

【土木学会論文集 第408号/V-11 1989年8月】

超硬練りコンクリートの締固め度に及ぼす打込み方法および 締固め方法の影響に関する基礎実験

FUNDAMENTAL EXPERIMENTS ON COMPACTION DEGREE OF EXTREMELY STIFF
CONSISTENCY CONCRETE INFLUENCED BY PLACING AND COMPACTING METHODS

徳田 弘*・加賀谷 誠**・川上 淳***・辻子雅則****

By Hiroshi TOKUDA, Makoto KAGAYA, Makoto KA WAKAMI and Masanori TSUJKI

The following experimental facts regarding the compaction process of prismatic concrete specimen compacted by surface vibrator were clarified. Cement paste moved downward at early compaction stage, after this time the moving direction changed to upward and the interstitial spaces between aggregate particles were filled up thoroughly by cement paste. The pressure of cement paste near the layer bottom increased gradually with compaction periods and reached the maximum value just at the time the spaces were filled up. On the other hand, the periods taking to reach the maximum compressive strength were nearly equal to that corresponding to the maximum pressure. Accordingly the compaction degree could be evaluated by measuring the pressure. Subsequently the following facts were found. The propagation of compacting effect to lower part was difficult with increase in specimen height. The methods of concreting one lift by dividing into several layers and compacting each layer up to the certain compaction degree were more successful than those of concreting and compacting the lift at a time, and thin mortar layer placed on joint before concreting was also useful to make effective compaction. Combining the frequency and amplitude of surface vibrator appropriately was more successful than increasing its weight to make effective compaction. Especially combining high frequency and low amplitude was the most effective practically.

Keywords : extremely stiff consistency concrete, compaction degree, placing method, compacting method

1. まえがき

RCD工法による重力式コンクリートダムの施工における特徴の1つは、超硬練り貧配合コンクリートを振動ローラによって締め固める点にある。わが国ではいくつかの重力式コンクリートダムがこの工法によって完成しており、また建設中である。さらにこの工法はその特徴を生かして道路舗装、その他の建設工事にも適用が試みられている。

この工法に関して多くの研究成果^{1)~6)}の蓄積がなされてきたが、なおいくつかの施工上の問題点が指摘されている。すなわち、1リフトの全高さにわたって十分な締固め度に達したか否かを判定するための適切な方法が提案されていないし、打込み方法や締固め方法の違いが締固め度に及ぼす影響についても不明な点が多い。

本研究では、これらの問題点の解明を図るため、まず角柱型枠に打ち込まれたコンクリートを表面振動機に

よって締め固めるととき、その締固め過程を可視化観察することにより組成成分、特にセメントペーストの挙動を把握し、併せて型枠底部の間隙圧の経時変化を明らかにした。一方、各締固め段階における試験体上・下部の水量、セメント量および水セメント比を求め、さらに材令28日における上・下部の圧縮強度と密度を測定し、これらの値の変化傾向と可視化観察および間隙圧測定結果とを比較検討することにより締固め度の判定方法を提案した。

次に、打込み方法と表面振動機による締固め度の関係を検討した。すなわち、最適締固め度を得るために締固め時間と打込み高さの関係を明らかにし、さらに振動機特性と締固め時間を一定にして、1リフトのコンクリートを一度に締め固める場合、1リフトのコンクリートをいくつかの層に分けて打ち込み、各層を十分に締め固める場合、あるいは各層をある程度の締固め度に達するまで締め固めた後、さらに全層を締め固める場合、モルタルを敷きならしてからコンクリートを打ち込み、1リフトを一度に締め固める場合についてその締固め度を比較した。

最後に締固め方法と締固め度の関係について検討した。まず振動機特性と締固め時間を一定にして、表面振動機と振動台による締め効果を比較した。さらに締固

* 正会員 工博 秋田大学教授 鉱山学部土木工学科
(〒010 秋田市手形学園町1-1)

** 正会員 工博 秋田大学助手 鉱山学部土木工学科
(同上)

*** 正会員 工博 秋田大学助教授 鉱山学部土木工学科
(同上)

**** 正会員 飛島建設(株)技術研究所
(〒270-02 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

め時間を一定にして、表面振動機の振動数、振幅および質量をそれぞれ変えて締め固めたとき、各特性値の組合せと締め度の関係を検討し、効率的な振動機特性の組合せを明らかにした。

2. 実験概要

(1) 使用材料およびコンクリートの配合

使用した材料は、普通ポルトランドセメント、天然樹脂酸塩を主成分とするAE剤、川砂（比重2.54、吸水率2.71%、粗粒率2.61）および川砂利（比重2.56、吸水率3.30%、粗粒率7.28、最大寸法40mm）であった。

表-1にコンクリートの配合および材令28日における圧縮強度を示す。コンクリートの配合設計は文献⁷⁾を参考にしてこれを行った。まず、本研究の目的からみて、VC値および水セメント比を決定するための条件は特にないものと判断されたので、既往のデータを参考にして、それぞれ20±5秒、80%と定めた。次に、適当と思われる細骨材率を仮定し、セメント量を一定として水量を変えたコンクリートのVC試験から単位水量を決定した。さらに、セメント量と水量を一定にし、細骨材率を変えたコンクリートのVC試験を行い、得られた最小VC値に対応する細骨材率を所要値とした。

なお、一般にRCDコンクリートの空気量は1.5%程度であるのに対して、本研究ではこれを5.0%とした。これは後述の可視化観察において空気量が多いほどその挙動を的確に把握できるためである。

コンクリートの練りまぜには容量50lの強制練りミキサを使用し、全材料投入後90秒間練りました。

(2) 試験体および振動機

表-2に試験体の種類を示す。Sは標準円柱供試体、P-1~4は高さの異なる角柱試験体である。供試体Sの締め度には、振動数50Hz、振幅0.25cm、質量35kgの振動ランマーを用い、文献⁷⁾に準じてこれを行った。試験体Pの締め度には、表-3に示す特性の試作した容量可変型表面振動機を用いた。なお、締め度に及ぼす振動機種別の影響を調べる実験においては表面振動機と振動台を使用した。振動台による締め度は、ボルトにより型枠を振動台の上に緊結し、振動数、振幅および載荷質量を表面振動機による場合と等しくしてこれを行った。また、角柱試験体を締め固めるときコンクリート上に作用する振動の振動特性（振動数および振幅）を振動機上に取り付けた加速度変換器により測定した。その結

果、締め過程において振動特性の若干の変動が認められるもののほぼ設定値に近い値が測定された。

使用した角柱試験体では、締め度時にコンクリートが型枠によって拘束されるため、その流動程度は現場よりも小さく、したがって両締め度に差違があると考えられる。しかし、角柱試験体と大型試験体の締め度を比較検討したところ、両者の間には対応関係が認められているので⁶⁾、角柱試験体による実験結果から現場における締め度を判断するための資料が得られると考える。

(3) 可視化観察および間隙圧測定

締め過程を観察するため、角柱試験体用型枠の側壁部せき板の1枚を透明なアクリル板とし、これを通してビデオカメラにより締め度の伝播過程を録画した。また、同時に、型枠の底部に間隙水圧計（φ40×64mm、最大容量2kgf/cm²）を設置し、締め過程における間隙圧の経時変化を測定した。

(4) 配合分析および圧縮強度・密度の測定

角柱試験体の上・下部における配合を求めるため、同一締め度条件について2個の試験体を作製し、一方を各材料の単位量、他方を空気量の測定に用いた。締め度が終わってから約2時間経過後、試験体の表面および底面から約8cmの部分を試料（15×15×8cm）として採取した。試料の質量を測定後、その一部から5mmふるいを用いたウエットスクリーニングにより約50gのモルタルを採取した。これを高周波加熱により脱水した後、塩酸溶解および水酸化ナトリウム溶液による滴定試験から水セメント比を求めた。残りの試料について洗い分析を行い、細・粗骨材量を求めた。他方、空気量測定用試験体の上・下部から、各材料の単位量を測定するための試料採取方法と同じ要領で試料を採取し、これを水で満たしたワシントン型エアメーターの容器に入れ、あふれた水量から試料の体積を求めた。試料中の空気泡を攪拌により消散させ、容器内の水位低下分に相当する水量から空気量を求めた。

表-2 試験体の種別

記号	試験体	形状・寸法
S	標準供試体	φ15×30cm
P-1	角柱試験体	15×15×15cm
P-2	角柱試験体	15×15×25cm
P-3	角柱試験体	15×15×30cm
P-4	角柱試験体	15×15×45cm

表-3 表面振動機の機械特性

振動数	0~75Hz
振幅	0~0.5cm
質量	38~98kg
起振力	0~560kgf
締め板	14.5×14.5cm

表-1 コンクリートの配合と圧縮強度

G _{max} (mm)	VC値 (sec)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					圧縮強度 (kgf/cm ²)
					W	C	S	G	Ad	
40	20±5	5±0.5	79.9	33.0	115	144	679	1346	0.10	106

試験体の上・下部における圧縮強度と密度を求めるため、同一締固め条件について2個の試験体を作製した。試験体の表面および底面から約5mmの部分を切除した後、その切断面から7.5cmの部分(15×15×7.5cm)を切り出した。さらにこのブロックを切削して2個の7.5×7.5×15cm供試体を作製した。したがって、2個の試験体から上・下部それぞれ4個の供試体が得られる。これらの密度を測定した後、軸方向に載荷して圧縮強度を試験した。試験材令を28日とし、それまで標準水中養生を行った。なお、粗骨材の最大寸法が40mmであるのに対して、圧縮強度試験用供試体の断面は7.5×7.5cmであって過小であり、試験値に対するその影響が懸念された。そこでこれについてあらかじめ実験的検討を行ったところ、この種のコンクリートではこのような影響はごく小さいと判断された。

3. 締固めによる性状変化と締固め度の判定

(1) 可視化観察および間隙圧測定の結果

表面振動機によってコンクリートを締め固める場合の問題点の1つは、1層の全高さにわたって十分に締め固められたか否かを判定するための適切な方法がないことである。締固め度を判定するための基礎資料を得る目的で、締固め過程におけるコンクリートの内部挙動をビデオテープに録画し、締固め効果の伝播状況を観察した。また、セメントペーストあるいはモルタルは、締固め初期に下降することが明らかであるから⁸⁾、これを感知するための間隙水圧計を型枠底部に設置し、間隙圧の経時変化と内部挙動の関係を比較検討した。試験体の種別はP-2であり、振動機特性を振動数50Hz、振幅0.18cm、質量38kgとし、締固め時間を300秒とした。

コンクリートの内部挙動を観察した結果は次のとおりであった。締固め開始と同時にコンクリートの表面は数cm急速に沈下し、表面から約5cmの部分のアクリル板がセメントペーストで覆われた。これは表層部分に高密度層が形成されたためである。続いて、表面のゆるやかな沈下、空気泡の上昇、まだ締め固められていない下層の骨材間隙へのセメントペーストの流入が観察された。締固め時間とともにセメントペーストによって覆われるアクリル板の面積は下方に向かって徐々に増加することから、高密度層の厚さは下方に向かって徐々に成長することがわかるが、その成長速度は層厚が大きくなるにつれて遅くなることが認められた。このようにセメントペーストは、締固めによって互いに接近した骨材粒の間隙を充填しながら下降するが、その一部は間隙内にとどまらずに流下し、底部に達した。締固め時間約90秒で締固め効果が底部付近に達すると、それまで底部に溜まっていたセメントペーストに締固め圧力が加わるた

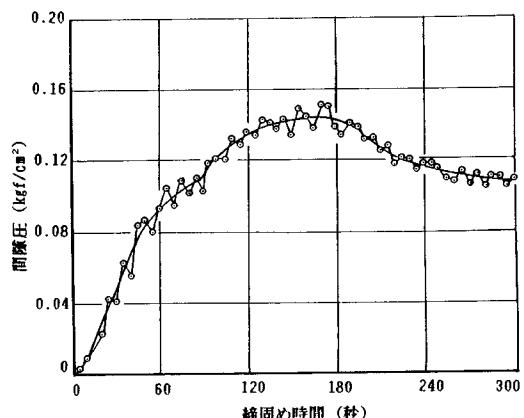


図-1 締固め時間と間隙圧の関係

め、セメントペーストは下降から上昇に転じた。そしてセメントペーストは下層部付近の骨材粒の間隙を充填しながら上昇を続け、約180秒でアクリル板の全面がセメントペーストで覆われた。その後締固め終了時まで、空気泡とセメントペーストはゆるやかな上昇を続けること、型枠と締固め板の隙間からモルタルの漏れが生じること、試験体の下部ほど比較的寸法の大きい空気泡が残っていることが観察された。

図-1は、締固め時間と型枠底部における間隙圧の関係であって、記録から5秒おきにその最大値と最小値を拾ってプロットし、平均間隙圧を曲線によって示したものである。図より、間隙圧は2段階に増加した後、減少に転じることがわかる。すなわち、締固めを開始してから約90秒まで急激に増大し、その後再び増大し、約180秒で最大値に達してからゆるやかな減少傾向に転ずる。可視化観察より、セメントペーストが底部に達する時間は締固め開始後約90秒であって、これ以前に間隙圧が急上昇したのは、空気泡が表層部分に形成された高密度層を通過して逸散するのが難しく、その一部がコンクリート内部にとどまり、その結果空気圧が上昇したことによると考えられる。間隙圧が再び上昇するのは、型枠の底部に溜まっていたセメントペーストの圧力が締固め力によって上昇するからであり、セメントペーストが下降傾向から上昇傾向に転じた時間に対応している。間隙圧は約180秒で最大値に達し、その後減少傾向に転じるのはコンクリート全体にゆきわたったセメントペーストの上昇流によって空気泡が容易に浮上逸散するため、空気圧が減少したことによると考えられる。

(2) 組成成分量および圧縮強度・密度の測定結果

締固め度を判定するための基礎資料を得る目的で、各締固め段階における角柱試験体の上・下部における配合と圧縮強度・密度を測定した。使用した試験体および締固め条件は、前項で述べたものと同じである。

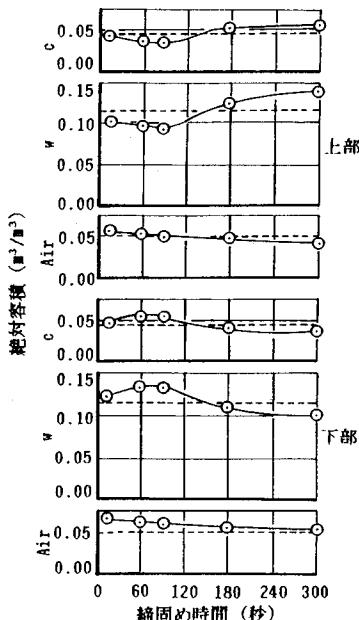


図-2 締固め時間と空気量、水量およびセメント量の関係

図-2に締固め時間と試験体の上部および下部の配合分析結果の関係を示す。ただし、組成成分のうち、細・粗骨材量の経時変化の割合は他の成分のそれに比べて非常に小さいことが明らかであるから⁶⁾、同図には、空気量、単位水量、単位セメント量の測定結果のみが示されている。図中の水平な点線は示方配合における各単位量の値を示す。空気量は、締固め時間とともに上・下部いずれにおいても減少傾向を示すが、上部の空気量は、常に下部より少ない。これは、締固め開始と同時に表層附近に形成される高密度層の層厚が時間とともに大きくなるので、空気泡はこれを貫通して逸散するのが難しく、したがって、下部ほど多くの空気泡が残留することによる。

水量は、締固めを開始してから約90秒まで、上部および下部でそれぞれ減少および増加傾向を示すが、その後約180秒までそれぞれ増加および減少傾向に転じ、さらに、それゆるやかな増加および減少を続ける。セメント量は、その程度は小さいものの、水量とほぼ同様な経時変化傾向を示すことが認められる。このような経時変化傾向は、可視化観察で認められたように、締固め

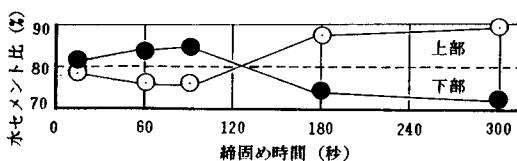


図-3 締固め時間と水セメント比の関係

開始後約90秒でセメントペーストが下降から上昇に転ずる現象と対応している。

図-3に締固め時間と試験体上・下部の水セメント比の関係を示す。図中の水平な点線は示方配合における値を示す。図から、水セメント比は、締固め開始後約90秒まで、上部および下部でそれぞれ減少および増加傾向を示すがその後それぞれ増加および減少傾向に転ずること、約120秒で上・下部の水セメント比はほぼ等しくなること、約180秒以後の水セメント比の変化の程度は小さいことがわかる。このように、締固め初期における上部の水セメント比は下部の値より小さいが、その後この大小関係は逆転する。これは、セメントペーストの水セメント比が高いため、締固めの際の振動によって水の一部が容易に分離し、したがって、下方あるいは上方への水の流動程度がセメントの場合より大きくなるからであると考えられる。

図-4に締固め時間と試験体上・下部の圧縮強度および密度の関係を示す。図中の水平な点線は、標準供試体によって測定した圧縮強度および示方配合より得られた密度を示す。締固め時間15秒における上部および下部の圧縮強度は、それぞれ標準強度の87%および58%であって、上部の強度の方が下部より高い。これは、締固め開始と同時に表層附近に高密度層が形成されるのに對し、下部ではまだ締固め度が不十分であることによる。その後締固め時間とともに各部の強度は増加して両者の差は小さくなり、約180秒で最大値（標準強度）に達する。さらに締固めを続けると両者ともにわずかな減少傾向を示すが、上部における強度の方が下部より低い。このように強度が減少傾向に転ずるのは、過剰締固めによるのであって、セメントペーストと水の上昇により上部では水セメント比が大きくなり、下部ではセメントペースト量が減少するからであると考えられる。

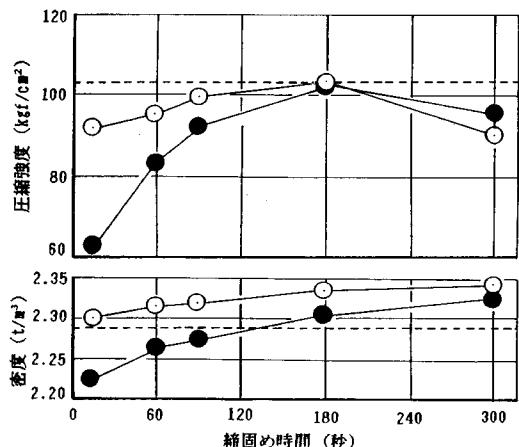


図-4 締固め時間と圧縮強度および密度の関係

同図より、密度は締固め時間とともに増加するが、締固め終了時近くまで上部の値の方が下部より大きい。そして約180秒で上・下部ともに標準値に達し、その後上部では変化が少なく、下部ではさらに増加傾向を示すことがわかる。

(3) 締固め度の判定

前項まで締固め過程の可視化観察と間隙圧測定の結果ならびに各締固め段階における試験体上・下部の組成成分量と圧縮強度・密度の測定結果について述べた。これらを要約すれば次のとおりである。締固め開始後約90秒まで、セメントペーストは骨材粒の間隙を充填しながら下降を続けるが、その後上昇に転じ、約180秒でコンクリート全体にゆきわたり、さらにゆるやかな上昇を続ける。これに対応して、水量、セメント量および水セメント比は約90秒まで上部で減少し、下部で増加するが、その後この増減傾向は逆転し、上部で増加、下部で減少傾向となる。空気量は終始減少傾向を示すが、上部における値は、常に下部より少ない。底部における間隙圧は、約90秒までコンクリート内部の空気圧の上昇に伴って増加し、さらにその後約180秒までセメントペーストの圧力上昇に伴って増加して最大値に達するが、続いてゆるやかに下降する。一方、圧縮強度は、締固め時間とともに増加して約180秒で最大値に達し、その後減少傾向に転ずる。密度は、約180秒以後標準値を上回る値となる。

以上の各結果を照合して、圧縮強度に基づいた締固め度の評価を試みる。試験体上・下部の圧縮強度が標準強度に達するための締固め時間は約180秒間である。締固め時間がこれより短い場合、セメントペーストがまだ試験体の下層部までゆきわたっていないために、上強下弱の強度分布となるし、上・下部ともに標準強度を下回るから、締固め不足と判定される。これより長い場合、水とセメントペーストが上昇するので、上部では水セメント比が大きくなり、下部ではセメントペースト量が減少する。このため、上・下部ともに標準強度を下回るし、上弱下強の強度分布となるから、締固め過剰と判断される。したがって、約180秒間が最適締固め度を得るためにの締固め時間であると判定される。この時間は型枠底部に設置した間隙水圧計が最大値を指示する時間と一致しているから、締固め時に、打込み中の一層の底部における間隙圧の経時変化を測定することによって最適締固め度に達したことを判定できる。

4. 打込み方法が締固め度に及ぼす影響

(1) 打上り高さと最適締固め時間の関係

図-5に打上り高さと最適締固め度を得るためにの締固め時間（最適締固め時間）の関係を示す。最適締固め時

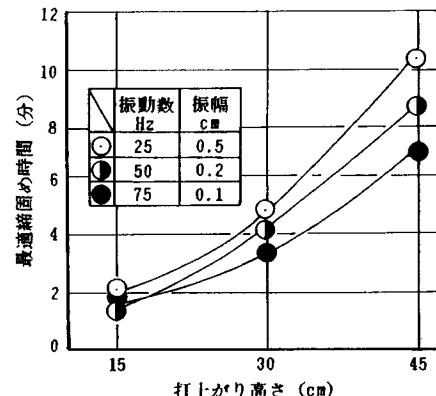


図-5 打上り高さと最適締固め時間の関係

間は、前章で述べた締固め過程の可視化観察において、アクリル板の全面がセメントペーストによって覆われるまでの時間である。使用した試験体はP-1, 3および4、振動機の質量は38kg、振動数および振幅はそれぞれ図中に示す値とした。図より、振動機特性が一定の場合、最適締固め時間は打上り高さが大きいほど増加すること、その増加割合は打上り高さが大きくなるとともに急速に増大すること、振動機の質量が一定の場合、最適締固め時間に及ぼす振動数と振幅の組合せの影響程度は、打上り高さが大きいほど著しいことがわかる。これらの結果から、打上り高さが大きくなるほど最適締固め時間は増加するが、振動機特性を適切に選定することによってこの時間を大幅に短縮できることがわかる。

(2) 打込み方法と締固め度の関係

試験体P-3を使用し、振動機特性を振動数25Hz、振幅0.50cm、質量38kg、締固め時間を240秒の一定として、次の4種類の施工方法が締固め度に及ぼす影響を比較検討した。締固め時間をこのように設定したのは、試験体P-3の最適締固め時間が、図-5からおよそ240秒であることによる。

- ① 一層締固め：1層に打ち込み、240秒間締め固める方法。
- ② 薄層締固め：4層に分けて打ち込み、各層を60秒間、合計240秒間締め固める方法。
- ③ 先行締固め：4層に分けて打ち込み、各層の密度が示方配合における値の95%程度となるようにそれぞれ15秒間、合計60秒間締め固め、さらに全層を180秒間締め固める方法。
- ④ 敷きモルタル締固め：コンクリートの打込みに先立ち、モルタルを敷きならした後一層に打ち込み、240秒間締め固める方法。

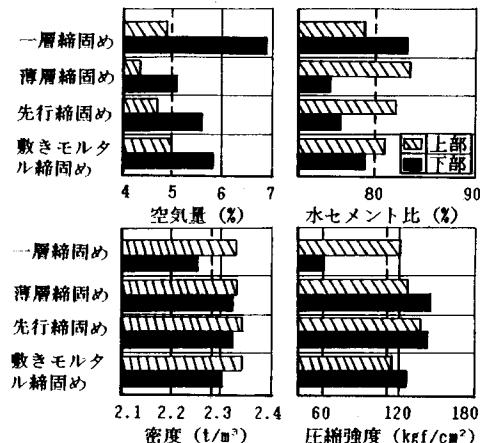


図-6 打込み方法とコンクリートの諸特性の関係

これらの方は、実施工では振動ローラによる締固め開始前にブルドーザの転圧によってある程度締固めが先行していること、打継面に敷きモルタルが塗り込まれていることなどを考慮し、それらの効果を明らかにするためのものである。敷きモルタルの配合は、実施工で用いられているものを参考にして、水セメント比 60 %、砂セメント比 3.0、フロー値 200 とし、その敷きならし厚さは、実施工の場合の粗骨材最大寸法と本実験におけるそれを比較して 5~6 mm とした。

図-6 に、これらの方で施工した試験体上・下部の空気量、水セメント比、密度および圧縮強度を示す。図中の縦点線は、示方配合における空気量と水セメント比ならびに標準供試体によって測定した密度と圧縮強度である。図から、空気量は、いずれの方法を用いた場合においても上部の値の方が下部より小さいこと、一層締固めの場合、下部の値が標準値を大きく上回っているが、他の場合、いずれも上・下部ともにほぼ目標の範囲内にあることが認められる。

水セメント比は、一層締固めの場合、上部の値の方が下部より小さいが、他の場合、いずれも上部の値の方が下部より大きく、両者の差は、敷きモルタル締固め、先行締固め、薄層締固めの順に大きくなる。前章で述べたように、水セメント比は、締固め開始後ある時間まで上部の方が下部より小さいが、圧縮強度から判断して十分な締固め度に達した段階ではこれが逆転しており、時間とともに両者の差は徐々に大きくなる。したがって、一層締固めの場合、その締固め度はまだ不十分であるが他の場合、適切な締固め段階あるいは締固め過剰の段階にあると推定される。

密度は、いずれの方法を用いた場合においても上部の値の方が下部より大きく、一層締固めの場合の下部のみが標準値を下回っている。

圧縮強度は、一層締固めの場合、上部の値の方が下部より大きく、下部では標準強度を大きく下回っている。その他の場合、上部の値の方が下部より小さいがその差は小さく、いずれも標準強度を上回っている。前章で述べたように、圧縮強度は、締固め開始後ある時間まで上部の方が下部より大きいが、最適締固め時間に達すると上・下部でほぼ等しい値となり、その後上部の方が下部より小さくなる。一層締固めの場合、上強下弱の強度分布状態にあるから、締固め不足の段階にあり、他の場合、上弱下強の強度分布状態にあるが、両者の差は小さいから、いずれも最適締固め時間をわずかに超過した段階にあると判断される。

以上述べたように、1 リフトのコンクリートをいくつかの層に分けて打ち込み、各層を十分に締め固める方法（薄層締固め）や各層をある程度の締め固め度に達するまで締め固めた後、さらに全層を締め固める方法（先行締固め）により、一層締固めの場合よりもかなり効率的な締め固めが可能である。また、一層締固めの場合であっても、コンクリートの打込みに先立ち、打込み面にモルタルを敷きならしてからコンクリートを打ち込み、締め固めを行う方法（敷きモルタル締固め）を採用すれば、かなり効率的な締め固めが可能である。実施工では、上記 4 方法のうち、先行締固めと敷きモルタル締固めを併用した方法が用いられているから、さらに効率的な締め固めが行われていることになる。

5. 締め固め方法が締め固め度に及ぼす影響

(1) 振動機種別と締め固め度の関係

表面振動機および振動台によって締め固めたコンクリートの締め固め度を比較検討した。表面振動機の機械特性を振動数 50 Hz、振幅 0.13 cm、質量 38 kg とした。振動台の振動数と振幅を表面振動機の場合と同一にし、コンクリートの表面に締め固め板を置いてその上に 38 kg の荷重を載せた。使用した試験体は P-3 で、締め時間を 240 秒とした。

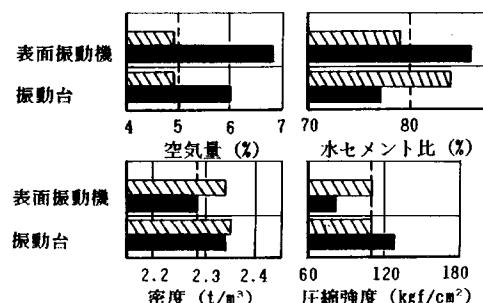


図-7 表面振動機および振動台によって締め固めたコンクリートの諸特性

図-7に、両振動機によって締め固めた試験体の上・下部における空気量、水セメント比、密度および圧縮強度を示す。図中の縦点線は標準値を示す。空気量はいずれの場合も上部における値の方が下部より小さく、下部では表面振動機で締め固めた場合の方が振動台による場合より大きい。これは3.(2)で述べたように、表面振動機による場合、締固めが上から下に向かって進行するためにまだ締め固められていない下層の空気泡が上部の高密度層を通して逸散するのが難しいからであり、振動台による場合、締固めは下から上に向かって進行するため、空気泡は上に向かって容易に移動するが、締固め板の下に形成される高密度層に遮られて逸散できないからであると考えられる。

水セメント比は、表面振動機による場合、上部における値の方が下部より小さいが、振動台による場合、これと逆の状態にある。これは、前者の場合、3.(2)で述べたようにまだ十分な締固め度に達していないためであり、後者の場合、締固めによって分離した水が上昇するためである。

密度は、いずれの場合も上部における値の方が下部より大きいが、標準値をほぼ満足している。

圧縮強度は、表面振動機による場合、上部における値の方が下部より大きく、下部では標準強度を大きく下回っている。振動台による場合、上部における値の方が下部より小さいが、いずれも標準強度をほぼ満足している。これは、前者の場合、締固めが下に向かって進行することから、まだ締固め不足の段階にあるためであり、後者の場合、締固めが上に向かって進行することから、わずかに締固め不足の段階にあるためである。

以上述べたように、同一機械特性の表面振動機と振動台により一定時間締め固めたコンクリートの締固め度を比較すると、前者による場合よりも後者による場合の方が優れていること、これは両振動機による締固めメカニズムの相違に起因することがわかった。ところで、施工で用いられる振幅ローラは前者に相当するし、VC値を求めるための振動台式コンシスティンシー試験装置は、振動台を利用したものである。したがって、両者による締固めメカニズムの相違を十分理解したうえでVC値を締固めの管理に反映させることが重要である。

(2) 振動機特性と締固め度の関係

表面振動機の機械特性を、振動数25～75Hz、振幅0.05～0.30cm、質量38～98kgの範囲で変化させたとき、これらの3特性の組合せと試験体上・下部の圧縮強度の関係を検討した。使用した試験体はP-3であり、締固め時間を240秒の一定とした。

図-8は、振動数と振幅を一定にしたときの質量と圧縮強度の関係である。図中の水平な点線は標準供試体に

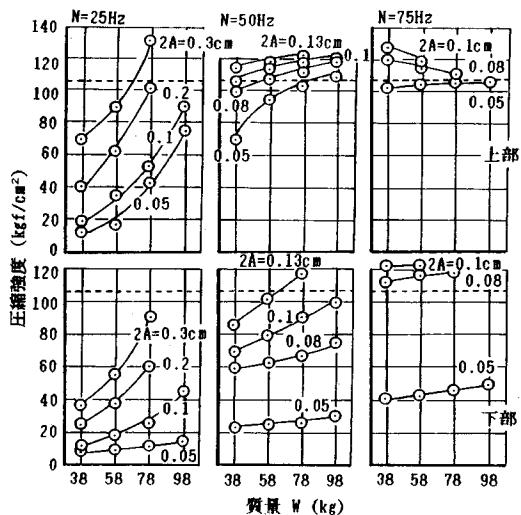


図-8 振動機質量と圧縮強度の関係（振動数・振幅一定）

よる圧縮強度を示す。また、振動数25Hzのとき、質量98kgに対応する振幅が記入されていないのは、振動機の機構上、振幅0.20および0.30cmが得られなかつたからである。以下に未記入の対応点が認められるのは同様な理由による。

図から、振動数25Hzの場合、上・下部の圧縮強度は、各設定振幅で質量の増加とともに増大する傾向にあること、強度の増大割合は振幅が大きいほど増加することが認められる。振動数50Hzの場合、上・下部の圧縮強度は、各設定振幅で質量の増加とともに増大する傾向にあるが、上部における強度の増大割合は振幅が大きいほど減少するのに対し、下部におけるその割合は振幅が大きいほど増加する。振動数75Hzの場合、上部における強度は振幅が大きいほど質量の増加とともに顕著な減少傾向を示すが、下部では各設定振幅で質量の増加とともにわずかな増大傾向を示す。上部で強度の減少傾向が認められたのは、3.(2)で述べたように、締固め過剰の状態になったからである。

図-9は、振幅と質量を一定にしたときの振動数と圧縮強度の関係であり、図-10は、振動数と質量を一定にしたときの振幅と圧縮強度の関係であって、いずれも図-8を書き改めたものである。これらの図から、ほぼ最適締固め度が得られる振動機特性の組合せを求めると表-4のようになる。

以上の結果に基づき、各振動機特性が試験体上・下部の締固め度に及ぼす効果について考察する。図-8から、振動機質量の増加に伴う締固め度の向上は、低振動数、高振幅の領域においてのみ顕著に認められるが、高振動数、低振幅の領域においては、振動機質量を増すことによって締固め効率を改善しようとしてもその効果はあま

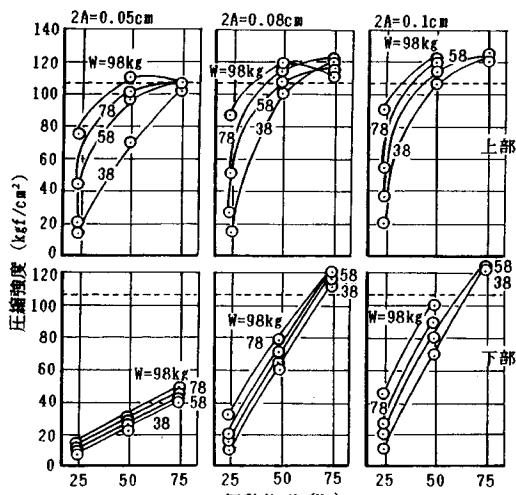


図-9 振動数と圧縮強度の関係（振幅・質量一定）

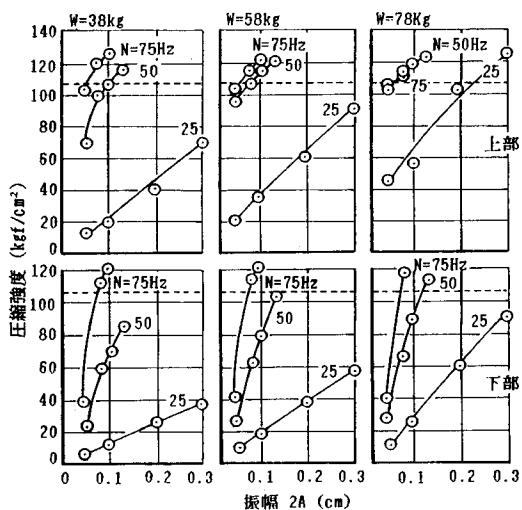


図-10 振幅と圧縮強度の関係（質量・振動数一定）

表-4 最適締固め度を得るための振動機特性の組合せ

り期待できないことがわかる。このことは表-4において、振動数と振幅を一定値に設定したとき、対応する質量の値に範囲が認められることと符合するし、図-9に示すように、低振幅の領域では質量と振動数を増しても

圧縮強度は増大しないこと、振動数の増加に伴う締固め度の向上は、振幅がある程度大きくなつた段階から認められるのであって、質量とはほとんど無関係であることがからも理解できる。また、図-10から、振幅による締固め度の向上は高振動数になるほど著しく、この傾向は質量の大小とほとんど無関係であることがわかる。なお、一般に振動機の機構上、質量が大きくなるほど高振幅を得ることは困難になる。

以上述べたように、この種のコンクリートを効率的に締め固めるには、振動機の質量を増すよりも、振動数と振幅をできるだけ大きく設定する方が効果的である。しかし、振動機の機構上の制約から、振動数と振幅の大きさには限度がある。そこで、両振動機特性値を可能な範囲で組み合わせることによって効果的な締固めができるか否かを検討する必要がある。図-8~10から、0.10~0.13 cm程度の振幅であっても振動数を50~75 Hz程度に設定すれば、所要の圧縮強度が得られることが明らかである。特に、このような低振幅の領域においては、振幅のごくわずかな増加に対応して圧縮強度は著しく増大することが認められるのであって、高振動数と低振幅の組合せは効率的な締固めを行ううえで有効であると思われる。なお、実施工で主として使用されている振動ローラの振動数および振幅は、それぞれおよそ40 Hzおよび0.2 cmであるから、上記の結果から判断してこれによって十分な締固め度が得られていると考えられる。

6. 結論

超硬練りコンクリートの締固め度を判定するための基礎資料を得る目的で、表面振動機による締固め過程の可視化観察と間隙圧の測定ならびに各締固め段階における試験体上・下部の組成成分量と圧縮強度・密度の測定を行った。また、打込み方法および締固め方法の違いが締固め度に及ぼす影響について検討を行った。それらを要約すると以下のようである。

(1) 締固め開始と同時にコンクリートの表面は急速に沈下し、表層部が高密度化する。続いて、セメントペーストは締固めによって互いに接近した骨材粒の間隙を充填しながら下降するので、高密度層の厚さは下方に向かって徐々に成長する。高密度化が底部付近に達するとセメントペーストは上昇に転じ、下層部付近に残っている骨材間隙を充填しながら上昇を続けるが、やがて間隙はほとんど認められなくなる。空気泡は終始上昇傾向を示す。底部における間隙圧は、締固め開始後下降傾向にあったセメントペーストが上昇に転じるまで増加し、さらに骨材間隙がほとんど認められなくなるまで増加して最大値に達する。

(2) 空気量は、繰り固め時間とともに上・下部いずれ

においても減少傾向を示すが、上部における値は常に下部より小さい。単位水量、単位セメント量および水セメント比は、締固め開始と同時に上部および下部でそれぞれ減少および増加傾向を示すが、その後それぞれ増加および減少傾向に転ずる。これは(1)で述べたセメントペーストの移動方向が逆転する現象と対応している。

(3) 上・下部における圧縮強度は締固め時間とともに増大して、ほぼ同等の最大値に達し、その後いずれも減少傾向に転じる。強度分布傾向は、最大強度に達するまで上強下弱であるが、その後上弱下強となる。最大強度が得られる締固め時間は、(1)で述べた底部の間隙圧が最大値に達する時間とほぼ等しい。したがって、間隙圧の経時変化から圧縮強度に基づく締固め度の判定が可能である。上部における密度は下部より大きいが、いずれも締固め時間とともに増大し、最大強度に達する時点では上・下部ともに示方配合から得られる密度を上回る値となる。

(4) 表面振動機の機械特性が一定の場合、最適締固め度を得るための締固め時間は、打上り高さが大きくなるとともに大幅に増加する。また、最適締固め時間に及ぼす機械特性の影響程度は、打上り高さが大きいほど顕著となる。

(5) 表面振動機の機械特性と締固め時間が一定の場合、1リフトを一度に締め固めるよりも、いくつかの層に分けて打ち込み、各層を十分に締め固めるか、あるいは各層をある程度の締固め度に達するまで締め固めた後、さらに全層を締め固める方がより高い締固め度を得ることができる。また、1リフトを一度に締め固める場合であっても、コンクリートの打込みに先立ってモルタルの敷きならしを行えば、これによって上記の場合と同等程度の締固め度が得られる。

(6) 表面振動機と振動台の機械特性を同一にし、一

定時間締め固めたコンクリートの締固め度を比較すると、後者による場合の方が優れている。

(7) 表面振動機を用いて効率的な締固めを行うためには、その質量を増すよりも、振動数と振幅の組合せを適切に設定する方が有利である。すなわち、0.10~0.13 cm程度の振幅であっても振動数を50~75 Hz程度に設定することにより所要の締固め度を得ることができるのであって、特にこのような低振幅の領域においては振幅のごくわずかな増加に対応して圧縮強度は著しく増加する。

参考文献

- 1) 嶋津晃臣ほか: RCDコンクリートの締固め実験、建設省土木研究所資料、1980号、1983.3.
- 2) 栗田守朗・青柳征夫・加藤治・金森洋史: 振動テーブルにおける RCC の締固め条件の検討、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 453~456、1986.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書(昭和61年制定)改定資料、pp. 258~271、1986.
- 4) 鎌田俊治・桜井隆広: RCD用コンクリートの締固めに関する考察、昭和62年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要、pp. 436~437、1988.3.
- 5) 松本徳久・佐谷靖郎・志加三智: RCDコンクリートの現場転圧試験、土木学会論文集、第391号/V-8、pp. 99~106、1988.3.
- 6) 加賀谷誠・徳田弘・川上淳: 表面振動機による超硬練りコンクリートの締固めに関する基礎実験、土木学会論文集、第384号/V-7、pp. 53~62、1987.8.
- 7) 国土開発技術センター: RCD工法によるダム施工、pp. 23~47、1981.
- 8) 徳田弘・加賀谷誠・川上淳・船木諭: 超硬練り貧配合コンクリートの圧縮および引張強度に関する実験的考察、材料、Vol. 36、No. 406、pp. 703~709、1987.

(1988.10.14・受付)