

# セグメント振動締め固め製作時の 合理的な加振方法の研究

## Effective vibrating compaction method of fresh concrete for sealed tunnel segments

若林正憲<sup>1)</sup>・橋本博英<sup>1)</sup>・大関宗孝<sup>1)</sup>・田中 努<sup>2)</sup>・國府勝郎<sup>3)</sup>

Masanori WAKABAYASHI, Hirohide HASHIMOTO, Munetaka OHZEKI, Tsutomu TANAKA, Katsurou KOKUBU

Concrete segment unit for sealed tunneling method is made with stiff concrete of 4 cm in slump by a table vibrator. As the size of unit is enlarged recently, the electric power for vibration and the noise level in working area become greater. In this study, the behavior of fresh concrete under vibration is examined for saving power and maintaining environmental conditions as well as the effective compaction. And, acceleration of fresh concrete of full-sized segment under vibration was measured. Prediction method of acceleration was examined by dynamic analysis, using FEM.

**Key Words :** concrete segment, fresh concrete, vibrating compaction, acceleration

### 1. 概要

#### (1) 目的

シールド工事で使用されるRCセグメントは、スランプが4 cm程度の硬練りコンクリートを用い、テーブルバイブレータ等による振動締め固めにより製作されている。近年のセグメントピースの大型化に伴い、使用されるテーブルバイブレータの能力も年々大きくなってきているが、セグメントのコストダウンや工場周辺の環境保全を考えれば、今までの方法の延長ではなく、より小さな振動で適切な締め固め状況を得るような工夫が必要である。

そこで、フレッシュコンクリートの振動特性を踏まえ、合理的な振動締め固め方法を追求する。

#### (2) 着目点

フレッシュコンクリートは一般にビンガム流体として取り扱われるが、振動を加えることで流動化し、気泡の存在により弾性挙動を示すことが知られている<sup>1)</sup>。このため、セグメント用コンクリートの見かけの弾性係数を空気量を基に算定する方法を明らかにできれば、通常の振動理論に基づいて、合理的な加振条件を設定することができる。また、同時に、コンクリート内部の加速度分布も把握することができ、振動締め固め効果をセグメント各部に確実に与えることも可能になる。従来、経験的に定めることが多かったバイブレータの能力や台数を、上記の振動理論に基づいて管理することも可能になる。本研究では、大型セグメント型枠の実機での加振実験を行い、上記の見かけの弾性係数を用いた解析を行って、シミュレートを試み、加振条件の管理指標を絞り込む。

1) 正 会 員：石川島建材工業株式会社 事業本部セグメント技術部

2) フェロー：㈱オリエンタルコンサルタンツ 技術本部技術開発部

3) フェロー：東京都立大学 工学部土木工学科

### (3) 方法

φ25cm 高さ50cm の円筒形鋼製型枠を振動台に固定し、23～76Hz の鉛直振動によるスweep加振実験を行った。スランプを一定にして、空気量を1.8～5.0%の範囲で変えた7種のフレッシュコンクリートに対し、共振曲線と深さ方向の加速度分布を調べた。次に、弾性論に基づく固有値や波動伝播理論と実測値を対比して妥当性を確認し、空気量とみかけの縦波速度と弾性係数の関係を調べた。

一方、テーブルバイブレータではなく、一般のヤードに置いた鋼製フレームに、内径10mクラスのシールドトンネルの実大の平板型セグメント型枠を、ゴム支承を介して2種類の方法で支持し、コンクリートを打設して、小型バイブレータ8台により加振を行い、締め固まり状況の確認と各部の加速度を計測した。合わせてFEMを用いた振動解析を行って比較し、予測方法を検討した。

## 2. フレッシュコンクリートの応答特性の検討

### (1) 実験の方法と装置

型枠を鉛直に加振した場合、側板に接する部分では、底板からの粗密波の他に側板からのせん断力が伝わるが、振動により液化化したフレッシュコンクリートのせん断抵抗は弾性ではなく、粘性のみの効果によるもので小さいため、基本性状を議論する範囲において無視し、一次元の波動伝播の問題として扱う。

図-1のような内径25.4cm 高さ50cmの円筒形の鋼製型枠を作製し、写真-1のように振動台で鉛直に23～76Hzの範囲でスweep加振し、深さ方向の加速度分布を計測した。所定の加振振動数で加振を始め、振動台の振動が安定した時点から30秒間ずつ計測して、そのまま次の振動数に移る作業を繰り返した。

コンクリートの配合は、表-1のように、実セグメントに準じた基本配合をベースに、スランプを一定に保って初期の流動性を同じにしながら、空気量を増加させて、見かけの弾性係数を変化させた。

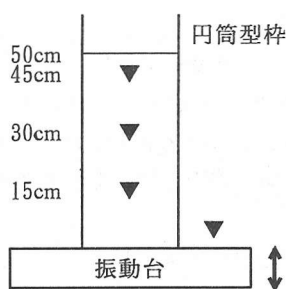


図-1 型枠と計測点

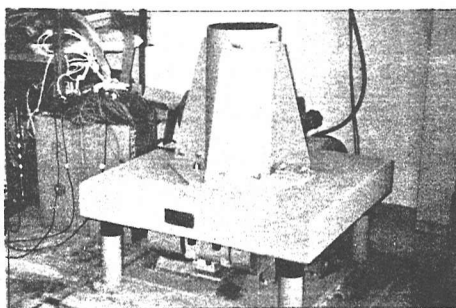


写真-1 型枠と振動台

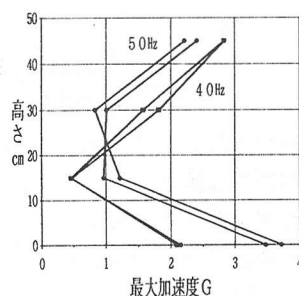


図-2 応答加速度の分布  
(ケース4)

### (2) 実験結果

供試体内部の最大加速度分布の例を図-2に示す。これより、深さ方向に一定の振幅でないため、見かけの弾性による2次モードのような応答が生じていると考えられ、さらに振動台の加速度より供試体内部の加速度が小さい場合もあることがわかる。

図-3に供試体内の加速度の応答倍率曲線の例を示す。ケース1-1では27Hz付近にピークがあり上段ほど応答が大きいこと、ケース4-2では53Hz付近にピークがあり下段・上段・中段の順に応答が大きいことがわかる。1次元の粗密振動の固有値との対比から、ケース1-1では1次モードが、ケース4-2では2次モードが現れていると考えられる。計測されたピーク振動数が、1次または2次の固有振動数であると考えて、見かけの縦波速度と弾性係数を逆算すると、表-2のようになる。同表には、岩崎・坂本らの論文<sup>1)</sup>に示された縦波速度の理論解を本実験の条件に適用した場合の理論値も示した。空気量と縦波速度の関係を図-4に示

すが、実験値と次式<sup>1)</sup>により求めた理論値はほぼ一致していることがわかる。

$$c = \sqrt{[K_A / \{ A (1 - A) \cdot \rho \}]} \tag{式1}$$

ここで、c：見かけの縦波速度、K<sub>A</sub>：空気の体積弾性率、A：空気量（体積比）、ρ：空気を含まないコンクリートの密度である。

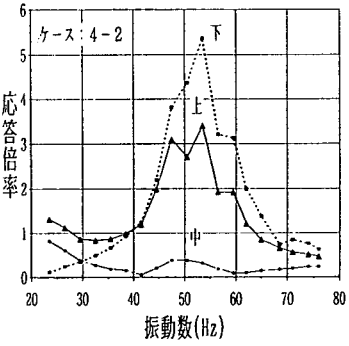
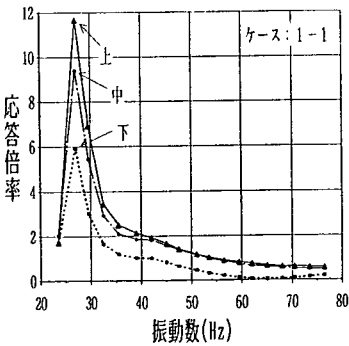
表－１ 実験に用いたコンクリートの配合・空気量・重量

| ケース名       | s/a<br>(%) | W/C<br>(%) | 空気量A(%) |            | スラブ <sup>°</sup> (cm) |            | 単重W(kgf/㎡) |              | 単位量(kgf/m3) |       |     |      | 混和剤(kgf) |      |
|------------|------------|------------|---------|------------|-----------------------|------------|------------|--------------|-------------|-------|-----|------|----------|------|
|            |            |            | 設計      | 実測         | 設計                    | 実測         | 設計         | 実測           | 水W          | セメントC | 砂S  | 粗骨材G | マイナ      | 303A |
| 1－1<br>1－2 | 37         | 39         | 1.5     | 1.8<br>1.9 | 4                     | 4.0<br>6.0 | 2.41       | 2.40<br>2.40 | 156         | 400   | 668 | 1182 | 4.0      | 10   |
| 2－1<br>2－2 | 37         | 38         | 2.5     | 2.6<br>2.4 | 4                     | 2.5<br>3.0 | 2.39       | 2.40<br>2.42 | 152         | 400   | 662 | 1171 | 4.0      | 20   |
| 3－1<br>3－2 | 37         | 37.3       | 3.5     | 3.5<br>3.9 | 4                     | 4.0<br>4.0 | 2.37       | 2.36<br>2.35 | 149         | 400   | 656 | 1160 | 4.0      | 30   |
| 4－1<br>4－2 | 37         | 36.8       | 4.0     | 4.3<br>5.0 | 4                     | 4.0<br>4.0 | 2.36       | 2.35<br>2.34 | 147         | 400   | 653 | 1155 | 4.0      | 40   |

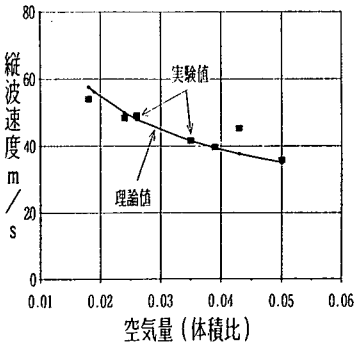
表－２ フレッシュコンクリートの見かけの弾性係数

| ケース名                       |             | 1－1   | 2－2   | 2－1   | 3－1   | 3－2   | 4－1   | 4－2   |
|----------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1次振動数<br>2次振動数<br>伝播速度     | f 1 Hz      | 27.0  | —     | —     | —     | —     | —     | —     |
|                            | f 2 Hz      | —     | 72.5  | 73.5  | 62.5  | 59.5  | 68.0  | 53.5  |
|                            | C e m/s     | 54.0  | 48.3  | 49.0  | 41.7  | 39.7  | 45.3  | 35.7  |
| 見かけの単位重量<br>見かけの弾性係数       | γ gf/cm3    | 2.4   | 2.42  | 2.40  | 2.36  | 2.35  | 2.35  | 2.34  |
|                            | E e kgf/cm2 | 4.17  | 3.37  | 3.44  | 2.44  | 2.20  | 2.88  | 1.77  |
| 空気量                        | A %         | 0.018 | 0.024 | 0.026 | 0.035 | 0.039 | 0.043 | 0.050 |
| 有効単位重量<br>理論伝播速度<br>理論弾性係数 | γ ' gf/cm3  | 2.44  | 2.45  | 2.45  | 2.45  | 2.45  | 2.45  | 2.45  |
|                            | C c m/s     | 57.6  | 49.9  | 48.0  | 41.6  | 39.5  | 37.7  | 35.0  |
|                            | E c kgf/cm2 | 4.74  | 3.59  | 3.30  | 2.43  | 2.18  | 1.99  | 1.71  |

注) ポアソン比ν：0.49（仮定値），空気の体積弾性率K<sub>A</sub>：1.4586kgf/cm2（文献1による）



図－３ 加速度応答倍率曲線例



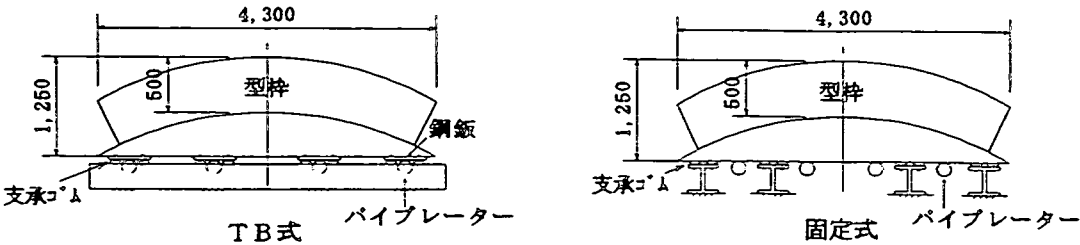
図－４ 空気量と縦波速度

3. 実大セグメントに対する実験および解析検討

(1) 振動締固め実験

振動締固め時に、セグメントコンクリートに生じる加速度を把握するために、実大セグメントを用いて振動締固め実験を行った。実験条件を表－３に示す。同表のCASE1, 2は、いずれもゴム支承で支持した鋼板にバイブレーターを取り付け、その上に型枠を直置きする場合（TB式）で、セグメント幅と加振力を変え

たケースである。CASE3はバイブレーターを型枠に直付けしてゴム支承に載せた場合（固定式）で、セグメント幅と加振力はCASE1と同じとした（図－5 参照）。加振振動数はバイブレータが安定した回転を示す状態での実測値である。



図－5 実験装置の概要

表－3 実験条件

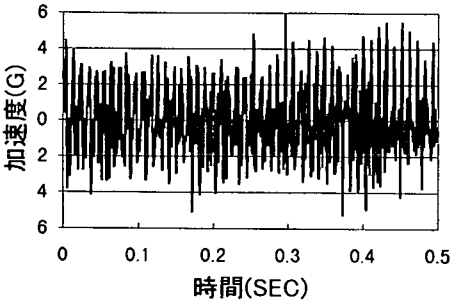
| ケース名  | セグメント幅(m) | バイブレーター |    |                   |
|-------|-----------|---------|----|-------------------|
|       |           | 設置方式    | 台数 | 加振力(tf/台) 振動数(Hz) |
| CASE1 | 1.2       | TB      | 8  | 1.0 97            |
| CASE2 | 1.5       | TB      | 8  | 1.5 75            |
| CASE3 | 1.2       | 固定      | 8  | 1.0 97            |

注) コンクリート :  $\sigma_{ck}=420\text{kgf/cm}^2$

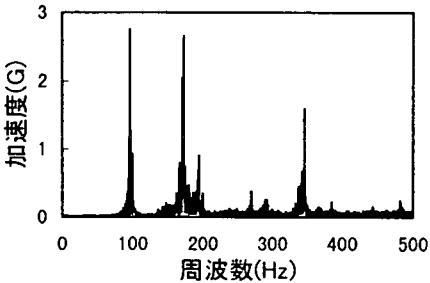
表－4 実験の加速度発生状況(G)

| ケース名  | 最大加速度 | 加振振動数のスペクトル値 | RMS  | 加速度実効値 | 締固め状態 |
|-------|-------|--------------|------|--------|-------|
| CASE1 | 12.67 | 1.01         | 2.51 | 2.83   | 良好    |
| CASE2 | 8.94  | 1.41         | 1.86 | 2.13   | 良好    |
| CASE3 | 2.97  | 0.93         | 1.24 | 0.98   | 不良    |

以下に実験結果を示す。対象は、すべて、所要のコンクリート全量を打設した直後の鉛直加速度である。実験で得られたセグメントコンクリート中の5測点の最大加速度は、場所によって3～4倍の差があった。各測点の加速度波形に対し、いくつかの指標の値を求め、その平均値を表－4に示した。各ケースの締固め状態は、目視で確認したところ、CASE1, 2は良好であったが、CASE3は不十分であった。また、単一振動数で加振したが、コンクリートの鉛直加速度波形は、図－6のように不規則となり、そのフーリエスペクトルは、図－7に示すように加振振動数のピークに加え、その整数倍の振動数にピークが現れた。良好な振動締固め状態を得るためには、2 G以上の加速度振幅が必要<sup>2) 3)</sup>とされているが、実大セグメントを用いた実験では、不規則な波形となり、締固め状態と最大加速度の大きさの対応が不明確である。そこで、表－4に示した加振力の大きさを示す指標の締固め状態との対応を整理すると、表－5のようになる。これより加速度実効値が最も妥当であり、RMSも比較的良好な整合を示すことが分かった。



図－6 CASE1の時刻歴応答波形の例(中央部)



図－7 CASE1のフーリエスペクトルの例(中央部)

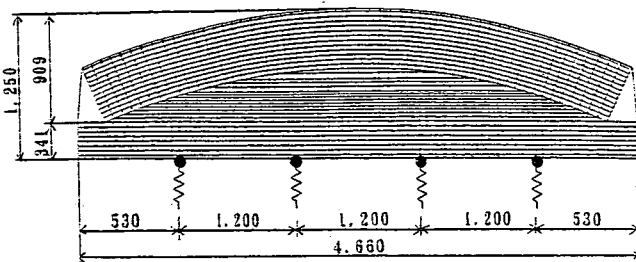
表－５ 指標と締め固め状態の対応

| 指 標 (案)                            | 締 め 固 め 状 態                                                |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| ①加速度波形の最大振幅                        | 全 CASE で最大加速度が 2 G を超えているが、CASE3 の締め固め状態は十分では無かった。         |
| ②加振振動数におけるスペクトル振幅                  | 全 CASE で、2 G に達していない。                                      |
| ③加速度スペクトルにおける複数のピーク振幅の二乗和平方根 (RMS) | CASE2 が 2 G 弱となるが、締め固め状態とほぼ整合している。                         |
| ④加速度実効値*                           | 目視による締め固め状態と整合がとれている。<br>なお、正弦波加速度の 2 G の速度実効値は 1.4 G となる。 |

\*注) 加速度実効値は、 $\text{SQRT}(\int_0^T a^2 dt / T)$  で定義される。ここで、T はサンプリング時間、a は加速度振幅。

## (2) FEMモデルの動的解析による締め固め効果の管理指標の検討

実験で得られた加速度の発生状況の、数値計算での再現を試みた。締め固め状態が良好であった CASE1, 2 を対象に 2 次元弾性 FEM による動的解析を行った。モデル化は、図－8 のように型枠およびフレッシュコンクリートを平面ひずみ要素とし、支承ゴムをばね要素とした。また、加振力は表－3 のパイプレータの加振力と振動数に合わせた鉛直方向の正弦波荷重とした。解析条件を表－6 に示す。フレッシュコンクリートのみかけの弾性係数  $E_c$  は、前述と同じ方法で空気量から算定した。



図－8 FEMモデル図

表－6 解析条件

|          |            | CASE 1               | CASE 2              |
|----------|------------|----------------------|---------------------|
| 空 気 量    | A          | 1.5%                 | 1.0%                |
| 有効単位体積重量 | $\gamma t$ | 2.2tf/m <sup>3</sup> |                     |
| ポアソン比    | $\nu$      | 0.49                 |                     |
| 弾 性 係 数  | $E_c$      | 57tf/m <sup>2</sup>  | 87tf/m <sup>2</sup> |
| 減 衰 定 数  | h          | 1.7%                 |                     |
| 型枠支持ばね定数 | k          | 1540tf/m             | 1440tf/m            |

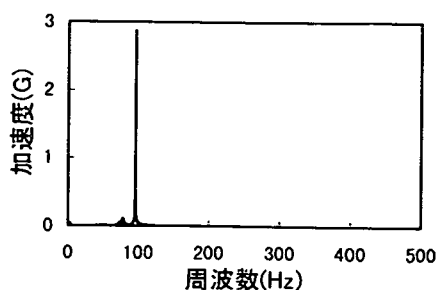
解析結果の実験の計測点と同じポイントの加速度の諸数値を求め、表－4 と同様に平均をとった値を表－7 に、中央部のフーリエスペクトルの例を図－9 に示す。これらより、次のことがわかる。

- ①加振振動数のフーリエ振幅は、実験結果とほぼ一致している。しかし、実験では図－7 のように加振振動数の整数倍でもピークが見られたが、解析では見られない。
- ②最大加速度・RMS・加速度実効値は、加振振動数の整数倍の卓越振動成分が再現できないため、表－4 の実験結果に比べて小さめの値となった。なお、解析ではコンクリートの加速度が加振振動数成分しか持たないため、加振振動数のフーリエスペクトルと RMS は一致する。

実効値の算定には加速度波形が必要となるが、波形には、振動数成分毎の振幅に加え、それらの位相の影響も含まれ、解析による再現性に難がある。そこで、発生加速度の大きさの指標として、実効値の次に締め固め状態と良い整合を示した RMS を選び、その推定方法を検討した。具体的には、表－4 の実験結果から加振振動数のフーリエ振幅と RMS の比率を算定し、この比率を解析結果のフーリエ振幅に乗じて RMS を推定した。この推定方法による結果を表－7 に示す。同表より、RMS は CASE1, 2 ともほぼ 2 G となり、締め固め状態と整合が取れるが、解析結果に乗ずる係数は、今後、より多くの実験で定める必要がある。

表－7 解析の加速度発生状況 (G)

| ケース名  | 最 大<br>加速度 | 加振振動数<br>のスペクトル値 | R M S | 加速度<br>実効値 | 補 正<br>R M S |
|-------|------------|------------------|-------|------------|--------------|
| CASE1 | 1.40       | 1.08             | 1.08  | 0.6        | 1.89         |
| CASE2 | 1.30       | 1.38             | 1.38  | 0.5        | 2.40         |



図－9 CASE1の解析のフーリエスペクトル

#### 4. まとめ

基礎振動実験と理論解析の結果、スランプ4 cm程度のセグメント用フレッシュコンクリートも、見かけの弾性挙動をすること、および空気量に基づく見かけの弾性係数は高い精度で算定可能であることを明らかにできた。したがって、その値を用いた動的解析により、フレッシュコンクリートの動的応答を推定できる。

また、大型の実大セグメントを用いた加振実験の結果、加振振動数の他に、規則的な高振動数成分が混入して、最大加速度は数倍になるものの、必ずしも有効な加振力とはならないこと、加速度波形の実効値を指標とすることにより、締め固まり状況との対応付けができることなどが分かった。また、F E Mモデルを用いた動的解析では、高振動成分が発生しないため、最大加速度やスペクトル値を小さく算定するものの、高振動数成分の混入率を実験から求めておけば、推定可能である見通しを得た。

#### 参考文献

- 1) 岩崎訓明, 坂本信義: コンクリート中における内部振動機の振動の伝播特性, 土木学会論文集, 第402号 /V-10, pp. 87~97, 1989. 2
- 2) 國府勝郎, 近藤拓也, 上野敦: R C C P用コンクリート締め固め性試験方法に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 46, pp. 964~969, 1992年
- 3) 山田弘道, 石井治郎, 落合実他: コンクリート振動機の性能実験, 竹中技術研究報告, No. 20, pp. 86~97, 1978年