

# 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

俵積田 新也\*<sup>1</sup>・梁 俊\*<sup>1</sup>・赤松 篤\*<sup>2</sup>・原田 拓也\*<sup>3</sup>

Keywords : compaction completion energy, arch springing, passing rebar spacing, propagation of vibration acceleration

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

## 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，型枠内に密実にコンクリートを充填する必要がある。しかし，コンクリートのフレッシュ性状や型枠・配筋条件，打設環境などは現場ごとに異なるため，それぞれに応じた打設計画を立てる必要がある。コンクリートの充填性を評価する手法として，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た評価手法が研究されており，梁ら<sup>1)</sup>の研究において，配筋部にコンクリートを充填させる為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，および装置が開発されている。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の打設計画の検討及び試験施工と実打設への適用を通して，本技術の効果を確認した。

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）。工事用道路として左岸側には日本最大級のインクライン（積載荷重 90t）を配置し，右岸側には工事用トンネルを設け，厳しい地形の中で現場への動線を確認している。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 間のアーチスパン長の 220m は同種橋梁型式において国内最大規模となる。

## 2. 検討内容

### 2.1 打設概要

新東名高速道路は神奈川県海老名市を起点とし，



図-1 河内川橋完成予想パース図

Fig.1 Perspective drawing of completed Kochigawa Bridge

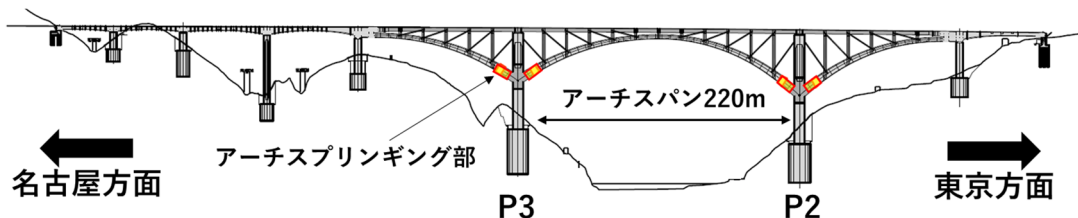


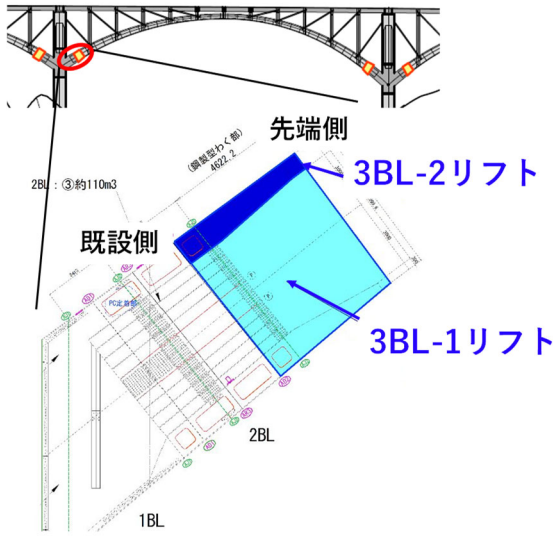
図-2 新東名高速道路 河内川橋構造一般図（上り線）

Fig.2 Shin-Tomei Expressway General drawing of Kochigawa Bridge structure

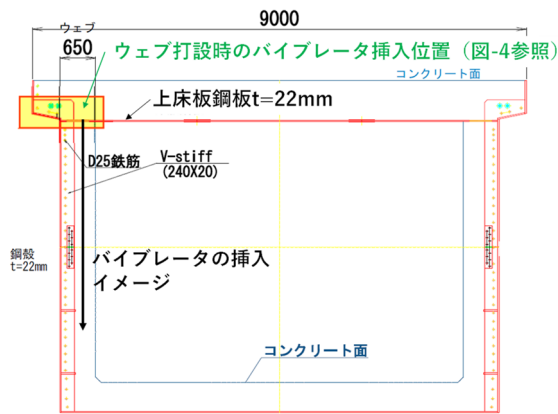
\* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 先端基盤研究室

\* 2 横浜支店 土木工事作業所

\* 3 中日本高速道路（株）



(a) 側面図



(b) 断面図 (3BL 先端部)

図-3 アーチスプリング部の構造

Fig.3 Structure of arch springing

アーチリブ部材の施工に関して、図-2 に黄色の網掛け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あるため、コンクリートの振動締固めの際のバイブレータの挿入が制限される。そのため、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。このウェブ打設における打設計画を、締固め完了エネルギーを用いて決定した。

P2・P3 間のアーチスプリング部の構造概要を図-3に、コンクリート打設の概要を図-4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ち込み、締固めについても鋼板に空けた φ80 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、

表-1 配合

Table 1 Concrete mixes

W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	EX	S	G	Ad
41.0	47.3	169	392	20	814	907	P×0.70%



写真-1 スパイラル鋼ガイド

Photo.1 Spiral steel guide

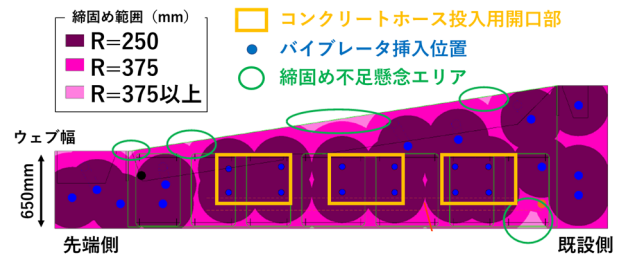


図-4 バイブレータ挿入位置および締固め範囲

(ウェブを上から見た図)

Fig.4 Vibrator insertion position and compaction range (plan view)

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、バイブレータ挿入口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。これより、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。

## 2.2 検討概要

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。締固め完了エネルギーの測定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、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、計画時で使用予定の φ50mm のものを用いた。

## 2.3 締固め完了エネルギー測定手法の概要

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

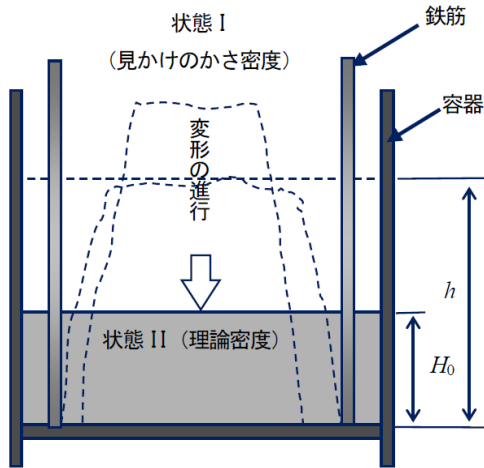


図-5 締固め度定義の概要<sup>1)</sup>

Fig.5 Overview of compaction definition

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<sup>1)</sup>。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ブ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  $\gamma$  (%) 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、 $\gamma$  : 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),  $\rho_0$  : 試料の単位容積質量(kg/L),  $A$  : 円筒容器の底面積(mm<sup>2</sup>),  $r$  : 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<sup>1)</sup>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。



(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

Photo.2 Instrument of measuring

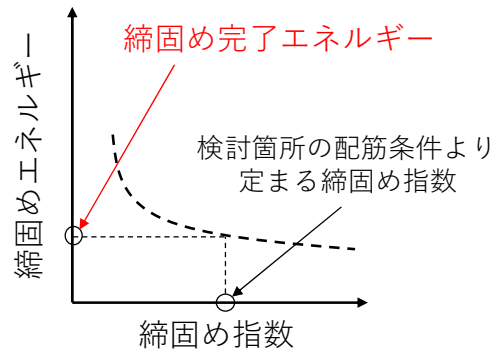


図-6 締固め完了エネルギーの推定方法

Fig.6 Estimation method of compaction completion energy

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

ここで、 $\alpha$  : 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、鉄筋径 (19, 25, 32, 41mm) と設置本数を変化させることで締固め指数を調整し、締固め完了エネルギーを 5 通りの条件で測定した。得られた結果より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。

表-2 測定条件

Table 2 Measurement condition

スランブ	鉄筋径(mm)	本数	鉄筋純間隔(mm)	締固め指数
13cm 17cm	41	12	31	0.76
	32	6	89	2.79
	25	6	93	3.71
	25	4	152	6.07
	19	4	153	8.05

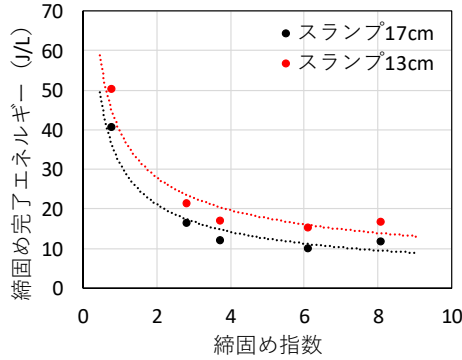


図-7 締固め完了エネルギーの測定結果

Fig.7 Result of compaction completion energy

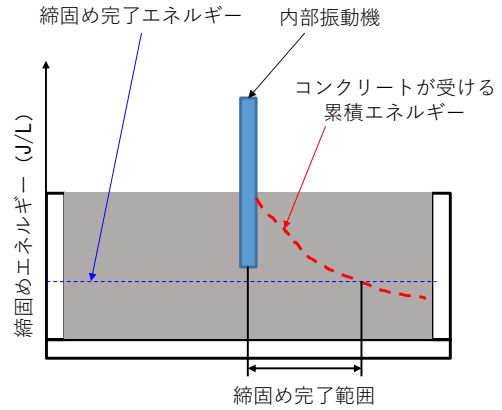


図-8 バイブレータからの距離による振動の減衰

Fig.8 Vibration attenuation with distance from the vibration

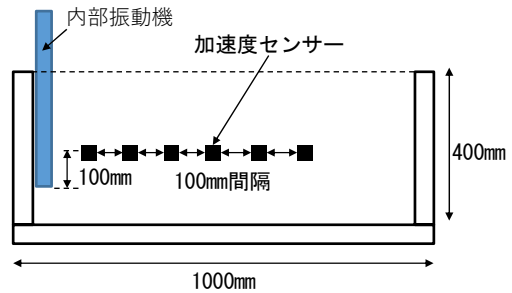


図-9 振動エネルギーの伝播の測定に用いた型枠

Fig.9 Formwork used to measure the propagation of vibrational energy

### 3. 室内試験結果

#### 3.1 締固め完了エネルギーの測定結果

実際の検討箇所の配筋条件は、鉄筋純間隔 150mm、鉄筋径主筋：D25、帯筋：D32 であり締固め指数は 4.7～6.0 となる。検討箇所の締固め指数と、近似曲線の作成を考慮して、測定を実施した締固め指数は表-2 に示す 5 通りに決定した。

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-7 に示す。スランブ 17cm の締固め完了エネルギー： $E_{17}$ 、およびスランブ 13cm の締固め完了エネルギー： $E_{13}$  は締固め指数： $a$  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、スランブ 17cm で 13.0J/L、スランブ 13cm で 18.2J/L であった。スランブ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、スランブ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ブ 17cm で 13.0J/L、スランブ 13cm で 18.2J/L として扱うこととした。

表-3 試験ケースおよび締固め完了範囲

Table 3 Test cases and compaction completion range

打込み時 スランブ(cm)	振動機 $\phi$ (mm)	振動時間 (秒)	締固め完了範囲 (mm)
17	50	15	378
		20	400
13		15	350
		20	381

#### 3.2 振動エネルギーの伝播の測定結果

図-8 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-9 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。

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。試験ケースを表-3に示す。

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距離  $x$  (cm) 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、各測点が回帰曲線の安全側に入る範囲で、偏差が可能な限り小さくなるように設定した。

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

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

ここで、 $T$ ：各スランプにおける距離  $x$  での累積の振動エネルギーとする。

試験結果より、スランプの変化により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播効率は低下する結果が得られた。

### 3.3 締固め完了範囲の検討

3.1, 3.2に示す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、スランプ17cmにおいて、φ50mm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、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、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、検討箇所を十分に充填できると判断される。

以下に室内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。

## 4. 試験施工

### 4.1 試験概要

図-12に試験施工に用いたモデルの概要を示す。モデルは、実構造物のコンクリート打設孔・バイブレータ

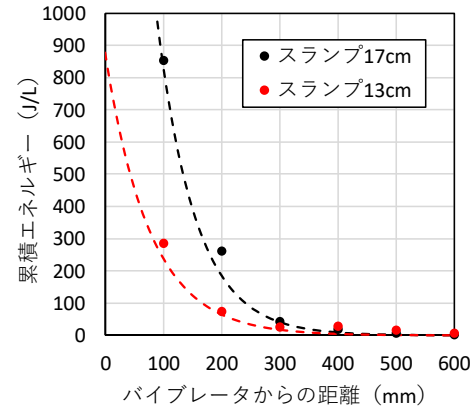


図-10 振動エネルギーの伝搬結果

Fig.10 Vibrational energy propagation results

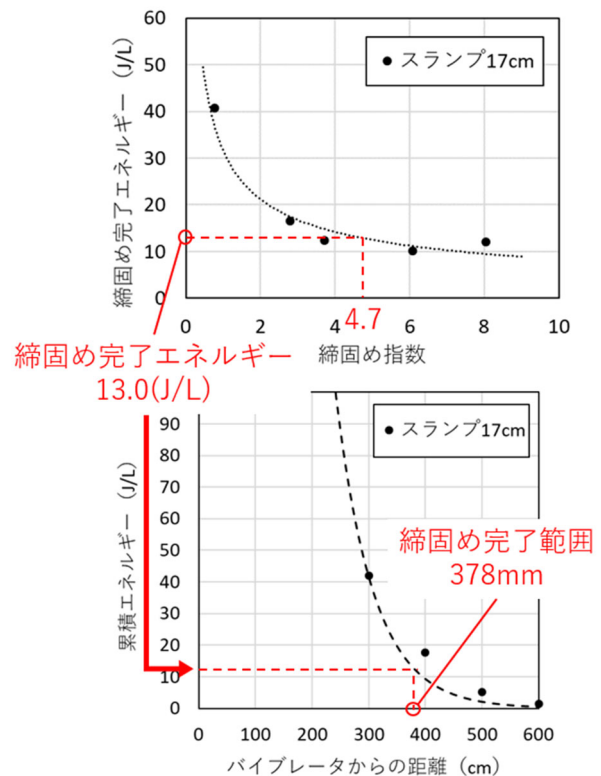


図-11 締固め完了範囲算定手順

Fig.11 Compaction completion range calculation procedure

挿入孔・空気孔・鉄筋および型枠を同寸法で再現した。水平換算長約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。形状については片側のウェブのみ再現したモデルとした。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φ50mmのバイブレータで15秒間振動させた。同条件での締固め

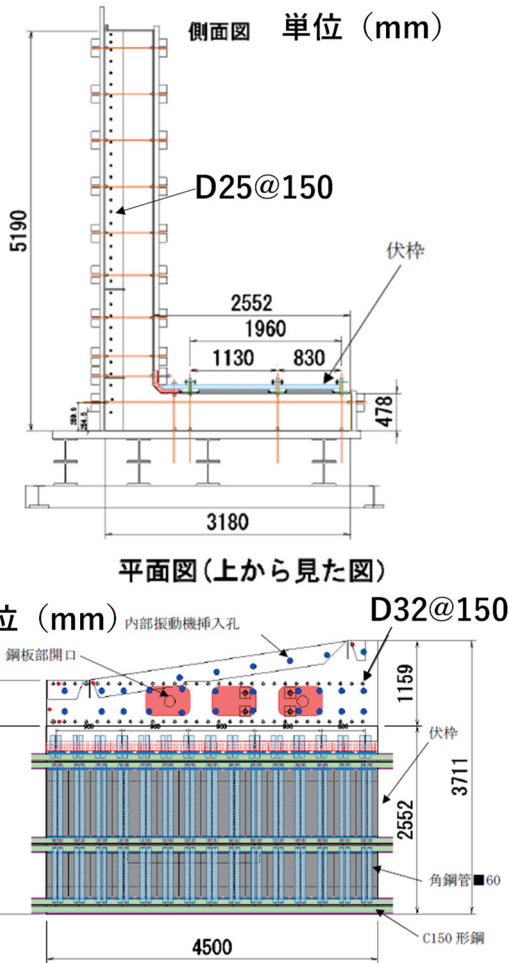


図-12 試験施工モデル概要

Fig.12 Overview of test construction model

完了範囲は 378mm であり、図-4 に D=375mm で示した範囲が締固められることが予想されるため、同図において緑円で示した締固め完了範囲を超えるエリアにおいては、脱型後に表層品質を十分に確認した。

また、実規模での振動エネルギー伝播特性を確認するため、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。室内試験結果より φ 50mm 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、φ 60mm のバイブレータ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。

#### 4.2 試験結果

表-5 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、ウェブ外面の一箇所で、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

表-5 フレッシュ性状

Table 5 Fresh properties

	スランブ (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

室内試験と試験施工の結果から明らかとなった。

#### 4.3 実施工時の締固め計画の検討

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。

型枠内に設置した加速度計の計測結果より、φ 60mm におけるバイブレータからの距離と振動エネルギーの累積値の関係を室内試験と同様の手順で式(7)に示す近似曲線として設定した。

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

試験施工の結果を考慮した、φ 50mm および φ 60mm の振動時間 15 秒における締固め完了範囲は φ 50mm で 378mm, φ 60mm 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、バイブレータを φ 50mm から φ 60mm 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。

### 5. まとめ

本検討では、新東名高速道路河内川橋工事において、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・振動時間を決定した。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立案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.