人工軽量骨材コンクリートの締固め*

(特に振動台によるかた練りコンクリートの締固めについて)

河 野 清**

Vibrating Compaction of Concrete with Artificial Lightweight Aggregate

by

Kiyoshi KOHNO

(Faculty of Engineering, Tokushima University, Tokushima)

This paper describes the preparation of vibrating compaction of concretes by the use of artificial lightweight aggregates, especially the consolidation on a vibrating table for dry mixes. The effects of vibrating frequency, amplitude, acceleration and time on the compressive strength of concrete were investigated.

These test results are summarized as follows : —

(1) The use of a vibrating table is a more effective method for obtaining consolidation of lightweight concrete in thin sections than internal vibration.

(2) The frequency of 3 000 to 5 000 vpm, the amplitude of 0.6 to 1.1mm and the acceleration of 5 to 10 g concerning the vibrator table used for this study are found to be suitable for the compaction of lightweight concrete.

(3) The length of time taken in vibration on the table can be somewhat shortened for lightweight concrete, although the optimum condition of compaction is dependent on the shape of the aggregate that was used.

(4) When the internal vibrator of a rod type is used for lightweight concrete, vibration of higher frequency is preferred for efficiency. However, the distance between the pair of legs of the plug must be kept as close as possible.

(Received Oct. 5, 1968)

1 ま え が き

近年、良質の人工軽量骨材が開発され、自重の軽減による下部構造の簡易化、スパンの長大化、取り扱いやすさなどの利点、さらに天然骨材の不足とあいまって今日では一般の土木・建築のコンクリート構造物に盛んに使用されるようになってきている。

人工軽量骨材およびこれを用いたコンクリート¹⁾に関しては、数年来きわめて多くの研究が行なわれ、その性状が明らかにされてきているが、実際の施工面についてはまだ充分な研究がなされておらず、その利用分野の拡大とともに今後さらに検討されなければならない問題点も多い。

人工軽量骨材は河川産骨材に比べて、比重がかなり小さく、最大寸法、粒形、吸水量なども異なるので、練り混ぜ、運搬、打込み、締固めなどその取り扱いの際には充分な配慮が必要である。これらの施工の良否は硬化コンクリートの品質と密接な関係のある重要な問題であり、構造部材の種類と形状・寸法、コンクリ

ートのコンシステンシなどと関連づけて研究を進める必要がある。

ここでは施工上の重要な問題の一つである締固めを取りあげ、将来、人工軽量骨材のプレキャスト部材への利用の増大を考慮し、特にかた練りコンクリートで振動台を用いた場合の締固めについて報告する。

2 振動台による締固めに関する研究

2・1 使用材料とコンクリートの配合

セメントは普通ポルトランドセメント（比重＝3.15、ブレン比表面積＝3 160 cm²/g、28日圧縮強度 412 kg/cm²）を用いた。

人工軽量骨材は、その形状の差異による影響について調べるため、市販の代表的な造粒型膨張頁岩（記号：R）と非造粒型膨張頁岩（記号：S）の2種（Fig. 1 参照）を取りあげ、また比較のために用いた川砂利・川砂（記号：N）は吉野川産で最大寸法 20 mm のものを用いた。これらの骨材の試験成績を Table I に示す。

コンクリートの配合は一般の振動締固め製品を対象とし、軽量コンクリートの場合は単位セメント量 330

* 原稿受理 昭和43年10月5日

** 正 会 員 徳島大学工学部 徳島市南常三島町

Table I. Physical properties of used aggregates.

Physical properties	Type of aggregate	Artificial lightweight aggregate				Normal aggregate (N)	
		Pelletized type (R)		Coated type (S)		River gravel	River sand
		Coarse agg.	Fine agg.	Coarse agg.	Fine agg.		
Fineness modulus (F.M.)		6.44	2.65	6.59	2.86	6.71	2.72
Specific gravity (Saturated surface-dry)		1.37	1.92	1.24	1.90	2.62	2.62
Water absorption (%)		2.0	4.3	9.6	18.7	1.1	1.0
Bulk density (kg/m ³)		870	1180	720	1010	1660	1680

Table II. Mix data of used concretes.

Type of aggregate	R-aggregate			S-aggregate			N-aggregate		
Type of mix	R-1	R-2	R-3	S-1	S-2	S-3	N-1	N-2	N-3
Maximum size (mm)	15	15	15	20	20	20	20	20	20
Slump (cm)	1±0.5	3±1	6±1	1±0.5	3±1	6±1	1±0.5	3±1	6±1
Water* (kg)	164	173	180	152	161	168	158	167	174
Cement (kg)	330	330	330	330	330	330	320	320	320
W/C* (%)	49.7	52.4	54.5	46.1	48.8	50.9	49.4	52.2	54.4
s/a (%)	48	46	44	48	46	44	46	44	42

* Data at a casting temperature of 28℃

Pelletized type (R) Coated type (S)
Fig. 1. Artificial lightweight aggregate.

Fig. 2. Table vibrator and molds.

kg, 普通コンクリートでは 320 kg とし, スランプは 6 cm 以下で 3 種に変え, Table II に示すものを用いた.

2・2 コンクリートの締固め方法

2・2・1 コンクリートの練り混ぜ 容量 50 l の強制練りミキサ (山中シャフト K K 製) を用いてコンクリートの練り混ぜを行なった. まず, 最初の 1 分間でモルタルを練り, ミキサを止めて粗骨材を投入した後さらに 1 分間練り混ぜを行なった. なお, 軽量骨材は十分にプレウェッチングしたものを用い, 練り混ぜの際に表面水の補整を行なった. 川砂利は表乾状態で使用し, 川砂は有効水量を加えて用いた.

2・2・2 振動台によるコンクリートの締固め 練り混ぜを終えたコンクリートは, 鋳鉄製の φ 10×20 cm 円柱形型わくに一層に詰め, Fig. 2 に示すように振動台 (不平衡重錘式テーブル型パイププレート, 丸東製作所製) の中央部に型わく 2 個を取り付け, Fig. 3 に示す種々の振動締固め条件でコンクリートの締固めを行ない, 振動数, 振幅, 加速度, 振動時間などの締

Vibrating time at maximum frequency
Slump 1±0.5.....20 sec
Slump 3±1.....15 sec
Slump 6±1.....10 sec
Amplitude of table
0.6~0.8 mm
1.0~1.2 mm

Fig. 3. Conditions of vibrating compaction.

固め効果への影響を調べた. なお, 比較のため振動数 8 000 vpm で直径 28 mm の棒形振動機を用い, φ 10×20 cm の型わくに一層詰めし振動棒を中央 1 個所にそう入し, スランプの差異によって振動時間を 9, 12 および 15 秒間に変えて締固めを行なった. さらに JIS A 1132 に準じ, 抜き終わってから木づちで側面を軽

く数回たたいた。

供試体は成形後、20～21℃の恒温室に入れ、数時間後にセメントペーストでキャッピングを行ない、翌日脱型してから以後所定材令まで20～22℃の水そうで養生した。

2・2・3 締固め効果の判定 コンクリートの締固め効果を判定するには、強度のほか電気抵抗、内圧力、密度、動弾性係数、超音波速度、反発度など種々の方法があるが、本報告ではコンクリートの品質判定の基準になっている圧縮強度を用いた。

材令7日および28日で供試体の重量を測定した後、100 t 万能試験機によって圧縮強度試験を行なった。なお、一部の供試体についてはヤング率測定器を用いてコンクリートの動弾性係数も求めた。

供試体数は1種につき3本としたが、その変動係数は0.2～6%の範囲内にあり、その平均値を求めると軽量コンクリートで3.5%、普通コンクリートで3.2%であった。

2・3 各種要因の締固め効果への影響

2・3・1 振動数および振幅の圧縮強度への影響

締固め際の振動台の振動数と材令28日の圧縮強度との関係を示したFig. 4(1)、(2)にみられるように、骨材の種類によってコンクリートの締固めにおける最適振動数は異なっている。振幅の大きい場合、軽量コンクリートではR骨材を用いたもので3000～4000 vpm、S骨材では4000 vpmのとき締固め効果がよく圧縮強度は高いが、川砂利・川砂を用いた普通コンクリートでは5000～6000 vpmの比較的高振動数で高い強度

が得られる傾向にある。振幅の小さい場合においてもその傾向に大差はないが、S骨材コンクリートでは振動数5000 vpmでよい結果が得られた。

造粒型R骨材コンクリートでは、やや角ばった非造粒型S骨材を用いたコンクリートに比べて、低振動数で高い強度が得られているが、これは骨材粒子が球形のため、粒子間の摩擦抵抗が小さくなりコンクリートの流動性がよくなるためと考えられる。軽量コンクリートの場合、普通コンクリートに比べて高振動数での締固め効果がやや低く、強度低下の傾向を示したのは粗骨材の浮上による材料分離の影響と思われる。

振幅の影響については、振幅の小さい場合は大きい場合に比べて強度が低く、Washaも普通コンクリートの結果について低振動数では振幅を大きくしたほど高強度が得られると述べている。Fig. 4にみられるように、コンクリートのコンシステンシが大きくなると締固めが容易になるので、振幅による強度差は小さくなる傾向がみられる。

なお、8000 vpmの棒状振動機の結果と比較すると、最適振動数で締固めを行なえば、振動台のほうが明らかに強度が高く、締固め効果のよいことを示している。

2・3・2 加速度の圧縮強度への影響 振動台の型わく取付け位置における振動加速度を加速度振動計を用いて実測したので、3種類の骨材コンクリートについて加速度と圧縮強度との関係をFig. 5に示した。馬場、Meissnerらは加速度が締固めに重要な要因であると報告しているが、Fig. 5にみられるように、本実験結果では明りょうな傾向が得られていない。しかし、

Fig. 4. Relationships between frequency and compressive strength of concretes at 28 days.

Fig. 5. Relationships between acceleration and compressive strength of concretes at 28 days.

(Type of mix : L-1, frequency : 4 000 vpm, time : 10, 20 and 30 sec)

Fig. 7. Examples of appearance of concrete sections cut in two.

R骨材コンクリートで4~10g, S骨材コンクリートでは7~13g, 普通コンクリートでは11~18g程度のときに締固め効果が比較的大となっている。

軽量コンクリートでは普通コンクリートに比べて明らかに最適加速度は小さい。また、各種コンクリートともコンクリートのコンシステンシが大きくなるにつれて加速度の圧縮強度への影響が小となる傾向がある。なお英国の土木学会と構造学会の連合委員会の振動締固めに関する報告によると、振動台による普通コンクリートの締固めには加速度4~7gが必要であると述べているが、この値は本実験のR骨材を用いた軽量コンクリートの締固めで得られた結果とほぼ同じである。

2・3・3 振動時間の圧縮強度への影響 R骨材コンクリートと普通コンクリートについて圧縮強度と振動時間との関係をFig. 6に示したが、軽量コンクリートでは振動時間を長くしても強度増加はみられずむしろ低下する傾向にある。一方、普通コンクリートでは、振動時間の増加とともに強度は増大し、ごくかた練りの場合は120秒でも増加の傾向が得られている。

軽量コンクリートが比較的短時間で締め固められるのは、骨材粒子が軽いため粒子の移動や再配列、粒子のかみ合せによる組織の安定化などがすみやかに行なわれるため、振動時間が長くなっても強度増加がみ

Fig. 6. Effect of vibrating time on compressive strength of concrete.

られないのは、Fig. 7にみられるように材料分離による骨材の浮上の影響のほか、Cusens⁴⁾の指摘しているように、時間が長くなると型わく中のコンクリートに不安定な回転を生ずるためと考えられる。

これらの結果より、軽量コンクリートの振動台による締固め時間は、普通コンクリートに比べていくぶん短かくできると考えられる。

3 棒形振動機による締固めについて

内部振動機による普通コンクリートの締固めについては、Bergstrom³⁾, Kolek⁶⁾, 馬場⁸⁾, Meissner⁹⁾, 英国の土木・構造学会連合委員会、尾坂らの報告があり、振動

締固め過程や諸要因の締固め効果に及ぼす影響について研究されているが、軽量コンクリートの締固めに関する研究結果はきわめて少ない。

鳥田¹²⁾⁽¹³⁾らは、建築用の軟練りコンクリートでは、締固めの際振動時間を短く（5秒程度）するかわりに、さし込み間隔を小さく（30 cm 程度）するのがよいと述べ、スランプ18～21 cm の場合、振動時間が長くなると粗骨材の浮上が著しくなり、上下層の分離が生ずると報告している。

土木学会の人工軽量骨材コンクリート設計施工指針¹⁴⁾（案）では、軽量コンクリートの締固めには内部振動機を用いるのを原則とし、普通コンクリートの場合よりはやや高振動数の振動機を用いるのがよいこと、一層の打込み高さ、振動時間、さし込み間隔などについては責任技術者の指示に従うよう指摘している。普通コンクリートに比べ、軽量コンクリートでは振動が吸収されやすいので、その有効範囲が小さくなり、自重で型わくのすみずみまで行きわたる傾向も弱くなるので、振動機のさし込み間隔は特に密にするのがよいとされている。

ACI 213 委員会の軽量骨材コンクリートの指針¹⁵⁾では、軽量コンクリートの打込みは普通コンクリートと同様に行ない、粗骨材とモルタルとが分離しないよう適当な締固めを行なうよう規定し、分離を防止するためスランプの最大値を 10 cm、良好な床面を作るには 8 cm 程度のコンクリートの使用を推奨している。

日本材料学会の人工軽量骨材使用コンクリート設計施工指針¹⁶⁾（案）では、打込み後コンクリートの柔らかさに応じて適当な振動打ちを行なうのがきわめて有効で、特に建築用の軟練りコンクリートでは棒つきのほか、型わくの外部から木づちで振動を与えるのがきわめて効果的であり、また PC 用などのかた練りでは型わく振動機が効果的であると解説している。

棒形の内部振動機を用いる場合は、振動エネルギーが周囲のコンクリートに吸収され締固め効率が低下するので、Jones¹⁷⁾らは 7 200 vpm 以上の振動機で締固めるとよい結果が得られると報告しており、今井¹⁸⁾らの報告によると、10 000 vpm 以上の内部振動機の使用がスラブの締固めには効果的であったと述べている。

造粒型の人工軽量骨材（R）を用いて、 $\phi 10 \times 20$ cm の小型円柱供試体で求めた締固め時間と圧縮強度との関係を Fig. 8 に示す。この結果にみられるように、型わくの寸法に対し棒形振動機の径（ $\phi 28$ mm）が大きいので、振動締固めの効率がよく 5 秒程度の短時間で充分な強度が得られており、さらに振動時間を長くしても、強度は増進せずむしろ低下の傾向を示している。

Kolek¹⁹⁾は普通コンクリートの締固め過程を(1)初期沈

Specimen : $\phi 10 \times 20$ cm cylinder
 Vibrator : 8 000 vpm rod type ($\phi 28$ mm)
 Aggregate : ALA₁ pelletized type (R)
 Concrete mix :

No.	Ms. (mm)	Sl. (cm)	C (kg)	W/C (%)	s/a (%)
I	15	1 $\pm$ 0.5	430	50	48
II	15	6 $\pm$ 1	430	55	44

Fig. 8. Relationships between vibrating time of internal vibrator and compressive strength of concrete.

(Type of mix: Mix-II (R))
 (Vibrating time : 15 sec)

Fig. 9. Cut section of concrete compacted with internal vibration.

下 (2)気ほう排除 (3)安定化 (4)分離の4段階に分けているが、軽量コンクリートでは骨材粒子が軽くしかも球形に近いため、(1)から(3)の段階が比較的短時間で終わり、Fig. 9にみられるように、時間を少し長くするとやや材料分離の傾向が現われるためと考えられる。

部材の形状・寸法、振動機の性能によって締固め条件は異なってくるが、軽量コンクリートの振動締固めの際には振動棒のさし込み間隔をできるだけ密にし、粗骨材とモルタルとの分離が生じないような適当な時間締固めを行なうのがよい。

4 型わく振動機による締固めについて

型わく振動機による普通コンクリートの締固めについては Kolek¹⁹⁾、尾坂²⁰⁾らの研究があり、Kolek は高振動数 (3 000→9 000 vpm) のほうがコンクリートの表面状態のよいこと、また、振動機を取り付けるための型わく設計上の注意、必要な振動機の容量と数などについて検討し、尾坂も型わく振動機の取付け位置や振動時間の重要性について報告している。

軽量コンクリートの型わく振動機による締固めについては、高橋²¹⁾⁽²²⁾、菅原²³⁾らの研究がある。高橋らは PC 用

高強度軽量コンクリートの施工上の問題点、特に打込みと締固めについて 3 000 vpm の型わく振動機を用いて検討し、軽量コンクリートを普通コンクリートと同じ方法によって施工する場合、軽量コンクリートでは粗骨材の浮上する傾向がみられ、これを防ぐにはできるだけかた練り（スランプ 3～5 cm）にするほうがよいこと、また打込み端と反対側の端部に若干粗骨材の押上げの傾向のみられること、表面の気ほうの大きさや強度のばらつきには大きな差がないこと、軽量コンクリートのほうが振動による流動性のよいことなどを報告している。なお、振動時間については 2 分振動と 3 分振動について検討し、強度は後者がやや大きいと有意差はないと述べている。

また、型わくの材質・形状なども締固め効果にかなり影響するが、一般に鋼製型わくが外部振動に対しては最も効果的であるとされている。型わくに対して振動機は特に堅固に取り付けなければならない。

5 遠心力による締固めについて

ボール、パイルなどのコンクリート製品への利用を目的として、人工軽量骨材コンクリートの遠心力締固めについて二、三の研究が行なわれている。

杉木らは、外径 20 cm、壁厚 4 cm、高さ 30 cm の供試体をジャイロ式遠心機で締固め条件を変えて 30 g 程度で成形し、比重 1.75 前後、圧縮強度 260～350 kg/cm² のコンクリートを得ているが、外側にペースト、内側に粗骨材が集まり分離は避けられなかったと報告している。堺らはジャイロ式と車輪式の成形機を用いて、材令 14 日で 250～310 kg/cm² の強度を得ているが、同様に粗骨材とモルタルの分離が顕著であると報告している。

遠心力締固めに関するこれらの研究によると、粗骨材の中空円筒内面への分離は、スランプが大きく、回転の上昇速度の早いほど顕著であり、分離をできるだけ小さくするにはスランプ 3～5 cm のコンクリートを用い、細骨材率 45% 程度、回転速度をできるだけゆるやかに上昇するのが比較的良好である。杉木は、遠心力締固めの際の材料分離を防止するには粗骨材の最適比重について研究する必要があることを指摘している。Kalandaje は、ケラムジートを用いて軽量コンクリートの遠心力締固めについて研究し、重量が普通コンクリートより 30～40% 軽減できる製品を得ているが、分離を防止するために、コンクリートの投入を 3 回に分けて行ない、よい結果を得たと報告している。

軽量コンクリートの遠心力締固めの最適方法については、今後さらに研究する必要があると考える。

6 結 言

人工軽量骨材を用いたコンクリートの締固め、特にかた練りコンクリートの振動台による締固めについて、

川砂利・川砂を用いた普通コンクリートと比較して検討した結果をまとめると、本実験の範囲内では次のことがいえる。

(1) 軽量コンクリートの振動台による最適締固め条件は、骨材粒子の形状によっていくぶん異なるが、振動数 4 000 vpm 前後、加速度 5～10 g が適当であり、普通コンクリートに比べて多少低い振動数で締固めが可能である。

(2) 軽量コンクリートの振動台による締固め過程は比較的短い時間で行なわれるので、振動時間が長くなると材料分離、不安定な回転などのため強度低下の傾向を示すから、普通コンクリートに比べて締固め時間を短くすることができる。

(3) かた練りコンクリートの場合、振動台による締固めは棒形振動機による場合に比べて明らかに効果的である。しかし、コンクリートのコンシステンシが大きくなると両者の強度差は小さくなる。

(4) コンクリートがワーカブルになると、振動数、振幅、加速度などの諸要因の強度への影響は、かた練りの場合に比べて小さくなる傾向がある。

(5) 内部振動機を用いて締固めを行なう場合は、高振動数の振動機の使用が効果的で、しかもさし込み間隔はできるだけ密にするのがよいが、振動機の性能がよければ比較的短いそう入時間で締固めが可能である。

人工軽量骨材コンクリートの締固めにおいては、構造部材の種類や形状・寸法、振動機の性能、コンクリートのコンシステンシなどに応じた最適の打込みおよび締固め方法を採用をする必要があるが、実際のコンクリート構造物の施工と関連づけて今後各方面でいっそう研究される必要があろう。

最後に文献を引用させていただきました各位に深く感謝いたします。

（昭和 43 年 10 月 11 日 第 23 回土木学会年次学術講演会にて一部講演）

参 考 文 献

- 1) 仕入豊和、長滝重義、コンクリートジャーナル、4, No. 12, 74 (1966).
- 2) 岡田 清、セメント技術年報、III, 228 (1949).
- 3) Bergstrom, S. G., Proc. Am. Conc. Inst., 49, 893 (1953).
- 4) Cusens, A R, Mag. Conc. Res., 10, No 29, 79 (1958).
- 5) 荒木謙一、河野清、里見洋征、徳島大学工学部研究報告、No. 13, 1 (1968).
- 6) Kolek, J., Civil Eng. Public Works Rev., 54, 1 286 (1959).
- 7) Washa, G. W., Proc. Am. Conc. Inst., 49, 945 (1953).
- 8) 馬場正己、土木試験所彙報、No. 20 (July, 1942).
- 9) Meissner, H. S., Proc. Am. Conc. Inst., 49, 885

- (1953).
- 10) A Joint Committee of the Institution of Civil Engineers and the Institution of Structural Engineers, "The Vibration of Concrete" (1956).
- 11) 尾坂芳夫, プレストレストコンクリート, **8**, No. 4, 56 (1966); **9**, No. 1, 70 (1967).
- 12) 島田専右, コンクリートジャーナル, **5**, No. 3, 40 (1967).
- 13) 島田専右, 森永 繁, 成田一徳, 材料, **15**, No. 157, 174 (1966).
- 14) 土木学会, 人工軽量骨材コンクリート設計施工指針(案) (May, 1966).
- 15) ACI Committee 213, Proc. Am. Conc. Inst, **64**, 433 (1967).
- 16) 人工骨材研究委員会, 材料, **15**, 108 (1966).
- 17) Jones, T. R., and Stephenson, H. K., Proc. Am. Conc Inst., **29**, 527 (1957).
- 18) 今井宏典, 吉原克郎, 河野富夫, セメントコンクリート No. 229, 14 (1966).
- 19) Kolek, J., Civil Eng. Public Works Rev., **54**, No. 633, 321 (1959).
- 20) 尾坂芳夫, 土木技術, **19**, No. 12 (1964).
- 21) 高橋克男, 菅原 操, プレストレストコンクリート, **6**, No. 3, 22 (1964).
- 22) 菅原 操, 構造用軽量骨材 シンポジウム, コンクリート・ライブラリー第10号 (土木学会), 46 (May, 1964).
- 23) 杉木六郎, 大石建一, 尾崎義典, 日本ACI構造用軽量コンクリートシンポジウム論文集, 51 (Nov., 1964).
- 24) 堺 毅, 竹内十三男, 上野秋朗, 第21回土木学会年次学術講演概要集, IV-69 (May, 1966).
- 25) 堺 毅, 竹内十三男, 上野秋朗, 第22回土木学会年次学術講演概要集, IV-20 (May, 1967).
- 26) 杉木六郎, セメントコンクリート, No. 259, 19 (1968).
- 27) Kalandaje, B S., Beton i Zhelezobeton, No. 12, 540 (1961).