制限される。 **図-4** よりバイブレータ 1 個が締固めを完了させる必要がある範囲は半径 375mm 以上となる箇所が存在する。

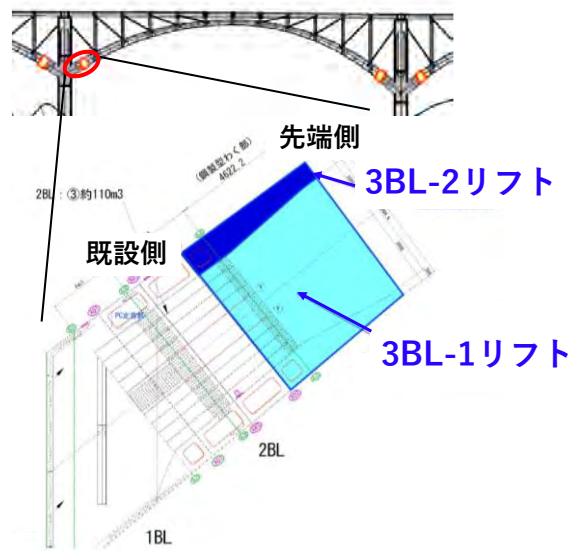
表-1 に実施工で使用される配合を示す。荷下ろし地点での目標フレッシュ性状はスランプ 19cm、空気量 4.5% であり、セメントは中庸熟ポルトランドセメント、骨材は山梨県産の砕石・砕砂を使用した。混和剤にはポリカルボン酸系化合物を主成分とする高性能 AE 減水剤を用いた。

3. 検討内容

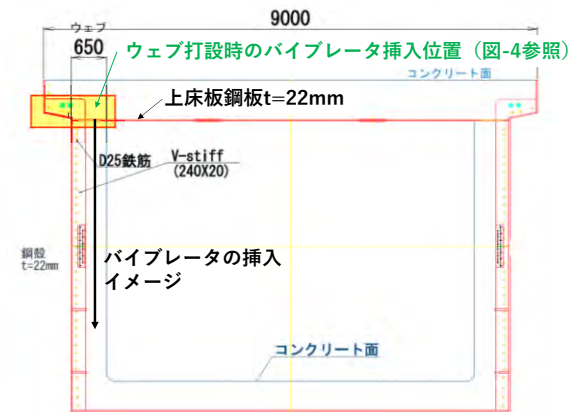
(1) 試験条件

梁 りらにより、締固め完了エネルギーを定量的に測定する手法および締固め完了エネルギーを用いた締固め範囲の検討手法が提案されている。同手法は、締固め完了エネルギーと、コンクリート内での振動エネルギーの伝播挙動を測定することにより、各バイブレータが締固めを完了させる範囲を推定する手法である。本稿では梁らの手法に基づき、締固め計画の検討を実施した。

検討箇所における締固め計画を検討するため、室内試験により実配合における締固め完了エネルギー、および実配合コンクリート内での振動エネルギーの伝播の 2 つ



(a) 側面図



(b) 断面図 (3BL 先端部)

図-3 アーチスプリング部



写真-1 スパイラル鋼ガイド

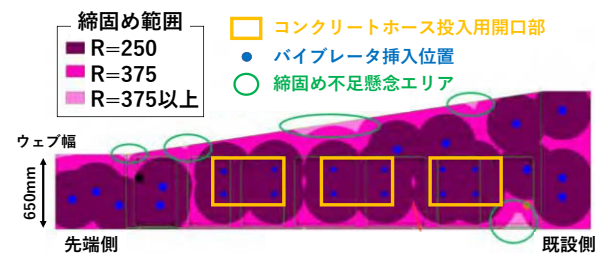


図-4 バイブレータ挿入間隔 (ウェブを上から見た図)

表-1 配合

W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)					
		W	C	EX	S	G	Ad
41.0	47.3	169	392	20	814	907	P×0.70%

のデータを測定する必要がある。実際の打設作業時におけるコンクリートの性状でデータを採取する必要があるため、試験に用いたコンクリートは圧送後筒先の状態を想定したスランプ 17cm と、運搬の遅れや施工中のトラブルによるスランプロスを考慮したスランプ 13cm の 2 種類とした。スランプの調整は配合を変えずに混和剤量や静置時間等を調整することで行った。使用したバイブレータは、実際の打設で使用予定のφ50mm のものを用いた。

(2) 締固め完了エネルギー

配筋部においてコンクリートを密実に充填させるためには、型枠内にコンクリートを行き渡らせるためのエネルギーに加えて、鉄筋間隙を通過させるためのエネルギーも必要となる。締固め完了エネルギーは、これらのエネルギーを考慮したものである必要がある。梁らの開発した手法では、上記を考慮した締固め完了エネルギーを定量的に評価することが可能である¹⁾。以下にその測定方法を示す。

図-5 に締固め完了エネルギーの概要を、写真-2 に締固め完了エネルギーの測定器具を示す。鉄筋が配置された容器内でスランプ試験を実施することで試料を投入し、容器に振動を加える。試料の最も高い部分を高さ h とし、円筒容器の底面積 A との積 Ah より鉄筋の体積を差し引いた体積に対する見かけの密度と図-5 に示す理論密度との比を締固め度 γ (%) と定義し、締固め度が 99.5% に達するまでに加えたエネルギーを締固め完了エネルギーとした。締固め度は式 (1) によって示される。

$$\gamma = \frac{m/\rho_0}{h(A - N \times \pi \times r^2)} \times 100 = \frac{H_0}{h} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 γ ：鉄筋間隙を通過し充填される際の締固め度 (%)、 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_0 ：試料の単位容積質量(kg/L)、 A ：円筒容器の底面積(mm²)、 r ：鉄筋の半径、 N ：鉄筋の本数とする。

また、鉄筋間隙の通過性は鉄筋径および鉄筋の純間隔によって変化する。梁ら¹⁾の計算手法に基づき、配筋状況による締固めへの影響を締固め指数として式 (2) のように定義した。締固め指数が大きいほど締固めは容易になり、締固め完了エネルギーは小さくなる。

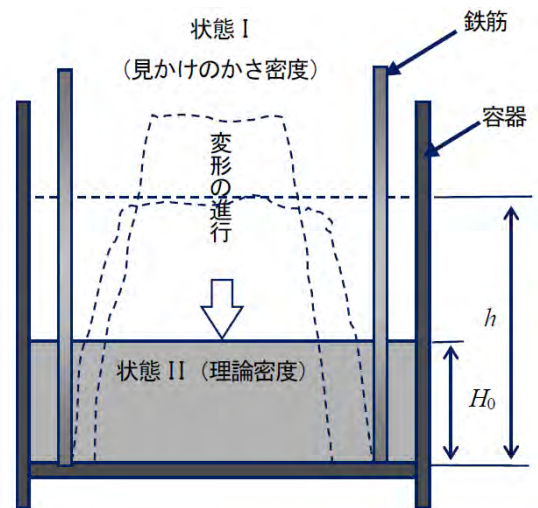


図-5 締固め完了エネルギーの概要¹⁾



(a) 全景



(b) 試験容器



(c) 試料投入



(d) 試料高さの測定

写真-2 締固め完了エネルギーの測定器具

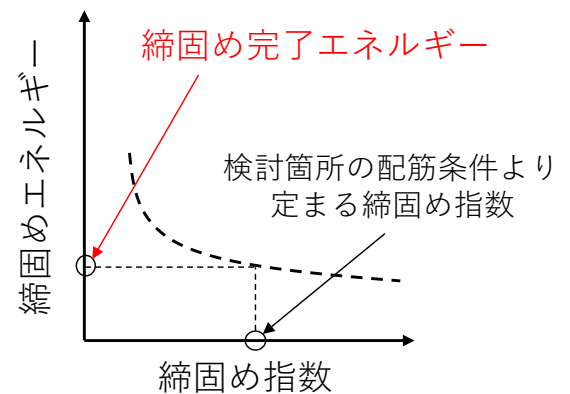


図-6 締固め完了エネルギーの推定方法

$$\alpha = \frac{s}{d} \quad (2)$$

ここで、 α ：締固め指数、 s ：鉄筋純間隔（mm）、 d ：鉄筋の直径（mm）とする。

本検討では、締固め指数を変化させて締固め完了エネルギーを5点測定し、締固め指数と締固め完了エネルギーの関係を図-6に示すグラフから作成した近似曲線により評価した。締固め指数については、装置に設置する鉄筋径（19、25、32、41mm）と設置本数を変化させることで任意の値に調整した。実際の検討箇所の配筋条件（D25、D32@150mm）より、締固め指数は4.7～6.0となる。検討箇所の締固め指数と、近似曲線の作製を考慮して、測定を実施した締固め指数は表-2に示す5点とした。

表-2 測定条件

締固め指数	鉄筋径(mm)	本数	鉄筋純間隔(mm)
0.76	41	12	31
2.79	32	6	89
3.71	25	6	93
6.07	25	4	152
8.05	19	4	153

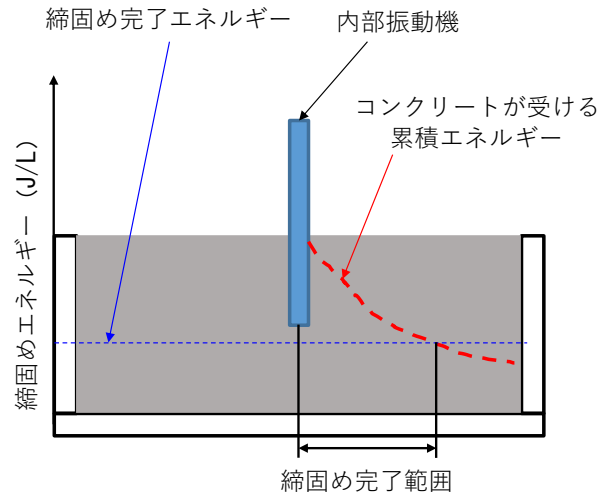


図-7 バイブレータからの距離による振動の減衰

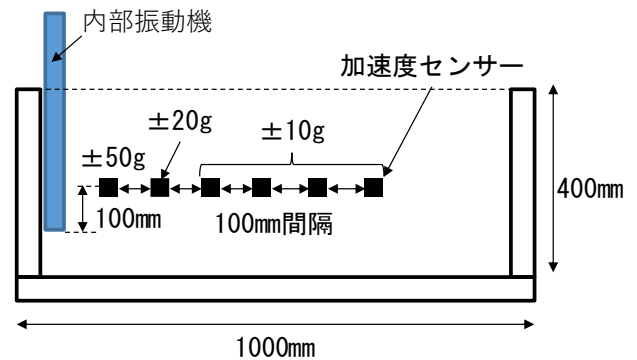


図-8 振動エネルギーの伝播の測定に用いた型枠

(3) 振動エネルギーの伝播

図-7に示すように、バイブレータをコンクリート内で振動させる際、バイブレータからの距離によりコンクリートが受ける振動エネルギーは減衰する。そのため、バイブレータがある振動時間で締固められる範囲は、バイブレータからの各距離でコンクリートが受けた振動エネルギーの累積で評価する必要がある。本検討では、無筋の型枠内でコンクリートにバイブレータを挿入し、一定時間振動を加えた際の、バイブレータからの各距離における振動エネルギーの累積値を測定した。

図-8に試験に用いた型枠、および型枠内に設置した加速度センサーの位置を示す。加速度センサーの位置は挿入したバイブレータの先端から100mm上の高さとし、バイブレータから100mm間隔で6か所に設置した。使用した加速度センサーは小型の1軸加速度計で、図-8に各加速度センサーの計測容量を示す。バイブレータを挿入する際、実際の施工ではスパイラル鋼ガイド内に沿って挿入するため、本検討では、スパイラル鋼ガイドを型枠に設置しガイド内部で振動させた場合と、比較としてガイド無しの場合で実験を実施した。測定に使用したバイブレータは現場で使用されるφ50mmのものを使用し、振動時間15秒と20秒でのデータを採取した。

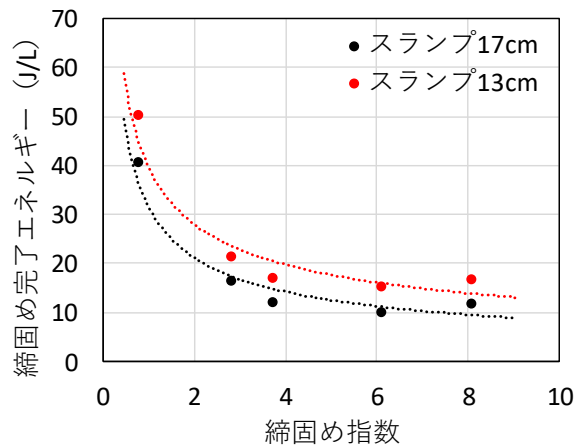


図-9 締固め完了エネルギーの測定結果

4. 室内試験結果

(1) 締固め完了エネルギーの測定結果

締固め完了エネルギーの測定結果および得られた結

果より作成した近似曲線を図-9に示す。スランプ 17cm の締固め完了エネルギー：E17、およびスランプ 13cm の締固め完了エネルギー：E13 は締固め指数：α の関数としてそれぞれ式 (3)、式 (4) に示す結果となった。

$$E_{17} = 31.605a^{-0.504} \quad (3)$$

$$E_{13} = 39.709a^{-0.576} \quad (4)$$

実際の検討箇所でも最小となる締固め指数 4.7 におけるそれぞれの締固め完了エネルギーは、スランプ 17cm で 13.0J/L、スランプ 13cm で 18.2J/L であった。スランプが大きいほど締固め完了エネルギーは小さい結果であり、スランプの大小による締固め完了エネルギーへの影響が再現された結果だと考えられる。以降の検討では、締固め完了エネルギーをスランプ 17cm で 13.0J/L、スランプ 13cm で 18.2J/L として扱うこととした。

(2) 振動エネルギーの伝播の測定結果

振動時間 15 秒における測定結果について、バイブレータからの各距離におけるコンクリートが受けた振動エネルギーの累積値を図-10に示す。試験結果より作成した回帰曲線をそれぞれ、スランプ 17cm は式 (5)、スランプ 13cm を式 (6) に示す。回帰曲線は、試験結果の各測点を用いて偏差が可能な限り小さくなるように作成した。

$$T_{17} = 3750e^{-0.150x} \quad (5)$$

$$T_{13} = 1000e^{-0.130x} \quad (6)$$

ここで、T：各スランプにおける、各距離での累積の振動エネルギー、x：バイブレータからの距離 (cm) とする。試験結果より、スランプの変化によってコンクリート内での加速度の伝播効率も異なり、スランプが小さいほど伝搬効率は低下する結果が得られた。

(3) 締固め完了範囲の検討

以上に示す室内試験結果より、バイブレータの締固め完了範囲について検討する。振動時間 15 秒、スランプ 17cm の場合の検討手順を図-11に示す。図-7、および式 (3) に示す近似曲線より、現場での施工条件に基づく締固め指数 4.7 における締固め完了エネルギー 13.0 (J/L) を読み取る。次に図-10において、累積エネルギーが、締固め完了エネルギーの 13.0 (J/L) 以上を満たすバイブレータからの距離を読み取る。これより、ス

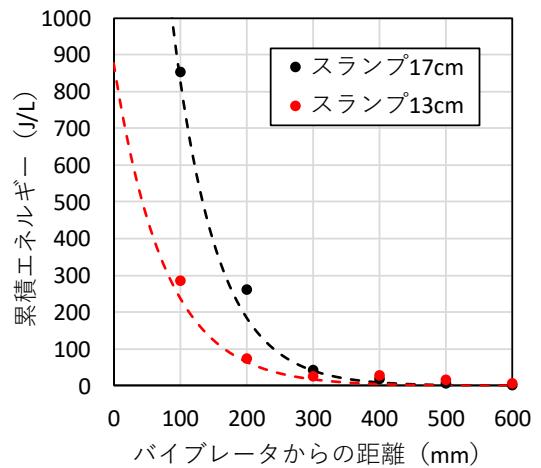


図-10 振動エネルギーの伝搬結果

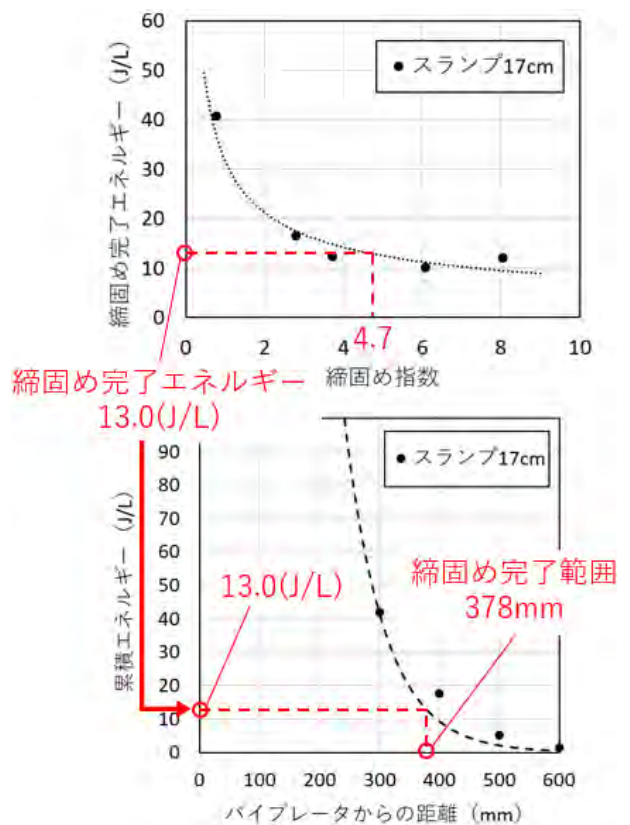


図-11 振動時間 15 秒における締固め完了範囲算定手順

表-3 締固め完了範囲

打込み時 スランプ (cm)	振動機 φ	スパイラル 鋼ガイド	締固め完了範囲 (mm)	
			15秒	20秒
17	50	有	378	400
		無	370	403
13		有	350	381
		無	342	373

ランプ 17cm において、 $\phi 50\text{mm}$ のバイブレータで 15 秒間振動締固めを実施した場合の締固め完了範囲は 378mm であることが分かる。同様にして、スランプ 13cm の場合も含め、スパイラル鋼ガイドの有無、振動時間 (15 秒, 20 秒), での各条件における締固め完了範囲の算出結果を表-3 に示す。結果より、スパイラル鋼ガイドの有無による振動エネルギーの伝播効率への影響は、締固め完了範囲にして 8mm 程度の差であり、影響は小さいと考えられる。また、振動時間を 15 秒から 20 秒とすることで、締固め完了範囲はスランプによらず 30mm 程度広がる結果となった。スランプ 17cm で 20 秒締固めた場合の締固め完了範囲は 400mm であり、検討箇所を十分に充填できると判断される。

以下に、これらの試験結果を考慮して実施した、検討箇所を模擬した試験体による試験施工の内容について示す。

5. 試験施工と実打設

(1) 試験施工概要

図-12 に試験施工に用いたモデルの概要を示す。モデルは、コンクリートの打設孔・内部振動機挿入孔・空気孔・鉄筋および型枠を再現し、形状については片側のウェブのみを再現したモデルとした。水平換算距離約 300m の配管圧送も模擬し、ポンプ圧送によるスランプロスについても確認した。試験施工モデルに実構造物と同様の縦断勾配 35°をつけることは、試験体安定状況から危険であると判断し、試験施工においては勾配無しとした。

試験施工の締固め計画は、当初の計画で施工した場合の充填状況を確認するため、バイブレータの挿入箇所については図-4 に示す位置とし、いずれも $\phi 50\text{mm}$ のバイブレータで 15 秒間振動させることとした。同条件での締固め完了範囲は 378mm であり、図-4 において締固め範囲 $R=375\text{mm}$ で示した範囲については締固めが完了されることが予想される。一方で、同図において緑円で示した締固め完了範囲 $R=375\text{mm}$ を超えるエリアにおいては、締固め不足が懸念されるため、脱型後に表層品質を十分に確認することとした。

また、一つのスパイラル筋から 250mm, 375mm, 500mm の箇所に加速度計を設置し、内部振動機から伝わる振動の加速度を計測した。その際、室内試験結果より $\phi 50\text{mm}$ より振動エネルギーの大きいバイブレータを使用する可能性を考慮し、 $\phi 60\text{mm}$ のバイブレータ

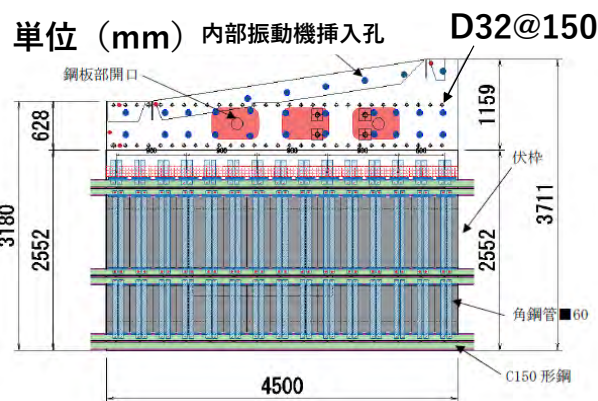
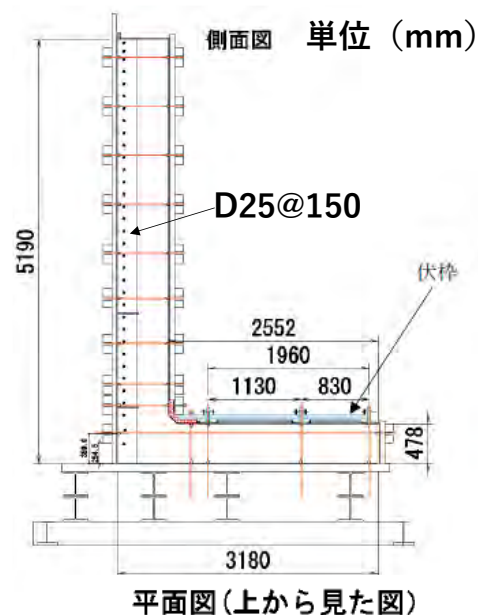


図-12 試験施工モデル概要

表-4 試験施工時のフレッシュ性状

	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
練上がり直後	21.5	4.4	29
荷下ろし時	19.5	4.2	30
圧送後 (筒先)	18.0	5.0	33

表-5 振動エネルギーの算出結果

振動機 ϕ	距離 (mm)	振動エネルギー (J/L)
50	250	24.8
	375	17.2
	500	1.3
60	250	191.6
	375	122.6
	500	3.0

を用いた際の振動エネルギーの伝播についても測定した。

(2) 試験施工結果

表-4 にコンクリートの性状を示す。圧送後のスランプロスは 1.5cm であり、室内試験時に想定していたスランプロス 2.0cm と同程度であった。

試験施工での脱型後の状態を確認した結果、締固め完了範囲を超えるエリアの一箇所(ウェブ外面中央部)で、締固め不足による充填不具合(豆板)が認められた。該当箇所においては、振動エネルギーをより伝播させるための計画変更が必要であることが室内試験と試験施工の結果から明らかとなった。

型枠内に設置した加速度計で計測した加速度より、振動エネルギーを算出した結果を表-5 に示す。φ60mm の試験施工の結果については、室内試験と同様の手順で式(7) に示す近似曲線を設定した。

$$T_{E17}' = 5000e^{-0.131x} \quad (7)$$

また、試験施工での計測結果と室内試験結果を図-13 により比較した。図-13 より、試験施工での φ50mm

の計測結果は、バイブレータからの距離 250mm で室内試験結果と異なる測定結果となった。この要因として、室内試験と試験施工において、加速度センサーの固定方法やセンサー周辺の充填状況、粗骨材分布状況等による測定状況の違いが影響していると考えられる。試験施工で得られた測定結果から累積エネルギーに関する近似曲線を作成し、締固め完了エネルギー 13.0J/L となる範囲を算出した結果、391mm となった。室内試験結果より安全側の結果であったため、本室内試験結果から締固め完了範囲を求めても問題無いと判断した。

(3) 実打設

室内試験および試験施工の結果より、締固め不足の予想された箇所では振動時間を 20 秒にする、あるいはより振動エネルギーの大きい φ60mm のバイブレータを用いる等の計画変更が必要であることが認められた。

試験施工の結果を考慮した、φ50mm および φ60mm の振動時間 15 秒における締固め完了範囲は φ50 で 378mm、φ60 で 454mm となる。振動時間を 15 秒以上とする場合、材料分離が懸念されるため、実打設においては、当初の施工計画で充填不具合の生じる箇所については、図-14 に示すようにバイブレータを φ50mm から φ60mm に変更して 15 秒間締固めることとした。

実施工の結果、脱型後の構造物に充填不具合等の施工不良は認められず、本技術は施工計画の検討に有効な技術であることが認められた。

6. まとめ

本検討では、コンクリートの充填性を締固め完了エネルギーを用いて評価することで、適切なバイブレータの挿入間隔・振動時間について検討した。今回の検討結果より、締固め完了エネルギーによる充填性の検討は充填不具合を防ぐ施工計画の検討に有効な評価手法であることを示した。

参考文献

- 1) 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.

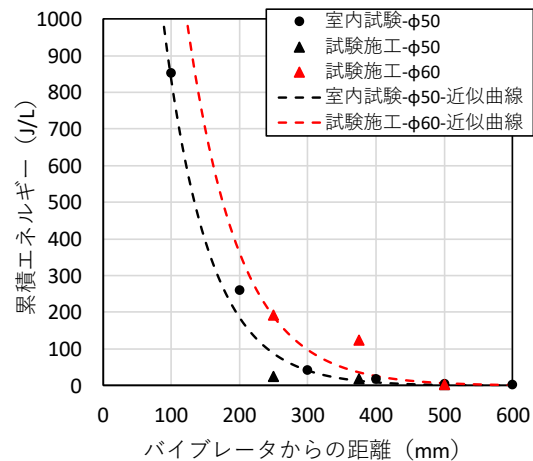


図-13 スランプ 17cm の締固め完了エネルギー

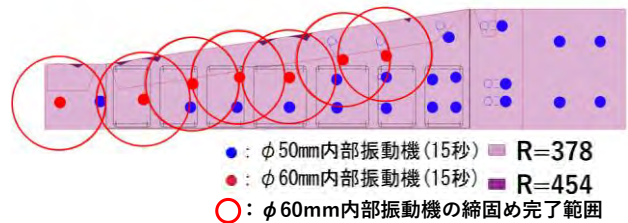


図-14 実打設での締固め計画