

## RCDコンクリートの締固め特性に関する研究

## Compaction Properties in Roller Compacted Concrete for Dams

佐々木洋介\* 堺 孝司\*\*

Yosuke SASAKI and Koji SAKAI

現在、ダム建設工事において、超硬練りコンクリートを振動ローラによって締固めるRCDコンクリート工法が数多く採用される気運にある。本研究の目的は、最大骨材寸法150mmおよび締固め厚さ750mmのRCDコンクリートについて、大型の上載式締固め試験装置を用いた機械特性試験および配合特性試験により、コンクリートの締固め特性に関する検討を行うことである。機械特性試験では、試験装置の振動数および振幅を変化させたときの締固め特性を、配合特性試験では、間隙水圧計を使用してフレッシュコンクリートの締固め特性に関する基礎的な検討および圧縮強度試験を実施した。また、VC試験もあわせて行った。

試験結果から、間隙水圧計が、RCDコンクリートの締固め特性を把握する上で有効であることおよび締固めは主にコンクリートの単位水量に影響されることが明らかになった。《RCDコンクリート；締固め試験；間隙水圧計；加速度計；密度；圧縮強度》

The use of RCD (roller compacted concrete for dams) method has recently increased in the construction of gravity concrete dams. In RCD concrete extremely stiff concrete is compacted by vibration roller.

This study examined the compaction mechanism in RCD concrete compacted from the upper surface with large-size compaction equipment. The maximum size of aggregate was 150mm and compaction depth was 750mm. Pore water pressure gauges and accelerometers were placed in the concrete. Vibration compaction (VC) tests were conducted for comparison. Compressive strength tests of concrete compacted with large-size compaction equipment were also carried out.

The test results showed that the pore water pressure gauges are useful to clarify the compaction mechanism in RCD concrete and that the compaction is mainly effected by the water content of the concrete.

Keywords: RCD concrete, compaction test, pore water pressure gauge, accelerometer, density, compressive strength.

## 1. まえがき

現在、ダム建設工事において、超硬練りコンクリートを振動ローラによって締固めるRCD工法が数多く採用される気運にある。RCDコンクリートのコ

ンシステンシー試験としてVC試験がある。VC試験は、振動テーブルによってコンクリートの下から振動を加える試験法であり、上から振動を加える現場施工とは大きく異なるが、現場における振動締固め

\*前材料研究室員 現稚内開発建設部枝幸港湾建設事業所 \*\*材料研究室長

に関する経験に基づいて、VC試験による配合の決定が行われてきている。しかしながら、現場におけるRCDコンクリートの締固め特性そのものをこの試験法によって明らかにすることはできない。一方、最近、上載式のRCDコンクリートの締固め試験(大型供試体試験)装置が開発され、これを用いて現場の締固め特性を評価しようとする試みがなされてきている。また徳田ら<sup>1)</sup>は、間隙水圧計を用いてRCDコンクリートの締固め度の評価に関する検討を行っている。

本研究では、最大骨材寸法が150mmおよび締固め厚さが750mmの供試体のフレッシュおよび硬化コンクリートについて、上載式締固め試験装置を用いた締固めメカニズムに関する基礎的な検討および圧縮強度試験を行った。また、VC試験もあわせて行った。

## 2. VC試験および上載式締固め試験

VC試験とは、RCDコンクリートのコンシステンシー管理を行うことを目的に開発された試験であり、まだ固まらないコンクリート供試体に20kgの上載荷重を作用させて振動台で締固め、ペーストがコンクリート供試体の表面に浮き上がるまでの時間

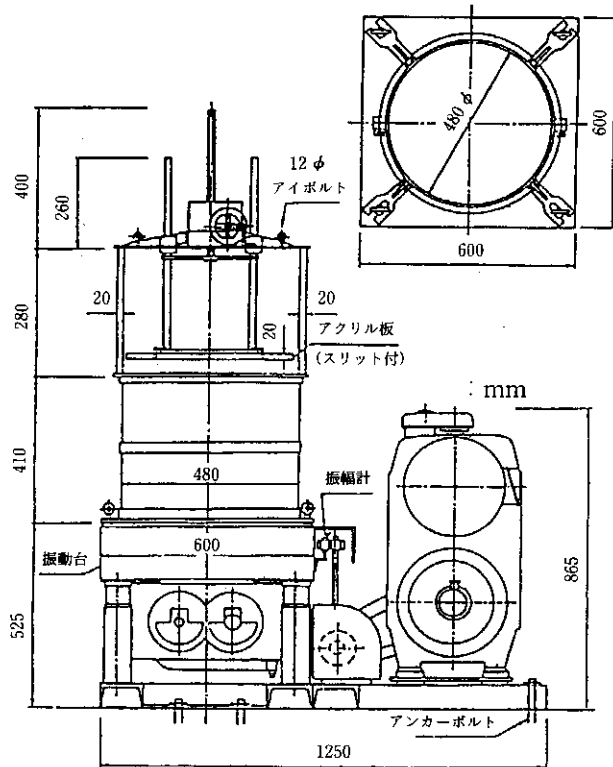


図-1 VC試験装置

を測定する試験である。この時間をVC値と呼び、コンクリートのコンシステンシーを表現する指標としている。図-1に、VC試験装置の概略を示す。

上載式締固め試験は、振動ローラの締固め機構と類似した締固めを室内で行う試験装置として開発されたものであり、所定の起振力を有する加振機に固定された加圧版で、大型型枠に詰めた試料を締固めて供試体を作成する装置である。図-2に、試験装置の概略を示す。

## 3. 試験項目と試験方法

### 3.1 機械特性に関する試験

本試験は、上載式締固め試験装置の振動数と振幅の締固めに及ぼす影響を把握するために、密度の経時変化を測定するものである。考慮した振動数は、1,500、2,000、2,500および3,000rpmの4ケース、また振幅は、片振幅0.9および1.2mmの2ケースである。コンクリートは、 $\phi 500 \times 750$ mmの鋼製円柱型枠に、3層に分けて投入した。その際、既往の研究<sup>2)</sup>を参考にして、コンクリートの密度比が95%前後となるように、振動数を2,000rpm、片振幅を0.9mmとし、各層25秒間の予備的な振動締固めを行った。その後、所定の振動数と振幅の組合わせにより、振動締固めを行った。締固め時間は150秒とし、0、30、60、90、120、150秒で振動を一時停止し、コンクリートの沈下量を測定することにより密

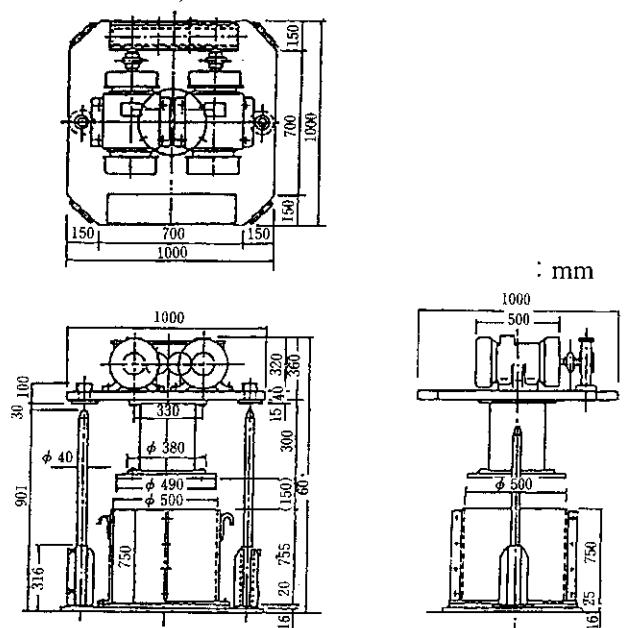


図-2 上載式振動締固め試験装置

度を測定して、最も振動締固め効率のよい加振条件を決定した。

### 3. 2 配合特性に関する試験

配合特性に関する試験では、単位水量を 81, 86, 91kg/m<sup>3</sup>、細骨材率を 26, 28, 30%と変化させたときのフレッシュコンクリートの締固め特性および硬化コンクリートの強度に関する検討を行った。

フレッシュコンクリートについては、コンクリートを  $\phi 500 \times 750$ mm の鋼製円柱型枠に 3 層に分けて投入した。その際、振動数 2,500rpm, 片振幅 0.9mm で 1 層目を 20 秒, 2 層目を 7 秒, 3 層目を 7 秒の予備的な締固めを行った。これは、著者らが関与した実際の RCD グム試験施工での、ブルトーザによる転圧効果を考慮したものであり、各層の密度比が 90% 前後となるように決定したものである。予備的な締固めの後、150 秒間継続して締固めを行った。締固め中は、コンクリート内部の間隙水圧および加速度を、また締固め終了後に密度を測定した。比較のために VC 試験もあわせて行った。VC 試験では、 $\phi 480 \times 400$ mm の鋼製円柱型枠にコンクリートを 3 層に分け、各層をそれぞれ突棒で 50 回突固めた後、振動数 3,000rpm, 振幅 1.0mm で 150 秒間締固

めた。VC 試験においても、間隙水圧および加速度の測定を行った。

間隙水圧計は 100 $\mu$  フィルターを取りつけ、センサー部が水平方向を向くように、また加速度計は上下方向の加速度が測定できる方向に設置した。図-3 に、計測システムの概略を示す。

圧縮試験用供試体は、 $\phi 480 \times 750$ mm の型枠と上載式締固め装置を用いて、フレッシュコンクリートの検討のときと同様の方法により 60 秒間振動締固めを行って作成した。コンクリート供試体は、60 日間水中養生した後、図-4 に示すように  $\phi 150 \times 300$ mm のコアを採取し、材令 91 日まで再び水中養生を行い、圧縮強度試験に供した。また、比較のために標準供試体も作成した。標準供試体は、40mm フルイでウェットスクリーニングした試料を  $\phi 150 \times 300$ mm の型枠に 3 層に分けて入れ、各層をそれぞれ 25 回突棒で突固め、10 秒間タンパで締固めて作成した<sup>3)</sup>。作成した供試体は、材令 28 日および 91 日まで水中養生を行った後、圧縮強度試験に供した。

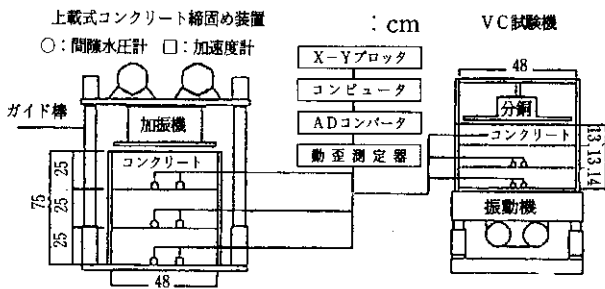


図-3 計測システム

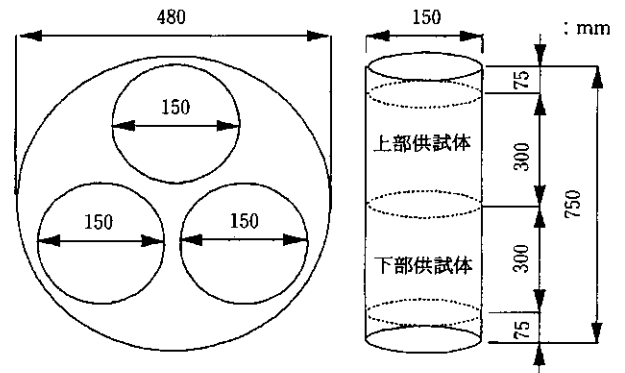


図-4 コア採取図

表-1 セメント試験成績表  
化 学 成 分

試 料 名	化 学 成 分 (%)								
	ig. loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
中庸熱高炉セメント	0.5	29.1	11.2	1.6	0.4	0.5	49.8	4.5	2.0

物 理 試 験

試 料 名	比重	ブレーン (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結			フ ロー	圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )			水和熱 (cal/g)	
			水量	始発	終結		3 d	7 d	28 d	7 d	28 d
中庸熱高炉セメント	3.00	3,900	28.9	4-00	5-55	248	62	148	321	52	65

表-2 骨材の品質試験結果

項目 粒径	比 重	吸 水 率 (%)	粗 粒 率	単位容積 重 量 (kg/m <sup>3</sup> )	実 積 率 (%)	洗い損失量 (%)	すりへり 減 量 (%)	安 定 性
細骨材	2.64	1.81	2.49	1,708	65.87	5.53	...	3.89
150~80	2.72	0.35	9.00	1,584	58.41	0.06	...	1.30
80~40	2.72	0.55	8.95	1,595	58.95	0.02	18.12	1.30
40~20	2.70	0.82	7.87	1,580	58.98	0.17	18.66	1.30
20~5	2.69	1.13	6.58	1,583	58.80	0.12	14.76	1.30

表-3 コンクリートの配合表

配 合 番 号	粗骨材の 最大寸法 G <sub>max</sub> (mm)	水セメ ント比 W/C (%)	高炉スラグ 置 換 率 Sg (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				AE 減水剤	備 考		
					水 W	細骨材 S	粗骨材 (mm)					
							150 ~80	80 ~40			40 ~20	20 ~5
1	150	67.5	65	26	81	598	1,732				0.3	大型
							485	416	346	485		
2	150	71.7	65	26	86	593	1,724				0.3	大型
							483	414	345	482		
3	150	75.8	65	26	91	591	1,713				0.3	大型
							480	411	343	479		
4	150	67.5	65	28	81	644	1,686				0.3	大型 VC
							472	405	337	472		
5	150	71.7	65	28	86	641	1,686				0.3	大型 VC
							469	402	335	469		
6	150	75.8	65	28	91	636	1,667				0.3	大型 VC
							467	400	333	467		
7	150	67.5	65	30	81	689	1,640				0.3	大型
							459	394	328	459		
8	150	71.7	65	30	86	686	1,629				0.3	大型
							456	391	326	456		
9	150	75.8	65	30	91	681	1,621				0.3	大型
							454	389	324	454		

#### 4. 使用材料とコンクリートの配合

##### 4.1 使用材料

セメントは、中庸熟ポルトランドセメントにスラグ微粉末を65%置換したものを使用した。表-1に、結合材の物理試験結果および化学成分を示す。

細骨材および粗骨材は、北海道札内川産を使用した。粗骨材は150~80, 80~40, 40~20, 20~5mm

の4群に分類し、混合比を28:24:20:28とした。表-2に、骨材の品質を示す。

混和剤は、AE減水剤遅延型を用いた。

##### 4.2 コンクリートの配合

表-3に、コンクリートの配合を示す。コンクリートの練り混ぜには、一軸パグミル型ミキサ150ℓを使用し、練り混ぜ時間は130秒とした。

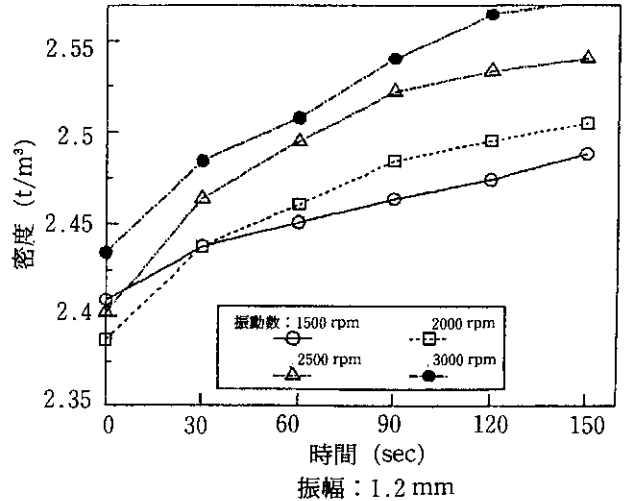
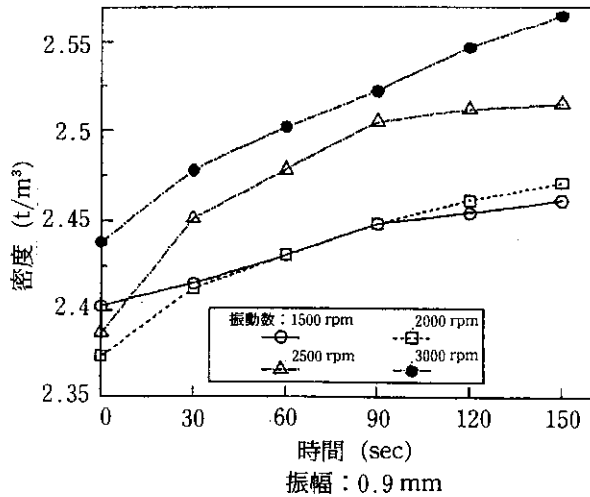


図-5 密度の経時変化

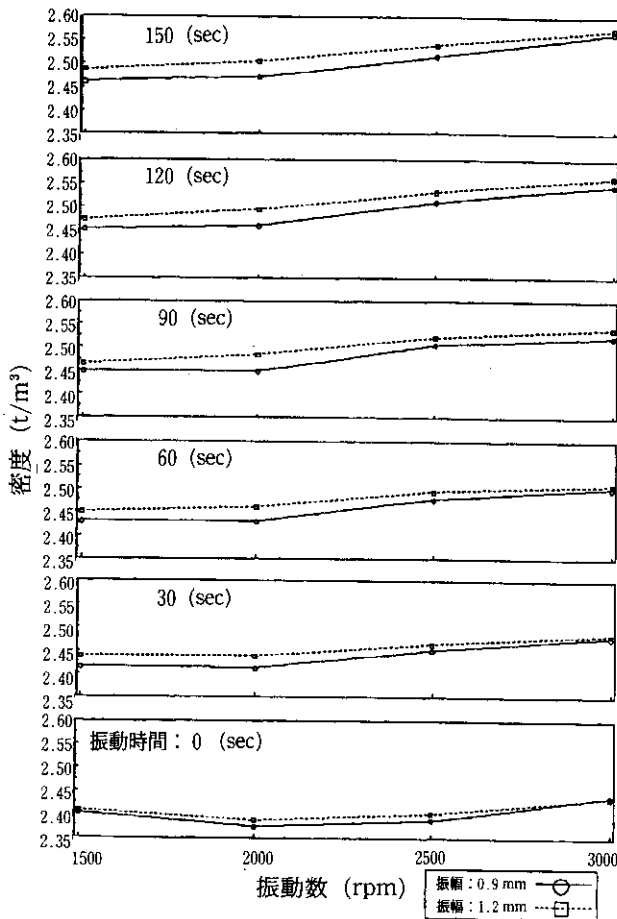


図-6 振動数と密度の関係

## 5. 実験結果および考察

### 5.1 機械特性試験

図-5に、振幅が0.9mmおよび1.2mmの場合の密度の経時変化を示す。いずれの振幅においても、振動数が大きくなるに従って密度が大きくなる傾向

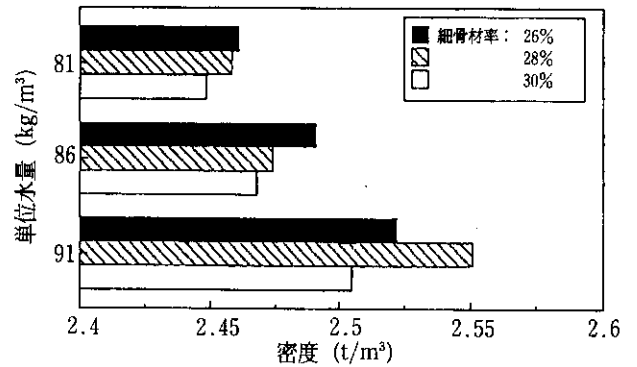


図-7 密度と単位水量の関係

にある。特に、振動数2,500rpmで急激に密度が大きくなっている。振動数3,000rpmに関しては、振動時間150秒後も密度が増加する傾向にあるが、ペーストが外に飛び出すなどあまりいい状態とはいえなかった。また、振動数1,500と2,000rpmについてはほぼ同じ密度であり、150秒間振動締めを行ってもあまり増加していない。図-6に、振動数と密度の関係を示す。振動数が1,500および2,000rpmについては、振幅が大きいと密度は増加する。しかし、振動数が大きくなるに従って振幅の影響が少なくなっている。

以上の結果から、最適な加振条件としては、密度のみを考慮すると振動数3,000rpmおよび振幅1.2mmを設定すべきと思われるが、振幅が1.2mmの場合の振動締め中の振動機の状態、振動数3,000rpmとした場合のペーストの飛びはねの状態、および振動締め終了後のコンクリートの目視観察から、振動数2,500rpmおよび振幅0.9mmの場合が

最適な加振条件と判断した。したがって、この加振条件で以後の実験を行った。

## 5. 2 配合特性試験

### 5. 2. 1 フレッシュコンクリート

図-7に、上載式締固め試験装置を用いた場合の単位水量と密度の関係を示す。単位水量が増加するに従い密度が増加する傾向にある。また、単位水量が $81\text{kg/m}^3$ および $86\text{kg/m}^3$ の場合、細骨材率が小さくなると密度が増加する結果となっている。

図-8~13に、間隙水圧の経時変化の例を示す。

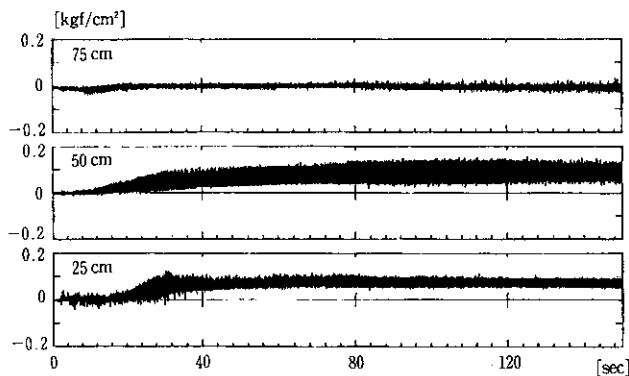


図-8 間隙水圧の経時変化 (配合番号 8)

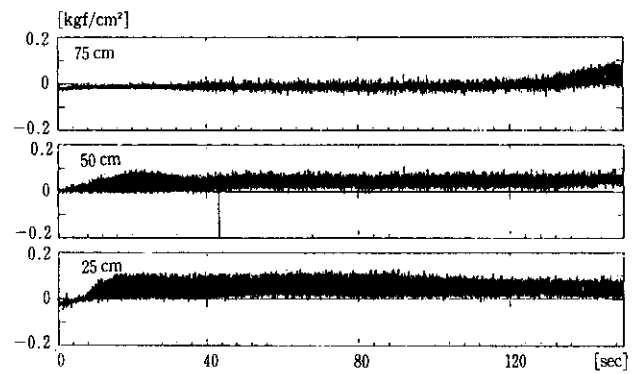


図-11 間隙水圧の経時変化 (配合番号 3)

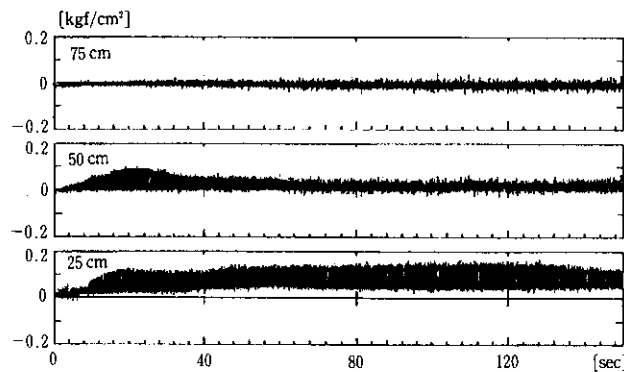


図-9 間隙水圧の経時変化 (配合番号 9)

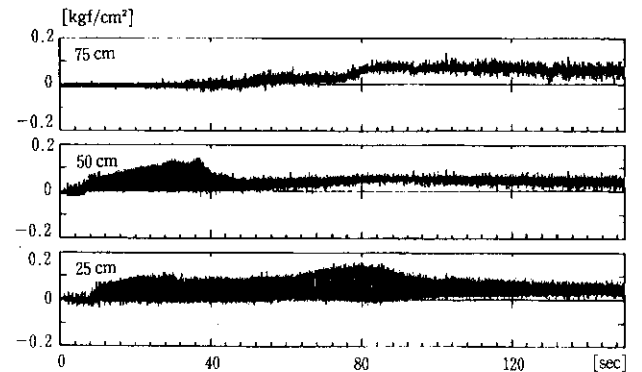


図-12 間隙水圧の経時変化 (配合番号 6)

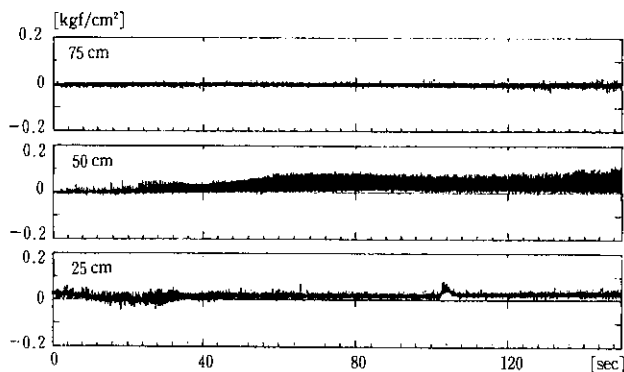


図-10 間隙水圧の経時変化 (配合番号 4)

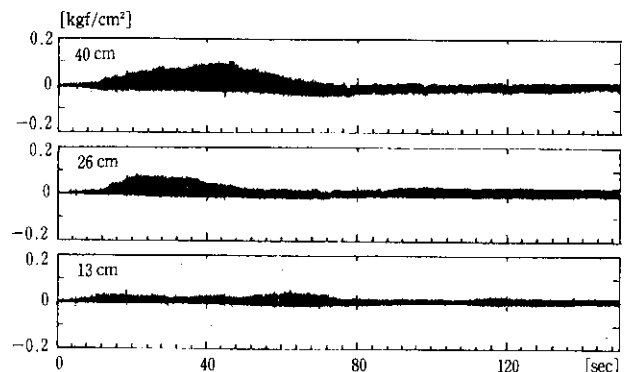


図-13 間隙水圧の経時変化 (配合番号 6)

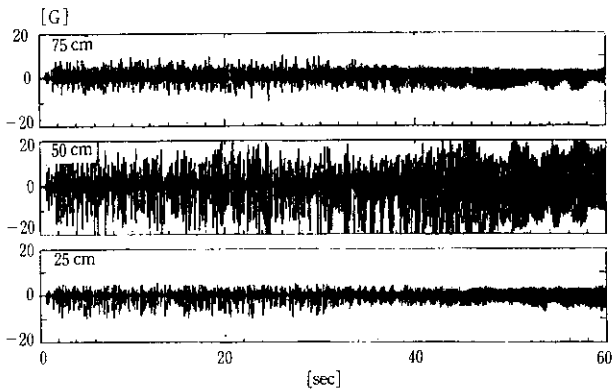


図-14 加速度の経時変化 (配合番号1)

圧が早くたち上がり、振動締固めによるセメントのペースト化に要する時間が単位水量に依存していることがわかる。

図-10は、単位水量が $81\text{kg/m}^3$ 、細骨材率が28% (配合番号4)の場合を示すが、セメントのペースト化に要する時間が長くなっている。間隙水圧の経時変化特性も単位水量によって異なったものとなり、図-9に示す単位水量 $91\text{kg/m}^3$ の場合、第2層目の間隙水圧は28秒前後から低下している。これに対して、図-8に示す単位水量 $86\text{kg/m}^3$ の場合、ほぼ一定の間隙水圧となった。いずれの場合も、ペースト化は2層目から始まっているといえる。

図-11および12に、単位水量が $91\text{kg/m}^3$ で細骨材率がそれぞれ26% (配合番号3)および28% (配合番号6)の場合の間隙水圧の経時変化を示す。いずれも、1層目のペースト化が見られ、これらの配合ではコンクリート上面からの振動締固めが下層まで有効であった。このことは、図-7に示した密度に関する結果からも明らかである。

次に、図-13に配合番号6のVC試験による結果について示すが、明らかに上載式締固め試験とは異なった挙動となっている。すなわち、この場合、セメントのペースト化はコンクリート下部から始まっている。

間隙水圧計による測定では、しばしば出力データに異常値が見られた。特に水量が小さい場合にその傾向があった。これは、150~80mmの粗骨材の分布等が微妙に影響している可能性がある。

図-14に、上載式締固め試験における加速度の経時変化の例を示す。振動開始直後から2層目の加速度が、1層目および3層目を大きく上まわる結果となった。若干の差はあるものの、どの配合について

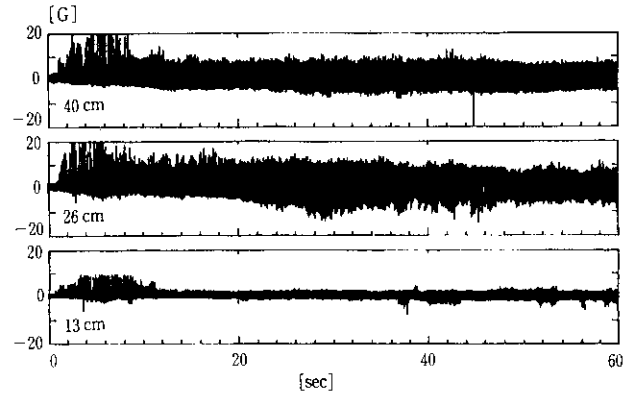


図-15 加速度の経時変化 (配合番号6)

も同様な傾向を示しており、一般に2層目のペースト化が早いことと符号する。図-15は、VC試験における加速度の経時変化の例を示す。1層目および2層目では、ほとんど同じ傾向で加速度が変化しているが、2層目が若干大きい値を示している。3層目に関しては、振動開始6秒程度で最大に達し、その後減少傾向を示し、振動時間10秒程度で安定している。これらの結果は、VC試験の場合、下層からペースト化が始まることを示すものである。

### 5. 2. 2 硬化コンクリート

図-16に、硬化コンクリートの密度および圧縮強度試験結果を示す。標準供試体およびコア供試体の密度は、いずれの単位水量においても、細骨材率の減少とともに増加している。標準供試体の場合、密

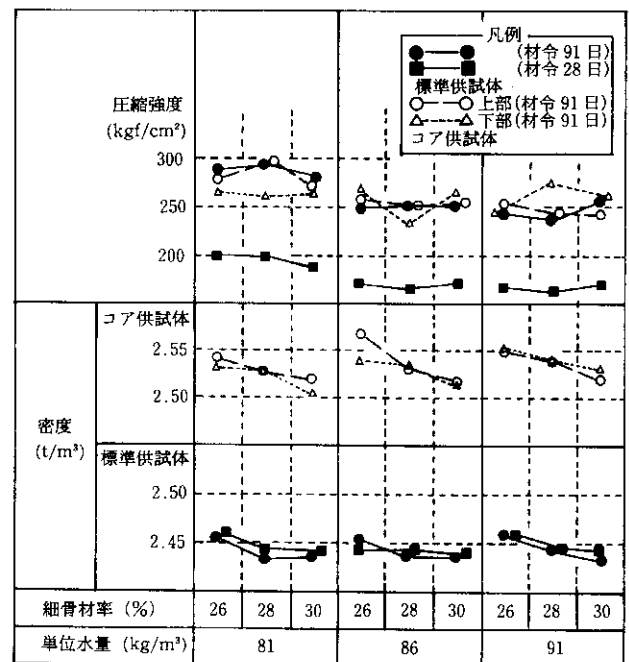


図-16 硬化コンクリート試験結果

度に対する単位水量の影響はほとんどないが、コア供試体では、単位水量の増加とともに密度が増加する傾向がある。コア供試体の上部と下部における密度に著しい違いはないが、上部の密度が若干大きな結果となっている。これは、供試体の上からの振動締固めが下層まで十分いきとどかないことのあることを示すものであり、実際、供試体は上部より下部に多くジャンカが観察されている。図-16から明らかのように、標準供試体の密度はコア供試体の密度よりかなり小さなものとなっている。コア供試体は、ウェットスクリーニングをした標準供試体より単位容積当たりの粗骨材の量が多くなることから、すなわち、比重の大きなものの割合が大きくなることから、その密度は常に標準供試体より大きなものとなる。

コンクリートの圧縮強度は、標準供試体およびコア供試体とも、単位水量の減少とともに増加している。単位水量が $81\text{kg}/\text{m}^3$ で細骨材率が28%の場合、材令91日において、最も大きな圧縮強度となっているが、一般に細骨材率の圧縮強度に対する影響は顕著でない。材令91日における標準供試体とコア供試体上部の圧縮強度は、ほぼ同じ結果となった。コア供試体の上部と下部の圧縮強度は単位水量に影響し、単位水量が $81\text{kg}/\text{m}^3$ の場合、上部が下部より大きな強度となり、単位水量が少ない場合下部まで振動締固めがいきとどかないことによる下弱上強現象が生じているものと思われる。これに対し、単位水量が $91\text{kg}/\text{m}^3$ の場合、細骨材率26%の場合を除いて下強上弱となっている。これは、単位水量が増加すると、セメントのペースト化に要する時間が早くなり、上部が締固め過多となったことによるものと思われる。実際、これらの場合、ペーストが型枠外に

飛び出す現象が観察された。単位水量が $86\text{kg}/\text{m}^3$ の場合、 $81\text{kg}/\text{m}^3$ と $91\text{kg}/\text{m}^3$ の場合の中間的な結果となった。

## 6. あとがき

以上、RCDコンクリートの締固め特性に関する検討を行うために、フレッシュおよび硬化コンクリートについて振動締固めおよび強度試験を行い、これらの結果について述べた。

本実験結果から、用いた上載式締固め装置の最適な加振条件として、振動数 $2,500\text{rpm}$ および振幅 $0.9\text{mm}$ が得られた。また、フレッシュコンクリートの締固めメカニズムの解明に、間隙水圧計を用いる手法は有効であることが明らかになった。今後、室内における基礎的な研究を継続するとともに、RCDコンクリートの実施工における締固め特性との相関について検討する。

本実験の計画実施にあたっては、帯広開発建設部・札内川ダム建設事業所および石狩川開発建設部・滝里ダム建設事業所の協力を得た。ここに、記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 徳田弘, 加賀谷誠, 川上洵, 辻子雅則: 間隙水圧計による超硬練りコンクリートの締固め度の判定, コンクリート工学論文集, 第1巻 第1号, 1990. 1.
- 2) 松本徳久, 佐谷靖郎, 志賀三智: ローラ転圧コンクリートの締固め特性, 土木研究所報告, 第178号, 1988. 10.
- 3) 財国土開発技術研究センター: RCD工法技術指針(案), 平成元年3月.