

論文 水平振動方式による軽量コンクリートの締固めにおける型枠形状の影響

河辺 伸二^{*1}・M.W. チャロンゲ^{*2}・陳 加潤^{*3}・武藤 正樹^{*4}

要旨: 水平振動方式で作製した軽量コンクリート供試体の圧縮強度をL型シュミットハンマーで評価し、さらに表面気泡測定を行い、型枠形状の違いによる水平振動方式の軽量コンクリートの締固めの効果を検討する。その結果は、直方体、多面体と斜面体の締固め結果は水平振動方式で良好な締固めが可能である。L型シュミットハンマーを用いて、水平振動方式で作製した軽量コンクリートの推定圧縮強度を測定し、検討した。製品の良否に関係の少ない気泡直径の範囲内で、型枠形状による表面気泡の性状に差を認めた。

キーワード: 水平振動、締固め、軽量コンクリート、L型シュミットハンマー、表面気泡

1. はじめに

コンクリート型枠振動機はフレッシュコンクリートの締固め効果が大きいと考えられるが、締固め時に90dB以上の騒音を発生する。そこで、締固め時の騒音を低減するために、型枠内のフレッシュコンクリートを高振幅かつ低振動数で水平方向に振動させることで締固めを行う方式（以下、水平振動方式という）を提案し、プレキャストコンクリート製品を作製した。水平振動方式の騒音は締固め時81dB以下となり、作業者の労働安全衛生向上と工場の近隣住民の音環境が保全されると期待される。¹⁾

軽量コンクリートのプレキャストコンクリート製品を水平振動方式で作製する可能性を検討するために、昨年、100×100×400mmの単純な小型供試体を研究対象とした²⁾。本研究では、600×50×500mmの供試体を用いて、型枠形状の違いが水平振動方式による軽量コンクリートの締固めに与える影響を検討する。水平振動方式で作製した供試体の圧縮強度をL型シュミットハンマー³⁾から求めた推定圧縮強度で評価し、さらに表面気泡の測定を行い、型枠形状の違いによる締固めの効果を検討する。

2. 実験方法

2.1 水平振動方式による締固め

水平振動方式の実験装置を図-1に示す。この装置はインバータ制御のモーターを動力に、円盤を回転させて水平方向の往復の動力に変換するものである。実験で検討する振幅は100mm、振動数は0.75Hz、1.00Hz、1.25Hzである。組み合

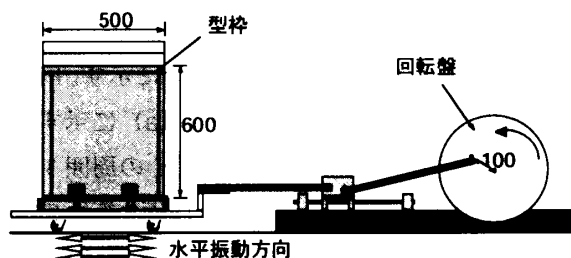


図-1 水平振動方式の実験装置（単位：mm）

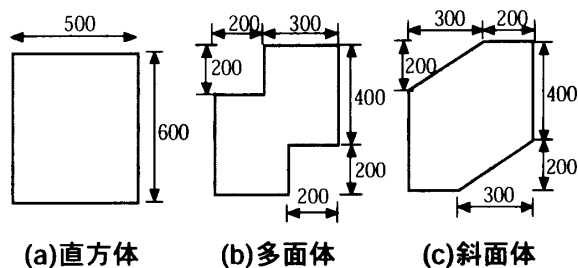


図-2 供試体の形状（厚さ 50, 単位：mm）

*1 名古屋工業大学助教授 工学研究科都市循環システム工学専攻 工博（正会員）

*2 名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム工学専攻 修士（工学）

*3 名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム工学専攻

*4 国土交通省 国土技術政策総合研究所 主任研究官 博士（工学）（正会員）

わせの違いを定量的に把握する目安として、式(1)の振動加速度と式(2)の総仕事量⁴⁾を用いる。

$$\alpha = 4a(\pi f)^2 \quad (1)$$

$$W = M(\pi af)^2 t \quad (2)$$

ここに、

α : 振動加速度(m/s²) W : 総仕事量(Js)

M : 質量(kg) f : 振動数(Hz=1/s)

a : 振幅(m) t : 振動時間(s)

図-2に示す直方体、多面体と斜面体の供試体を水平振動方式で作製する。フレッシュコンクリートを3層に分けて各層50秒間で締固めを行い、硬化脱型後、標準養生を行う。

人工軽量骨材の物理的性質を表-1、軽量コンクリートの調合を表-2に示す。スランブは12±2.5cmと18±2.5cmの2種類である。普通ポルトランドセメントを用い、目標空気量は5±1.5%、設計基準強度は24N/mm²とする。混和剤はAE減水剤である。

2.2 圧縮強度試験

L型シュミットハンマーにより圧縮強度の推定のために、JIS A 1108に従って、4種類の強度別のΦ100×200mmの円柱供試体を手詰めで作製する。コンクリートの調合を表-3に示す。円柱供試体の上面を研磨し、写真-1(a)に示すように、強度別に円柱供試体中心とその周囲3cm間隔で4箇所とり、上面5箇所、底面5箇所の測定に、合計10箇所の衝撃を与える。この10箇所の平均値を円柱供試体の反発度とする。反発度を測定した後、同一円柱供試体の圧縮強度をラムスレー型圧縮試験機で測定し、反発度と圧縮強度の推定式を求める。そして、写真-1(b)に示すように、水平振動方式で作製した供試体の反発度をL型シュミットハンマーで測定し、反発度と推定式より推定圧縮強度を求める。

2.3 表面気泡測定⁵⁾

表面気泡測定装置を写真-2に示す。コンクリート表面の気泡部を潰さないように供試体の表面に墨汁(黒色)を塗り、気泡部には白墨(白色)を充填する。供試体の気泡度数を画像解析ソフトウェアで測定する。

表-1 骨材の物理的性質(膨張頁岩系)

骨材	最大寸法 (mm)	吸水率 (%)	絶乾密度 (kg/l)	粗粒率 (%)
細骨材	5	14	1.63	2.71
粗骨材	15	0.51	0.95	6.50

表-2 軽量コンクリートの調合

スランブ (cm)	w/c (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (g/m ³)
			W	C	S	G	
12±2.5	44	42	172	390	450	360	975
18±2.5	44	46	178	402	492	326	1005

表-3 L型シュミットハンマーの試験の調合

設計基準強度 (N/mm ²)	w/c (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (g/m ³)
			W	C	S	G	
15	48	48	178	371	510	325	928
24	44	46	178	402	492	326	1005
30	42	44	178	424	453	342	1060
36	41	46	178	434	480	323	1085

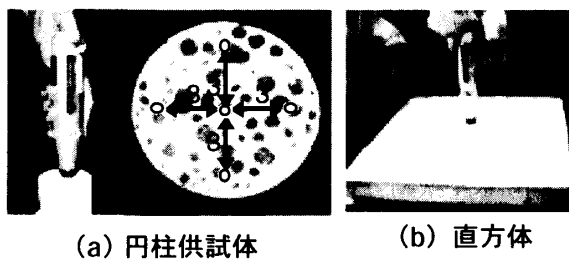


写真-1 L型シュミットハンマーの試験

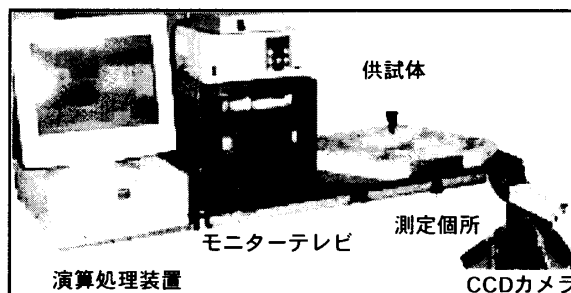


写真-2 表面気泡測定装置

3. 実験結果と考察

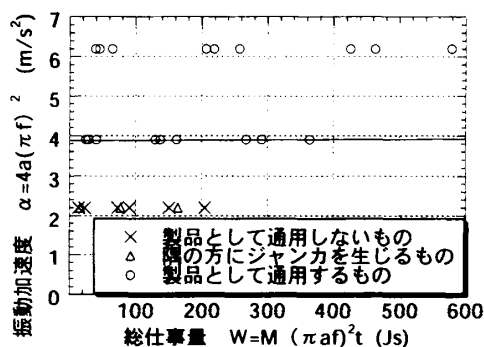
3.1 水平振動方式による締固め

締固め状態を外観目視調査により、製品として通用するもの(○印)、隅の方にじゃんかを生じるもの(△印)、製品として通用しないもの(×印)の3段階で目視評価する。

スランブ12±2.5cmにおいて振動条件(振動数

表－４ 振動条件と締固め結果
(スランブ 12 ± 2.5cm)

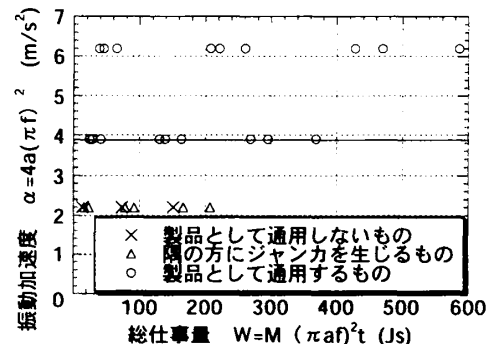
型枠 形状	振動数 f (Hz=1/s)	箇所	振動 時間 t (s)	質量 M (kg)	振動加速度 $4a(\pi f)^2$ (m/s^2)	総仕事量 $M(\pi a f)^2 t$ (Js)	目視 評価
直 方 体	0.75	上	50	8.3	2.2	22.9	×
		中	100	16.6	2.2	91.3	×
		下	150	24.9	2.2	205.4	×
	1.00	上	50	8.3	3.9	40.5	○
		中	100	16.6	3.9	161.9	○
		下	150	24.9	3.9	364.2	○
	1.25	上	50	8.3	6.2	64.4	○
		中	100	16.6	6.2	257.3	○
		下	150	24.9	6.2	578.9	○
多 面 体	0.75	上	50	5.0	2.2	13.8	×
		中	100	13.3	2.2	73.2	×
		下	150	18.3	2.2	151.0	×
	1.00	上	50	5.0	3.9	24.4	○
		中	100	13.3	3.9	129.7	○
		下	150	18.3	3.9	267.6	○
	1.25	上	50	5.0	6.2	38.8	○
		中	100	13.3	6.2	206.2	○
		下	150	18.3	6.2	425.5	○
斜 面 体	0.75	上	50	5.8	2.2	16.0	△
		中	100	14.1	2.2	77.6	△
		下	150	19.9	2.2	164.2	△
	1.00	上	50	5.8	3.9	28.4	○
		中	100	14.1	3.9	137.5	○
		下	150	19.9	3.9	291.0	○
	1.25	上	50	5.8	6.2	45.1	○
		中	100	14.1	6.2	218.6	○
		下	150	19.9	6.2	462.7	○

図－３ 振動加速度，総仕事量と締固め結果の
関係 (スランブ 12 ± 2.5cm)

f, 振幅a, 時間t, 振動加速度 α , 総仕事量Wと締固めの目視評価の関係を表－４と図－３に示す。振動数0.75Hz (振動加速度: $2.2m/s^2$)では、直方体, 多面体の下, 中, 上層部の締固め結果が不良であり、製品として通用しないものになった。斜面体の場合は下, 中, 上層部の隅に小さいジャンカが生じた。振動数1.00Hz (振動加速度: $3.9m/s^2$)以上では各種の供試体の下, 中, 上層部の締固め結果が良好であり、製品として通用するもの

表－５ 振動条件と締固め結果
(スランブ 18 ± 2.5cm)

型枠 形状	振動数 f (Hz=1/s)	箇所	振動 時間 t (s)	質量 M (kg)	振動加速度 $4a(\pi f)^2$ (m/s^2)	総仕事量 $M(\pi a f)^2 t$ (Js)	目視 評価
直 方 体	0.75	上	50	8.4	2.2	23.1	△
		中	100	16.8	2.2	92.4	△
		下	150	25.2	2.2	207.9	△
	1.00	上	50	8.4	3.9	41.0	○
		中	100	16.8	3.9	163.8	○
		下	150	25.2	3.9	368.6	○
	1.25	上	50	8.4	6.2	65.1	○
		中	100	16.8	6.2	260.4	○
		下	150	25.2	6.2	585.9	○
多 面 体	0.75	上	50	5.0	2.2	13.8	×
		中	100	13.4	2.2	73.7	×
		下	150	18.4	2.2	151.8	×
	1.00	上	50	5.0	3.9	24.4	○
		中	100	13.4	3.9	130.7	○
		下	150	18.4	3.9	269.1	○
	1.25	上	50	5.0	6.2	38.8	○
		中	100	13.4	6.2	207.7	○
		下	150	18.4	6.2	427.8	○
斜 面 体	0.75	上	50	5.9	2.2	16.2	△
		中	100	14.3	2.2	78.7	△
		下	150	20.2	2.2	166.7	△
	1.00	上	50	5.9	3.9	28.8	○
		中	100	14.3	3.9	139.4	○
		下	150	20.2	3.9	295.4	○
	1.25	上	50	5.9	6.2	45.7	○
		中	100	14.3	6.2	221.7	○
		下	150	20.2	6.2	469.7	○

図－４ 振動加速度，総仕事量と締固め結果の
関係 (スランブ 18 ± 2.5cm)

になった。

スランブ18 ± 2.5cmにおいて振動条件(振動数f, 振幅a, 時間t, 振動加速度 α , 総仕事量Wと締固めの目視評価の関係を表－５と図－４に示す。振動数0.75Hz (振動加速度: $2.2m/s^2$)では直方体, 多面体, 斜面体とも十分な締固めができなかった。振動数1.00Hz (振動加速度: $3.9m/s^2$)以上の場合、軽量コンクリートは各種の供試体の下, 中, 上層部に良好な締固め結果が得られた。

以上の結果より、振動数すなわち振動加速度が大きいほど外観の目視評価の結果は良好になり、スランプ $12 \pm 2.5\text{cm}$ 、 $18 \pm 2.5\text{cm}$ とも振動加速度 3.9m/s^2 以上ではいずれの型枠形状の供試体の締固め結果は良好であった。これは型枠内の軽量コンクリートを振動数 1.00Hz （振動加速度： 3.9m/s^2 ）以上で水平方向に振動すると、軽量骨材とセメントペーストの摩擦が振動時間経過とともに低減して、軽量コンクリートが液化化し、そして軽量骨材は水平方向に動きながら型枠内に密実安定すると同時にセメントペーストが軽量骨材の周囲を包み込んだと考えられる。

3.2 圧縮強度

L型シュミットハンマーによる反発度と圧縮強度の関係を図-5に示す。L型シュミットハンマーの反発度と円柱供試体の圧縮強度の関係はほぼ直線関係であった。図-5を踏まえて、L型シュミットハンマーの反発度と推定圧縮強度の推定式(3)を求めた。

$$y = 1.07x + 0.53 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3)$$

ここに、

y : コンクリートの推定圧縮強度 (N/mm^2)

x : L型シュミットハンマーによる反発度

製品として通用する供試体（表-4と表-5の○印の供試体）を測定対象とし、測定個所を図-6、図-7中に示す。端部から5cm供試体中央寄りを測定点とした。

スランプ $12 \pm 2.5\text{cm}$ における推定圧縮強度を図-6、スランプ $18 \pm 2.5\text{cm}$ における推定圧縮強度を図-7に示す。図中に各供試体における平均の推定圧縮強度を示す。強度管理のために、水平振動方式で供試体を作製したとき、同時に円柱供

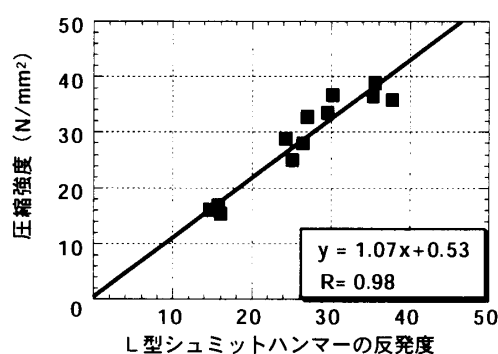


図-5 円柱供試体の反発度と圧縮強度の関係

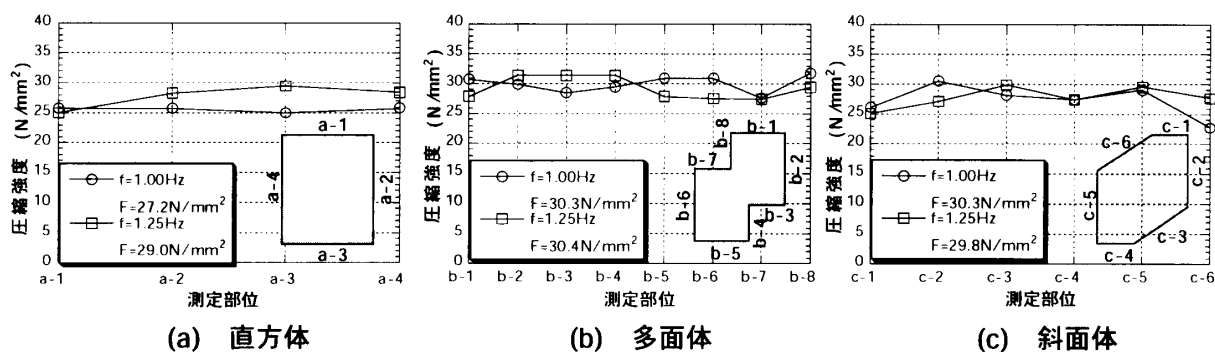


図-6 推定圧縮強度（スランプ $12 \pm 2.5\text{cm}$ ）

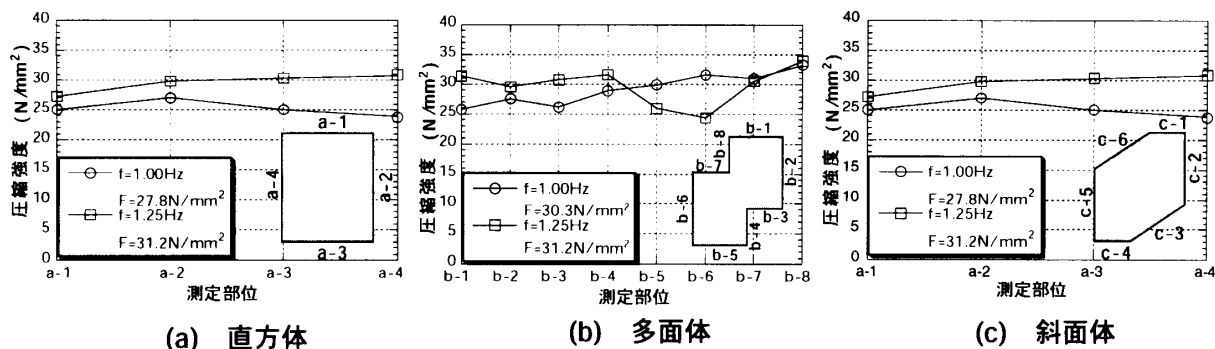


図-7 推定圧縮強度（スランプ $18 \pm 2.5\text{cm}$ ）

試体を手詰めで作製した。JIS A 1108に従って測定したスランプ $12 \pm 2.5\text{cm}$ の円柱供試体の平均圧縮強度は 26.6N/mm^2 であり、 $18 \pm 2.5\text{cm}$ の円柱供試体の平均圧縮強度は 27.3N/mm^2 であった。

式(3)より求めた水平振動方式で作製した供試体の下層部から上層部への平均の推定圧縮強度は 27.2N/mm^2 以上であった。いくつかの端部分の推定圧縮強度が平均の推定圧縮強度より小さかったが、供試体の下層部から上層部への平均の推定圧縮強度は、円柱供試体の圧縮強度に対して同等以上であった。

3.3 表面気泡

硬化後のコンクリート供試体の下部と上部の表面の表面気泡を測定した。スランプ $12 \pm 2.5\text{cm}$ における表面気泡の測定結果を図-8に、スランプ $18 \pm 2.5\text{cm}$ における表面気泡の測定結果を図-9に示す。表面気泡の測定範囲は $200 \times 50\text{mm}$ とし、測定箇所を図中に示した。

図-8と図-9より、振動数 1.00Hz と 1.25Hz では、いずれの供試体の下部の表面気泡は上部に比べて少なかった。これは下部の気泡が上部に上昇しやすいものとする。

各供試体の上部の気泡について比較すると、多面体の立面部分の表面気泡は少ない。これは多面体の上部は型枠の垂直部が短く、下部から連行される気泡が少ない分、直方体の上部に比べ表面気泡は少なくなったと考えられる。また、多面体の横部分は上面の型枠により空気泡が抜けにくいため、表面気泡が多くなった。さらに、斜面体の上部のフレッシュコンクリートが擦る方向は斜め方向と考えられるため、斜面体の表面気泡は多くなった。製品の良否に関係が小さい気泡直径 2mm 程度以下の範囲内で、型枠形状による表面気泡の性状に差を認めた。

4. 結論

スランプ $12 \pm 2.5\text{cm}$ とスランプ $18 \pm 2.5\text{cm}$ の軽量コンクリートの締固めにおいて、本研究の範囲内で以下のことが言える。

1) 水平振動方式による締固めにおいて、振動

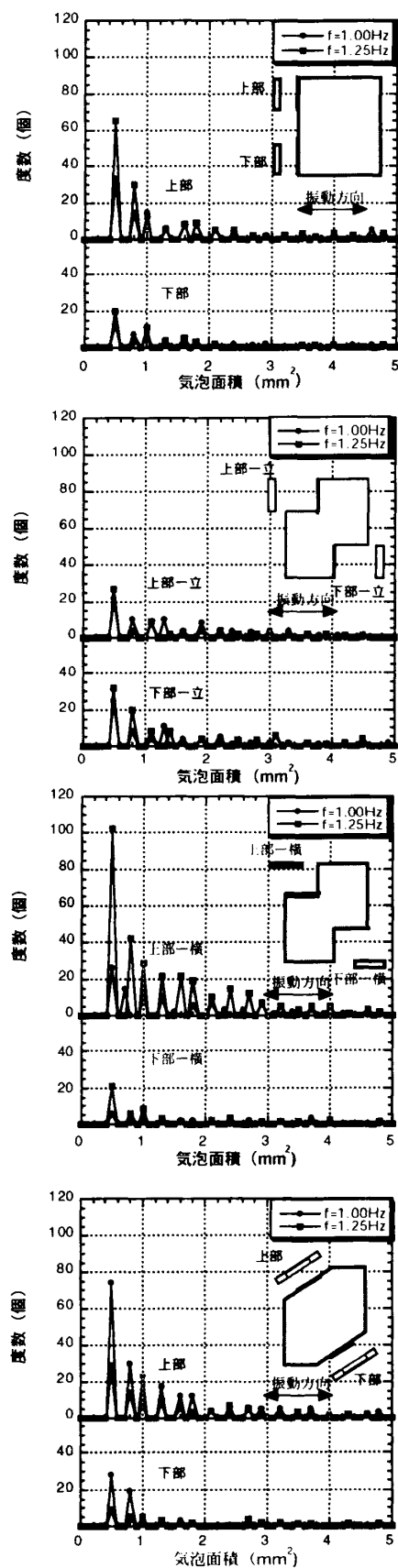


図-8 表面気泡の測定結果
(スランプ $12 \pm 2.5\text{cm}$)

加速度 3.9m/s^2 以上で、直方体、多面体、斜面体のいずれの型枠形状で良好な締固めが可能であった。

2) L型シュミットハンマーから求めた各供試体の下層部から上層部への平均の推定圧縮強度は、円柱供試体の圧縮強度に対して同等以上であった。

3) 製品の良否に関係が少ない気泡直径 2mm 程度以下の範囲内で、型枠形状による表面気泡の性状に差を認めた。

謝辞

本研究に対し絶えず御助言を頂いた名古屋工業大学前学長岡島達雄工学博士に、深く感謝の意を表します。本研究は松岡コンクリート工業(株)との共同研究にて行いました。ここに深く謝意を表します。また、材料提供の日本メサライト工業(株)に謝意を表します。

参考文献

- 1) M.W. チャロンゲ, 河辺伸二, 武藤正樹, 岡島達雄: 低振動数と高振幅の水平振動方式によるコンクリートの締固めに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.545, pp.7~11, 2001.7
- 2) M.W. チャロンゲ, 河辺伸二, 岡島達雄, 武藤正樹: 水平振動方式による軽量コンクリートの締固めに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.877~882, 2001.7
- 3) 柏忠二: コンクリートの非破壊試験法, 富士物産(株), 1980
- 4) フレッシュコンクリートの挙動研究委員会: 振動締固めワーキンググループ, コンクリートの振動締固めに関する実験報告書, (社)日本コンクリート工学協会, p.7, 1990.3
- 5) 田代侃, 沼田修: プレキャストコンクリートの表面性状に及ぼす成型方法の影響, A-1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.771~772, 1997.9

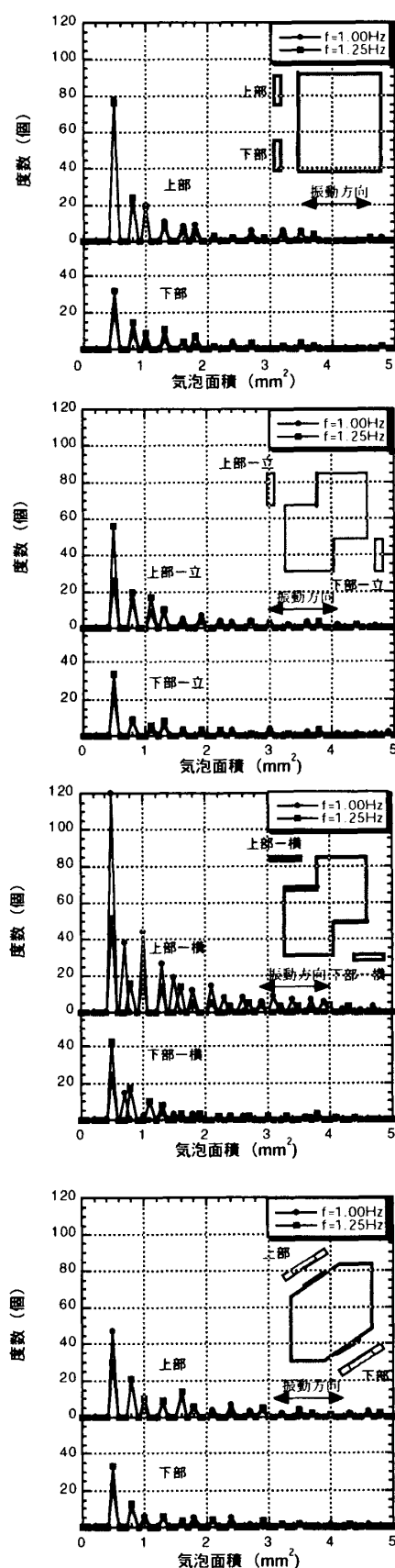


図-9 表面気泡の測定結果
(スランプ $18 \pm 2.5\text{cm}$)