

論文 水平振動方式におけるコンクリートの打込み高さ

陳 海峰*¹・河辺 伸二*²

要旨：水平振動方式で締固めを行う際に、締固め後のコンクリートの表面状態は一括で投入するコンクリートの打込み高さの影響が大きい。そこで、本研究では港湾工学の波動理論を適用してコンクリートの打込み高さと水平振動時に発生する波との関係から、コンクリートの打込み高さが表面状態に及ぼす影響を解析した。さらに、投入するコンクリートの一層の打込み高さが比較的小さい問題を解決するため、ハンマーを水平振動装置に設置し、水平振動と同時に型枠の両端の下層部だけに衝撃を与えながら締固めを行った。その結果、一括で投入するコンクリートの打込み高さを大きくしても良好な締固め効果が得られた。

キーワード：水平振動方式、打込み高さ、波動理論、ハンマー、表面気泡

1. はじめに

コンクリート二次製品の工場では、作業時に発生する騒音により作業者の労働安全衛生上の問題や、近隣住民の騒音環境悪化の問題が起きている。そこで筆者らは、10年前から低騒音の低振動数かつ高振幅の水平振動方式を提案し研究を行ってきた。一連の研究^{1)~5)}から、水平振動方式の主な特徴は、締固め時の騒音の低下、骨材分離の低下、表面気泡の減少、大量生産による効率化等が挙げられる。

本研究では、今までの研究成果に基づいて、港湾工学の波動理論を適用し、コンクリートの打込み高さや水平振動時に発生する波との関係からコンクリートの打込み高さが表面状態に及ぼす影響を解析した。また、投入するコンクリートの一層の打込み高さが比較的小さい問題を解決するため、ハンマーを水平振動装置に設置し、水平振動と同時に型枠の両端の下層部だけに衝撃を与えながら締固めを行い、締固め後のコンクリートの表面状態を検討した。

本研究でいう表面状態は、主に締固め後のコンクリートの表面気泡の面積率と表面気泡の分布状態を指す。

2. 水平振動方式

水平振動方式とは、コンクリートの締固め時に型枠を

水平方向に往復運動させる方式である。本研究で使用した水平振動装置を図-1に示す。装置は、インバータ制御のモータを動力とし、円盤を回転させて連結棒を通し振動台を水平方向に往復運動させる。型枠は水平振動台の上に固定し、水平振動台と同時に振動させる。それにより、型枠に投入したフレッシュコンクリートに振動を与え締固めを行う。振動数は、インバータ制御装置により1.5Hzまで自由に調整できる。振幅は、円盤にある4つの穴の位置を選択することで、50mm、75mm、100mm、150mmと変更できる。

3. 波動理論^{1),6)}

3.1 波動現象

水平振動方式で締固めを行う際の、型枠内のフレッシュコンクリートの流動状態は図-2に示す構造物に対する海の波の現象と似ている。そこで、港湾工学の海の波動理論を用いて解析することを試みる。水平振動方式によるフレッシュコンクリートの流動状態の概念図を図-3に示す。

港湾工学の波動理論を水平振動方式の締固め現象に引用する際、まず以下の3つの仮定が必要となる。

1) 実際の海の波は非常に複雑な形をしているが、水平振動方式により発生する波は比較的一定であり、周期も

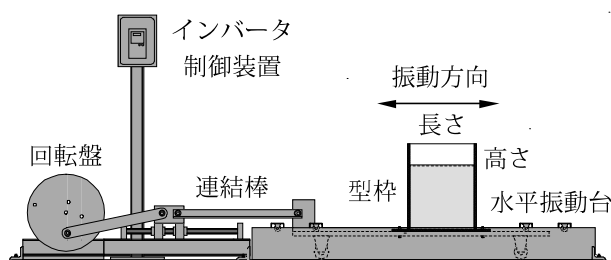


図-1 水平振動装置

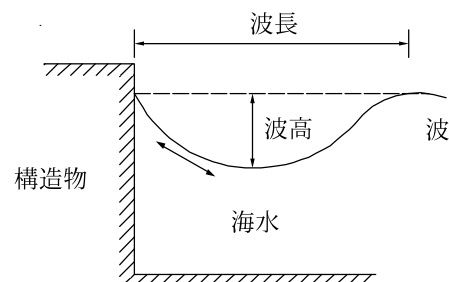


図-2 構造物に対する海の波の現象

* 1 名古屋工業大学 産学官連携センター 講師 工博 (正会員)

* 2 名古屋工業大学大学院 教授 工博 (正会員)

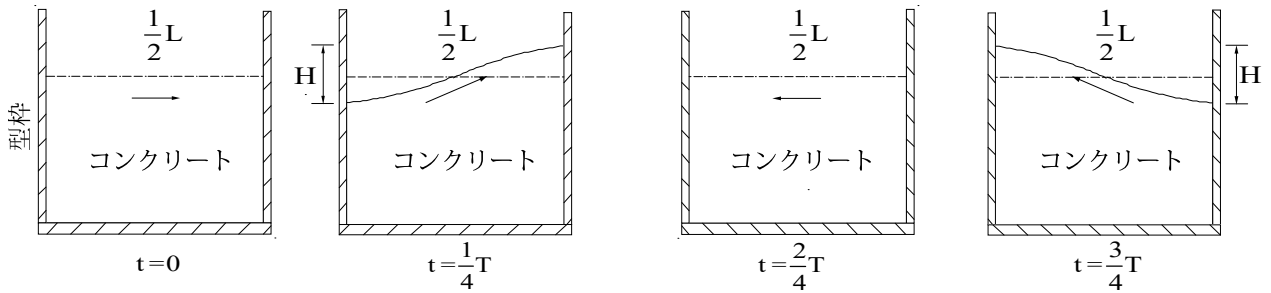


図-3 水平振動方式によるフレッシュコンクリートの流動状態の概念図

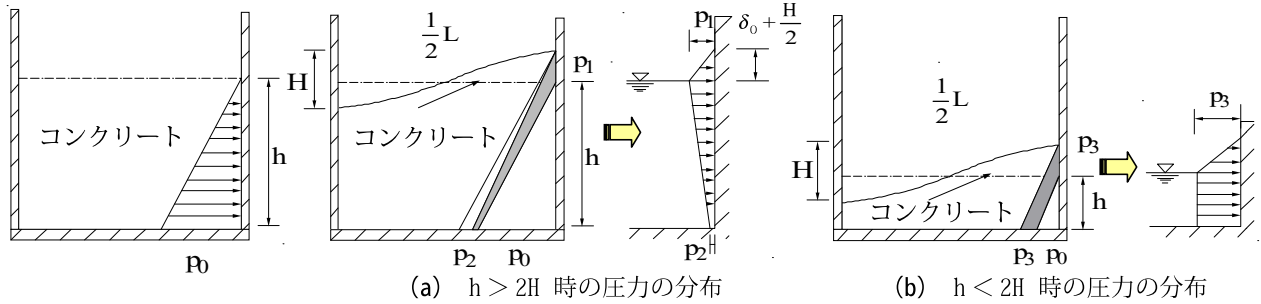


図-4 液圧の分布の概念図

図-5 水平振動方式による波圧の分布の概念図

水平振動装置により一定である。即ち、波高と周期は一定の規則波である。

2) 実際、波高が大きくなると波長は若干延びているが、波長の増大が最も著しい場合でも波高の増大率は13～25%である。そこで、計算を単純化するため波長の変化を無視する。すなわち、発生する波高による波長の変化は無視し、波長は型枠の長さの2倍と一定にする。

3) JASS5では、軟練りコンクリートを用いる場合、フレッシュコンクリートを液体と仮定し、型枠の壁面には図-4に示す p_0 のように液圧が作用すると記している。実際に、コンクリート二次製品工場で水平振動方式により締固めを行う場合、フレッシュコンクリートのスランプは通常18cm以上のものを用いる。そこで、水平振動方式で締固めを行うフレッシュコンクリートを軟練りコンクリートとし、液圧の分布として算出する。

しかし、自重による側圧 p_0 のみではコンクリートの締固めが不可能である。水平振動方式で締固めを行う際には、型枠の衝撃面に発生するコンクリートの波圧が締固めの主な原因であると考えられる。すなわち、型枠の衝撃面に作用する合計の圧力は、コンクリートの自重による側圧 p_0 にそれぞれ波圧 p_1 、 p_2 、 p_3 が加算されるとする。

3.2 波動理論式

港湾工学の波動理論⁶⁾と既往の研究¹⁾に基づいて、型枠の衝撃面に発生する波圧をフレッシュコンクリートの打込み高さ h と波高 H が、 $h > 2H$ の場合と $h < 2H$ の場合に区別して解析する。

1) $h > 2H$ の場合は、サンプルー簡略公式⁶⁾を用い解析する。波圧の分布は図-5-(a)に示すようになり、以下の式(1)～(3)で表す。

の式(1)～(3)で表す。

$$p_1 = (p_2 + \rho h 10^{-2}) \left(\frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} \right) \quad (1)$$

$$p_2 = \frac{\rho H 10^{-2}}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} \quad (2)$$

$$\delta_0 = \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \quad (3)$$

ここで

- p_1 : 型枠の衝撃面に波の峰があるときの静水面におけるフレッシュコンクリートの波圧強度(kN/m²)
- p_2 : 型枠の衝撃面下端における波圧強度(kN/m²)
- ρ : フレッシュコンクリートの単位体積質量(kg/m³)
- δ_0 : 型枠の衝撃面における波高中分面の静水面の高さ(m)
- h : フレッシュコンクリートの打込み高さ(m)
- H : 波高(フレッシュコンクリートの谷と山の距離)(m)
- L : 波長(型枠長さの2倍)(m)

2) $h < 2H$ の場合は、広井式⁶⁾を用い解析する。波圧の分布は図-5-(b)に示すようになり、式(4)で表す。

$$p_3 = 1.5 \rho H 10^{-2} \quad (4)$$

ここで

- p_3 : 型枠の衝撃面に波の峰があるときのフレッシュコンクリートの波圧強度(kN/m²)

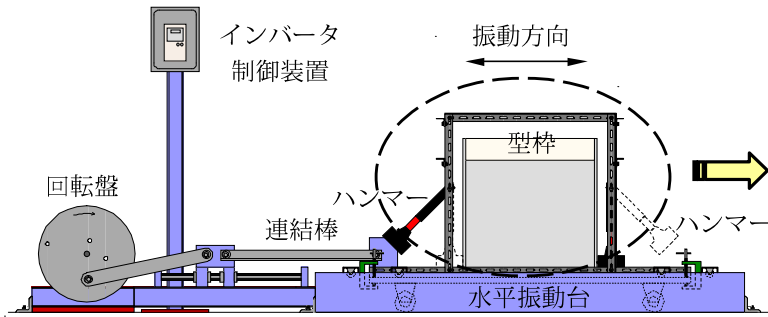


図-6 水平振動装置とハンマーによる組合せ

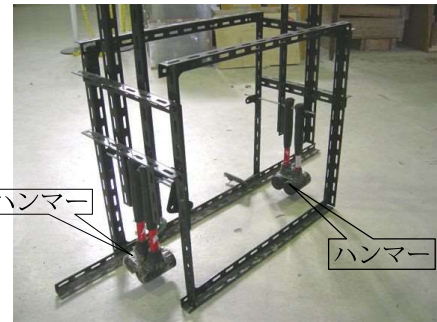


写真-1 ハンマーの組立て

表-1 使用材料と物理的性質

材料	種類	備考	
セメント	普通ポルトランドセメント	密度：3.15g/cm ³	比表面積：3410cm ² /g
細骨材	木曾川産砂(～5mm)	表乾密度：2.56g/cm ³	粗粒率：2.79
粗骨材	木曾川産砂利(5～25mm)	表乾密度：2.62g/cm ³	粗粒率：6.86
化学混和剤	AE剤	――	
化学混和剤	AE減水剤	密度：1.27g/cm ³	
水	上水道水	――	
離型剤	油性	――	

表-2 コンクリートの調合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE剤 ^{注)} (C×0.02%)	AE減水剤 ^{注)} (C×0.2%)
43	41	175	407	689	1013	0.081	0.81

注)単位水量に含む

4. 水平振動方式とハンマーとの組合せ³⁾

上記の波動理論から、水平振動を行う際に、 h (打込み高さ) $>2H$ (波の高さ)の場合に型枠の下層部或いは隅の波圧が小さいため不良が発生する原因の一つであると考えられる。 h (打込み高さ) $<2H$ (波の高さ)の場合は、型枠の上、下層部ともに波圧が大きいため、上、下層部ともに表面状態が良好になる。しかし、打込み高さが小さいため、何層かに分けて締固めを行わなければならない、効率に欠ける。既往の研究²⁾によれば、スランプ18cmの場合には、一層の打込み高さを20cm以下に抑えると締固め後のコンクリートの表面状態が良好であるとされている。

そこで、 h (打込み高さ) $>2H$ (波の高さ)の場合、上層部と下層部ともに表面状態を良好にするため、ハンマーを水平振動装置に設置し、水平振動方式の水平方向の運動を利用し、水平振動と同時に型枠の両端の下層部だけに衝撃を与えながら締固めを行う方法を考案した。水平振動装置とハンマーの組合せを図-6に示す。型枠に衝撃を与える際に発生する騒音を低減するため、頭部がゴム製のハンマーを用いた。1個のハンマーの質量は0.82kgであり、合計4個を使用した。ハンマーの組立てを写真-1に示す。

水平振動方式の振動条件は、振動数は1.0Hz、振幅は

100mmと一定にし、振動時間は60、120、180s間の3種類で実験を行った。

実験は、ハンマーで型枠の両方の隅を叩く方法(以下、ハンマーの両方有という)、ハンマーで型枠の片方の隅を叩く方法(以下、ハンマーの片方のみ有という)、ハンマーが無く水平振動のみの方法(以下、ハンマー無という)の3種類とし、ハンマーの有無の影響を比較した。

4.1 実験方法

(1) 使用材料及び調合

実験に用いたコンクリートの使用材料と物理的性質を表-1に、コンクリートの調合を表-2に示す。コンクリートの目標スランプは18cm、目標空気量は4.0%とした。コンクリートの練混ぜは、傾胴式練混ぜミキサーを使用した。

(2) 供試体の作製

300(高さ)×50(幅)×300(長さ)mmの合板型枠を使用した。コンクリートは型枠に一括で投入し、振動を行った。

(3) 表面気泡の測定

作製した供試体の表面気泡の面積率は、既往の研究^{1)～5)}で用いられた方法に基づいて測定した。測定手順を以下に示す。デジタルカメラを用いて脱型後の供試体の表面気泡を撮影した。撮影風景を写真-2に示し、撮影風景



写真-2 撮影風景

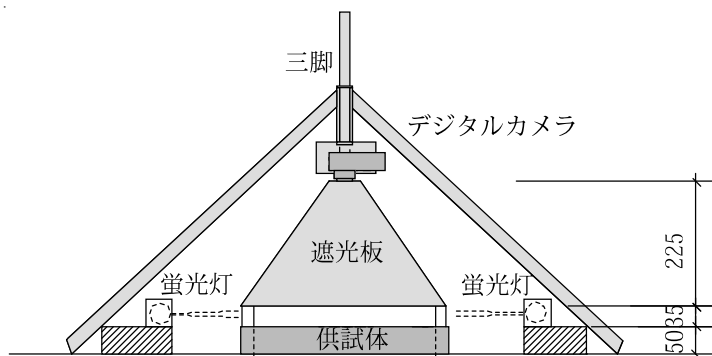


図-7 撮影風景の側面図(mm)

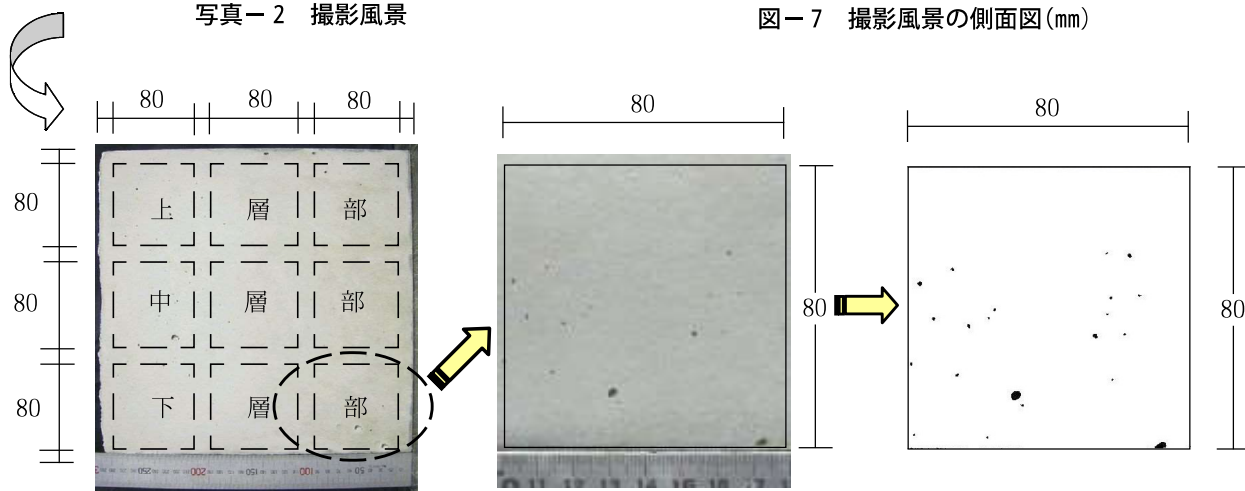


写真-3 供試体の測定箇所(mm)

写真-4 供試体の画像と2値化後の画像(mm)

の側面図を図-7に示す。遮光板と供試体の間を約3.5cm開いて、そこから蛍光灯で光を測定面に平行に当て、コンクリート表面の窪み部分を影として撮影した。撮影箇所は写真-3に示すように、側面の上、中、下と左、中、右の9箇所に分け、一箇所ずつ撮影した。一箇所の測定範囲は80×80mmとした。撮影した供試体の画像は、多機能汎用画像解析ソフト「Cosmos32」を用いて二値化し、コンピュータで表面気泡の面積率を計測した。供試体の画像と2値化後の画像を写真-4に示す。

5. 実験結果及び考察

作製した供試体の表面状態は、外観の目視観察と表面気泡の面積率により評価した。

5.1 外観の目視観察

ハンマーの両方有、ハンマーの片方のみ有、ハンマー無の水平振動のみにより作製した供試体をそれぞれ水平振動させた。水平振動時間60s、120s、180s間の表面状態を写真-5～7に示す。

水平振動時間60s間では、ハンマーの両方有、ハンマーの片方のみ有、ハンマー無の水平振動のみの供試体は、いずれも表面気泡が発生し、表面気泡の分布状態は大きな違いは現れていなかった。ただし、水平振動のみでは、下層部の隅に空洞が発生しているが、ハンマーの両方有、

片方のみ有では空洞が現れていなかった。

これらから、水平振動時間が短い場合には、ハンマーによって全体の表面気泡の減少効果は現れていなかったが、型枠の隅の部分では効果があると考えられる。

水平振動時間120s間のハンマーの両方有の供試体は、水平振動時間180s間のハンマー無の水平振動のみより表面気泡が少なく綺麗な表面状態が現れている。ハンマーの片方のみ有では、水平振動時間120s間で依然として表面気泡が多く現れていた。

水平振動時間180s間のハンマーの片方有の供試体も表面気泡が大幅に減少した。

以上から、水平振動時間を短くしてもハンマーの両方有により、水平振動のみの振動時間が長い場合の効果を得られると考えられる。ハンマーの片方のみ有では、水平振動時間が短い場合は、下層部の隅の部分では若干効果があるが、全体の表面気泡の減少には影響が少ない。これは、片方のみ有の場合フレッシュコンクリートに対する衝撃が小さいためと考えられる。

5.2 表面気泡の面積率

ハンマーによる表面状態の影響を数量的に評価するため、表面気泡の面積率を測定し検討した。

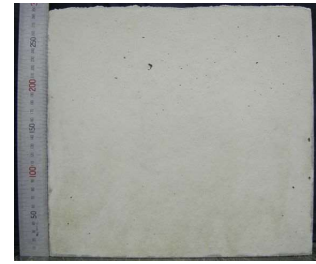
ハンマーの両方有、ハンマーの片方のみ有、ハンマー無の水平振動のみにより作製した供試体の水平振動時間と



水平振動時間 60s 間



水平振動時間 120s 間

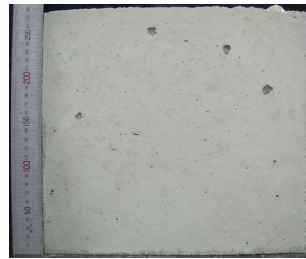


水平振動時間 180s 間

写真-5 ハンマーの両方有によるコンクリートの表面状態



水平振動時間 60s 間



水平振動時間 120s 間



水平振動時間 180s 間

写真-6 ハンマーの片方のみ有によるコンクリートの表面状態



水平振動時間 60s 間



水平振動時間 120s 間



水平振動時間 180s 間

写真-7 ハンマー無の水平振動のみによるコンクリートの表面状態

表面気泡の面積率との関係を図-8に示す。図に示すように、ハンマー無の水平振動のみにより作製した供試体は、水平振動時間60s間で表面気泡の面積率が1.7%に達しているが、ハンマーの片方のみ有、ハンマーの両方有では0.9%に達していた。水平振動時間120s間では、ハンマーの両方有で表面気泡の面積率が0.4%発生し、ハンマー無の180s間の0.6%よりも少なかった。これらから、ハンマーの両方有により水平振動時間が短い場合でも、水平振動のみの振動時間が長い場合の効果を得られると考えられる。

水平振動時間 60s 間におけるハンマーの両方有、ハンマーの片方のみ有、ハンマー無の水平振動のみにより作製した供試体の高さ方向と表面気泡の面積率との関係を図-9に示す。図に示すように、水平振動時間 60s 間では、型枠の上、中層部でハンマー有と無の表面気泡の面積率が1%前後で大きな差異は現れていなかった。ハンマー無の水平振動のみの下層部では表面気泡の面積率が3.3%に達しているに比べ、ハンマー有では0.5%以下と

なっていた。これらは、水平振動時間が短い場合に型枠の隅にハンマーの影響が大きいと考えられる。

水平振動時間 120s 間におけるハンマーの両方有、ハンマーの片方のみ有、ハンマー無の水平振動のみにより作製した供試体の高さ方向と表面気泡の面積率との関係を図-10に示す。図に示すように、水平振動時間 120s 間では、ハンマーの両方有で型枠の上層部の表面気泡の面積率が0.6%なり、下層部では0.2%まで減少していた。ハンマー無の水平振動のみは上層部に2%達していた。しかし、中、下層部では表面気泡の面積率が顕著な差異は現れていなかった。これらは、ハンマーの両方有により水平振動時間 120s 間ですでに型枠の上、中、下層部いずれも表面気泡が少なく良好な表面状態を得られると考えられる。

水平振動時間 180s 間におけるハンマーの両方有、ハンマーの片方のみ有、ハンマー無の水平振動のみにより作製した供試体の高さ方向と表面気泡の面積率との関係を図-11に示す。図に示すように、水平振動時間 180s 間で

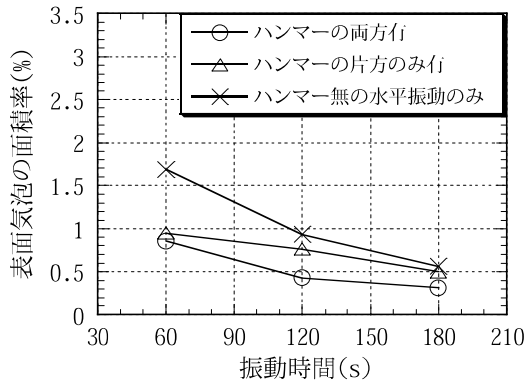


図-8 水平振動時間と表面気泡の面積率との関係

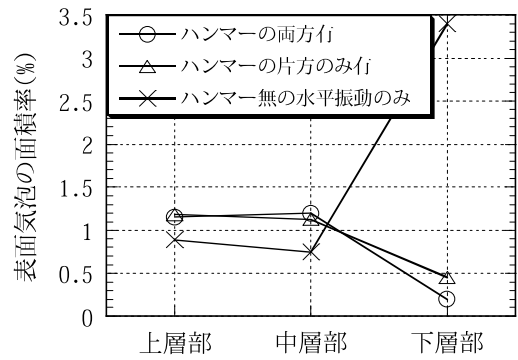


図-9 水平振動時間60s間における供試体の高さ方向と表面気泡の面積率との関係

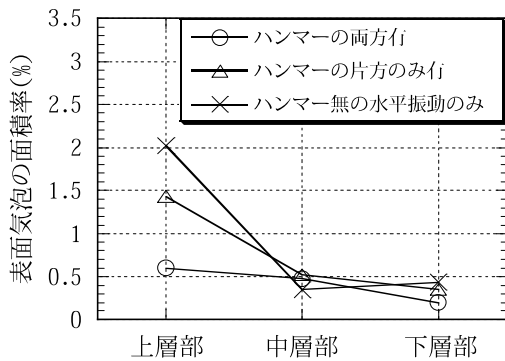


図-10 水平振動時間120s間における供試体の高さ方向と表面気泡の面積率との関係

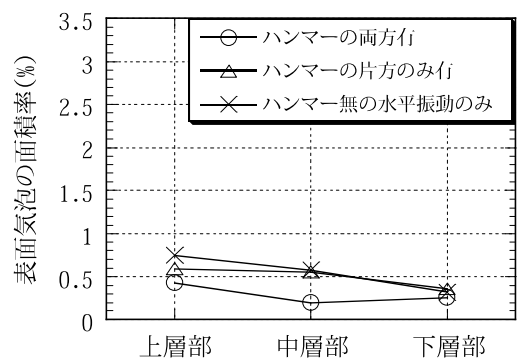


図-11 水平振動時間180s間における供試体の高さ方向と表面気泡の面積率との関係

は、ハンマー有が、型枠の上、中、下層部いずれもハンマー無の水平振動のみより表面気泡の面積率が減少しているが、顕著な差異は現れていなかった。これらから、水平振動時間が長い場合には、表面気泡の減少効果は小さく、ハンマーの両方有、ハンマーの片方のみ有、ハンマー無の水平振動のみいずれも良好な結果が得られると考えられる。

6. まとめ

本実験の結果を以下に示す。

- 1) 型枠の衝撃面に発生する波圧を、フレッシュコンクリートの打込み高さ h と波高 H を用いて、 $h > 2H$ の場合と $h < 2H$ の場合に区別して解析した。この際、発生する波圧の分布が、締固め後のコンクリートの表面状態に大きく影響することが分かった。
- 2) フレッシュコンクリートの打込み高さ h と波高 H が、 $h > 2H$ の場合は、ハンマーで型枠の隅を叩く方法により打込み高さを大きくしても、コンクリートの表面状態は良好になる。この際、ハンマーは型枠の両方の隅を叩く方法がより効果がある。
- 3) 水平振動時間を短かくしても、型枠の両方の隅をハンマーで叩く方法により、振動時間が長い水平振動の場合と同様な表面状態を得ることができる。

謝辞

本実験に協力を頂いた松岡コンクリート工業(株)に謝意を表します。

参考文献

- 1) 陳海峰, 河辺伸二: 水平振動方式におけるフレッシュコンクリートの打込み高さに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.619, pp.1-6, 2007.9
- 2) 陳海峰, 河辺伸二: 水平振動方式によるコンクリートの表面状態, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.771-776, 2007.7
- 3) 陳海峰, 河辺伸二: 水平振動方式とハンマーとの組み合わせによるコンクリートの表面状態, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.649-650, 2007.8
- 4) 陳海峰, 河辺伸二: 水平振動方式におけるフレッシュコンクリート及び粗骨材の挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1085-1090, 2006.7
- 5) 河辺伸二, 岡島達雄, M.W. チャロンゲ, 武藤正樹: 水平振動方式によるコンクリートの締固め効果と表面気泡, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.943-948, 1999.6
- 6) 合田良實: 海岸・港湾二訂版, わかり易い土木講座 17 土木学会編集, 彰国社刊, 1998.9