

土木研究所報告

第 178 号

ローラ転圧コンクリートの締固め特性 松本徳久
佐谷靖郎
志賀三智

昭和 63 年 10 月

建設省土木研究所

Copyright © 1988年 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

「ローラ転圧コンクリートの締固め特性」

松本 徳久*
佐谷 靖郎**
志賀 三智***

Compaction Characteristics of Roller Compacted Concrete

by Norihisa Matsumoto
Yasuo Satani
Minori Shiga

要 旨

わが国では、いくつかの重力式コンクリートダムがRCD工法により建設されており、コンクリートダムの新しい施工法として世界から注目されている。RCD工法は超固練りコンクリートをブルドーザで薄層に撒き出し、振動ローラで転圧して固める方法であり、RCD工法が現在の形に至る過程においては、いくつかの新技术が生まれている。その中で本論文では、RCDコンクリートのようなローラ転圧コンクリートの配合決定方法、ローラ転圧工法における転圧機構の解明、施工管理において設計上必要なコンクリートとしての転圧がなされているかどうかの決定方法の3点について室内試験、現場転圧試験を行った結果をとりまとめたものである。

室内試験では、種々の単位水量、細骨材率におけるコンクリートの密度試験および圧縮強度試験を行った。室内試験においてローラ転圧コンクリートを締固める方法としては振動台による方法がよく用いられているが、個々の試験機によって結果に差が生じる、締固めエネルギーの評価が容易ではない、等の理由から試験結果の評価方法が確立されていないのが現状である。そこで、密度試験においてコンクリートの締固めには、従来用いられている振動台による方法の他に、フィル材料に対して用いられている突固めによる方法でも行った。

現場転圧試験では、種々の単位水量、転圧条件におけるコンクリートの施工時の撒き出し層ごとの密度と変位量の測定を行った。RCDコンクリートの転圧に対しての施工管理は、リフト単位での変位量とリフト表層部でのRI密度計による密度測定とによって行われているが、転圧に伴うコンクリート内部の密度変化および変位量については明らかにされていない。そこで今回の現場転圧試験では、密度については、RI密度計、砂置換法、ボーリングコアによる方法で測定を行い、変位量の測定には、相互インダクタンスを利用した非接触型層別変位計（ソイルストレインゲージ）を用いた。

これらの実験結果をもとにして、一連の施工段階におけるローラ転圧コンクリートの転圧機構を明らかにするとともに、ローラ転圧コンクリートの施工管理方法、さらには配合決定方法に関しての提案もあわせて行った。

* ダム部フィルダム研究室長
** ダム部フィルダム研究室部外研究員（現在（株）熊谷組）
*** ダム部フィルダム研究室（現建設省九州地方建設局大隅工事事務所）

Synopsis :

Roller Compacted concrete is no-slump concrete with very small amount of water, and is compacted by using vibratory roller. The authors have conducted the laboratory and field tests to find the rational methods to determine the design mix of roller compacted concrete. The results of laboratory compaction tests show that there exists the optimum fine aggregate ratio which gives the maximum density in the compaction tests of aggregates without cement paste, and also exists the optimum cement paste content which gives the maximum density under the optimum fine aggregate ratio. The ratio of optimum cement paste volume to the void volume of the aggregate compacted to maximum density is equal to or slightly larger than 1.0. These results were confirmed also by the field compaction tests.

Field experiments on the compaction for roller compacted concrete have been conducted to investigate its compaction mechanism. In these tests, no slump concrete with poor cement content was spread in 18 to 25 cm layers by bulldozers, and three layers were compacted in 54 to 75 cm lifts by vibratory rollers. Non-contact type displacement devices were embedded at the top of each bulldozer spread layer to measure the internal displacement during bulldozer spreading and vibratory roller compacting. Density and unconfined compressive strength were tested for the drilled core specimen obtained from hardened concrete. From these test results, several conclusions were drawn on the (1) effects of bulldozer and vibratory roller on the compaction of roller compacted concrete, (2) the procedure to determine the most suitable quantity of cement paste content in the design of mix proportion and, (3) field quality control method for compaction.

目 次

1. まえがき	(1)
2. 室内試験	(2)
2.1. 試験目的	(2)
2.2. 種々の細骨材率における骨材のみの締固め試験	(4)
2.2.1. 試験方法	(4)
2.2.2. 試験結果および考察	(5)
2.3. 種々の細骨材率におけるコンクリートの締固め試験	(6)
2.3.1. 試験方法	(6)
2.3.2. 試験結果および考察	(9)
2.4. 種々の単位水量におけるコンクリートの締固め試験	(9)
2.4.1. 試験結果および考察	(9)
2.5. 種々のペースト量におけるコンクリートの締固め試験	(11)
2.5.1. 試験方法	(11)
2.5.2. 試験結果および考察	(12)
2.6. 骨材間の空隙に着目した配合設計方法	(14)
2.7. 結論	(14)
3. 現場転圧試験	(15)
3.1. 試験目的	(15)
3.2. 試験方法	(16)
3.2.1. コンクリートの配合	(16)
3.2.2. 試験ヤード	(16)
3.2.3. 測定	(17)
3.3. 結果および考察	(22)
3.3.1. 沈下および圧縮量	(22)
3.3.2. 密度	(25)
3.3.3. 強度	(33)
3.4. 施工管理に対する提案	(37)
3.5. 結論	(38)
4. 配合決定から施工管理までの設計施工手法の提案	(38)
5. あとがき	(39)
謝辞	(39)
参考文献	(39)

1. まえがき

近年、コンクリートダム の合理化施工の1つとして RCD 工法 (The Roller Compacted Dam-concrete method) が脚光を浴びている。RCD 工法は超硬練りコンクリートをトラック等で運搬し、ブルドーザで薄層に撒き出し、振動ローラによって締固める施工方法であり、我国独自の設計・施工方針に基づき、建設省が中心となって開発した施工方法である。¹⁾

我国における RCD 工法の研究の着手は、1974年、財団法人 国土開発技術研究センターに「コンクリートダム合理化施工に関する研究委員会」が設置されたことに遡る。その後、1976年には大川ダムの上流仮締切ダムにおいて大がかりな実験が実施され、その結果、超硬練り貧配合コンクリートの振動ローラを用いての締固めの可能性が実際に確かめられ、RCD 工法のダム本体への適用性が実証された。これらの検討結果を踏まえ、1978年には島地川ダム本体コンクリートの施工²⁾、1979年には大川ダムマットコンクリートの施工³⁾、1980年には新中野ダムの減勢地コンクリートの施工⁴⁾を経て、RCD 工法による施工方法が体系化され、現在数多くの重力式コンクリートダムが RCD 工法によって建設・計画されている。

RCD 工法は、コンクリートの配合および締固め方法が従来工法と異なるものの、硬化後においては、RCD コンクリートは従来のダムコンクリートと比べて遜色のない品質を得ることを基本としている。RCD 工法を採用しているダム施工現場では、堤体施工前に実施する試験施工によって、コンクリートの配合および締固め条件の選定とその妥当性の確認を行っており、各施工現場では良質なコンクリートが得られている。しかし、RCD コンクリートに代表されるローラ転圧コンクリートの締固め機構は十分に明らかにされていないため、各施工現場では最適な打設条件を見いだすのに、多種多様の打設条件を設定しており、また、施工管理方法についても、より簡便にして信頼性のある方法の開発が期待されている。

ローラ転圧コンクリートは、超硬練りのコンクリートを内部振動機を用いず振動ローラで転圧する点が、フィルダム材料に類似している。フィルダム材料は、強度や透水性など重要な物性値は、密度に大きく依存するため、大きな密度を得るための締固めに多大な努力が払われてきた。筆者らの所属するフィルダム研究室においてもフィルダム材料に関する一連の室内およ

び現地締固め試験を実施してきた。⁵⁾⁶⁾⁷⁾そこで、筆者らは本論文において、内部振動機によらずローラで転圧されるコンクリート (以下ローラ転圧コンクリートとする) が水和反応によって固結する段階以前の締固めを中心に、フィルダム工学の分野で用いられる手法によって、ローラ転圧コンクリートの締固め機構の解明を試みた。

以上の背景のもと、締固め易さとの関連での配合特性については、

① 骨材の締固め特性

② コンクリート中のペースト量

に着目した室内試験を実施した。また、締固め機構については、

① 一連の施工工程にともなうコンクリートの変位および密度上昇過程

② 締固め度と強度との関係

に着目した現場転圧試験を実施した。なお、上記の実験の実施時期は昭和61年9月～11月である。

以下、本論文の内容を第2章より各章、節について要約しておく。

第2章「室内試験」においては、ローラ転圧コンクリートの室内試験を行い骨材間の空隙に着目した配合設計方法について検討を行っている。

第2章1節「試験目的」においては、ローラ転圧コンクリートは超硬練りのコンクリートであり、振動ローラによって締固められるから締固め特性についてはフィルダムのコア材に類似の特性を持つことが推定され、このことからコア材における最適含水比に相当する概念を求める動機が述べてある。

第2章2節「種々の細骨材率における骨材のみの締固め試験」においては、細骨材率と締固め密度との関係を把握するための骨材のみの締固め試験を行っている。

第2章3節「種々の細骨材率におけるコンクリートの締固め試験」においては、水セメント比およびペースト量を一定とし、細骨材率をパラメータとしたコンクリートの締固め試験を行っている。

第2章4節「種々のペースト量におけるコンクリートの締固め試験」においては、水セメント比および細骨材率を一定とし、ペースト量をパラメータとしたコンクリートの締固め試験を行っている。

第2章5節「骨材間の空隙に着目した配合設計方法」においては、骨材間の空隙に着目した配合設計を行った場合、水セメント比を一定に保った状態で締固め特性およびコンシステンシーを検討することが可能となり、

強度についても一定水準以上の密度を確保することにより所要の強度を得ることを述べる。

第2章6節「結論」においては、室内試験結果に対する考察を行った結果以下に示す結論を得たことを述べる。

- ① 骨材のみの締固め試験によってローラ転圧コンクリートの最適細骨材率が推定できる。
- ② ローラ転圧コンクリートの最適ペースト量は骨材間の空隙量よりやや多い量である。
- ③ 水セメント比を一定とし、細骨材率およびペースト量をパラメータとした配合設計方法は合理的な配合設計方法と考えられる。
- ④ ローラ転圧コンクリートのVC試験は、大型容器による試験が適当と考えられる。

第3章「現場転圧試験」においては、ローラ転圧コンクリートの締固め機構を解明するために、主として配合および締固め方法に着目した現場転圧試験を行っている。なお、本章の内容は既に土木学会論文集に発表した内容⁹⁾を含むが、土木学会論文集では、紙数の制約から実験結果を一部割愛しているので、本章ではすべての実験データを収録する形でとりまとめている。

RCDコンクリートの締固めに関して各施工現場で種々の試験施工が行われているが、締固め機構については不明確な点が残されており、合理的な施工管理方法は確立していないのが現状である。そこで、第3章1節「試験目的」において、ローラ転圧コンクリートの締固め工程においてブルドーザおよび振動ローラが締固めに果たす役割および施工工程と密度、強度の増加との関係を把握することを述べている。

第3章2節「試験方法」においては、ローラ転圧コンクリートの締固め度を表すパラメータとして沈下量、密度および強度を取り上げ、撒き出しから振動転圧までの各施工工程におけるコンクリートの沈下量、密度および強度を非接触型変位計、RI密度計、ボーリングコアなどによって測定した。また、ブルドーザによる転圧効果を排除するためバックホウによってコンクリート撒き出しした試験ブロックを設定し、上記と同様の測定をおこなうことによってブルドーザおよび振動ローラの転圧効果を分離して把握できるようにしたことを述べる。

第3章3節「結果および考察」においては、現場転圧試験を行った結果を沈下および圧縮量、密度、強度に分けて考察した。

第3章4節「施工管理に対する提案」においては、現場転圧試験結果から、ローラ転圧工法でコンクリー

トダムを施工する際のコンクリートの締固めに関する品質管理項目を提案する。

第3章5節「結論」においては、現場転圧試験結果より、ローラ転圧コンクリートの締固め機構および施工管理方法に関して以下の結論を得たことを述べる。

- ① 非接触型変位計は各撒き出し層ごとの沈下量を精度良く測定することができるが、沈下量のみからではコンクリートの締固め度を把握することは困難である。
 - ② ブルドーザによる撒き出しは密度の増加に大きく貢献し、ブルドーザによる転圧効果なしで良質なコンクリートは得られないが、ブルドーザによる転圧は密度の増加に比べて強度の増加が少ない範囲の転圧であり、強度の増加は主に振動ローラでの転圧によっておこなわれている。よって、ブルドーザおよび振動ローラは両者とも良質なコンクリートを得るためには不可欠な工程といえる。
 - ③ ローラ転圧コンクリートの密度と強度との関係は、密度が $2.0\text{t}/\text{m}^3$ から $2.3\text{t}/\text{m}^3$ までの間は密度の増加に比べて強度の増加は少ないが、密度が $2.3\text{t}/\text{m}^3$ を越えると密度の増加にともない強度は急激に増加する。
 - ④ RI密度計は、測定の簡便性および迅速性から広く利用されているが、ローラ転圧コンクリートの密度を測定する場合、特に撒き出し直後および転圧初期において密度が低く評価される可能性がある。
 - ⑤ ローラ転圧コンクリートの締固めに関する施工管理のパラメータとしては密度が適当と考えられる。ただし、施工中の密度は転圧表面でしか測定できないため、管理基準値はコンクリート内部の密度および強度を考慮した値ではなくてはならない。また、管理基準値は試験施工時の各種測定結果（沈下量、密度、強度など）をもとにして求めることができる。
- 第4章「配合決定から施工管理までの設計施工体系の提案」においては、室内試験および現場転圧試験によって得られた結論よりローラ転圧コンクリートの配合決定から施工管理までの設計施工体系について提案を行っている。

2. 室内試験

2.1 試験目的

ローラ転圧コンクリートは超硬練りのコンクリートであり、振動ローラによって締固められるから、締固

め特性についてはフィルダムのコア材に類似の締固め特性を持つことが推定される。コア材では、所定の強度と透水性を持つよう粒度と含水比が決定されるが、一般には、粒度は、天然の与えられたものとして設定し、振動ローラにより転圧する場合に、最も高い密度を与える最適含水比を、室内締固め試験で見出し、この含水比に近い値で施工含水比が決定されている。

ローラ転圧コンクリートとフィルダムのコア材との類似からすると、超硬練りコンクリートにもローラ転圧する場合に最適な単位水量、単位セメント量および細骨材率などの存在が予想され、これらの諸量を室内締固め試験で効率的に見出すことは可能ではないかと思われる。

現在、RCD コンクリートの配合設計は、所要の水セメント比およびVC値で表わされるコンシステンシーを定めた後、フィルダムという含水比および粒度に対する単位水量および細骨材率をパラメータとし、コア材のように種々の単位水量および細骨材率によるトライアンドエラーによって配合を決定している。すなわち、以下のような手順で行われている。⁹⁾

- ① モルタルの単位容積重量試験、種々の単位水量によるコンクリートの圧縮強度試験およびコンシステンシー試験により、単位水量を定める。
- ② 種々の細骨材率によるコンクリートのコンシステンシー試験を行い、細骨材率を定める。
- ③ ①、②で定まる配合のコンクリートの圧縮強度試験を行う。

以上の結果に基づいて示方配合を設定し、最終的には試験施工を行い、必要な場合には示方配合を修正している。上記の手順のうち①では、単位セメント量を一定として単位水量を種々変えた配合の締固め試験および圧縮強度試験を行っているが、単位水量を変えることによって各配合の水セメント比が異なるために、締固め密度がピークとなる単位水量と強度がピークとなる単位水量とが異なることが予想される。そこで、ローラ転圧コンクリートにおいても通常のコンクリートと同様に強度が水セメント比の法則に従うとすると、ローラ転圧コンクリートでは、フィルダムのコア材における含水比に相当するパラメータとしては、単位水量のかわりに水セメント比を一定としたペースト量をパラメータとすることによって、与えられた水セメント比の条件の下で、密度のピーク値を求めることができると考えられる。また、手順の②では、手順の①で用いた細骨材率よりもコンシステンシーが小さくなる細骨材率が見出せたならば、単位水量もしくはペース

ト量は手順①で得られる量よりもさらに減ずることができる。

超硬練りコンクリートの配合と締固め特性に関する研究、特に細骨材率およびペースト量に着目したものの中で、中原ら¹⁰⁾は、セメントペースト量の細骨材空隙充てん率(α)とモルタル量の粗骨材空隙充てん率(β)はRCDコンクリートのコンシステンシーに対して大きな影響を与える要因であると報告している。また、M、R、H、Dunstan¹¹⁾は、ローラ転圧されたコンクリート中のモルタル分に対するペースト分の体積比が一定量以上でないと転圧後において高品質なコンクリートが得られないと報告している。

ところで、 α 、 β 方式は骨材を粗骨材と細骨材とに分けて扱っており、 α と β が互に独立な定数として存在するという考え方はフィル材料の立場でいう礫率補正の考え方に対応しているが、よく知られているように礫率補正(Walker Holtz)は礫率が30%程度以下の範囲しか適用できない。したがって2段階でなく全粒度を対象としての締固め試験がより重要であると考えられる。

そこで、第2章では、現行の配合設計方法におけるパラメータである単位水量をペースト量に置き換え、さらにはフルサイズでの骨材の空隙量にも着目した。いわば現行の方法と α 、 β 方式の双方の考え方を合わせた観点に立ち、密度および強度の最も高くなるローラ転圧コンクリートの配合決定方法について実験的に研究した。

本章における試験項目は大別して以下に示す3点である。

- ① 種々の細骨材率による骨材のみの締固め試験を行い、細骨材率と密度の関係を明らかにし、最適細骨材率での空隙率を求める。
- ② ①で求められる最適細骨材率が、実際のコンクリートではどうなのか、ペースト量を一定として種々の細骨材率によるコンクリートの締固め試験を行い、コンクリートでの最適細骨材率を求める。
- ③ ローラ転圧コンクリートにおけるペースト量を、フィルダムのコア材における含水比に対応した物理量と仮定して、ペースト量を変えて締固め試験を実施し、最大密度を与える最適ペースト量が存在するかどうかを確かめる。なお、この時、細骨材率と水セメント比は一定とする。

コンクリートの配合は、骨材、セメント、フライアッシュ混入率および水セメント比が異なる2つのダムのローラ転圧コンクリートの示方配合を基本とし、そ

の前後の細骨材率およびペースト量により2シリーズ(シリーズIおよびシリーズII)実施した。上記のシリーズIは、北海道開発局の美利河ダム、シリーズIIは、福島県の真野ダムである。

次に、各試験項目の順に試験方法および試験結果をみてゆくことにする。

2.2 種々の細骨材率における骨材のみの締固め試験

2.2.1 試験方法

使用した骨材の粒径別の比重を表-2・1に示す。また、粒度分布を図-2・1、図-2・2に示す。

骨材のみの締固め試験では、最大粒径80mmのフルサイズの試料およびこれから40mm以上の骨材を取り除いた試料(以下土質力学用語にしたがい剪頭粒度)の2種の粒度を設定し、細骨材率を変化させている。表2・2と2・3に、それぞれ図2・1と2・2に示した粒度の内訳と細骨材率を示す。なお、骨材の含水状態はすべて表乾状態である。

骨材のみの締固めおよび測定は所定の粒度の試料を

表-2・1 骨材の比重

	細 骨 材	粗 骨 材		
		5mm~20mm	20mm~40mm	40mm~80mm
シリーズI	2.61	2.65	2.66	2.66
シリーズII	2.66	2.68	2.71	2.71

単位：t/m³

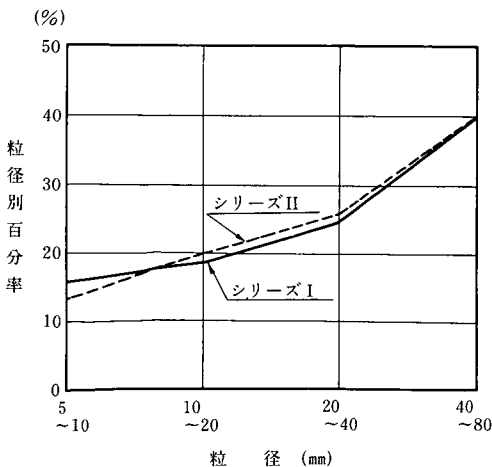


図-2・1 粗骨材の粒度分布

十分に混合した後、 $\phi 30\text{cm} \times 60\text{cm}$ のモールドに投入し、電動ランマーによって締固めた(写真-2・1、2・2)。表-2・4に電動ランマーの仕様を示す。投入直後、および5秒、20秒、40秒、60秒、120秒締固めた時点でモールド天端から試料表面までの距離を10ヶ所測定して試料の平均高さを求め、この値とモールドの内径および試料の投入重量から各締固め時間での試料の密度を算出した。なお試験は、同一配合に対してすべて3回実施した。2.2.2に示す試験結果は、3個の平均値を用いて整理してある。以下に試験の手順を示す。

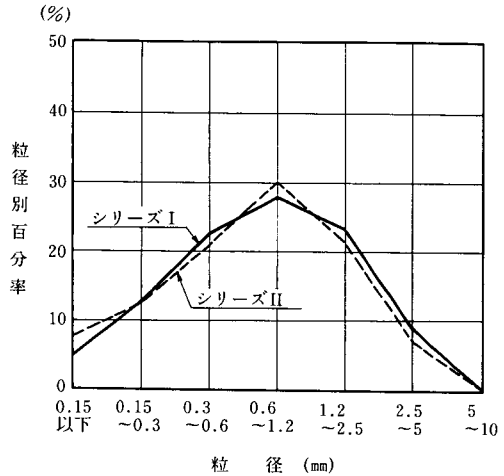


図-2・2 細骨材の粒度分布

表-2・2 骨材のみの締固め試験配合表
(シリーズI)

配合No.	細骨材率(%)	細骨材(kg)	粗 骨 材(kg)			備 考
			5~20mm	20~40mm	40~80mm	
A1-1	24	14.21	16.03	11.45	18.32	
A1-2		20.45	23.07	16.48	0.00	A1-1の剪頭粒度試料
A1-3	27	15.99	15.40	11.00	17.60	
A1-4		22.63	21.80	15.57	0.00	A1-3の剪頭粒度試料
A1-5	30	17.78	14.78	10.56	16.89	
A1-6		24.74	20.57	14.69	0.00	A1-5の剪頭粒度試料
A1-7	33	19.57	14.15	10.11	16.17	
A1-8		26.79	19.38	13.84	0.00	A1-7の剪頭粒度試料
A1-9	36	21.36	13.53	9.66	15.46	
A1-10		28.77	18.22	13.01	0.00	A1-9の剪頭粒度試料

表-2・3 骨材のみの締固め試験配合表
(シリーズII)

配合No	細骨材率(%)	細骨材(kg)	粗骨材(kg)			備 考
			5~20mm	20~40mm	40~80mm	
A2-1	27	16.03	14.95	11.43	17.59	
A2-2		22.67	21.15	16.18	0.00	A2-1の剪頭粒度試料
A2-3	30	17.81	14.34	10.97	16.88	
A2-4		24.78	19.96	15.26	0.00	A2-3の剪頭粒度試料
A2-5	33	19.60	13.74	10.50	16.16	
A2-6		26.83	18.80	14.37	0.00	A2-5の剪頭粒度試料
A2-7	36	21.40	13.13	10.04	15.44	
A2-8		28.81	17.67	13.52	0.00	A2-7の剪頭粒度試料
A2-9	39	23.19	12.52	9.57	14.72	
A2-10		30.73	16.59	12.68	0.00	A2-9の剪頭粒度試料

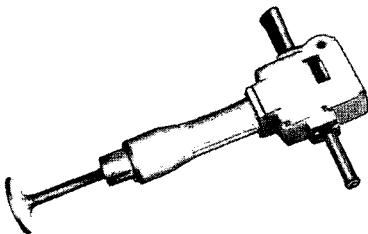


写真-2・1 電動ランマー外観



写真-2・2 骨材のみの締固め試験

表-2・4 ランマー仕様

全 負 荷 打 撃 数	850打撃/分
本 体 重 量	30kgf
加 圧 盤 直 径	約29cm

- ① モールドの天端から底面までの距離を10ヶ所測定する。
- ② 各粒径毎に骨材(表乾状態)の必要量を計量し、調整した後4つのバケツに均等に投入する。
- ③ バケツ内の試料をバレットに広げ十分に混合する。
- ④ バレット上で混合された試料を不均一にならないように16分割しモールド内に静かに投入する。
- ⑤ ③~④の作業を4つのバケツについて行い、すべての試料の投入が終了したらモールドの天端から試料表面までの距離を10ヶ所測定する(図-2・3参照)。
- ⑥ ①および⑤で得た値と試料の重量から投入時の試料の密度を求める。
- ⑦ 試料表面に鉄板をおき電動ランマーで所定の時間となるまで締固める。
- ⑧ モールドの天端から試料表面までの距離を測定しこの値と①で得た値および試料の重量から所定の締固め時間での試料の密度を求める。
- ⑨ ⑦~⑧の作業をすべての締固め時間(5種類)に対して行う。
- ⑩ ①~⑨の作業を1配合につき3回(供試体3本)行う。
- ⑪ ①~⑩の作業をすべての配合について行う。

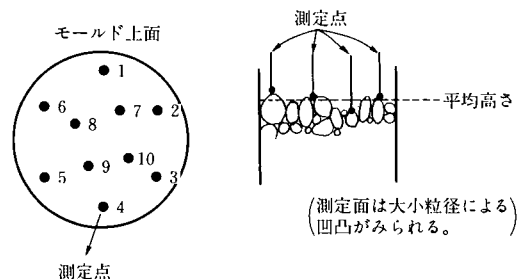


図-2・3 供試体高さの読み取り

2.2.2 試験結果および考案

表-2・5および表-2・6に骨材のみの締固め試験結果の一覧表を示す。また、電動ランマーの締固め時間と密度の関係のうち代表的なものを図-2・4および図-2・5に示す。いずれの試料においても締固め時間が60秒を過ぎると密度上昇率は小さくなり、以降のわずかな密度の上昇は、骨材の破砕を伴うと推定され、各試料は120秒締固めた時点で最大密度に達していると考えたことにした。

各試料の120秒締固め時点での密度と骨材の細骨材率の関係を図-2・6および図-2・7に示す。シリーズI、

表-2・5 骨材のみの締固め試験結果の一覧表
(シリーズ I)

配合No	細骨材率 (%)	締固め密度 (t/m ³)					
		0秒	5秒	20秒	40秒	60秒	120秒
A1-1	24	1.834	2.005	2.100	2.154	2.179	2.220
A1-2		1.823	2.026	2.130	2.174	2.193	2.225
A1-3	27	1.861	2.037	2.140	2.188	2.211	2.250
A1-4		1.851	2.063	2.153	2.194	2.212	2.240
A1-5	30	1.907	2.109	2.206	2.248	2.268	2.305
A1-6		1.836	2.066	2.165	2.200	2.219	2.248
A1-7	33	1.941	2.112	2.210	2.247	2.262	2.292
A1-8		1.853	2.075	2.164	2.197	2.216	2.238
A1-9	36	1.910	2.115	2.198	2.237	2.254	2.273
A1-10		1.825	2.041	2.136	2.170	2.188	2.212

表-2・6 骨材のみの締固め試験結果の一覧表
(シリーズ II)

配合No	細骨材率 (%)	締固め密度 (t/m ³)					
		0秒	5秒	20秒	40秒	60秒	120秒
A2-1	27	1.906	2.068	2.165	2.211	2.231	2.264
A2-2		—	—	—	—	—	2.220
A2-3	30	1.924	2.093	2.187	2.233	2.255	2.287
A2-4		—	—	—	—	—	2.225
A2-5	33	1.962	2.141	2.231	2.270	2.290	2.308
A2-6		—	—	—	—	—	2.253
A2-7	36	1.960	2.141	2.222	2.263	2.273	2.296
A2-8		—	—	—	—	—	2.229
A2-9	39	1.958	2.136	2.223	2.250	2.272	2.290
A2-10		—	—	—	—	—	2.206

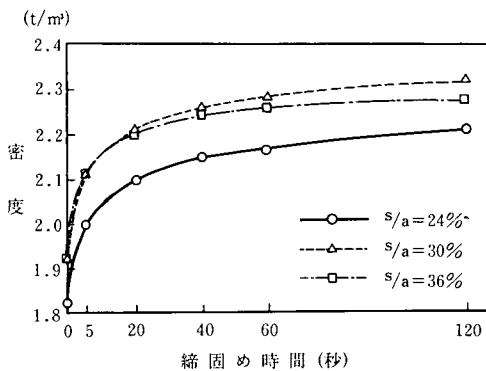


図-2・4 締固め時間と密度の関係
(シリーズ I : フルサイズ試料)

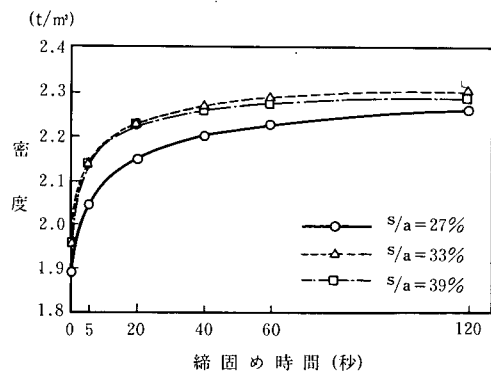


図-2・5 締固め時間と密度の関係
(シリーズ II : フルサイズ試料)

IIとも、最も密度が大きくなる細骨材率はフルサイズ試料の場合と剪頭粒度試料の場合で、ほとんど差がない。また、このときの細骨材率は、シリーズ I では30%、シリーズ II では33%である。

2.3 種々の細骨材率におけるコンクリートの締固め試験

2.3.1 試験方法

表-2・7および表-2・8に示すように、ペースト量を一定として細骨材率を変えたコンクリートの締固め試験を実施した。表-2・7および表-2・8における水セメント

比(W/C+F)およびフライアッシュ混入率(F/C+F)は実際に使用されているローラ転圧コンクリートの示方配合の値を用いている。また、ペースト量についても実際の示方配合の値を用いた。このペースト量は、図-2・6および図-2・7に示したフルサイズ試料の骨材のみの締固め試験結果より、骨材のみを最大限締固めた時における骨材間の空隙量とほぼ同程度の値であることがわかる。なお、ここでは、電動ランマーにより120秒間締固めた時の密度をもって『最大限締固めた時』としている。

コンクリートの締固め試験における試料は、所定の配合で練ったあとモールド径の関係から40mmでウェッ

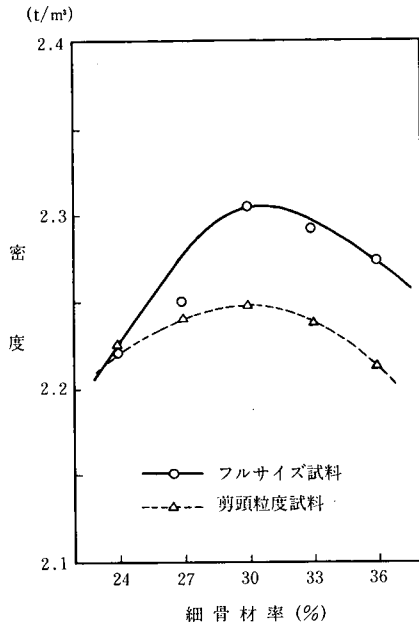


図-2・6 骨材のみの締固め試験結果 (シリーズ I)

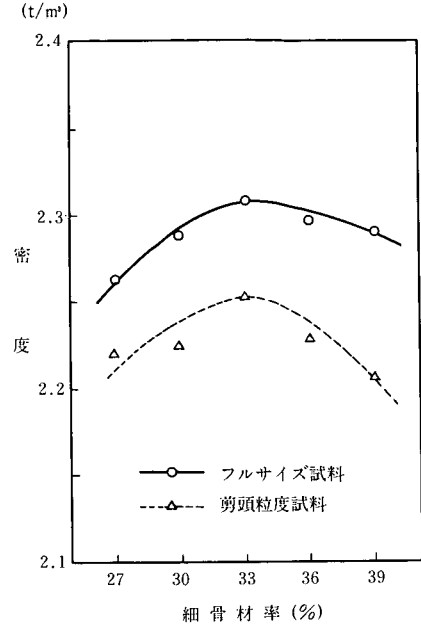


図-2・7 骨材のみの締固め試験結果 (シリーズ II)

表-2・7 種々の細骨材率におけるコンクリートの締固め試験配合表 (シリーズ I)

配合No.	粗骨材の 最大寸法 G _{MAX} (mm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C+F (%)	フライアッシュ 混入率 F/C+F (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m³)						
						水 W	セメント C	フライ アッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G		
										5mm ~20mm	20mm ~40mm	40mm ~80mm
MI-1	80	1.5	75.0	30.0	24	90	84	36	535	603	431	689
MI-2	80	1.5	75.0	30.0	27	90	84	36	602	579	414	662
MI-3	80	1.5	75.0	30.0	30	90	84	36	668	556	397	635
MI-4	80	1.5	75.0	30.0	33	90	84	36	735	532	380	608
MI-5	80	1.5	75.0	30.0	36	90	84	36	802	508	363	581

各配合とも (C+F)×0.25%のAE減水剤を使用

表-2・8 種々の細骨材率におけるコンクリートの締固め試験配合表 (シリーズ II)

配合No.	粗骨材の 最大寸法 G _{MAX} (mm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C+F (%)	フライアッシュ 混入率 F/C+F (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m³)						
						水 W	セメント C	フライ アッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G		
										5mm ~20mm	20mm ~40mm	40mm ~80mm
MII-1	80	1.5	81.7	20.0	27	98	96	24	607	567	433	667
MII-2	80	1.5	81.7	20.0	30	98	96	24	675	543	416	639
MII-3	80	1.5	81.7	20.0	33	98	96	24	742	520	398	612
MII-4	80	1.5	81.7	20.0	36	98	96	24	810	497	380	585
MII-5	80	1.5	81.7	20.0	39	98	96	24	877	474	362	557

各配合とも (C+F)×0.25%のAE減水剤を使用

トスクリーニングしたものを用いた。コンクリートの締固め方法は、振動台式締固めおよび突固めによる締固めの2種類とした。

まず振動台式締固めによる試験であるが、大型 VC 試験用振動台(写真-2・4)を使用し、5秒、20秒、40秒、60秒および120秒締固めた時点の密度を測定した。試験は各配合、各締固めエネルギーに対して3回ずつ行った。以下に試験手順を示す。

- ① 所定の配合で練られたコンクリートを40mmのウェットスクリーンにかけ、40mm以上の骨材を除く。
- ② 最大密度試験に用いる $\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ のモールドの空の重量をあらかじめ測っておく。
- ③ ①で得たコンクリートを②のモールドに投入し、モールド+コンクリートの重量を測定する。
- ④ 所定の時間大型 VC 試験用振動台(上載荷重10kg)によって締固める。
- ⑤ モールド天端からコンクリート表面までの距離を7ヶ所測定し、供試体の体積を求める。
- ⑥ 飛び出したモルタル(モールド内外に付着したモルタル)を取り除いた上でコンクリート+モールドの重量を測定し、これと②および⑤で得られた値とからコンクリートの密度を求める。
- ⑦ ③および⑥で測定した重量の差から締固めによって飛び出したモルタルの量を求める。
- ⑧ ①~⑦の作業を3回行う。
- ⑨ ①~⑧の作業を各締固めエネルギーについて行う。

次に突固めによる締固め試験は、自動突固め試験機(写真-2・5)を使用した。試験は、土に対して行う方法(JIS A 1210)に準拠して実施し、1Ec($5.6 \times 10^4 \text{m} \cdot \text{kgf}/\text{m}^2$)および3Ecのエネルギーで締固めたときの密度を測定した。試験は各配合各締固めエネルギーに対して3回ずつ行った。なお、締固めた供試体は、20℃の養生水槽で養生した後材令91日で密度測定および圧縮強度試験を行う。以下に試験の手順を示す。

- ① 所定の配合で練られたコンクリートを40mmでウェットスクリーニングする。
- ② 締固め試験に用いる $\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ のモールドの空の重量を測定する。
- ③ ①で得たコンクリートを $\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ のモールドに3層に分けて投入し、自動突固め試験機により突固める。一層当りの突固め回数は、1Ecの場合は49回、3Ecの場合は147回である。(いずれも4.5kgのランマーを使用し、落下高さは45cmの場合)なお、各層の密着を良くするため、1層目及び2層目の突固めの終了後は層の表面を突き棒等で乱しておく。



写真-2・3 小型 VC 試験

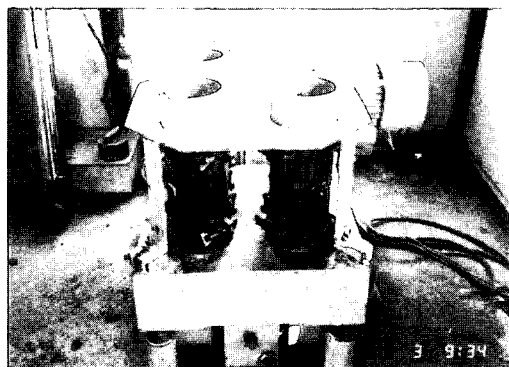


写真-2・4 大型 VC 試験用振動台

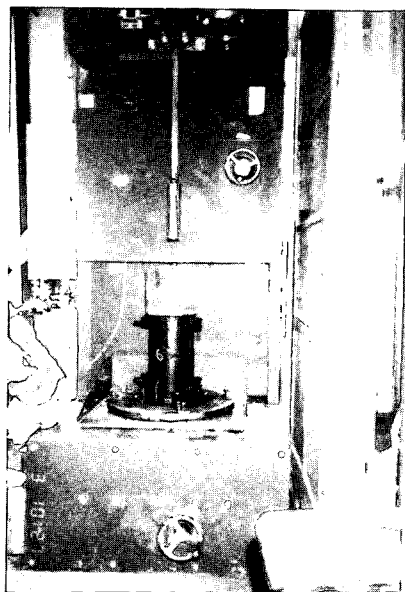


写真-2・5 自動突固め試験機

- ④ モールド天端からコンクリート表面までの距離を7ヶ所測定し、供試体の体積を求める。
 - ⑤ コンクリート+モールドの重量を測定し、これと②および④で得られた値とからコンクリートの密度を求める。
 - ⑥ ①～⑤の作業を1配合につき3回(供試体3本)行う。
 - ⑦ ①～⑥で作成した供試体を20℃の養生水槽内で91日養生した後、圧縮強度試験を行う。
なお締固め試験で作成した供試体は、20℃の養生水槽で養生した後、材令91日で密度測定およびJIS A 1108にもとづいて圧縮強度試験を行った(写真-2・6)。
- 締固め試験で作製した供試体での試験の手順は以下の通りである。
- ① 締固め試験が終了して6時間以上(練上り後約8時間以上)経過したら、ブラシ等で供試体表面のレイタンスを除去する。
 - ② 練上り後1日経過した供試体の脱型、表面状況を観察した後、20℃の養生槽で91日間養生する。
 - ③ 載荷試験を行う数時間前に供試体を養生槽から取り出し、供試体の水中重量、供試体表面が乾燥した時点の空中重量を測定する(供試体の密度を計算する)。
 - ④ ノギスにより供試体の直径を6カ所測定し、供試体の平均直径を求める。
 - ⑤ 供試体上部(粗面)にキャッピングを施す。
 - ⑥ キャッピング終了後、数時間経過した後で載荷試験を行う。
 - ⑦ 供試体の破壊状況を観察する。

2.3.2 試験結果および考察

振動台による締固め試験および突固めによる締固め試験の結果の一覧表を表-2・9および表-2・10に示す。また、シリーズIでの締固め試験結果を図-2・8に、シリーズIIでの締固め試験結果を図-2・9に示す。これらの試験結果より細骨材率は、シリーズIでは30%、シリーズIIでは33%が適当と考えられる。これらの値は、骨材のみの締固め試験で密度が最大となる細骨材率と一致しており、ローラ転圧コンクリートの最適細骨材率は、骨材のみの締固め試験で最大密度を与える細骨材率と深く関連していると考えられる。

2.4 種々の単位水量におけるコンクリートの締固め試験

2.4.1 試験結果および考察

フィルダムのコア材における最適含水比と同様の概念が、ローラ転圧コンクリートにおいて存在するかどうかを確かめるために、単位水量を変えた室内締固め試験を実施した。なお、コア材における最適含水比とは、土質力学の用語どおり、ある一定の締固めエネルギーにおいて、最大の乾燥密度を与える含水比のこと

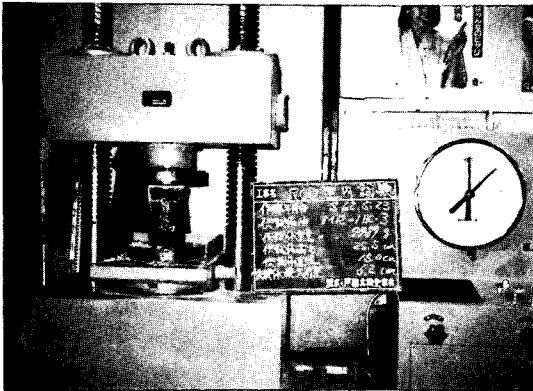


写真-2・6 圧縮強度試験機

表-2・9 種々の細骨材率におけるコンクリートの締固め試験結果の一覧表 (シリーズI)

配合No.	細骨材率 (%)	締固め密度 (t/m ³)							圧縮強度 (kgf/cm ²)	
		振動台式締固め					突固め		突固め	
		5秒	20秒	40秒	60秒	120秒	IEC	3EC	1EC	3EC
M I -1	24	2.170	2.313	2.367	2.414	2.416	2.261	2.336	70.1	96.9
M I -2	27	2.198	2.323	2.404	2.425	2.420	2.270	2.354	72.5	85.1
M I -3	30	2.213	2.337	2.356	2.384	2.430	2.274	2.372	76.8	102.1
M I -4	33	2.201	2.316	2.362	2.388	2.395	2.227	2.319	54.8	76.5
M I -5	36	2.130	2.225	2.247	2.337	2.349	2.173	2.267	37.8	61.8

表-2・10 種々の細骨材率におけるコンクリートの締固め試験結果の一覧表 (シリーズII)

配合No.	細骨材率 (%)	締固め密度 (t/m ³)					圧縮強度 (kgf/cm ²)			
		振動台式締固め					突固め		突固め	
		5秒	20秒	40秒	60秒	120秒	IEC	3EC	1EC	3EC
MII-1	27	2.338	2.401	2.405	2.400	2.436	2.386	2.458	167	187
MII-2	30	2.372	2.419	2.420	2.452	2.465	2.388	2.461	163	186
MII-3	33	2.349	2.418	2.463	2.457	2.465	2.388	2.472	162	192
MII-4	36	2.324	2.363	2.398	2.399	2.428	2.348	2.435	111	173
MII-5	39	2.253	2.325	2.373	2.358	2.417	2.321	2.390	118	168

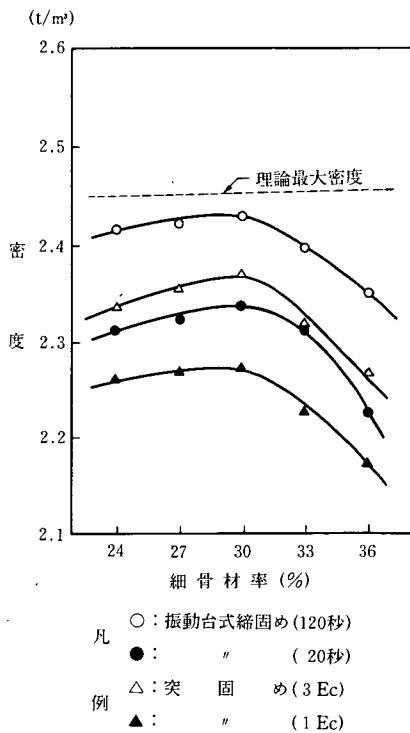


図-2・8 種々の細骨材率におけるコンクリートの締固め試験結果 (シリーズI)

である。図-2・10、図-2・11はそれぞれ美利河ダムおよび真野ダムにおける試験結果である。両試験において、細骨材率は一定であり、単位水量を変え、水セメント比を一定とするため結果的にペースト量も変えている。締固め方法としては、振動台および突固めの2方法を用いている。図-2・10において、シリーズIでは単位水量の増加とともに密度は単調増加し、密度曲線がゼロ空隙理論密度と交差している。図-2・11において、シリーズIIでは単位水量の増加につれて密度は増加するが、

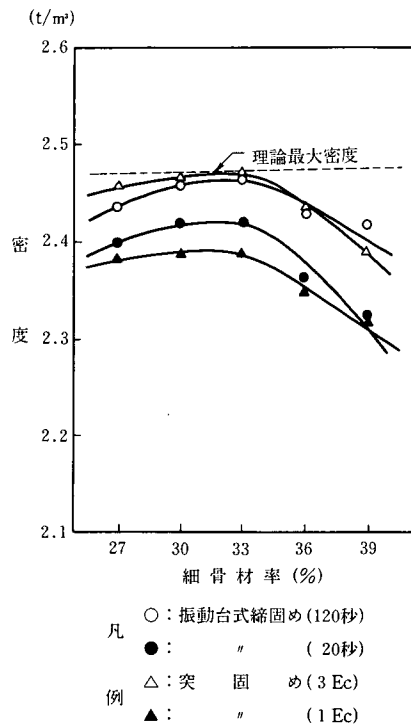


図-2・9 種々の細骨材率におけるコンクリートの締固め試験結果 (シリーズII)

密度がピークとなる単位水量が存在し、ピーク後はゼロ空隙理論密度にそって減少している。コンクリート内の空気量はAE剤を混入していることもあり、ゼロ空隙ということはありません。1.5%程度の空気量は必然的に含まれていると推定される。このことから締固め密度が1.5%空隙密度以上となるのは、締固め試験においてモールド外へ水あるいはセメントペーストが飛散しているためと考えられる。図-2・10および図-2・11において単位水量が多くなると実際に締固め試験中

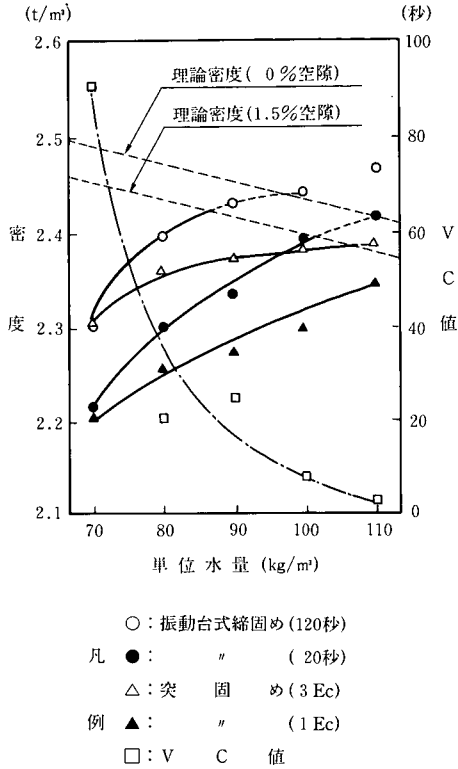


図-2-10 種々の単位水量におけるコンクリートの締固め試験結果(シリーズI)

に水あるいはセメントペーストがモールド外へ飛散しており、両図において横軸の単位水量の値は正確でないと考えられ、データポイントを破線で結んでいる。以上から図中の実線のデータポイントのみから判断すると、シリーズIの材料では密度を最大とする単位水量すなわち土質材料の最適含水比に相当する指標は存在しておらず、シリーズIIの材料においては存在しているように見えるが、明確ではない。シリーズIとシリーズIIのこのような差は、シリーズIでは図-2-2に示すように細骨材中の微粒分が5%であるのに対してシリーズIIでは8%であることによると考えられる。

コア材とローラ転圧コンクリートを粒度の点から比較してみると、コア材は0.074mm以下の粘土・シルトを少なくとも10%以上含むのに対してローラ転圧コンクリートはこれに当たる粒度のものとしては、セメントと極くわずかの微粒分の一部でありこれの合計は5%程度であり、コア材に比べずっと少ない。一般に透水係数など土における水理特性は、10~15%粒径に支配されているから、コア材とローラ転圧コンクリートの含水量に対する締固め特性の差は、0.074mm以下の

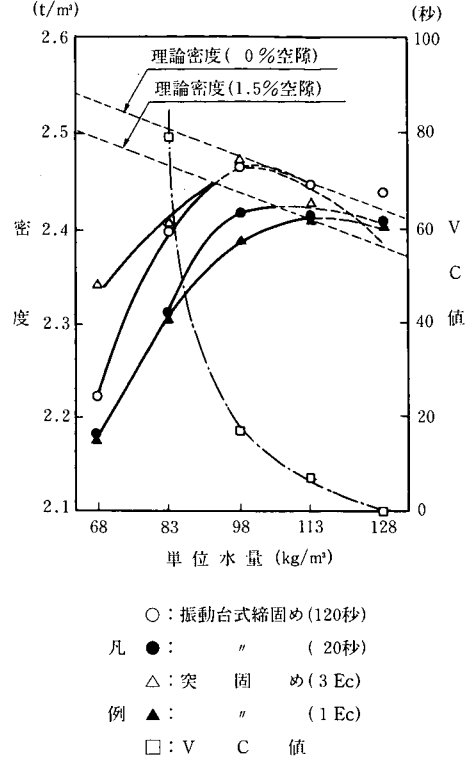


図-2-11 種々の単位水量におけるコンクリートの締固め試験結果(シリーズII)

含有量の差によるものと判断される。また、以上に関連して、土質力学における含水比という指標で、両者を比較してみると、コア材では10~50%であるのに対して、ローラ転圧コンクリートでは、4%前後と大きく異なる。これも粘土・シルトの含有量の差によるものと推定される。

2.5 種々のペースト量におけるコンクリートの締固め試験

2.5.1 試験方法

表-2-11および表-2-12に示すように、細骨材率および水セメント比を一定としてペースト量を変えた配合のコンクリートの締固め試験を実施した。水セメント比、細骨材率は、実際に使用されている示方配合の値を用いている。表中のペースト空隙比 (R_{pv}) は、配合中の骨材のみを最大限締固めた時の骨材間の空隙量に対するペースト量の体積比であり、次式によって求めた。

表-2・11 種々のペースト量におけるコンクリートの締固め試験配合表 (シリーズ I)

配合No.	粗骨材の 最大寸法 G _{MAX} (mm)	空気量 (%)	水 セ メ ン ト 比 W/C+F (%)	フライア ッシュ混 入率 F/C+F (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)							ペースト空隙比 Rpv	
						水 W	セメント C	フライ アッシュ F	細骨材 S	粗 骨 材 G				
										5mm ~20mm	20mm ~40mm	40mm ~80mm	フルサイズ	40mm以下
M I - 6	80	1.5	75.0	30.0	30	70	65	28	691	575	410	657	0.789	0.931
M I - 7	80	1.5	75.0	30.0	30	80	75	32	680	565	404	646	0.919	1.083
M I - 8	80	1.5	75.0	30.0	30	90	84	36	668	556	397	635	1.051	1.238
M I - 9	80	1.5	75.0	30.0	30	100	93	40	657	546	390	624	1.187	1.399
M I - 10	80	1.5	75.0	30.0	30	110	103	44	646	537	383	613	1.331	1.568

各配合とも (C+F)×0.25%のAE減水剤を使用

表-2・12 種々のペースト量におけるコンクリートの締固め試験配合表 (シリーズ II)

配合No	粗骨材の 最大寸法 G _{MAX} (mm)	空気量 (%)	水 セ メ ン ト 比 W/C+F (%)	フライア ッシュ混 入率 F/C+F (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)							ペースト空隙比 Rpv	
						水 W	セメント C	フライ アッシュ F	細骨材 S	粗 骨 材 G				
										5mm ~20mm	20mm ~40mm	40mm ~80mm	フルサイズ	40mm以下
MII-6	80	1.5	81.7	20.0	33	68	67	17	780	546	418	643	0.665	0.778
MII-7	80	1.5	81.7	20.0	33	83	81	20	761	533	408	627	0.828	0.982
MII-8	80	1.5	81.7	20.0	33	98	96	24	742	520	398	612	1.004	1.191
MII-9	80	1.5	81.7	20.0	33	113	111	28	724	507	388	597	1.188	1.409
MII-10	80	1.5	81.7	20.0	33	128	125	31	705	494	378	581	1.378	1.635

各配合とも (C+F)×0.25%のAE減水剤を使用

$$R_{pv} = \frac{((C+F)/\rho_{C+F} + W/\rho_w)}{((G+S)/\gamma_{G+S} - G/\rho_G - S/\rho_s)} \dots (1)$$

ここに、

C、F、G、S：セメント、フライアッシュ、粗骨材、砂の単位量 (kg/m³) ρ_{C+F} 、 ρ_w 、 ρ_F 、 ρ_s ：セメント+フライアッシュ、水、粗骨材、砂の粒子の密度 (kg/m³) γ_{G+S} ：配合中の骨材のみを最大限締固めた時の密度 (kg/m³)。

式(1)の γ_{G+S} は、骨材のみの締固め試験によって求められ、シリーズIでは2305kg/m³であり、シリーズIIでは2308kg/m³であった。なお、40mmでウェットスクリーニングを行うと骨材間の空隙量およびペースト量が増加し、ペースト空隙比も増加する。そこで、表-2・11と表-2・12には、ウェットスクリーニング後の各配合のペースト空隙比も併記してある。

なお、締固め方法および測定方法は、前項2.3.1と全

く同様である。

2.5.2 試験結果および考察

試験結果の一覧表を表-2・13および表2-14に示す。

図-2・12および図-2・13は、シリーズI、IIでの試験結果をペースト空隙比と締固め密度の関係として示したものである。ペースト空隙比が1.2を越え、1.5%空隙理論密度以上の配合になるとペースト量が多いため締固めるとペーストが飛び散ってしまい、それ以上密度は上がらなかった。そこで、その前のペースト空隙比をもって最適ペースト量とすれば、最適ペースト量を得る配合はシリーズIにおいて120秒の振動台式締固めではMI-8、3Ecの突固めではMI-9の配合であることがわかる。また、コンクリートの締固め試験において最適なペースト量を見出そうとするならば少なくとも突固め試験で3Ec以上のエネルギーが必要であろう。

両シリーズとも、ペースト空隙比が1以下の配合では、120秒の振動締固め後および3Ecの突固め後の密度とも、1.5%空隙密度よりずっと小さい。また、ペー

表-2・13 種々のペースト量におけるコンクリートの締固め試験結果の一覧表（シリーズⅠ）

配合No.	ペースト 空隙比 R _{pv}	締固め密度(t/m ³)							圧縮強度(kgf/cm ²)	
		振動台式締固め					突固め		突固め	
		5秒	20秒	40秒	60秒	120秒	IEC	3EC	IEC	3EC
MⅠ-6	0.931	2.167	2.217	2.258	2.275	2.303	2.202	2.306	89.3	70.0
MⅠ-7	1.083	2.237	2.302	2.341	2.368	2.397	2.258	2.361	78.7	112.3
MⅠ-8	1.238	2.213	2.337	2.356	2.384	2.430	2.274	2.372	76.8	102.1
MⅠ-9	1.399	2.374	2.393	2.434	2.454	2.442	2.299	2.384	125.0	120.7
MⅠ-10	1.568	2.369	2.419	2.454	2.454	2.469	2.348	2.390	119.0	118.9

表-2・14 種々のペースト量におけるコンクリートの締固め試験結果の一覧表（シリーズⅡ）

配合No.	ペースト 空隙比 R _{pv}	締固め密度(t/m ³)							圧縮強度(kgf/cm ²)	
		振動台式締固め					突固め		突固め	
		5秒	20秒	40秒	60秒	120秒	IEC	3EC	IEC	3EC
MⅡ-6	0.778	2.111	2.183	2.163	2.240	2.224	2.179	2.343	51.1	87.7
MⅡ-7	0.982	2.220	2.312	2.353	2.372	2.398	2.305	2.404	77.5	142
MⅡ-8	1.191	2.349	2.418	2.463	2.457	2.465	2.388	2.472	162	192
MⅡ-9	1.409	2.413	2.414	2.455	2.435	2.448	2.410	2.430	194	199
MⅡ-10	1.635	2.383	2.407	2.422	2.448	2.438	2.407	2.410	205	212

スト空隙比が1.4を越えている配合ではVC値(小型容器)は10秒以下となっている。なおここで念のために、VC値について説明しておくと、ローラ転圧コンクリートは非常に硬練りであるので、そのコンシステンシーを測るのにスランプ試験は使えない。そこで、ローラ転圧コンクリートのコンシステンシーを振動台式のコンシステンシー試験装置(写真-2・3)により定めることとしている。この試験装置は、VB試験を参考としているが、①振動台の振動数3000cpm程度とする。②コーンは使用しない。③載荷(20kg)により締固めを促進するなどの、諸点を改良した装置を用い、振動により容器に詰めたコンクリートの表面全体にペーストが浮上し、プラスチック円盤に付着するまでの時間(秒)を測定して、この時間をコンシステンシーの尺度とすることとしている。なおこの値を、他の試験方法の測定値と区別するため、VC値(Vibrating Compaction Value)と呼んでいる。RCD工法において適切なVC値(小型容器)が20±10秒程度⁹⁾であるとする、ペースト空隙比が1.4以上であるとVC値が小さすぎる。したがって、ウェットスクリーニング後の適切な

ペースト空隙比は、締固め密度が大きくVC値が適切な値であることの2点から、1.2程度と判断できる。ところで、両シリーズともウェットスクリーニング後のペースト空隙比が1.2程度となるコンクリートのフルサイズでのペースト空隙率は、1.0程度であり、ペースト量は完全なコンクリートマトリックスを形成するための最小量程度となる。両シリーズともウェットスクリーニング後のペースト空隙比が1.2程度のコンクリートの、120秒の振動締固めおよび3Ecの突固め後の密度は1.5%空隙密度にほぼ達していることも合わせて考えると、ローラ転圧コンクリート工法においてフルサイズコンクリートの適切なペースト空隙比は1よりもやや大きい値(1.05程度)と考えられる。

表-2・9、2・10、2・13、2・14に示されるように、シリーズⅠ、Ⅱともエネルギーを1Ecから3Ecに増加させると、密度、圧縮強度とも増大する傾向にある。シリーズⅠでは、s/a=30%、シリーズⅡではs/a=33%において、最大圧縮強度が得られており、骨材のみの締固め試験において最大密度を与える細骨材率との関係が深い。シリーズⅡにおいて、R_{pv}が1.191以下の場合

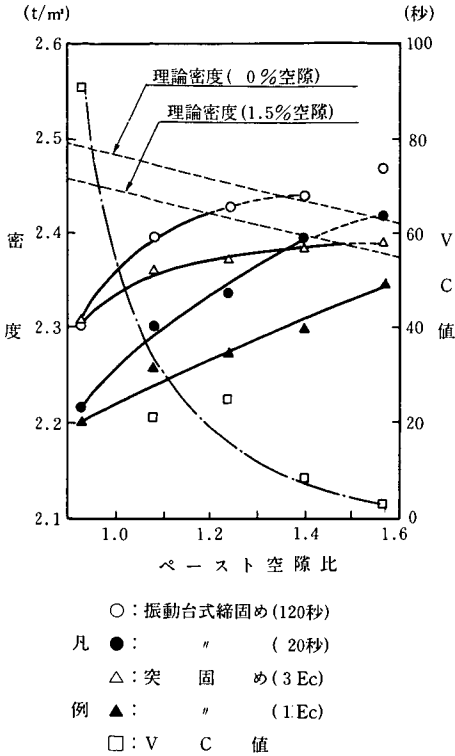


図-2・12 種々のペースト量におけるコンクリートの締固め試験結果(シリーズI)

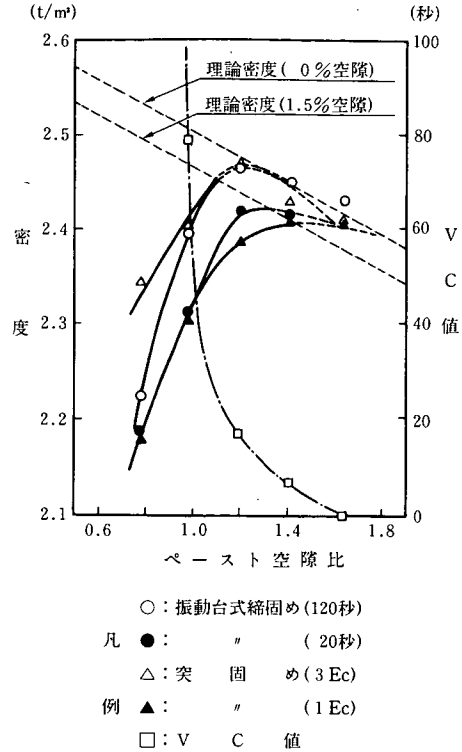


図-2・13 種々のペースト量におけるコンクリートの締固め試験結果(シリーズII)

には、エネルギーを増加させると密度・強度とも増大しているが、 $R_{pv}=1.409$ および 1.635 の場合には、エネルギーの大小による密度の差は小さい。すなわち、 R_{pv} が $1.2\sim 1.3$ 位よりも小さいときには、密度は締固めエネルギーに大きく依存し、密度が大きいほど強度も大きなコンクリートが得られる。

2.6 骨材間の空隙に着目した配合設計方法

以上の試験結果より、骨材間の空隙に着目した次のような手順の配合設計方法が可能と考えられる。

- ① 強度、耐久性、水密性などから必要とされる水セメント比、粗骨材最大寸法などを決める。
- ② 粗骨材中の大砂利、中砂利、小砂利の混合割合を締固め試験などによって定める。
- ③ 種々の細骨材率による骨材のみの締固め試験を行い、最適細骨材率を推定するとともに骨材間の空隙量を把握する。
- ④ ③で求められた細骨材率と、同じく③で求められた空隙量からペースト空隙比が 1.05 程度となるペースト量とから示方配合を決定する。

⑤ ④で得られた配合でのコンクリートのコンシステンシー試験および圧縮強度試験を行い、妥当性を確認する。

⑥ 現場試験施工を行い、必要な場合は示方配合を修正する。

以上の方法で配合設計を行った場合、水セメント比を一定に保った状態で締固め特性およびコンシステンシーを検討することが可能となる。

ウェットスクリーニング後のコンクリートのVC値(小型VC試験機)は、図-2・12および図-2・13に示すようにペースト空隙比の増加につれて減少している。以上のことから、ペースト空隙比 R_{pv} を、フルサイズにおいて1よりやや大きい値、ウェットスクリーニング後において 1.2 程度とすると、最適配合ないしは、それに近い配合のコンクリートが得られよう。ただしウェットスクリーニング後の試料よりもフルサイズ試料の方がより厳密な締固め試験結果を与えられと考えられる。

2.7 結論

ローラ転圧コンクリートの合理的な配合設計方法に関

して骨材間の空隙量およびペースト量に着目した各種試験を実施し、次のような結論を得た。

- (1) 骨材のみを種々の細骨材率で混合して締固めた場合、骨材のみの締固め密度が最大となる細骨材率が存在し、フルサイズ試料および40mm以上の骨材を取り除いた剪頭粒度試料とで締固め密度が最大となる細骨材率は一致した。また、骨材のみの締固め密度が最大となる細骨材率はコンクリートの最大密度を与える細骨材率と一致しており、種々の細骨材率による骨材のみの締固め試験によりコンクリートの最適細骨材率が推定できる。
- (2) コンクリート中のペースト量は、ペースト空隙比 R_{pv} (配合中の骨材のみを最大限締固めた場合の骨材間の空隙量に対する配合中のペーストの体積比) が1よりもやや大きな値 (1.05程度) となるようなペースト量が最適ペースト量であり、骨材のみの締固め試験および予め定めた水セメント比とからコンクリート中の最適単位水量および最適単位セメント量が推定できる。
- (3) コンクリートの配合設計は、2.6に示した手順で行うことにより水セメント比を一定に保った状態でかつ密度と強度との相関の強い合理的な配合設計ができる。
- (4) コンクリートのVC値はペースト空隙比 R_{pv} が1以下になると急激に増加するが、1以上では変動が少ない。また、最適配合およびそれに近い配合のコンクリートの、ペースト空隙比は1程度 (1.00~1.05) である。ところが、40mmでウェットスクリーニングを行なうとペースト空隙比は1.2程度となる。よって、VC試験による品質管理を行う場合、ウェットスクリーニング試料よりもフルサイズ試料の方がより厳密な品質管理が可能と考えられる。なお、ローラ転圧コンクリートの最適水セメント比、フライアッシュ混入率および空気量については本論文では与件としている。

3. 現場転圧試験

3.1 試験目的

RCD工法によるローラ転圧コンクリートの施工では、内部コンクリートに超硬練り貧配合コンクリートを使用しており、1リフトの厚さは50cm~100cmとし、1リフト分のコンクリートを約15cm~25cmの薄層で数回に分けてブルドーザによって撤き出し、振動ローラ

で1リフト分をまとめて締固めている¹⁾。これに対し米国 の RCC (Roller Compacted Concrete) によるダムの施工などでは、一般に1リフト分のコンクリートは1度に撤き出して締固めており、振動ローラによる締固め効果がコンクリートに十分に伝わるように1リフトの厚さは30cm程度としている¹²⁾。振動ローラによる締固めは一連の打設工程の中で最も重要な工程と考えられており、振動ローラの機種、リフト厚きなどを変えた種々の条件による試験が実施され、多数の研究結果が報告されている。^{13), 14)}例えば、嶋津ら¹³⁾は、種々の締固めエネルギーによる転圧試験を行い、ローラ転圧コンクリートの密度・強度を増加し、その品質のバラツキを一定の水準に保つには、一定以上の締固めエネルギー (試験施工では実機として、7t級程度以上がこれに相当) が必要としている。また、各現場の試験施工、本体施工に広く用いられている振動ローラ (公称重量7t、起振力32t) を用い、深さ方向の振動ローラの締固め効果について、リフト厚を1mとして締固めても下層部では良質なコンクリートが得られると報告¹⁵⁾されており、新中野ダム⁴⁾や玉川ダム¹⁵⁾では実際にリフト厚1mによる施工が行われている。ところで、RCD工法におけるリフト高は、先に述べたように50~100cmと厚いわけであるが、リフト高の各部にわたって良質なコンクリートが得られており、RCD工法では、振動ローラによる締固め以外の要素、すなわち撤き出し時のブルドーザによる締固め等も良質なコンクリートを得るための締固めの重要な要素となっていると考えられる。しかし、ローラ転圧コンクリート工法において、振動ローラを含む全体の締固めの中で、ブルドーザおよび振動ローラのそれぞれの締固めに対する寄与の割合は、定量的に明確にされていない。また、締固め機構を知ることは、適切な施工を行う上で基本的かつ重要なことである。土の締固めでは、最適含水比という概念が存在するが、ローラ転圧コンクリートの締固めにおいても、配合と締固め易さの関係が注目される。そこで筆者らは、

- ① 配合特性、特に配合中のペースト量が締固め度を与える影響
 - ② ブルドーザによる締固め効果
 - ③ 締固め度と強度との関係
- を明らかにすることを目的として、ローラ転圧コンクリート工法による現場転圧試験を実施した。第3章では、現場転圧試験および硬化後のコンクリートの試験結果に基づいて、ローラ転圧コンクリート工法におけるコンクリートの締固め機構に関する考察をおこなう

とともに、施工管理に關しての提案も合わせて行った。

3.2 試験方法

今回の試験での測定には、現場転圧過程における内部変位および密度の測定とコンクリート硬化後におけるボーリングコアの密度と強度の測定が含まれる。コンクリートの配合については、以下に述べる主としてペースト量を変化させた4種類の配合を設定した。転圧時の内部の締固め度を測定する手段としては、非接触型の内部変位計を利用した。また、すべての試験地点で最終段階まで転圧を完成させることはせず、各転圧施工段階の途中のままで、コンクリートを硬化させ、後でこれからボーリングコアを採取し、施工途中段階での密度およびこれが硬化したときの強度を求めた。以下に配合および試験方法の詳細を記す。

3.2.1 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-3・1に記す。練り上がり後のコンクリートのVC値はヤードI～IVにおいて、それぞれ42秒、15秒、6秒、20秒であった。また、外気温およびコンクリート温度はヤードI～IIIではそれぞれ18℃、16℃、ヤードIVではそれぞれ7℃、12℃であった。混和剤にはAE減水剤を使用した。表中のペースト空隙比(R_{pv})とは、配合中の骨材のみを最大限締固めた時の骨材間の空隙量に対するペースト量の容積比であり、2.5.1で示した式-(I)によって求めた。なお、ここでは、前項2.2.1で示した電動ランマー(重量30kgf、850打撃/分)により120秒間締固めた時の密度をもって『最大限締固め時』としている。表-3・1では4種の配合を設定しているが、そのうち配合I、IIおよびIIIは、北海道美利河ダムにおいて実施したもので、粗骨材の最大寸法、細骨材率、水セメント比($W/C+F$)が一定で、ペースト量のみが異なる配合である。また、配合IVは福島県真野ダムで実施したものであり、骨材そのもの、水セメント比、細骨材率が、配合I、

II、IIIと異なっている。配合、I、IIおよびIIIの骨材を最大限締固めた時の骨材密度は2.31t/m³であり、ペースト空隙比 R_{pv} は配合Iではかなり多く、配合IIではほぼ同程度、配合IIIではやや少なくなっている。配合IVにおいて骨材を最大限締固め時の骨材の密度は2.31t/m³であり、ペースト空隙比 R_{pv} は配合IIに近い。

3.2.2 試験ヤード

試験ヤードは各配合毎に1ヤード、すなわち全体で4ヤード用意した。配合I、II、III、IVを施工したヤードをそれぞれヤードI、II、III、IVと名付けた。4つの試験ヤードはいずれも図-3・1に示した形状である。各試験ヤードは10個のブロックに分割されており、ブルドーザによる締固め効果および振動ローラの転圧回数が締固めに及ぼす影響を調べるために各ブロックごとに打設条件を変えて施工した。なお、ブルドーザによる締固めとは撤き出しを主としコンクリートを均一に敷均した時点で終了とする。ヤードI、IIおよびIIIの各ブロックにおける打設方法を次に記す。

第1ブロック モルタル敷均し+第1層をブルドーザ撤き出し→硬化

第2ブロック 第1ブロックの工程+第2層をブルドーザ撤き出し→硬化

第3ブロック 第2ブロックの工程+第3層をブルドーザ撤き出し→硬化

第4ブロック 第3ブロックの工程+無振動1回、
第5ブロック 振動1回転圧→硬化

第6ブロック 第4、5ブロックの工程+振動転圧2回(合計3回)→硬化

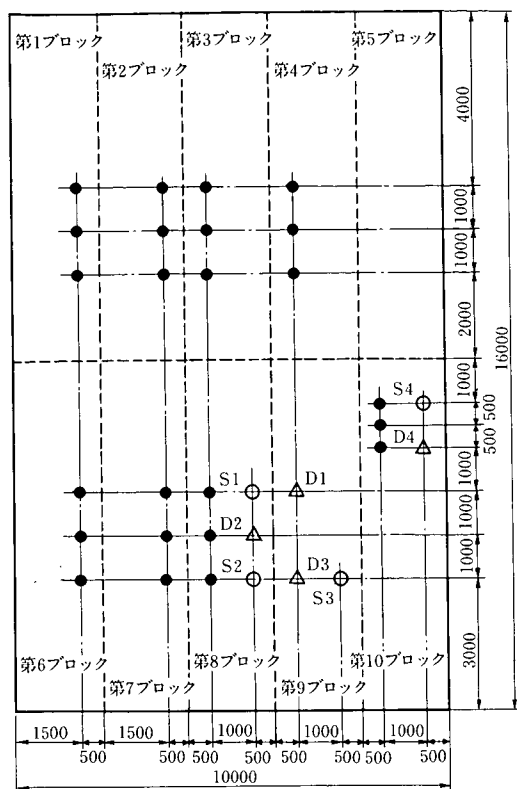
第7ブロック 第6ブロックの工程+振動転圧4回(合計7回)→硬化

第8ブロック 第7ブロックの工程+振動転圧4回
第9ブロック (合計11回)→硬化

第10ブロック コンクリートを3層に分けて、パッ

表-3・1 コンクリート配合表

配合 No.	粗骨材の最大寸法(mm)	空気量(%)	$\frac{W}{C+F}$	細骨材率(%)	フライアッシュ混入率(%)	ペースト空隙比	単 位 量 (kg/m ³)				
							セメント	フライアッシュ	水	細骨材	粗骨材
I	80	1.5	0.75	30.0	30.0	1.19	93	40	100	657	1560
II	80	1.5	0.75	30.0	30.0	1.05	84	36	90	668	1588
III	80	1.5	0.75	30.0	30.0	0.92	75	32	80	680	1615
IV	80	1.5	0.82	33.0	20.0	1.00	96	24	98	742	1530



- ：内部変位測定位置
△：密度測定位置 (R1密度計)
●：ボーリングコア採取位置

単位：mm

図-3・1 試験ヤード平面図

クハウで撒き出し、無振動1回+振動転圧11回転圧→硬化

ヤードIVの打設方法は上記に準じているが、第6～10ブロックにおいて振動ローラの転圧回数を（無振動2回+振動6回）減らしている。各ヤードともコンクリートの撒き出しは、下層より順に第1層目、第2層目として最上層の第3層目まで行った。撒き出し層厚は、ヤードI、II、IIIの各層およびヤードIVの第1層目は約25cmとし、ヤードIVの第2層目および第3層目は約18cmとした。また、各ヤードとも第1ブロックから第9ブロックまでのコンクリートはブルドーザ（湿地用、重量14t）によって撒き出し、第10ブロックのコンクリートはブルドーザの締固め効果を排除するために試験ヤード外からバックハウ（写真-3・7）によって撒き出した。第1ブロックから第7ブロックまでのコンクリートは、第8～10ブロックに比べ、振動ロー

ラによる転圧回数が少ない。振動ローラ（写真-3・11）は、公称重量7t、起振力32tのものを用了。表-3・2にその仕様を示す。

表-3・2 振動ローラの仕様 (BW-200)

項 目		仕 様
メーカ		Bomag
種 別		自走式4輪振動
重量 (kg)	作業時重量	7,000
	前輪重量 W_{1F}	3,500
	後輪重量 W_{1R}	3,500
振 動 数 n (cpm)		2,600
振 幅 $2a$ (cm)		0.2
起 振 力 F (kg)		$16,000 \times 2$
寸 法 (cm)	全 長	198.0
	全 幅	252.0
	ローラ直径 D	80.0
	ローラ幅 B	190.0
最 小 回 転 半 径 (cm)		0
走 行 速 度 V (km/h)		最適速度 2
トータル線圧 ¹⁾ (kg/cm)		102.6
締め固めエネルギー	谷本式 ²⁾	6.05
	谷本修正式 ³⁾	6.05

1) トータル線圧 = 静線圧 + 動線圧 = (振動体重量 W_1 + 起振力 F) / ローラ幅 B

2) 谷本式 $E_1 = f$ (重量, 起振力, 振幅)

$$= a \left(W_1 + \frac{F}{2} \right) \times \frac{1}{B}$$

振動数の関数

3) 谷本修正式 $E_2 = E_1 \cdot \frac{V_0}{V} \cdot \frac{n}{n_0}$ ここに $V_0 = 1 \text{ km/hr}$, $n_0 = 2600 \text{ cpm}$

3.2.3 測定

各ヤードともコンクリート打設中には表面沈下量、内部変位、および密度を測定し、コンクリート硬化後には密度と圧縮強度を測定した。

コンクリート打設時の表面沈下量は、レベル測量によったが、内部変位は非接触型変位計を用いて測定した。今回使用した非接触型変位計は米国 BISON 社製の4101型ソイルストレイゲージ用アンプ（写真-3・1）および同じく4インチセンサー（写真-3・2）である。

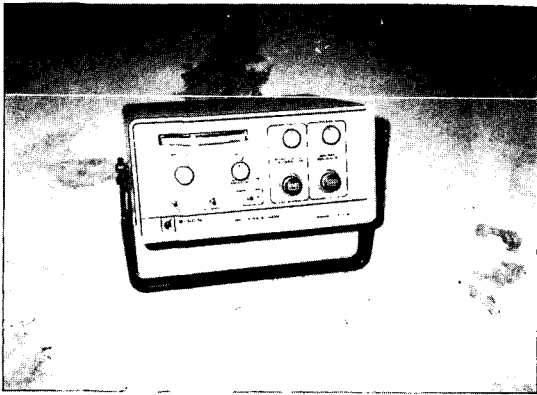


写真-3・1 非接触型変位計用アンプ

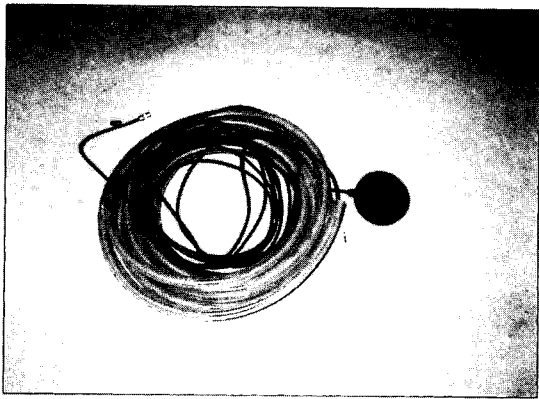


写真-3・2 非接触型変位計

表-3・3にソイルストレーンゲージの仕様を示す。ソイルストレーンゲージにはコイルが内蔵されており、2つ一組で一方から電磁界を発生させ、相互インダクタンスを利用してコンクリート中に埋設した計器間の距離が測定される。(図-3・2、3・3参照) この、非接触型変位計(センサー)は、土中やコンクリート中等、直

表-3・3 ソイルストレーンゲージ仕様

項 目	仕 様
検 出 器 寸 法	41/8" (10.5cm) 径×13/32" (1.03 cm) 厚さ
測 定 範 囲	100～400mm範囲で任意
励磁特性	
周 波 数	20kHz
増 幅 度	15V (P-P)
全 調 和 歪 み	0.3%
入力インピーダンス	2 kΩ以上
応 答 時 間	0.25msec
出 力 電 圧	± 5 V
最 高 感 度	0.1%/V
分 解 能	0.01%
温 度 特 性	10mV/°C
使用温度範囲	0～70°C
ケーブル長	15m但し300m迄可能
電 源	内蔵バッテリー±12V, 外部充電器110/220V～50/60Hz

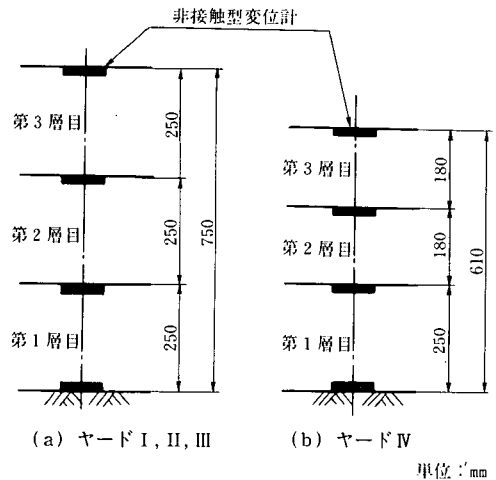


図-3・2 非接触型変位計埋設位置

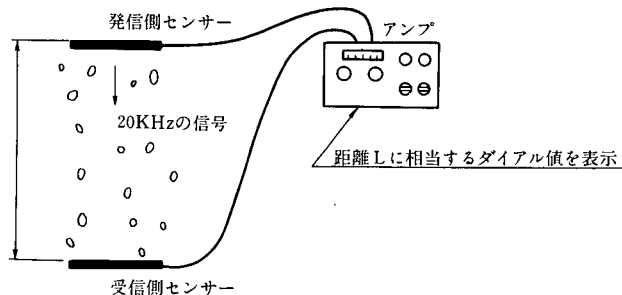


図-3・3 ソイルストレーンゲージの測定機構

接計測できない箇所の変位を測定でき次の特徴を有している。

- ① センサー間にある物質が金属である場合を除き、良好な再現性がある。
- ② センサーが非接触型なので、層別沈下計のような周辺の摩擦の影響をほとんど受けない。
- ③ センサーの中心が同一線上にあり、傾きがなければ0.1mmの精度まで測定できるが、ずれたり傾いたりしたときには、補正が必要である。
- ④ 測定値を離間距離に換算する際、両者に直線性がなく、センサーにより換算値がやや異なるため、センサー毎に較正表を作成するのに手間がかかる。

そこで、非接触型変位計を現場転圧試験で使用するにあたり幾つかの検定試験を行っているのでその結果を示す。この結果は当研究室において昭和61年度に報告されているが確認のため再度記述する¹⁶⁾。

① コンクリート中での再現性

コンクリート中にセンサーを埋め込んだ場合、コンクリート中のセンサーの離間距離と空气中で求めた離間距離にどのような差が生ずるか調べた。表-3・4にコンクリート中に埋設した時の誤差の関係を示す。表-3・4よりノギスで測定した離間距離①とアンプに表示されるダイアル値から求めた換算離間距離②の差は0.3mm～0.5mm、コンクリート中に埋設した時の換算離間距離③と空气中での換算離間距離②の差は-0.1mm～0.1mmとなり、コンクリート中にセンサーを埋設して問題ないことがわかった。

② 金属の影響

ソイルストレインゲージは、電磁作用により測定する機構のため、金属の接近により測定値は影響を受ける。そこで、測定値に影響を与えるセンサーと金属間の距離についての検定を実施した。図-3・4に金属の影響による離間距離の誤差の関係を示す。図-3・4から、三軸釜との距離が50cm以上であれば金属の影響を受けないことがわかる。従って、現場でセンサーを埋設する際は、センサーの周囲50cm以内に金属を置かないこととした。

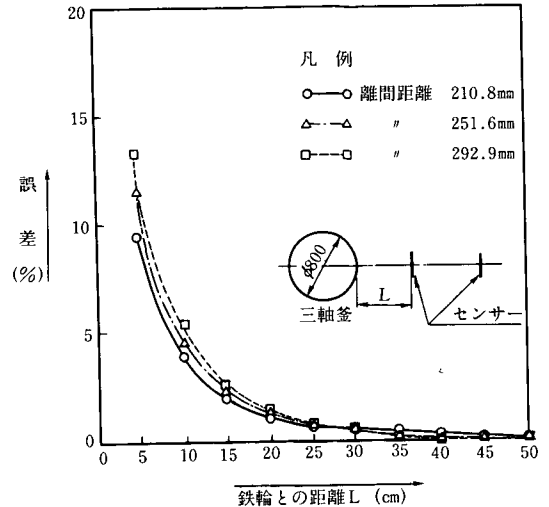


図-3・4 金属の影響による離間距離の誤差

③ センサーの平行移動量と離間距離の誤差

センサーは互いに平行で中心が同一軸線上にあることが正確な測定の条件となっている。しかし、現場で測定する場合、必ずしもこの条件を守れるとは限らない。従って、事前にセンサーの平行移動が測定値に与える影響を知る必要がある。図-3・5に平行移動量と離間距離の誤差の関係を示す。図-3・5によれば、センサーの離間距離が小さいほど平行移動量の影響が大きいが、平行移動量が10mm以内であれば離間距離に与える影響も0mmに近いので、この範囲のセンサーのズレであれば補正を行わず10mm以上のズレに対しては平行移動による誤差の補正を行うこととした。

④ センサーの傾きによる離間距離の誤差

現場において測定する場合センサーの平行移動の他にセンサーの傾きの発生も考えられる。そこで、センサーの傾きの影響を検定した。図-3・6にセンサーの傾きと離間距離のずれの関係を示す。図-3・6によれば、各距離とも傾き10°までは誤差0.1%前後であることがわかる。したがって傾き10°までは補正を

表-3・4 コンクリート中に埋設した時の誤差

ノギスによる離間距離 ① (mm)	空气中の測定値② (mm)	コンクリート中の測定値 ③ (mm)	誤 差 (mm)	
			① - ②	② - ③
211.0	210.7	211.2	0.3	0.1
251.6	251.2	251.1	0.4	0.1
312.7	312.2	312.3	0.5	-0.1

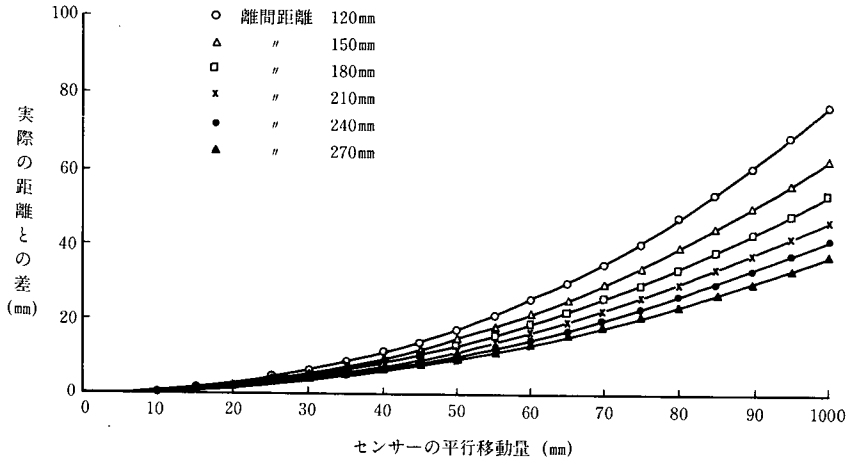


図-3・5 センサーの平行移動量と離間距離の誤差

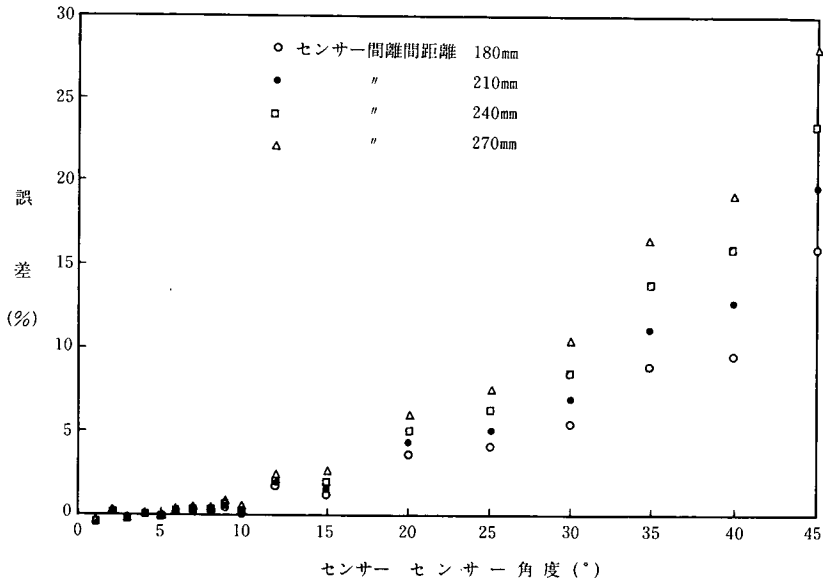


図-3・6 センサーの傾きと離間距離のずれ

行わず、 10° を越えた傾きをした場合補正を行うこととした。

非接触型変位計による内部変位測定位置は各ヤードとも図-3・1に示したように、第8ブロック2ヶ所、第9ブロックおよび第10ブロックが各1ヶ所の計4ヶ所である。各測定位置には図-3・2に示すように4個の非接触型変位計を埋設し(写真-3・3)、各撤き出し層の上下に設置された非接触型変位計によって各層の層厚を測定し層厚の変化から層別圧縮量を求めた。非接触型変位計による内部変位測定は、ブルドーザおよびバックホウによる撤き出し後と、振動ローラによる転圧後



写真-3・3 底盤の非接触型変位計の設置



写真-3-4 人力によるモルタル敷均し

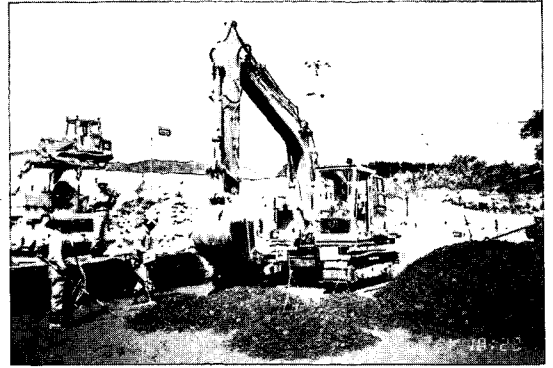


写真-3-7 バックホウによる撒き出し

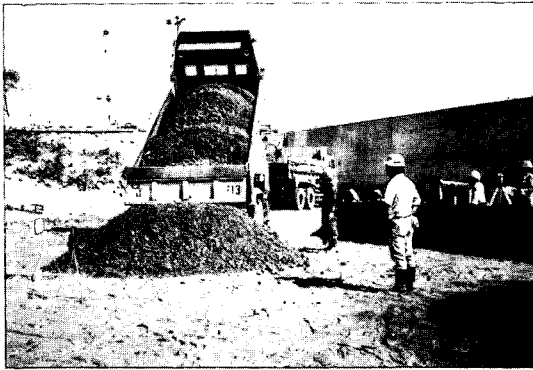


写真-3-5 ダンプによる搬入



写真-3-8 RIによる密度測定



写真-3-6 ブルドーザによる撒き出し

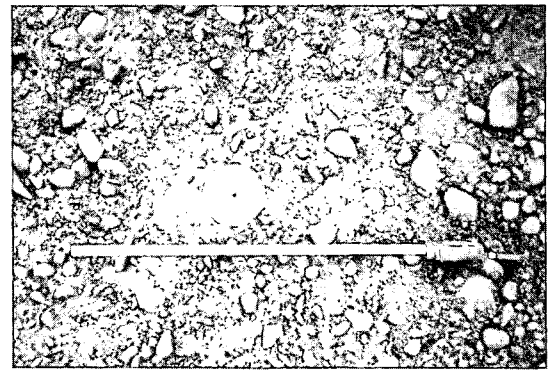


写真-3-9 非接触型変位計の設置

(ヤードⅠ、ⅡおよびⅢは無振動1回、振動1, 3, 5, 7, 11回、ヤードⅣでは無振動2回、振動2, 4, 6回)に実施した。レベルによる測量は、非接触型変位計による沈下量測定結果を検証するためのものであり、各ヤードとも非接触型変位計による測定と同じ時点でコンクリート表面の変位計を標点として実施した。

コンクリート打設中の密度測定には、表面型 RI 密

度計を使用した。RI 密度計は透過型で線源長は20cmである。測定位置は、各ヤードとも図-3-1に示したように、第8ブロックおよび第10ブロックが各1ヶ所、第9ブロックが2ヶ所の計4ヶ所である。測定時期は、ブルドーザおよびバックホウによる撒き出し後と、振動ローラによる転圧後(ヤードⅠ、ⅡおよびⅢは振動1, 3, 7, 11回、ヤードⅣでは無振動2回、振動2, 4,

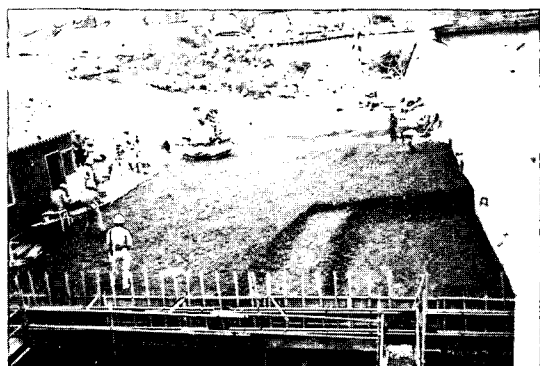


写真-3・10 振動ローラ転圧前



写真-3・12 レベルによる沈下量の測定



写真-3・11 振動ローラによる転圧

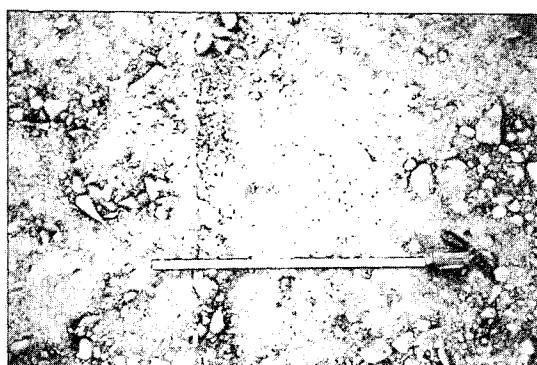


写真-3・13 転圧後の状況

6回)に実施した。以上の一連の現場転圧試験の過程を写真-3・4～写真-3・13に示す。

コンクリート硬化後の密度および圧縮強度を求めるために各ヤードとも図-3・1に示した位置でボーリングコアを採取した。各撤き出し層ごとの密度および強度を知るためにボーリングコアは層別に切断して測定を行った。強度については、材令91日における圧縮強度を測定した。

3.3 試験結果および考察

3.3.1 沈下および圧縮量

コンクリート撤き出し後の振動転圧に伴うコンクリート表面沈下量を非接触型変位計およびレベルによって測定した結果の一覧表を表-3・5～表-3・20に示す。表-3・5～表-3・20のうち代表的なものを図-3・7に示す。なお非接触型変位計による表面沈下量は、図-3・2における第1, 2, 3層の圧縮量を合計して求めたものである。ここでの、圧縮量は非接触型変位計のローラ転圧に伴う傾きおよび平行移動等の補正を行っている。非接触

型変位計による測定結果とレベルによる測定結果は非常に良い一致を示した。また、他の測定位置においても両者は良い一致を示しており、非接触型変位計による測定値は信頼性の高いものであると考えられる。

図-3・7に示した沈下のうち、測点S2はブルドーザによって撤き出されたブロックにあり、S4はブルドーザの走行に伴う締固め効果を排除するためにバックホウによって撤き出したブロックにある。ヤードII、III、IVとも測点S2の沈下量はS4に比べて非常に少なく撤き出し時のブルドーザの走行によりかなり締固められていることを示している。なお、本実験におけるブルドーザ撤き出しは、試験施工のための通常の施工よりも入念に実施しており、よりブルドーザ転圧の効果が強調されていると考えられる。

非接触型変位計によって測定した各撤き出し層ごとの内部変位から求めた圧縮量の結果を図-3・8～図-3・11に示す。図-3・9(b)は、ヤードIIのS2での測定結果であり、この測定位置のコンクリートはブルドーザで撤き出されている。一方、図-3・9(d)は、同じヤードIIの

表-3・5 非接触型変位計の測定結果(ヤードⅠ, S1)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量(mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	10.9				
	3層目撒き出し後	11.7	4.4			
振動ローラ	無振動1回転圧後	12.2	4.4	0.1	0.6	2.0
	振動1回転圧後	12.7	4.5	-1.1	0.0	0.0
	振動3回転圧後	13.6	4.7	-3.4	-1.2	-2.0
	振動5回転圧後	13.5	4.8	-4.7	-2.5	-3.0
	振動7回転圧後	13.6	4.8	-3.5	-1.2	-1.0
	振動11回転圧後	13.8	5.7	-1.8	1.6	-1.0

表-3・6 非接触型変位計の測定結果(ヤードⅠ, S2)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量(mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	5.0				
	3層目撒き出し後	5.5	8.3			
振動ローラ	無振動1回転圧後	5.5	8.4	-0.1	0.0	1.0
	振動1回転圧後	5.6	8.4	-1.8	-1.6	-1.0
	振動3回転圧後	5.6	8.2	-3.4	-3.4	-4.0
	振動5回転圧後	5.8	8.6	-5.2	-4.6	-4.0
	振動7回転圧後	5.9	8.9	-5.7	-4.7	-3.0
	振動11回転圧後	6.1	9.4	-5.1	-3.4	-3.0

表-3・7 非接触型変位計の測定結果(ヤードⅠ, S3)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量(mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	1.4				
	3層目撒き出し後	1.7	0.8			
振動ローラ	無振動1回転圧後	1.8	1.0	3.3	3.6	2.0
	振動1回転圧後	2.8	3.4	12.0	15.7	16.0
	振動3回転圧後	3.3	4.5	14.5	19.8	20.0
	振動5回転圧後	3.9	5.5	15.3	22.2	22.0
	振動7回転圧後	4.2	6.5	16.8	25.0	25.0
	振動11回転圧後	4.9	8.2	19.7	30.3	30.0

表-3・8 非接触型変位計の測定結果(ヤードⅠ, S4)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量(mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	-0.8				
	3層目撒き出し後	-0.8	0.3			
振動ローラ	無振動1回転圧後	-0.9	0.3	-1.1	-1.2	-1.0
	振動1回転圧後	1.3	1.9	5.3	9.0	12.0
	振動3回転圧後	3.2	3.1	6.2	13.0	16.0
	振動5回転圧後	4.2	4.4	10.4	19.5	21.0
	振動7回転圧後	5.2	5.5	12.3	23.5	26.0
	振動11回転圧後	6.6	6.9	14.4	28.4	30.0

表-3・9 非接触型変位計の測定結果(ヤードⅡ, S1)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量(mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	3.8				
	3層目撒き出し後	4.4	10.4			
振動ローラ	無振動1回転圧後	4.4	10.4	0.1	0.1	0.0
	振動1回転圧後	4.6	10.6	0.7	1.1	1.0
	振動3回転圧後	4.8	13.0	1.3	4.3	3.0
	振動5回転圧後	4.8	16.7	1.7	8.6	5.0
	振動7回転圧後	5.0	20.8	3.4	14.4	8.0
	振動11回転圧後	5.3	23.7	3.3	17.5	10.0

表-3・10 非接触型変位計の測定結果(ヤードⅡ, S2)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量(mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	4.0				
	3層目撒き出し後	4.6	5.0			
振動ローラ	無振動1回転圧後	4.6	5.0	1.1	1.1	1.0
	振動1回転圧後	5.0	6.2	4.0	5.6	6.0
	振動3回転圧後	5.8	7.3	6.7	10.2	10.0
	振動5回転圧後	5.8	8.1	8.5	12.8	12.0
	振動7回転圧後	5.9	8.7	9.3	14.3	14.0
	振動11回転圧後	5.8	10.2	9.8	16.2	17.0

表-3-11 非接触型変位計の測定結果(ヤードII, S3)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量 (mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	1.0				
	3層目撒き出し後	1.2	1.6			
振動ローラ	無振動1回転圧後	1.2	1.7	0.5	0.6	1.0
	振動1回転圧後	1.8	4.2	5.4	8.6	11.0
	振動3回転圧後	2.6	6.4	7.2	13.4	15.0
	振動5回転圧後	2.9	7.7	9.6	17.4	19.0
	振動7回転圧後	3.1	8.8	11.2	20.3	21.0
	振動11回転圧後	3.5	10.0	11.0	21.7	24.0

表-3-12 非接触型変位計の測定結果(ヤードII, S4)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量 (mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	1.0				
	3層目撒き出し後	1.0	0.2			
振動ローラ	無振動1回転圧後	1.3	0.7	18.8	19.6	20.0
	振動1回転圧後	7.4	11.2	34.6	52.0	53.0
	振動3回転圧後	10.1	16.6	43.6	69.1	70.0
	振動5回転圧後	11.6	19.1	47.2	76.7	77.0
	振動7回転圧後	12.8	21.3	47.3	80.2	82.0
	振動11回転圧後	15.1	24.3	49.5	87.7	89.0

表-3-13 非接触型変位計の測定結果(ヤードIII, S1)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量 (mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	3.3				
	3層目撒き出し後	3.5	6.5			
振動ローラ	無振動1回転圧後	3.5	6.3	-0.6	-0.8	0.0
	振動1回転圧後	3.6	6.6	0.9	1.1	2.0
	振動3回転圧後	3.7	7.2	2.9	3.8	5.0
	振動5回転圧後	3.7	7.6	3.7	5.0	5.0
	振動7回転圧後	3.9	7.9	4.6	6.4	7.0
	振動11回転圧後	4.0	8.3	5.8	8.1	8.0

表-3-14 非接触型変位計の測定結果(ヤードIII, S2)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量 (mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	4.7				
	3層目撒き出し後	5.0	7.4			
振動ローラ	無振動1回転圧後	4.7	7.2	-0.4	-0.9	0.0
	振動1回転圧後	4.8	7.4	0.2	0.0	1.0
	振動3回転圧後	4.8	8.1	1.7	2.2	4.0
	振動5回転圧後	4.9	8.3	2.6	3.4	5.0
	振動7回転圧後	4.5	8.3	2.6	3.0	6.0
	振動11回転圧後	4.4	8.7	2.9	3.6	6.0

表-3-15 非接触型変位計の測定結果(ヤードIII, S3)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量 (mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	2.7				
	3層目撒き出し後	3.1	3.2			
振動ローラ	無振動1回転圧後	3.0	2.9	-1.0	-1.4	0.0
	振動1回転圧後	3.6	4.5	-0.2	1.6	2.0
	振動3回転圧後	4.7	7.8	1.7	7.9	9.0
	振動5回転圧後	5.2	9.8	2.8	11.5	11.0
	振動7回転圧後	5.6	11.0	3.5	13.8	15.0
	振動11回転圧後	6.1	12.4	4.7	16.9	18.0

表-3-16 非接触型変位計の測定結果(ヤードIII, S4)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量 (mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	1.3				
	3層目撒き出し後	1.3	1.1			
振動ローラ	無振動1回転圧後	1.3	1.7	15.6	16.2	16.0
	振動1回転圧後	8.1	12.7	31.9	50.3	47.0
	振動3回転圧後	11.6	18.2	37.2	64.6	61.0
	振動5回転圧後	13.8	21.0	40.3	72.7	69.0
	振動7回転圧後	15.1	22.8	39.0	74.5	73.0
	振動11回転圧後	17.1	25.0	43.4	83.1	81.0

表-3-17 非接触型変位計の測定結果(ヤードIV, S1)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量(mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	6.2				
	3層目撒き出し後	6.9	2.6			
振動ローラ	無振動2回転圧後	6.9	2.9	3.9	4.2	5.0
	振動2回転圧後	16.2	5.2	4.8	16.7	18.0
	振動4回転圧後	18.5	4.6	7.9	21.5	21.0
	振動6回転圧後	20.2	4.4	11.3	26.4	29.0

表-3-18 非接触型変位計の測定結果(ヤードIV, S1)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量(mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	4.0				
	3層目撒き出し後	4.1	1.3			
振動ローラ	無振動2回転圧後	4.1	1.4	1.2	1.3	0.0
	振動2回転圧後	6.9	4.5	8.7	14.7	12.0
	振動4回転圧後	8.3	5.9	10.8	19.6	18.0
	振動6回転圧後	9.2	6.6	13.7	24.1	23.0

S4での測定結果であり、この測定位置でのコンクリートはバックホウで撒き出されているが、いずれの層においてもバックホウによって撒き出した場合のS4の方がブルドーザで撒き出したS2の場合よりも大きく、ブルドーザによる締固め効果は大きいことがわかる。図-3-11では、第2層目より第1層目の方が層別圧縮量が大きくなっているが、これは、第1層目の層厚が約250mmであるのに対し、第2、3層目の層厚が約180mmであるからである。図-3-9～図-3-11において、第2層目をブルドーザで撒き出した時に第1層目は5mm程度圧縮されており、第3層目を撒き出した時には第2層目は5mm圧縮されているが、第1層目はほとんど圧縮されていない傾向にある。このことは、コンクリート撒き出し時にはブルドーザによる締固め効果が撒き出し層の直下の層には及ぶが、2層下の層までは及ばないことを示している。一方、図3-9～図3-11の(d)のバックホウによる撒き出しの場合には、振動転圧に伴う各層の圧縮量は、最下層の第1層目が15mm程度、第2

表-3-19 非接触型変位計の測定結果(ヤードIV, S3)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量(mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	6.4				
	3層目撒き出し後	6.9	1.0			
振動ローラ	無振動2回転圧後	7.1	0.7	3.5	3.4	1.0
	振動2回転圧後	22.8	5.3	5.4	25.6	23.0
	振動4回転圧後	26.4	7.4	5.3	31.2	33.0
	振動6回転圧後	26.2	7.0	12.2	37.5	41.0

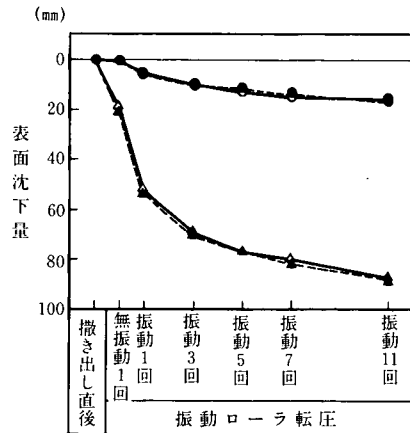
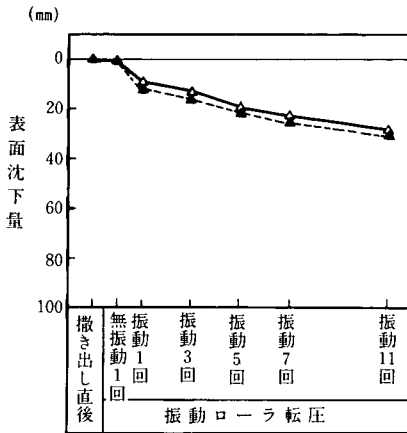
表-3-20 非接触型変位計の測定結果(ヤードIV, S4)

転圧機種	施工工程	層別圧縮量(mm)				沈下量(mm)
		1層	2層	3層	全層	
ブルドーザ	1層目撒き出し後					
	2層目撒き出し後	0.7				
	3層目撒き出し後	0.7	0.2			
振動ローラ	無振動2回転圧後	2.3	2.2	25.9	29.5	28.0
	振動2回転圧後	21.4	13.8	44.1	78.4	78.0
	振動4回転圧後	27.3	15.7	44.3	86.4	87.0
	振動6回転圧後	31.0	17.0	47.7	94.8	96.0

層目が25mm程度であるのに対し、最上層の第3層目は50mm程度にまで達している。このことは、ブルドーザ撒き出しがない場合には、転圧面から離れるにしたがって振動ローラの締固め効果が小さくなることを示しており、振動転圧を直接に受けない下層部では撒き出した直後の締固め度が小さいと振動転圧後においても十分に締固まったコンクリートが得られない可能性があると考えられる。

3.3.2 密度

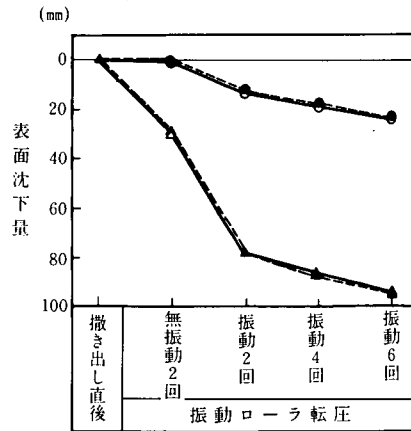
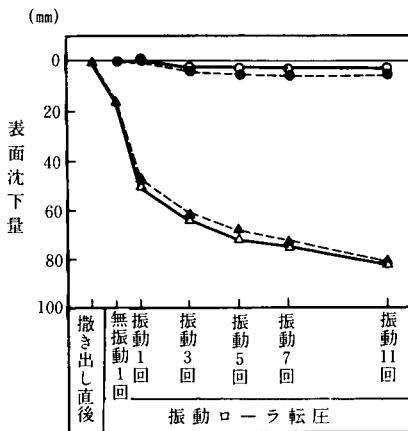
表-3-21～表3-24は、コンクリート打設後、材令91日における、ボーリングコアによる密度および強度試験結果である。図-3-12は、これらのうち密度を図化したものである。ブロックによっては、振動ローラを走らせなかったり、走行回数を少なくしたままコンクリートを硬化させているから、各施工段階における密度を知ることができる。なお、撒き出し過程および振動転圧初期において密度が見かけ上低下しているようであるが、これは、ブルドーザによる撒き出し後の密度の



凡 —○— : 非接触型変位計 (S2, ブルドーザによる撤き出し)
 ---●--- : レベル測量 (")
 例 —△— : 非接触型変位計 (S4, バックホウによる撤き出し)
 ---▲--- : レベル測量 (")

(a) ヤード I

(b) ヤード II



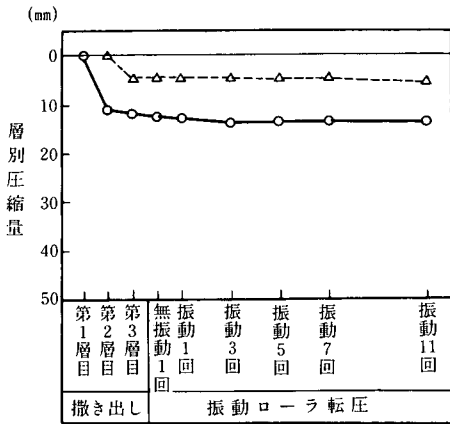
凡 —○— : 非接触型変位計 (S2, ブルドーザによる撤き出し)
 ---●--- : レベル測量 (")
 例 —△— : 非接触型変位計 (S4, バックホウによる撤き出し)
 ---▲--- : レベル測量 (")

(c) ヤード III

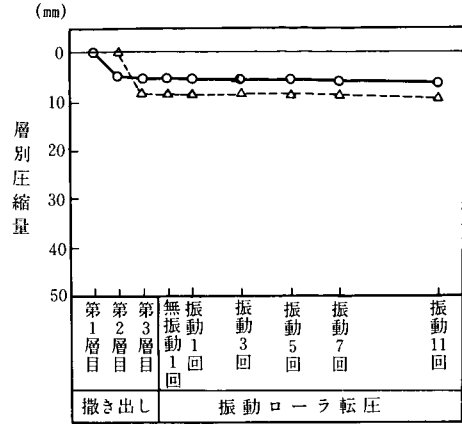
(d) ヤード IV

図-3・7 コンクリート表面沈下量測定結果

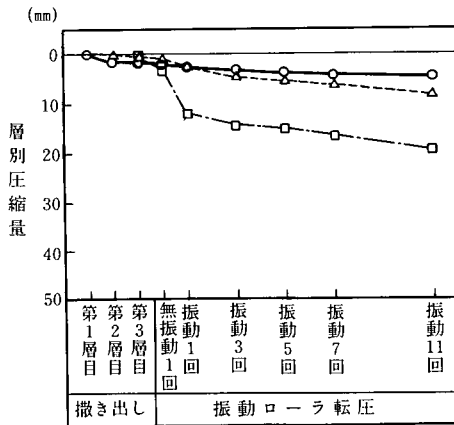
ローラ転圧コンクリートの締固め特性



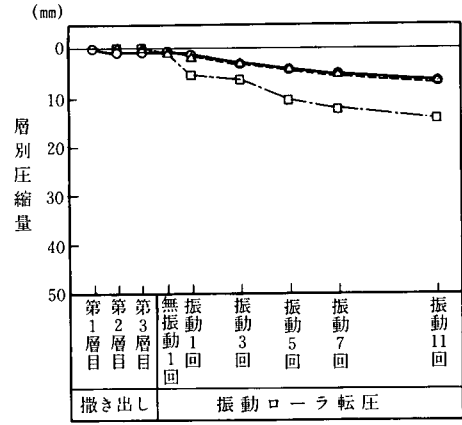
(a) ヤード I, S1 (ブルドーザ撒き出し)



(b) ヤード I, S2 (ブルドーザ撒き出し)

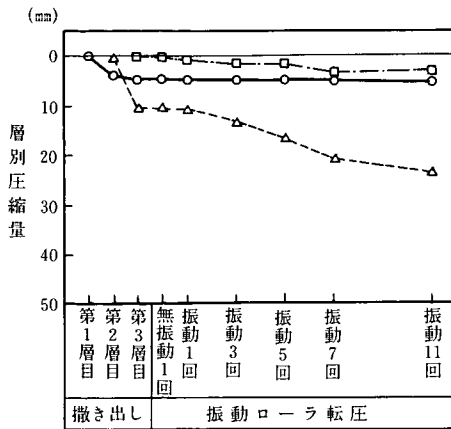


(c) ヤード I, S3 (ブルドーザ撒き出し)

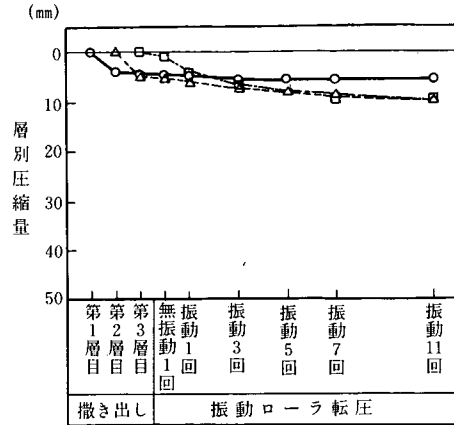


(d) ヤード I, S4 (バックホウ撒き出し)

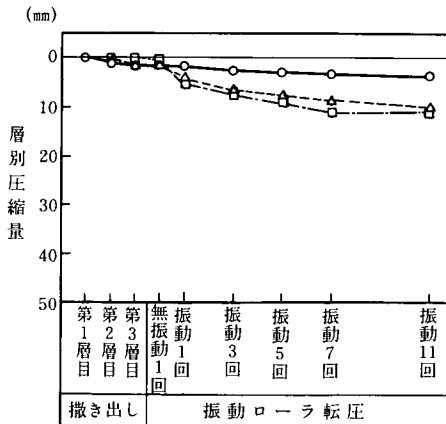
図-3・8 層別圧縮量測定結果



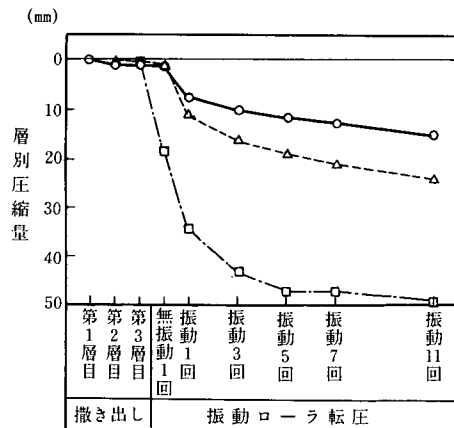
(a) ヤードII, S1 (ブルドーザ撒き出し)



(b) ヤードII, S2 (ブルドーザ撒き出し)



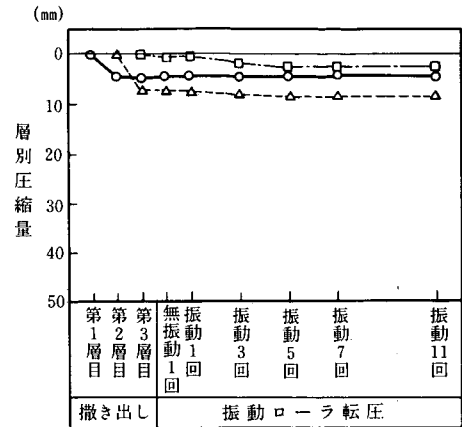
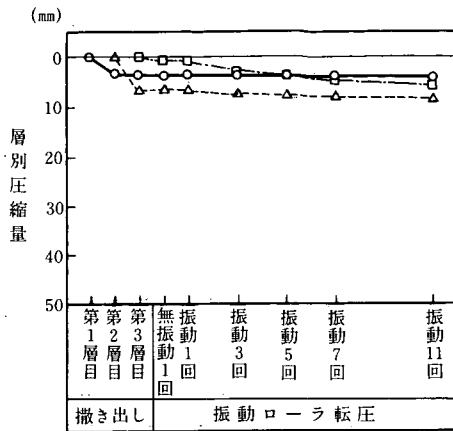
(c) ヤードII, S3 (ブルドーザ撒き出し)



(d) ヤードII, S4 (バックホウ撒き出し)

図-3・9 層別圧縮量測定結果

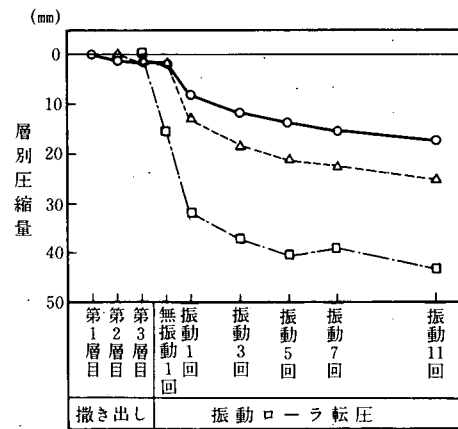
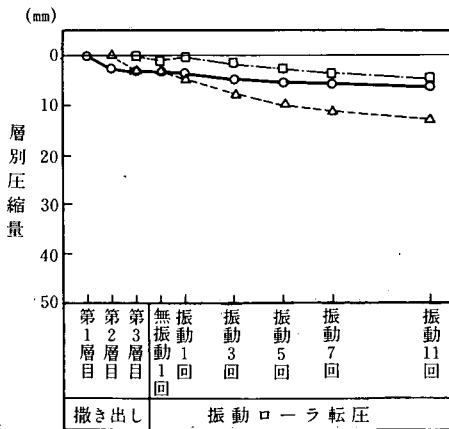
ローラ転圧コンクリートの締固め特性



凡 例
 ○ 第1層目
 △ 第2層目
 □ 第3層目

(a) ヤードⅢ, S1 (ブルドーザ撒き出し)

(b) ヤードⅢ, S2 (ブルドーザ撒き出し)

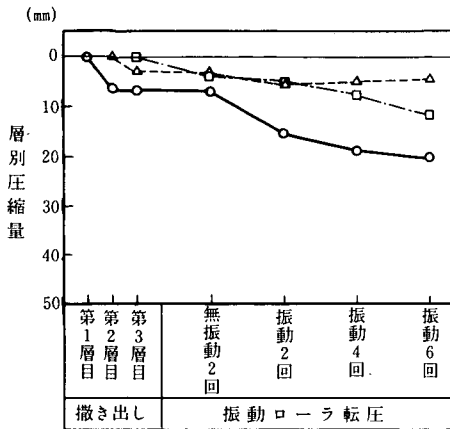


凡 例
 ○ 第1層目
 △ 第2層目
 □ 第3層目

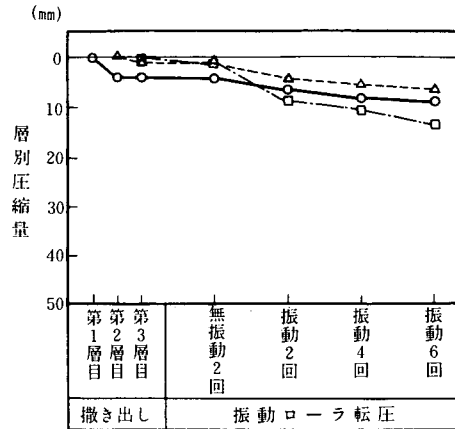
(c) ヤードⅢ, S3 (ブルドーザ撒き出し)

(d) ヤードⅢ, S4 (バックホウ撒き出し)

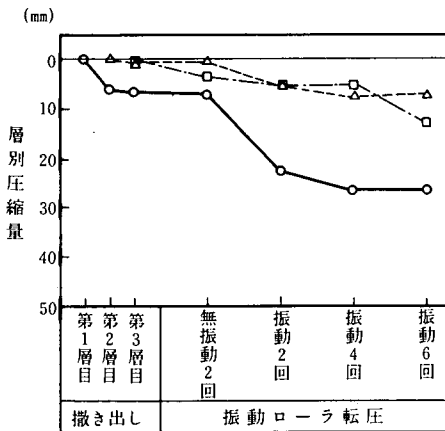
図-3・10 層別圧縮量測定結果



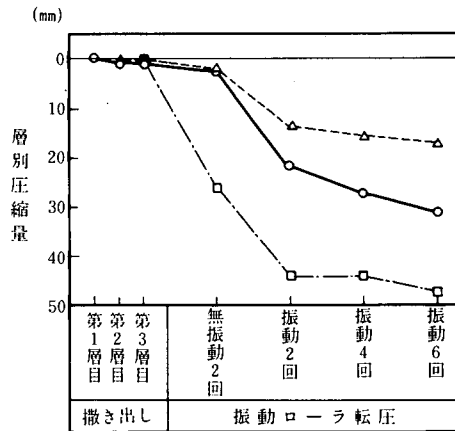
(a) ヤードⅣ, S1 (ブルドーザ撒き出し)



(b) ヤードⅣ, S2 (ブルドーザ撒き出し)



(c) ヤードⅣ, S3 (ブルドーザ撒き出し)



(d) ヤードⅣ, S4 (バックホウ撒き出し)

図-3・11 層別圧縮量測定結果

表-3-21 現場転圧試験における圧縮強度試験結果(ヤードⅠ)

転圧機種	施工工程	コア密度 (tf/m ³)			圧縮強度 (kgf/cm ²)		
		1層目	2層目	3層目	1層目	2層目	3層目
ブルドーザ	1層目撒き出し後	2.407			102.3		
	2層目撒き出し後	2.457	2.375		157.4	79.8	
	3層目撒き出し後	2.428	2.413	2.386	124.2	105.2	79.7
振動ローラ	無振動1回転圧 振動1回転圧後	2.386	2.389	2.415	93.1	95.9	115.8
	振動3回転圧後	2.411	2.426	2.414	107.2	123.3	110.4
	振動7回転圧後	2.446	2.446	2.441	142.3	138.0	132.0
	振動11回転圧後	2.437	2.435	2.451	133.3	127.9	139.2
	バックホウ撒き出し 振動11回転圧後	2.349	2.372	2.439	60.1	74.6	124.6

表-3-22 現場転圧試験における圧縮強度試験結果(ヤードⅡ)

転圧機種	施工工程	コア密度 (tf/m ³)			圧縮強度 (kgf/cm ²)		
		1層目	2層目	3層目	1層目	2層目	3層目
ブルドーザ	1層目撒き出し後	2.387			83.4		
	2層目撒き出し後	2.398	2.394		106.3	78.8	
	3層目撒き出し後	2.370	2.396	2.367	81.8	105.9	65.1
振動ローラ	無振動1回転圧 振動1回転圧後	2.376	2.363	2.379	63.6	93.9	95.6
	振動3回転圧後	2.426	2.391	2.400	117.3	88.9	118.0
	振動7回転圧後	2.443	2.430	2.428	143.3	135.8	122.3
	振動11回転圧後	2.443	2.415	2.432	137.6	108.1	126.0
	バックホウ撒き出し 振動11回転圧後	2.324	2.373	2.453	47.2	77.1	143.1

バラツキが原因と考えられる。

まずブルドーザによって撒き出したコンクリートの初期密度であるが、いずれのヤード、いずれの層においても撒き出し直後の密度は2.35～2.40t/m³程度である。バックホウによって撒き出された直後のコンクリートは最もゆるい状態と考えられるが、このときの密度を計算で求めると、いずれのヤード、いずれの層においても2.00t/m³程度であった。なお計算で求めた密度とは、図-3-12のバックホウ撒き出し層の転圧終了後の密度と内部圧縮量とから初期密度を逆算したものである。以上の結果より、ブルドーザで撒き出すことによってコンクリート密度が最小密度から2.35～2.40

表-3-23 現場転圧試験における圧縮強度試験結果(ヤードⅢ)

転圧機種	施工工程	コア密度 (tf/m ³)			圧縮強度 (kgf/cm ²)		
		1層目	2層目	3層目	1層目	2層目	3層目
ブルドーザ	1層目撒き出し後	2.382			70.2		
	2層目撒き出し後	2.355	2.333		44.3	36.3	
	3層目撒き出し後	2.390	2.373	2.331	78.5	64.9	43.2
振動ローラ	無振動1回転圧 振動1回転圧後	2.368	2.353	2.385	66.9	54.3	79.3
	振動3回転圧後	2.413	2.367	2.396	98.7	68.3	89.7
	振動7回転圧後	2.418	2.389	2.408	102.6	82.8	94.9
	振動11回転圧後	2.410	2.412	2.436	96.5	104.9	134.8
	バックホウ撒き出し 振動11回転圧後	2.313	2.365	2.405	39.2	70.1	107.9

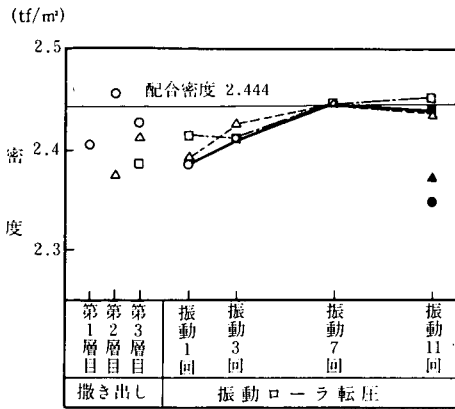
表-3-24 現場転圧試験における圧縮強度試験結果(ヤードⅣ)

転圧機種	施工工程	コア密度 (tf/m ³)			圧縮強度 (kgf/cm ²)		
		1層目	2層目	3層目	1層目	2層目	3層目
ブルドーザ	1層目撒き出し後	2.415			74.6		
	2層目撒き出し後	2.403	2.344		97.0	73.5	
	3層目撒き出し後	2.427	2.380	2.416	120.8	105.8	92.9
振動ローラ	無振動2回転圧後	2.396	2.405	2.415	65.9	99.3	97.6
	振動2回転圧後	2.471	2.453	2.452	158.1	109.6	107.6
	振動4回転圧後	2.482	2.470	2.454	179.3	136.9	119.9
	振動6回転圧後	2.461	2.455	2.458	147.7	146.2	144.5
	バックホウ撒き出し 振動6回転圧後	2.440	2.464	2.478	105.0	139.7	141.6

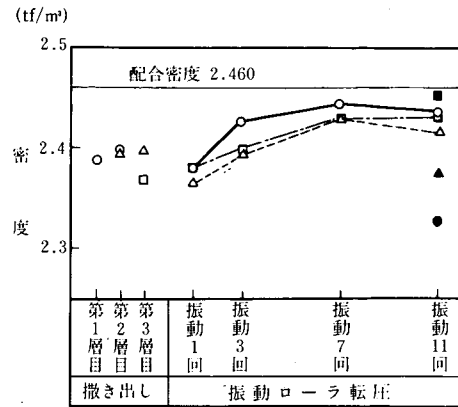
t/m³となると考えると、コンクリートの締固めの相当の部分はブルドーザによっておこなわれていることになる。またブルドーザ撒き出し時には図-3-8～図3-11の層別圧縮量からわかるように、当該層のみならず、1層下の層の密度を上昇させていることがわかる。

次に振動転圧過程における密度の上昇をみると、ヤードⅠ、Ⅱにおいては、7回くらいの転圧で、ほぼ最終密度に達している。ヤードⅢでは11回転圧後もまだ密度上昇の傾向が認められる。ヤードⅣでは、2回の転圧で相当の密度が達成されている。これは、ベースト量の少ないヤードⅢが締固めにくいこと、細骨材率の多いヤードⅣは締固め易いことを示している。

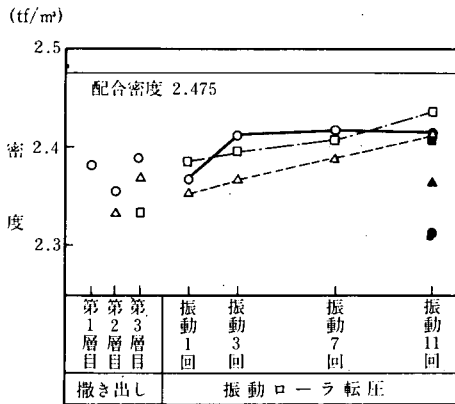
図-3-12において、各ヤードのブルドーザによって



(a) ヤードI

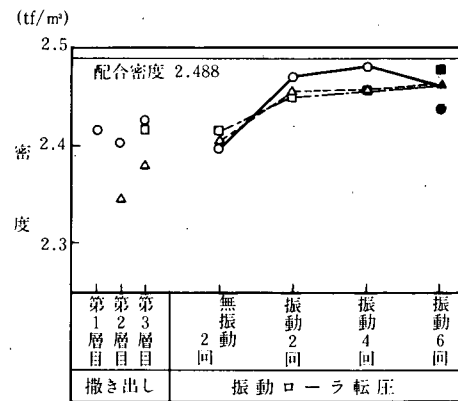


(b) ヤードII



○ — : 第1層目 (ブルドーザ撒き出し) ● : 第1層目 (バックホウ撒き出し)
 △ — : 第2層目 (") ▲ : 第2層目 (")
 □ — : 第3層目 (") ■ : 第3層目 (")

(c) ヤードIII



(d) ヤードIV

図-3・12 層別密度測定結果

撒き出したコンクリートは、第1層目から第3層目まで振動ローラ転圧の効果が認められ、振動転圧終了後の密度には層間のばらつきは少ない。一方、バックホウによって撒き出したコンクリートの振動転圧終了後の密度は、ヤードIVを除いて、第3層目の密度は大きい、第1、2層の密度は小さい。すなわち、振動転圧を直接に受けない下層部では上層部よりも振動ロー

ラの締固め効果が小さいことを示しており、合理的な締固めをおこなうには特に下層部において撒き出し直後の密度が、ある程度大きくなっている必要があると考えられる。また、ヤードIVではバックホウによる撒き出し後の密度がブルドーザによる撒き出し後の密度とほぼ一致している結果となっているが、これは、ヤードIVがヤードI～IIIに比べリフト厚が薄いためと考

えられる。これより、ヤードIVでは振動ローラの締固め効果が下層部まで及んでいることがわかる。

図-3・12において、各ヤードのブルドーザによって撒き出したコンクリートの振動転圧終了後の密度を配合密度（各材料の単位量の合計）と比較してみると、ヤードI、IIおよびIVはほぼ配合密度に達しているが、ヤードIIIは配合密度には達していない。これは骨材間の空隙を充填するのに必要なペースト量がケースIIIのコンクリートには不足していたためであり、合理的な締固めをおこなうためには、先に定義したペースト空隙比が1以上、すなわち骨材を最も密に締固めた場合の骨材間の空隙よりもペースト量が多い配合のコンクリートを採用する必要があることを意味していると考えられる。

図-3・13は、ヤードIのブルドーザで撒き出したコンクリートの第3層目における撒き出し直後から振動転圧終了までの間の密度を、RI密度計およびボーリングコアによって測定した結果の比較である。撒き出し直後および振動転圧初期において、RI密度計による測定結果はボーリングコアによる測定結果よりも低い値となっている。しかし両者の差は振動転圧が進むにつれて少なくなっている。また、これと同様の傾向が他のヤードにおいても見られた。この原因としては、図-3・14に示すような撒き出し直後にコンクリート表面に生じている凹凸、ブルドーザの覆帯や排土板によって引き起こされるコンクリート表面近傍の緩みなどが考えられる。RI密度計は、測定の簡便性および迅速性から広く用いられているが、撒き出し直後や振動転圧初期のコンクリート密度をRI密度計によって測定する際には精度の良い測定値を得るための工夫が必要となる。

3.3.3 強度

図-3・15は、表-3・21～表-3・24の材令91日における圧縮強度試験結果を示す。この図は、図-3・12と対応したものであり、各施工段階の途上で、そのまま硬化させ

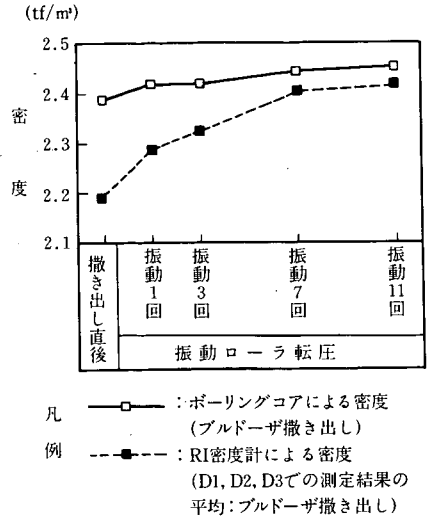


図-3・13 ボーリングコアおよびRI密度計による密度測定結果の比較(ヤードI)

たコンクリートからボーリングコアを抜き、圧縮強度を求めたものである。なおボーリングコアの径は180mmである。ブルドーザで撒き出されたコンクリートの11回ローラー転圧された後の硬化したコンクリートは、ヤードI、II、IVでは、圧縮強度で100kg f/cm²以上の値が得られている。またヤードIとIVでは、層間のばらつきが少なく、図-3・12の密度とよく対応した結果となっている。一方、バックホウによって撒き出されたコンクリートは、振動転圧終了後において層間に強度のばらつきが生じており、いずれのヤードにおいても、第1層の強度はかなり小さい。以上の強度に関する結果は、全体として図-3・12に示した密度に関する結果とよく対応している。

図-3・16は、各ヤードにおける硬化後のコンクリートの密度と圧縮強度との関係を示したものである。いず

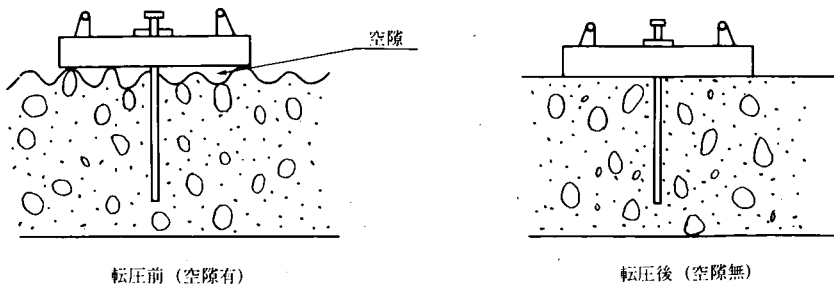
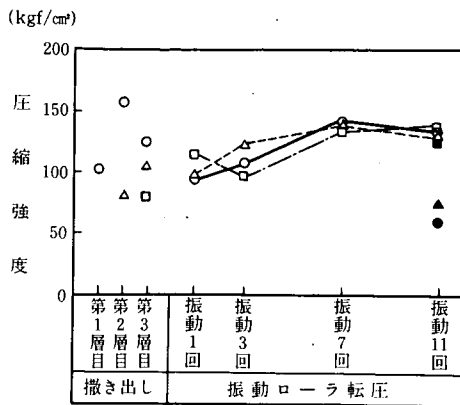
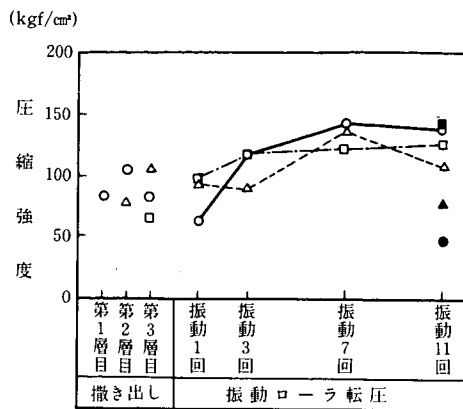


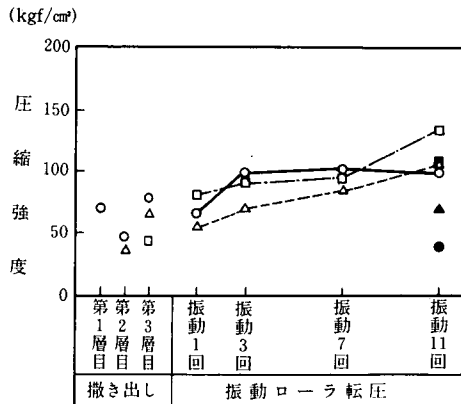
図-3・14 転圧前後のRI計測状況



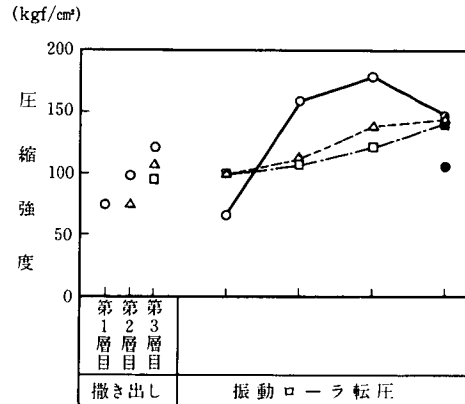
(a) ヤード I



(b) ヤード II



(c) ヤード III



(d) ヤード IV

凡例
 —○— : 第1層目 (ブルドーザ撒き出し) ● : 第1層目 (バックホウ撒き出し)
 -△- : 第2層目 (") ▲ : 第2層目 (")
 -□- : 第3層目 (") ■ : 第3層目 (")

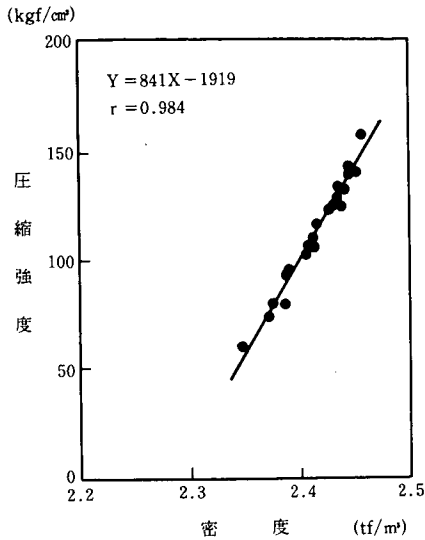
図-3・15 層別強度測定結果

れのヤードにおいても両者は強い相関を示しており、相関関係は最も小さいヤードIVにおいても0.828である。また、目視観察によると、各ヤードとも強度が100 kgf/cm²以上であれば良質なコンクリートであり、70 kgf/cm²以下だとポーラスなコンクリートであった。よって、強度、品質の点で良いコンクリートを得るためには、ある値以上の密度が確保されなければならない

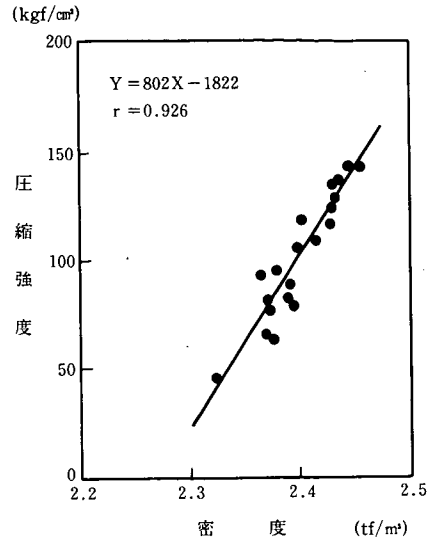
いと考えられる。

図-3・16の各ヤードのコンクリートの密度と圧縮強度との関係を見ると、密度が2.30t/m³以下においては強度は50kgf/cm²以下と推定される。密度が2.30t/m³以下のものはポーラスなコンクリートであり品質はかなり落ちる。密度増加に伴う強度の増加過程は、最小密度である。2.00t/m³から2.35t/m³程度まで増加す

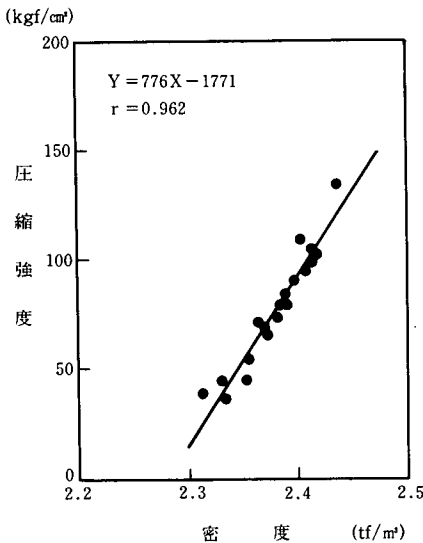
ローラ転圧コンクリートの締固め特性



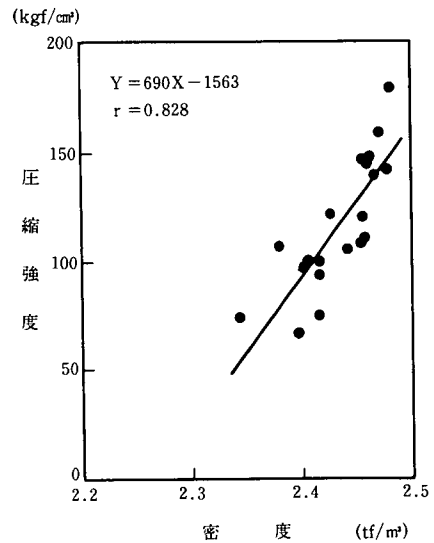
(a) ヤード I



(b) ヤード II



(c) ヤード III



(d) ヤード IV

図-3・16 圧縮強度と密度との関係

ると、強度は50kg f/cm²程度へ増加し、密度が2.35t/m³を越えると、強度は急激に増加すると考えられる。ブルドーザでの撒き出しによって密度は2.35~2.40 t/m³に達するが、この時点での強度は60~100kg f/cm²であり必ずしも十分ではなく、振動ローラでの締固めによって十分な強度が確保されることになる。また、ヤード I ~ III のコンクリートの密度と強度の関係はほぼ同じとなっている。これらのコンクリートの水セメ

ント比は一定であり、このことから RCD コンクリートにおいても水セメント比が一定であれば配合中のペースト量に関係なく密度と強度との関係は一定になると考えられる。

図-3・17は水セメント比を一定とした場合の密度と材令91日における強度の関係を示したものである。いずれのペースト空隙比においても両者は強い相関を示しており、相関係数は0.958である。これより、水セメン

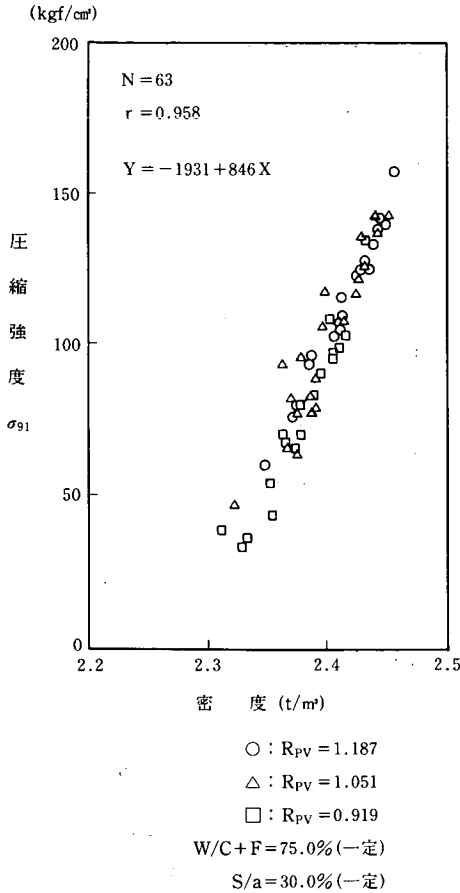


図-3-17 密度と圧縮強度の関係

ト比を一定とすることで締固め密度がピークとなるペースト空隙比と強度がピークとなるペースト空隙比が一致、もしくは近い値となることがわかる。

図-3-18は、ヤードⅠ～Ⅲにおける密度と強度をペースト空隙比をパラメータにしてプロットしたものである。図-3-18より、ペースト空隙比が1.0以上のヤードⅠ、Ⅱは、ほぼ配合密度(各材料の単位計の合計)に達しており十分締固まっていることがわかる。また、その時のVC値は、ヤードⅠ～Ⅲにおいて6～42秒であった。強度は、ヤードⅠ～Ⅲにおいて全層で平均112～133kgf/cm²である。しかし、ヤードⅢの強度は第1層、第2層が第3層に比べ小さい値であることがわかる。前章2.6で記したフルサイズコンクリートの適切なペースト空隙比は、締固め密度、VC値から1よりもやや大きい値(1.05程度)であるという結果からペースト空隙比が1.05程度に相当するヤードⅡが密度、強度、VC値から最適な配合であるといえる。ヤードⅡは、実際に使

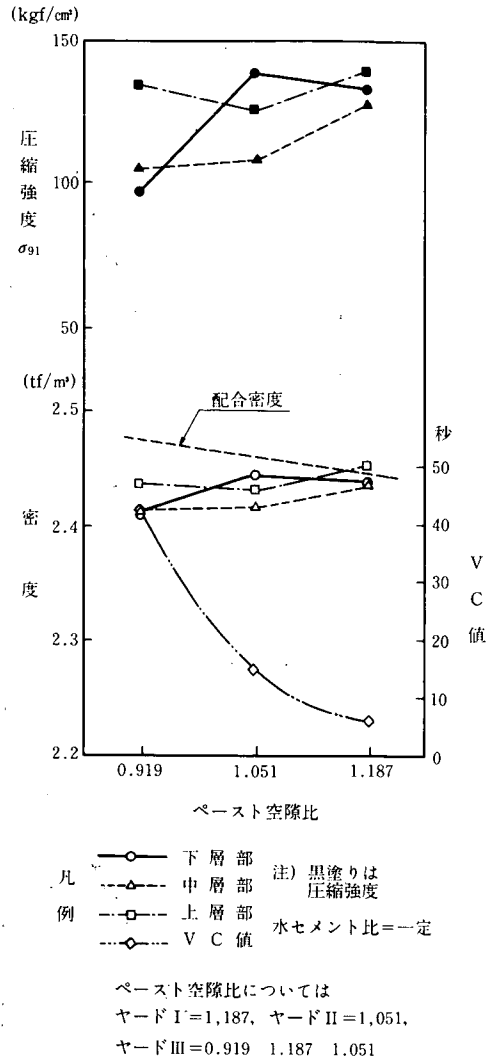


図-3-18 種々のペースト量における現場転圧試験結果(シリーズⅠ)

用されているRCDコンクリートの示方配合の値を用いている。

これより、第2章で行った室内試験で得られた結果は、現場転圧試験でも確かめられたといえる。

図-3-19は、ローラ転圧コンクリート工法におけるコンクリートの密度増加および強度増加において、ブルドーザおよび振動ローラの果している役割を图示したものである。

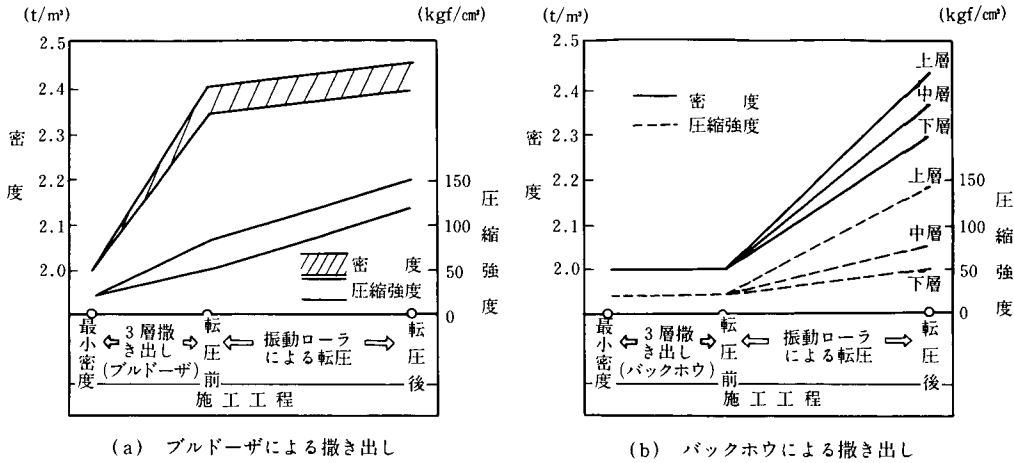


図-3-19 ブルドーザおよび振動ローラの果している役割

3-4 施工管理に関する提案

前節において、現場転圧試験結果に基づき、ローラ転圧コンクリート工法におけるコンクリートの締固め機構を考察した。そこで、この工法でコンクリートダムを施工する際のコンクリートの締固めに関する管理項目をここで論ずることとする。まずはじめに、前節の考察結果から、設定するのが望ましいと考えられる品質管理項目を列記すると、ブルドーザによる撒き出し後のコンクリート密度、振動転圧終了時のコンクリート密度、撒き出し層の層厚、撒き出し後から振動転圧終了までのコンクリートの沈下量の4項目となる。

- ① まず撒き出し後の密度であるが、これは振動転圧終了後の密度に与える影響が大きく、振動転圧を直接受けない下層部では振動転圧による密度の大幅な増加が期待できないので、撒き出し後の密度が小さいと下層部では振動転圧終了後においても密度が小さいままとなる可能性がある。撒き出し後の目標密度を試験施工によって求め、ダム本体施工時には、特に下層部において目標密度を満たしているかをチェックする必要がある。
- ② 振動転圧終了時の密度は、十分な締固めがおこなわれたかをチェックするものであるが、実際には表面部コンクリートの密度でしか管理することができない。したがって試験施工時に表面部コンクリートの密度と下層部のコンクリートの密度との関係を調べ、下層部コンクリートの密度を考慮した表面部コンクリートの目標密度をダム本体施工時の管理基準値と

する必要がある。

- ③ ダム本体コンクリート打設時における施工管理方法には、精度、迅速性、簡便性、経済性などが要求される。密度測定方法の中で最も施工管理方法として適しているものの1つにRI密度計による測定方法があり、我が国ではローラ転圧コンクリート工法によるコンクリートダムやフィルダムの施工現場などで広く利用されている。しかし、ローラ転圧コンクリート工法において撒き出し直後や振動転圧初期のコンクリート密度をRI密度計によって測定する場合、コンクリート表面の凹凸等により密度が低く評価される可能性があり、精度良く測定するための十分な予備試験を実施する必要がある。
- ④ 撒き出し層の層厚および撒き出し後から振動転圧終了までの間の表面沈下量は、転圧状況の有力な指標である。ただし、一定転圧回数後に、表面沈下量が一定となり沈下がなくなったからといって、必ずしも所定の密度が得られているわけではないから、表面沈下量のみを品質管理項目とすることなく、常に密度によりチェックを実施すべきである。

以上の4つの管理項目の基準値は、いずれも試験施工によって得られるものである。試験施工では、施工工程の進行に伴うコンクリートの沈下量、密度変化、強度変化を非接触型変位計およびボーリングコアによって撒き出し層ごとに調べ、これらの結果を基にして管理基準値を求める必要がある。

3.5 結論

ローラ転圧コンクリート工法におけるコンクリートの締固め機構および施工管理方法に関して、種々の配合、締固め条件による現場転圧試験を実施し、次のような結論を得た。

- (1) ブルドーザでの撒き出しによってコンクリート密度は最小と考えられる $2.0t/m^3$ から $2.35\sim 2.40t/m^3$ に増加し、密度増加という点ではブルドーザの締固め効果は大きい。しかし、ブルドーザによる締固めの大部分は強度の増加の小さい密度範囲の締固めであるため、ブルドーザによる撒き出しのみでは強度が $60\sim 100kgf/cm^2$ であり必ずしも十分ではない。
- (2) ブルドーザによる撒き出し後の振動転圧では、密度は $2.35\sim 2.40t/m^3$ から $2.45\sim 2.49t/m^3$ へと増加する。この増加量は、ブルドーザ撒き出し時の密度増加量に比べ小さいが、強度が急激に増加する密度範囲の締固めに相当し、十分な強度を確保するためには振動転圧は欠くことができない。また、ブルドーザで薄層に撒き出した場合は、振動ローラによる締固め効果は、下層まで及び、硬化後のコンクリートは全層に渡って所定の強度を発現している。一方バックホウによって撒き出した75cm層を振動ローラによって締固めたときには、上層は締固められ所定の密度・強度が得られるが、下層は密度・強度が小さい。すなわち振動ローラ転圧前の密度(初期密度)を一定値以上にしておくことが一様なコンクリートを得る上で重要である。
- (3) 硬化したローラ転圧コンクリートにおいて、密度と圧縮強度の相関は極めて強く、密度の高いコンクリートを打設することが、良質のコンクリートを製作することになる。コンクリートの密度の増加に伴う圧縮強度の増加過程は、最小密度から $2.35tf/m^3$ までの間は本試験の配合では、零から $50kgf/cm^2$ 程度の増加と推定され、密度が $2.35t/m^3$ を越えると密度の増加に伴い強度は急激に増加する。
- (4) コンクリートの締固めに関する管理項目としては、ブルドーザによる撒き出し後のコンクリート密度、振動転圧終了後のコンクリート密度、撒き出し層の層厚および撒き出し後から振動転圧終了までの間のコンクリートの沈下量の4項目とするのが適当と考えられる。密度に関する管理基準値は、表面部密度と内部密度との関係および密度と強度との関係を考慮して決めねばならない。また、RI密度計によって密度を測定する場合には、撒き出し直後および振動

転圧初期において測定値が実際の密度よりも低くなる可能性があるため、予備試験を十分実施すべきである。撒き出し層の層厚および撒き出し後から振動転圧終了までの間の沈下量は、施工管理の有力な指標のひとつであるが、沈下量のみから締固め度を判定することはできない。

- (5) 試験施工において、非接触型変位計およびボーリングコア採取によって施工工程の進行に伴うコンクリートの沈下量、密度変化、強度変化を撒き出し層ごとに調べることは、有効な方法であり、これらの結果は管理基準値を定めることに役立つ。
- (6) 合理的な締固めをおこなうためにコンクリート中のペースト量は、骨材のみを最大限締固めた場合の骨材間の空隙を充填するのに必要な量よりもやや多い量(ペースト空隙比が1.05程度)が適当である。

4 配合決定から施工管理までの設計施工手法の提案

今回実施した、ローラ転圧コンクリートの室内試験および現場転圧試験によって得られた結論は先に示した通りであるが、これらの結論よりローラ転圧コンクリートの配合決定から施工管理までの一連の設計施工について以下に示すような手法を提案する。

- (1) ローラ転圧コンクリートの配合設計にあたっては、水セメント比を定め、骨材間の空隙に着目した、細骨材率およびペースト量をパラメータとした締固め試験を実施する。
- (2) 骨材のみの締固め試験よりコンクリートの最適細骨材率を推定したうえで種々の細骨材率によるコンクリートの締固め試験を行い最適細骨材率を定める。
- (3) 最適細骨材率が定まったなら、種々のペースト量によるコンクリートの締固め試験を行いコンクリートの最適ペースト量を定める。
- (4) ローラ転圧コンクリートのコンシステンシーの管理は、VC試験により行う。
- (5) 試験施工では、各施工工程にともなうコンクリートの層別沈下量、密度、強度などを測定し、配合の確認や転圧条件の決定のほかに締固めに関する施工管理基準値(密度)を定める。
- (6) 締固め度の判定は表面部の密度でおこなう。なお、ブルドーザによる撒き出し後のコンクリート密度についても管理する必要がある。

5. あとがき

本論文は、まえがきで述べたようにローラ転圧コンクリートの締固めについて、主としてフィルダムにおける締固めの視点から実験結果をとりまとめたものである。ローラ転圧コンクリートの設計施工においては、従来のコンクリート工学が基本となっているが、筆者らのとりまとめが、少しでも役に立てば望外の喜びである。

謝辞

今回の試験を実施するにあたり北海道開発局美利河ダム建設事務所および福島県真野ダム建設事務所の関係各位をはじめ、計測に同行されたフィルダム研究室安田成夫氏をはじめ元フィルダム研究室部外研究員荒川昭治氏、弘中義昭氏には多大な御協力を得たことを記し、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (財)国土開発技術研究センター「RCD工法によるダム施工」昭和56年7月。
- 松永憲佳、坂田俊之、「島地川ダム RCD コンクリートの施工と管理」ダム日本、No.440、昭和56年6月。
- 伴登義「大川ダムマットコンクリートの設計・施工」ダム日本、No.440、昭和56年6月。
- 佐藤勝三、南勲「RCD工法によるコンクリートの施工〈新中野治水ダム減勢工基礎部〉」ダム日本 No.440、1981、6。
- 松本徳久、渡部和夫、岩田充弘、小川優、「コア材転圧時の変位計測と機種による転圧特性の比較」土木研究所資料第2181号、昭和60年3月。
- 松本徳久、渡部和夫、岩田充弘、小川優、「コア材の転圧に伴う内部変位と密度に着目した現地試験」ダム技術、Vol.3-3、昭和60年5月。
- 松本徳久、渡部和夫、岩田充弘、小川優、「粗粒材料の密度試験に関する実験的検討」土木研究所資料第2233号、昭和60年7月。
- 松本徳久、佐谷靖郎、志賀三智、「RCD コンクリートの現場転圧試験」土木学会論文集No.391/VI-8、1988年3月。
- (財)国土開発技術研究センター「RCD コンクリート設計施工指針(案)」昭和54年8月。
- 中原康、横田慎一、平田重信「超硬練りコンクリートの配合の考え方とコンシステンシー」セメント・コンクリート、No.384、昭和54年2月。
- M.R.H. DUNSTAN "A method of design for the mix proportions of roller-compacted concrete to be used in dams" 15th ICOLD, LAUSANNE, 1985, Q.57-R.41 p.713-738.
- ACI Committee 207 "Roller Compacted Concrete" ACI Journal, July-August 1980.
- 嶋津晃臣、見波潔、足立賢一「RCD コンクリートの締固め実験」土木研究所資料第1980号、昭和58年3月。
- 栗田守郎、奥村忠彦、林亮、小野定、嶋田洋「RCD コンクリートの締固め性状に関する一研究」清水建設研究所報第38号、昭和58年10月。
- 足立敏之、臼井加悦「リフト層 1 m による玉川ダム RCD 工法の施工」ダム技術、vol.3-4、昭和60年10月。
- 松本徳久、弘中義昭、小川優「RCD コンクリートの転圧機構に関する調査」土木研究所資料第2397号、昭和61年9月。

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年10月

松本徳久, 佐谷靖郎, 志賀三智

要 旨:

わが国では、いくつかの重力式コンクリートダムがRCD工法により建設されており、コンクリートダムの新しい施工法として世界から注目されている。RCD工法は超固練りコンクリートをブルドーザで薄層に撒き出し、振動ローラで転圧して固める方法であり、RCD工法が現在の形に至る過程においては、いくつかの新技術が生まれている。その中で本論文では、RCDコンクリートのようなローラ転圧コンクリートの配合決定方法、ローラ転圧工法における転圧機構の解明、施工管理において設計上必要なコンクリートとしての転圧がなされているかどうかの決定方法の3点について室内試験、現場転圧試験を行った結果をとりまとめたものである。

室内試験では、種々の単位水量、細骨材率におけるコンクリートの密度試験および圧縮強度試験を行った。室内試験においてローラ転圧コンクリートを締固める方法としては振動台による方法がよく用いられているが、個々の試験機によって結果に差が生じる、締固めエネルギーの評価が容易ではない、等の理由から試験結果の評価方法が確立されていないのが現状である。そこで、密度試験においてコンクリートの締固めには、従来用いられている振動台による方法の他に、フィll材料に対して用いられている突固めによる方法でも行った。

現場転圧試験では、種々の単位水量、転圧条件におけるコンクリートの施工時の撒き出し層ごとの密度と変位量の測定を行った。RCDコンクリートの転圧に対しての施工管理は、リフト単位での変位量とリフト表層部でのRI密度計による密度測定とによって行われているが、転圧に伴うコンクリート内部の密度変化および変位量については明らかにされていない。そこで今回の現場転圧試験では、密度については、RI密度計、砂置換法、ボーリングコアによる方法で測定を行い、変位量の測定には、相互インダクタンスを利用した非接触型層別変位計（ソイルストレインゲージ）を用いた。

これらの実験結果をもとにして、一連の施工段階におけるローラ転圧コンクリートの転圧機構を明らかにするとともに、ローラ転圧コンクリートの施工管理方法、さらには配合決定方法に関しての提案もあわせて行った。

Comaction Characteristics of Roller Compacted Concrete

Report of PWRI
Vol.178, Oct.1988

by **Norihisa Matsumoto**
Yasuo Satani
Minori Shiga

Synopsis :

Roller Compacted concrete is no-slump concrete with very small amount of water, and is compacted by using vibratory roller. The authors have conducted the laboratory and field tests to find the rational methods to determine the design mix of roller compacted concrete. The results of laboratory compaction tests show that there exists the optimum fine aggregate ratio which gives the maximum density in the compaction tests of aggregates without cement paste, and also exists the optimum cement paste content which gives the maximum density under the optimum fine aggregate ratio. The ratio of optimum cement paste volume to the void volume of the aggregate compacted to maximum density is equal to or slightly larger than 1.0. These results were confirmed also by the field compaction tests.

Field experiments on the compaction for roller compacted concrete have been conducted to investigate its compaction mechanism. In these tests, no slump concrete with poor cement content was spread in 18 to 25 cm layers by bulldozers, and three layers were compacted in 54 to 75 cm lifts by vibratory rollers. Non-contact type displacement devices were embedded at the top of each bulldozer spread layer to measure the internal displacement during bulldozer spreading and vibratory roller compacting. Density and unconfined compressive strength were tested for the drilled core specimen obtained from hardened concrete. From these test results, several conclusions were drawn on the (1) effects of bulldozer and vibratory roller on the compaction of roller compacted concrete, (2) the procedure to determine the most suitable quantity of cement paste content in the design of mix proportion and, (3) field quality control method for compaction.

土木研究報告第178号

昭和63年10月25日発行

発行 建設省土木研究所
〒305 茨城県つくば市大字旭1番地
電話 0298 (64) 2211

印刷 日青工業株式会社
〒105 東京都港区西新橋2-5-10
電話 03 (501) 5151

本研究報告より転載又は複製する場合は、前もって
建設省土木研究所情報資料課に連絡のうえ、許可を
得てください。

Report
of
Public Works Research Institute
Ministry of Construction

Vol. 178, Oct. 1988

CONTENTS

Compaction Characteristics of Roller Compacted Concrete	Norihisa Matsumoto Yasuo Satani Minori Shiga
--	--
