

土木研究所資料

RCD工法によるコンクリートダムの 設計上の諸問題に関する考察

平成元年1月

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室

「Copyright © (1988) 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 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、複製は、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。」

R C D工法によるコンクリートダムの 設計上の諸問題に関する考察

ダム部ダム構造研究室 室長 永山 功
研究員 渡辺 和夫
(前)研究員 田中 靖
研究員 大槻 英治
小林 政登

要 旨

近年、コンクリートダムの施工の合理化を目指して各種の工法が研究、開発されている。その一つにR C D (Roller Compacted Dam-Concrete) 工法がある。R C D工法とは、超硬練り貧配合コンクリートをダンプトラックなどによって運搬し、これをブルドーザーで撒き出し、振動ローラーで締め固めるコンクリートダムの新しい施工法である。本報文は、R C D工法における設計上の諸問題のうち、R C D用コンクリートの配合特性と強度特性、温度応力と温度規制、水平打継目の強度とその設計上の取扱いについて検討した結果をとりまとめたものである。

キーワード：R C D工法，R C D用コンクリート，配合設計，温度応力，温度規制，水平打継目，圧縮強度，せん断強度

目 次

1. は じ め に	1
2. R C D工法の概要	2
2.1 ローラー転圧コンクリートダムの歴史的背景	2
2.2 日本におけるR C D工法の発達	3
2.3 諸外国における同様な施工	8
2.3.1 超貧配合コンクリートを用いた施工法	8
2.3.2 フライアッシュ高含有コンクリートを用いた施工法	10
3. R C D用コンクリートの配合	12
3.1 R C D用コンクリートの配合設計	12
3.2 R C D用コンクリートの配合特性	14
3.2.1 概 説	14
3.2.2 V C値に影響を及ぼす要因	14
3.2.3 R C D用コンクリートの密度と強度	19
3.3 結 論	30
4. 堤体コンクリートの温度規制	35
4.1 R C D工法における温度規制の位置付け	35
4.2 コンクリートダムにおける温度応力の解析法	35
4.2.1 体積変化の拘束と温度応力	35
4.2.2 H / L理論	36
4.2.3 拘束度マトリクス	37
4.3 R C D工法における温度応力の特性	40
4.3.1 ダムの規模と拘束温度ひずみ	40
4.3.2 最高拘束温度ひずみに影響を及ぼす因子	42
4.3.3 最適打設開始時期	45
4.4 結 論	46
5. R C D用コンクリートの設計強度	47
5.1 ダムの構造的安定性に関する要件	47
5.2 コンクリートの破壊規準	47
5.2.1 コンクリートの破壊規準に関する諸説	47

5.2.2	ダム工学におけるコンクリートの破壊理論	48
5.3.	コンクリートの設計強度	49
5.3.1	圧縮強度に対する安全率とせん断強度に対する安全率の関係	49
5.3.2	Henny の式の意味	51
5.3.3	水平打継目に要求されるせん断強度	51
5.4	コンクリートのせん断強度の試験例	52
5.5	結 論	58
6.	あ と が き	59

1. はじめに

RCD工法とは、貧配合超硬練りのコンクリートを振動ローラーによって締め固めるコンクリートダムの新しい施工法で、コンクリートダムの建設の合理化（経済性、省力化）を目指して、建設省が世界に先駆けて開発した施工法である。既にRCD工法を用いて6ダムが完成（堤体コンクリートの打設完了）し、7ダムで堤体コンクリートを打設中である（1988年12月現在）。また、RCD工法を計画しているダムは、既に発注済みのものを含めて9ダムに及んでいる。

RCD工法は、1978年に島地川ダムにおいて初めて採用されて以来、その後、細部にわたって多くの改良がなされ、1987年の玉川ダムの完成（堤体コンクリートの打設完了）によって技術的に体系化された工法として確立するに至り、またこれによって世界的にも高い評価を得ている。

しかし、RCD工法は本質的に多様性に富む工法であり、今後も発展すべき余地を数多く残している。また、設計面での合理化の推進も今後の課題であり、これによって、一層の省力化、経済性の追求が期待されている。

本報文では、RCD工法によるコンクリートダムの設計の現状を紹介するとともに、RCD工法の今後の課題について考察を加える。

2. RCD工法の概要

2.1 ローラー転圧コンクリートダムの歴史的背景

ローラー転圧コンクリート^{x1)}によるコンクリートダムの施工は、ここ10年の間に急速に発展してきた概念であるが、ローラー転圧コンクリートの概念そのものは、転圧コンクリート(rolled concrete)として、古くから道路や飛行場の舗装に利用されてきている。特にイギリスでは、1940年代より貧配合コンクリート(lean concrete)または超貧配合コンクリート(dry lean concrete)と呼ばれ、路盤材として広く用いられてきた¹⁾。

重力ダムにローラー転圧コンクリートを利用することが提案され始めたのは、1970年頃のことであり、例えば、Patonは、第10回 ICOLD大会(1970)²⁾の中で、「重力ダムの内部コンクリートに、舗装などに用いられている超貧配合コンクリート(dry lean concrete)を用いれば、経済的なダムが造れる」ことを述べている。また、Raphaelは、“The Optimum Gravity Dam”(1970)³⁾の中で、「掘削したままの材料をセメントで固化させれば、フィルダムの断面勾配を急にすることができる」ことを述べている。さらに、Cannonは、“Concrete Dam Construction using Earth Compaction Method”(1972)⁴⁾、“Compaction of Mass Concrete with Vibrating Roller”(1974)⁵⁾の中で、Tims Fordダムで行われたローラー転圧試験結果(1970)について報告している。また、第11回 ICOLD大会(1973)では、「急速かつ経済的な施工に関する新しいアイデア」という課題が選択され、22題の論文が提出されている。ここで、Moffatは“A Study of Dry Lean Concrete Applied to the Construction of Gravity Dams”⁶⁾の中で、「イギリスの高速道路で用いられている超貧配合コンクリート(dry lean concrete)を重力ダムの施工に使用する」ことを提案している。

RCD工法の開発に先立つ重要な出来事は、イタリアにおけるAlpe Geraダム(1961-1964)の急速施工である⁷⁾。このダムはローラー転圧によるダムではないが、コンクリート(最小単位セメント量 $C = 115 \text{ kg/m}^3$)はインクラインとダンブトラックによって運搬され、トラクター後部に取り付けられた内部振動機によってリフト厚さ70cmに打設されている。また、施工は全面レヤ打設によって行われ、横継目は振動目地切り機で切断して作製されている。なお、ダム堤体の止水性は、上流面を鉄板で覆うことにより確保されている。

また、パキスタンのTarbelaダムでは、洗掘された洪水吐きの基礎岩盤の補強工事(1975, 1977)にローラー転圧コンクリートが用いられ、日平均打設量 $5,200 \text{ m}^3$ という急速施工によって、 $518,000 \text{ m}^3$ のコンクリートが打設されている(1977)⁸⁾。一方、台湾の石門ダムの仮締切りダム(1960)では、遮水ゾーンの材料としてローラー転圧コンクリートが用いられている⁹⁾。

〔脚注1〕 我が国ではRCD(Roller Compacted Dam-Concrete)用コンクリート、また諸外国ではRCC(Roller Compacted Concrete)、ロールクリート(Rollerete)などと呼ばれているが、本章では混乱を避けるため、この名称で統一することにする。

2.2 日本におけるRCD工法の発達

日本におけるRCD工法の発達は、1974年に、建設省によって「コンクリートダム合理化施工検討委員会」が設置されたのを契機とする。ここでは、

- ① 人件費の上昇に伴い、構造設計面の工夫よりダムの堤体積を削減するような経済性の追求（例えば、アーチ式コンクリートダムや中空重力式コンクリートダムの建設）が困難となり、施工面の工夫よりダムの堤体コンクリートの単価を節減するような経済性の追求がより有利と考えられるようになったこと
- ② ダムの基礎岩盤の地質条件が悪くなり、また地形的に恵まれたダムサイトが数少なくなってきたことから、重力式コンクリートダムの安定性を確保するために必要なダムの堤体積が次第に大きくなり、施工面からの経済性の追求が必要になってきたこと

などを背景に、

- ① 人件費の削減を目指し、機械化施工を図ること
 - ② 施工の効率化を図るため、汎用性の高い機械を利用すること
 - ③ ダムサイトの特性、ダムの規模に即した施工法を開発すること
- を基本的な柱として、調査研究が進められた。

その結果、超硬練り貧配合のコンクリートを振動ローラーで締め固める施工法が採用され、1976年には大川ダムの上流仮締切りダムで $10,000\text{m}^3$ のコンクリートが振動ローラーによって施工された¹⁰⁾。続いて1978年には、島地川ダムのテストピットにおいて同様な試験が実施され、ローラー転圧コンクリートをダムに適用することが可能であると判断された¹¹⁾。

この結果、1978年9月、島地川ダム（堤高 $H = 89\text{m}$ 、堤体積 $V = 317,000\text{m}^3$ ）において、世界で初めて堤体コンクリートが振動ローラーによって打設された。島地川ダムの施工法は、図-1に示すように、13.5tの固定式ケーブルクレーンでコンクリートを堤外運搬し、ダム堤体に設置された移動式ホッパーでコンクリートを仮受けした後、11tダンプトラックによりコンクリートを堤内運搬し、7tの振動ローラーでコンクリートを締め固めるものである¹¹⁾（写真-1～写真-4参照）。同様な施工は、1979年7月、大川ダムのマット部（ $V = 300,000\text{m}^3$ ）でも施工された¹⁰⁾。

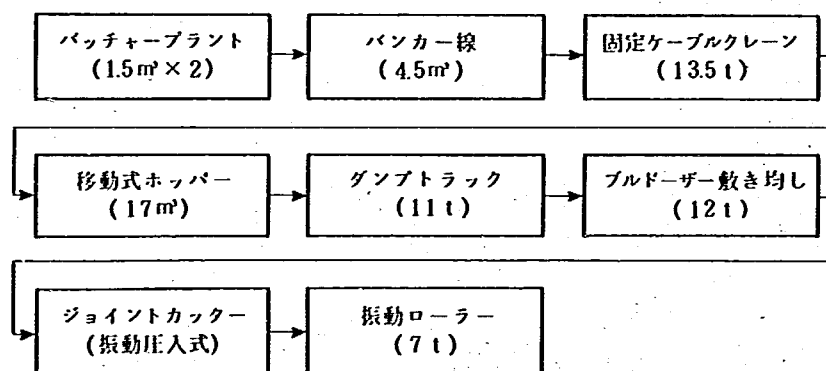
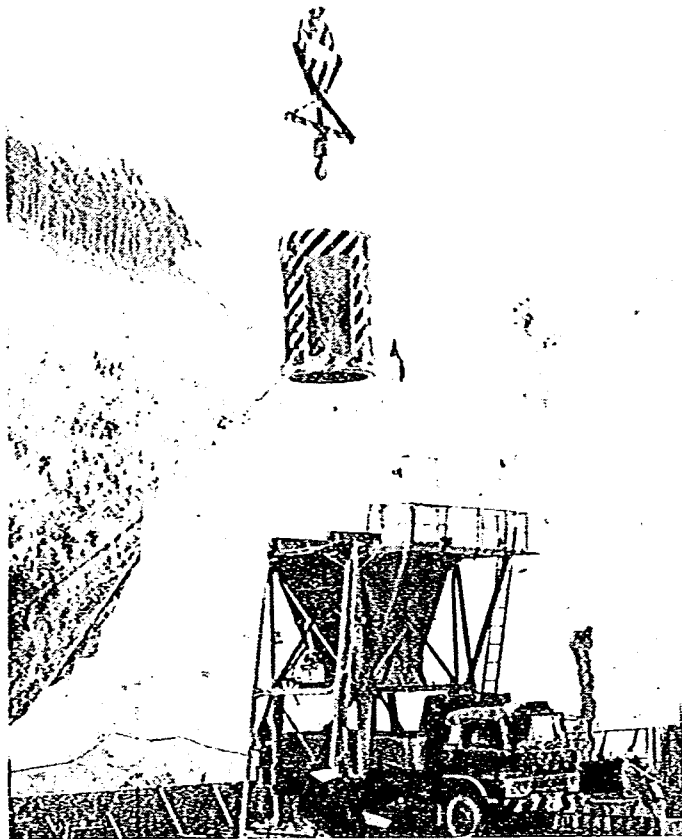
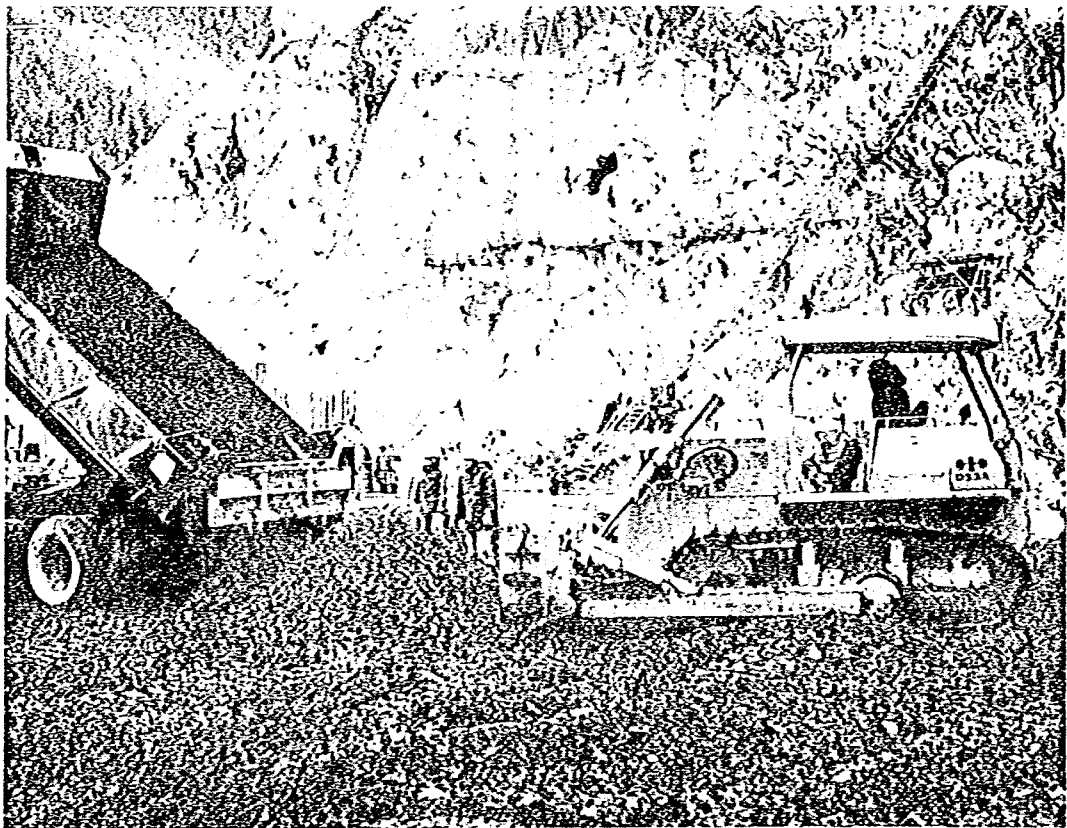


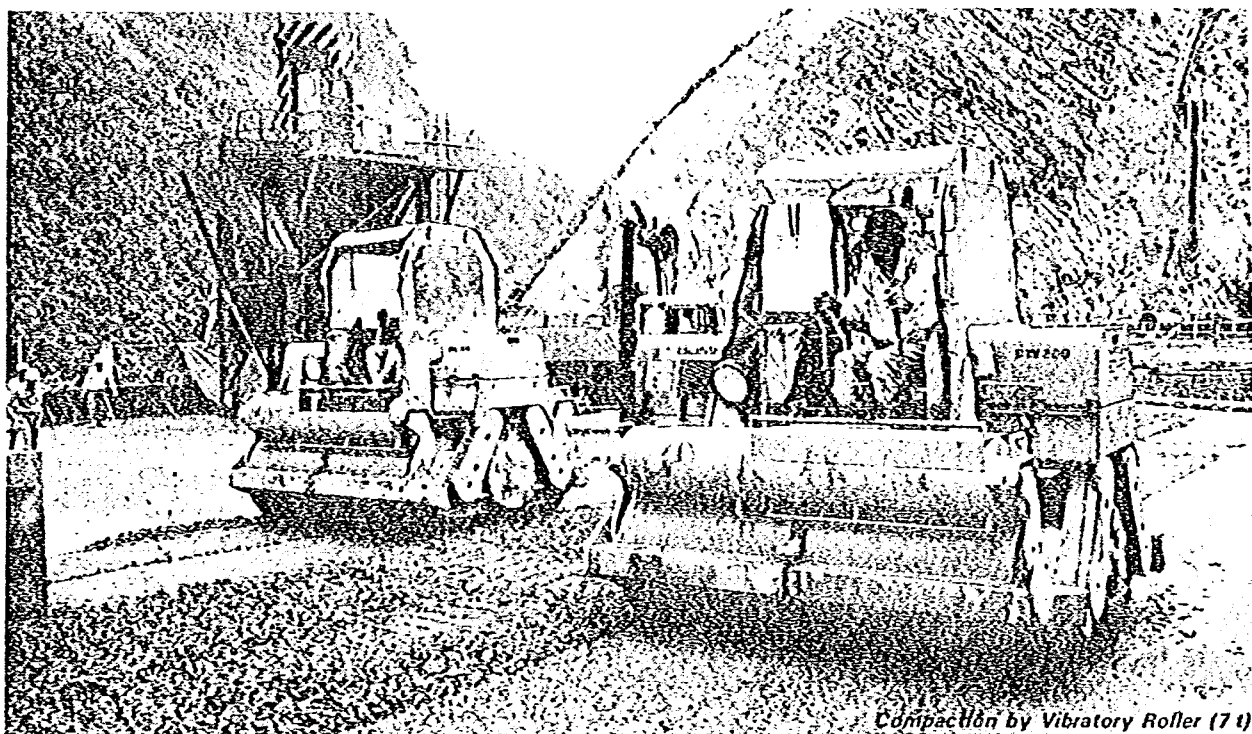
図-1 島地川ダムにおけるコンクリート打設のフロー



写真－１ 固定ケーブルクレーンと移動式ホッパー



写真－２ ブルドーザーによるＲＣＤ用コンクリートの撒き出し



Compaction by Vibratory Roller (7 t)

写真-3 振動ローラーによるRCD用コンクリートの締め固め

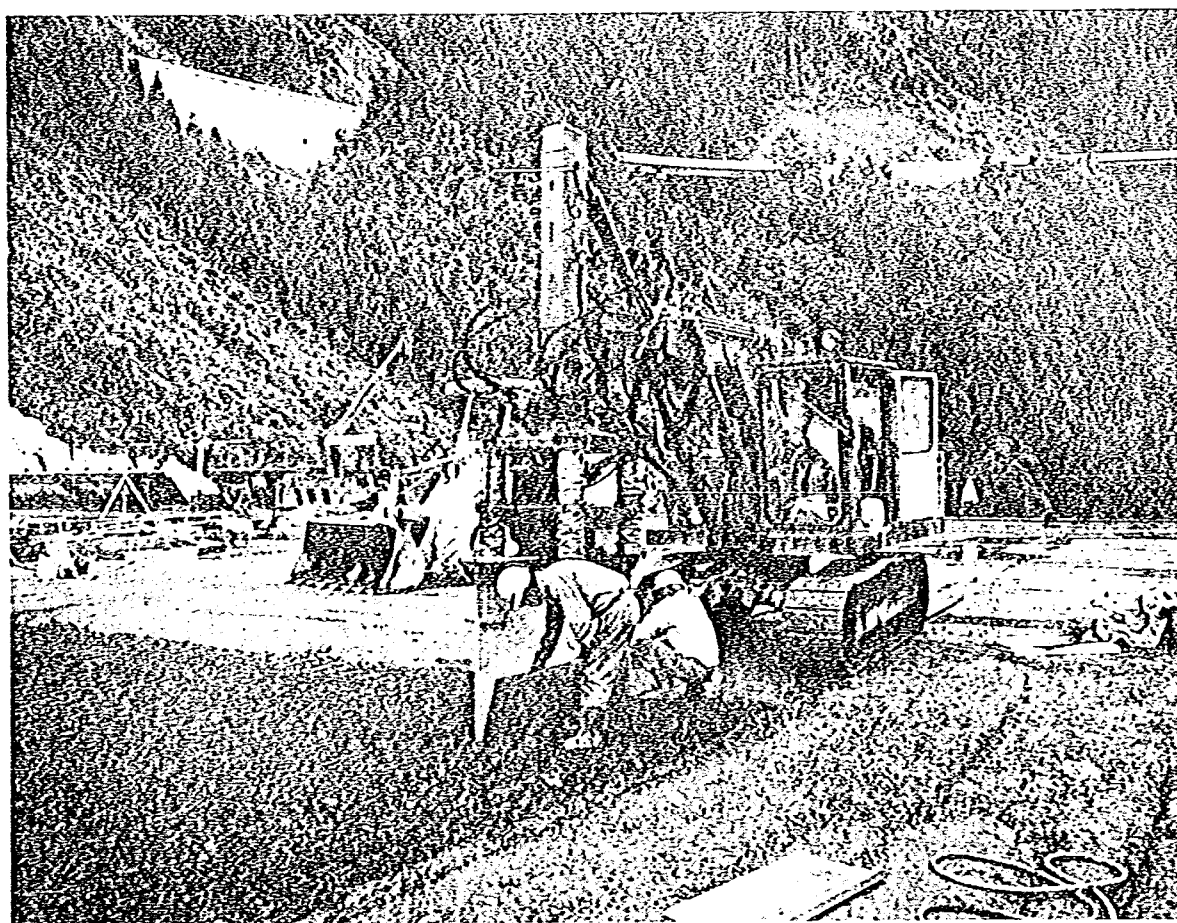


写真-4 振動目地切り機

大川ダムでは、コンクリートはパッチャープラントから打設面までダンプトラックで直送された。これらの施工は、1980年成功裡のうちに完了し、島地川ダムは世界で最初のローラー転圧コンクリートダムの榮譽を得るとともに、その施工法の優秀性が立証された。この工法は、RCD (Roller Compacted Dam-Concrete) 工法と名付けられた。続いて、RCD工法は、新中野ダムの嵩上げ工事における洩勢工のコンクリート ($V = 13,000 \text{ m}^3$) 打設にも利用された¹²⁾。

1983年9月、RCD工法は玉川ダム ($H = 100 \text{ m}$, $V = 1,150,000 \text{ m}^3$) に適用された。玉川ダムでは、図-2のように、 9 m^3 のインクライン2基を用いてコンクリートの堤外運搬を行い、堤内では20tダンプトラックでコンクリートを運搬し、7t級の振動ローラーで締め固めを行った¹³⁾ (写真-5, 写真-6参照)。玉川ダムのコンクリート打設は1987年に完成した。

RCD工法は、次のような施工上の特徴をもっている。

- ① コンクリートの単位セメント量は $120 \sim 130 \text{ kg/m}^3$ 程度、単位水量は $95 \sim 105 \text{ kg/m}^3$ 程度、細骨材率は $30 \sim 32\%$ 程度とする。
- ② コンクリートの堤外運搬は、ダムサイトの特性を考慮して適切な運搬設備を採用するが、堤内運搬はダンプトラックによって行う。
- ③ コンクリートは、ブルドーザーによって1層 $18 \sim 27 \text{ cm}$ の薄層に撒き出し、振動締め固め後に $50 \sim 75 \text{ cm}$ のリフトを形成する。
- ④ コンクリートは7t級の振動ローラーで締め固め、転圧回数は、 $50 \sim 75 \text{ cm}$ リフトに対してそれぞれ6~12回程度とする。
- ⑤ コンクリートの打設は拡張レヤ方式とし、縦継目は設けず、横継目は15m間隔に振動目地切り機を用いて設置する。
- ⑥ 上下流面付近には、外部コンクリートとして従来コンクリートを打設する。
- ⑦ 打継目にはモルタルを敷き均す。

現在、RCD工法は、前述の島地川、大川、新中野、玉川ダムをはじめとして、真野、美利河、白水川、朝日小川、朝里、境川、道平川、布目、神室ダムの13ダムで採用されている。これらのダムの概要を表-1に示す。

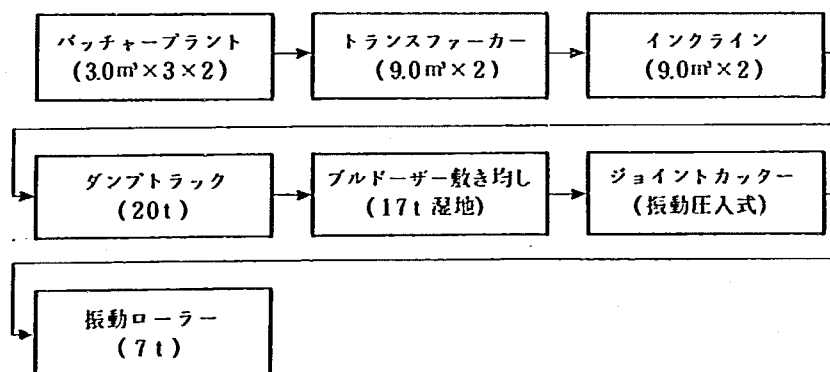


図-2 玉川ダムにおけるコンクリート打設のフロー

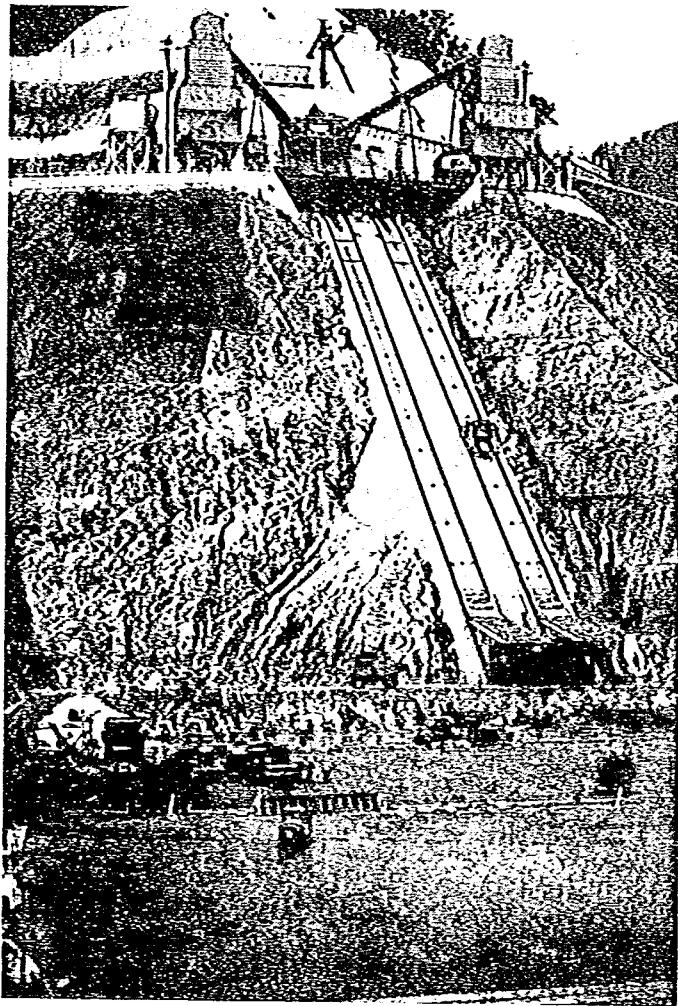


写真-5 RCD用コンクリート運搬用のインクライン

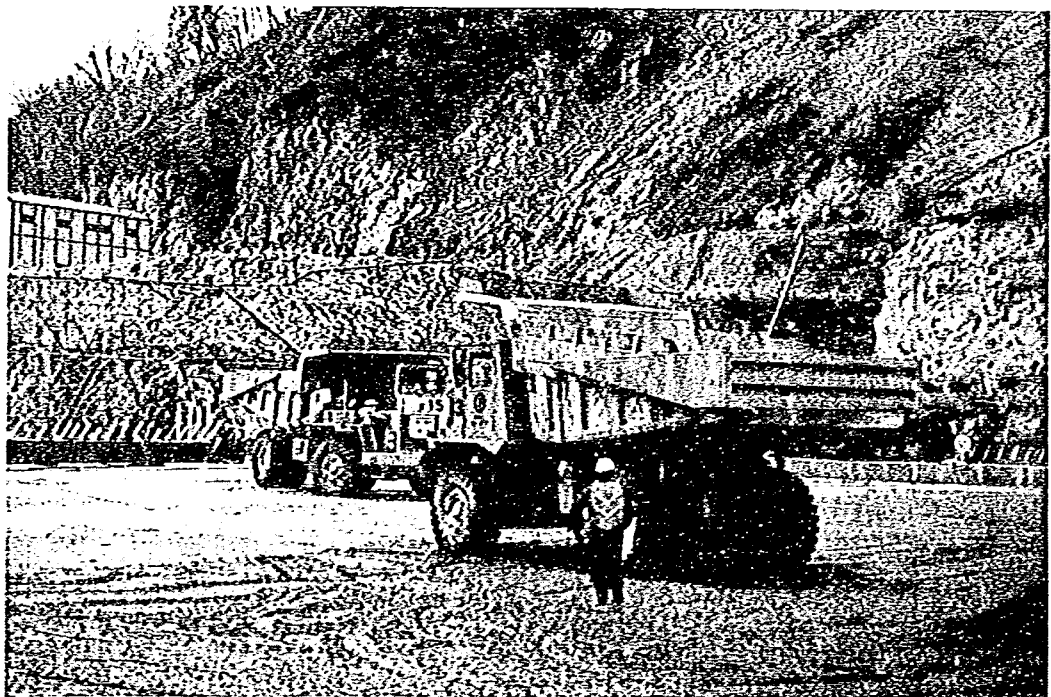


写真-6 20 tダンプトラックによるRCD用コンクリートの運搬

表-1 日本におけるRCD工法によるコンクリートダムの施工実施例

ダム名	所 管	堤高 (m)	堤 頂 長 (m)	堤 体 積 (m ³)	運 搬 方 法
島地川ダム	中国地建	89.0	240.0	317,000	固定ケーブルクレーン (13.5t)ダンプ運搬(11t)
新中野ダム ^{*)}	北海道	74.9 (53.0)	248.0 (162.0)	減勢池部 276,400 13,000	ダンプ運搬(11t) RCD工法は減勢池部のみ
大川ダム	北陸地建	75.0	406.5	1,000,000 マット部 300,000	ダンプ運搬(11t) RCD工法はマット部のみ
玉川ダム	東北地建	100.0	441.5	1,154,000	インクライン(9m ³ ×2) ダンプ運搬(20t)
美利河ダム	北海道 開発局	40.0	コンクリート 1,480 フィル 910 570	コンクリート 870,000 フィル 360,000 510,000	ダンプ運搬(11t)
真野ダム	福島県	69.0	239.0	218,000	インクライン(3m ³) ダンプ運搬(8t)
白水川ダム	山形県	54.5	367.0	315,000	ダンプ運搬(11t)
朝日小川ダム	富山県	84.0	262.0	350,000	ダンプ運搬(8t)
朝里ダム	北海道	73.9	390.0	484,000	ダンプ運搬(11t)
道平川ダム	群馬県	70.0	300.0	346,000	インクライン(6m ³) ダンプ運搬(8t)
境川ダム	富山県	115.0	297.5	712,000	インクライン(4.5m ³ ×2) ダンプ運搬(11t)
布目ダム	水資源 開発公団	72.0	360.0	370,000	ダンプ運搬(11t)
神室ダム	山形県	60.6	257.0	298,000	インクライン(4.5m ³) ダンプ運搬(11t)

注釈 *) 新中野ダムは再開発ダムであり()内の数値は旧堤体のものである。

また、国外においても、中国の観音閣ダムにおいてRCD工法が採用されることになり¹⁴⁾、アメリカの陸軍工兵隊(Corps of Engineers)のElk CreekダムにおいてもRCD工法の特徴が反映されるなど¹⁵⁾、RCD工法は世界的にも高く評価されている。

2.3 諸外国における同様な施工

RCD工法と同様な施工法は、諸外国でも検討されている。これらの工法は、その特徴から3つに大別することができる。

- ① 日本のRCD工法に代表される貧配合コンクリートを用いた施工法
 - ② アメリカのRCC(Roller Compacted Concrete)ダムに代表される超貧配合コンクリートを用いた施工法
 - ③ イギリスのCIRIA(Construction Industry Research and Information Association)の研究に代表されるフライアッシュ高含有コンクリートを用いた施工法
- ①については既に述べたので、ここでは②、③の工法について略述する。

2.3.1 超貧配合コンクリートを用いた施工法

超貧配合コンクリートを用いた施工法は、アメリカの陸軍工兵隊(Corps of Engineers)を中心に検討された。この施工法によって造られたダムはRCCダムと呼ばれる。その代表例は、

1982年に完成したWillow Creekダム ($H=52\text{ m}$, $V=330,000\text{ m}^3$)である¹⁶⁾。このダムにおけるコンクリート中の単位結合材量は 67 kg/m^3 で、そのうち 19 kg/m^3 がフライアッシュである。これはRCD用コンクリートの単位結合材量 $120\sim 130\text{ kg/m}^3$ と比較すると極端に少ない。

このダムは洪水調節を目的とするダムで、常時の貯水を目的としていないことから、コンクリートの品質低下を許容して徹底した経済性の追求が行われている。施工上の特徴を述べると次のとおりである。

- ① コンクリートの堤外運搬はベルトコンベヤ、堤内運搬は底開き式スクレーパーで行う。
- ② コンクリートは、振動ローラーによって1層 30 cm に締め固め、打継面にはモルタルを敷かず連続打設を行う。
- ③ 上流面にはコンクリートパネルを型枠として利用し、また下流面には型枠を設けない。また、外部コンクリートは設けず、全てローラー転圧コンクリートを用いて施工する。
- ④ 超貧配合コンクリートのため、温度ひび割れを防止するための横継目は一切設けない。
- ⑤ 堤体内の通廊は、ローラー転圧コンクリートの打設時に砂利を用いて成形しておき、後にこれを掘削除去して作製する。
- ⑥ 骨材は予め製造して貯蔵しておく。

Willow Creekダムでは、堤体積 $330,000\text{ m}^3$ のコンクリートをわずか6カ月の間に打設し、その施工の急速性と経済性を示した。しかし、洪水後のダムには、毎分 8000 l の漏水が生じ、堤体内に大規模なグラウチングが実施された¹⁷⁾。このような漏水の原因は、次のような理由によるものと考えられる。

- ① コンクリート中のペースト量が十分でなく、また転圧が粗雑であったこと
- ② 打継目にモルタルが敷かれなかったこと
- ③ 上流面まで全てローラー転圧コンクリートが用いられ、その十分な転圧が行われなかったこと
- ④ 横継目が設置されず、温度ひび割れが生じたこと

その後、いくつかの改良が加えられ、Winchesterダム、Middle Forkダム、Gallesvilleダムなど多くのダムが完成している¹⁸⁾。これらのダムでの改良点は、次のとおりである。

- ① コンクリートの配合を富配合にしてきたこと（例えば、Gallesvilleダムでは、単位結合材量としてセメント 57 kg/m^3 、フライアッシュ 52 kg/m^3 を用いた）
- ② 堤体上流面付近に、フェーシングコンクリートとして従来コンクリートを施工するようになったこと
- ③ 上流面に止水膜を施工するか、グループを設けて止水材を充填するようになったこと
- ④ コンクリートの撒き出し機械を改良し、材量の分離に注意するようになったこと
- ⑤ 上流面付近の打継目に、富配合のベッティングコンクリートを敷くようになったこと

しかし、このような方法は必ずしも完全なものでなく、いくつかのダムで多量の漏水が観測さ

れている。

このような反省から、工兵隊では第二世代のRCCダムとして、Elk Creekダムにおいて新しい方法を採用した¹⁵⁾。ダムは環境問題から施工を中断して現在に至っているが¹⁹⁾、ここでは、日本のRCD工法の経験を多く採用している。すなわち、次のような点である。

- ① コンクリート中の単位結合材量を、セメント 70kg/m^3 、フライアッシュ 33kg/m^3 と富配合にしたこと
- ② 上流面に型枠を設置し、富配合の従来コンクリートを打設したこと
- ③ 1リフトを60cmとし、これを薄層撒き出しによって2層に撒き出し、材料の分離を防ぐとともにブルドーザーによる転圧効果を期待したこと
- ④ 打継目を清掃し、モルタルを敷いたこと
- ⑤ 間隔は40~100m前後と粗いが、振動目地切り機により横継目を設けたこと

このようにアメリカのRCCダムにおいても、日本のRCD工法と同様な施工法が採用されるようになってきており、単に経済性の追求だけでなく、コンクリートの品質についても重視するようになっている。

2.3.2 フライアッシュ高含有コンクリートを用いた施工法

フライアッシュを高い割合で含んだコンクリートを用いた施工法は、イギリスのCIRIAを中心に開発されてきた²⁰⁾。しかし、イギリスにおいてはダムの建設が活発でないため、このような施工法を用いた最初のダムは、アメリカの内務省開拓局(Bureau of Reclamation)のUpper Stillwaterダム($H=87\text{m}$, $V=1,100,000\text{m}^3$)である²¹⁾。

Upper Stillwaterダムのコンクリートは、結合材料として、セメントを 78kg/m^3 、フライアッシュを 174kg/m^3 含んでいるフライアッシュ高含有コンクリートである。ここでの施工法の特徴を述べると次のとおりである。

- ① コンクリートの堤外運搬はベルトコンベヤ、堤内運搬はダンプトラックで行う。
- ② コンクリートは1層30cmに締め固められ、原則として打継面にモルタルを敷かず連続打設を行う。
- ③ 上下流面にはスリップフォームベイパーを用いてコンクリートを打設し、これを型枠代わりに利用してローラー転圧コンクリートを打設する。
- ④ スリップフォームベイパーを用いて打設したコンクリートが内部のローラー転圧コンクリートの温度ひび割れを防止するため、横継目は設けない(この場合、表面のコンクリートには温度ひび割れを許容している)。
- ⑤ 骨材は予め製造して貯蔵しておく。

Upper Stillwaterダムは、1987年に打設完了しているが²¹⁾、その施工法の妥当性については、今後、ダム貯水池の湛水後の情報を待たねばならない。なお、Upper Stillwaterダムの設計では、開拓局の新しい設計基準に基づき²²⁾、堤体の上流面においてコンクリートの許容応力の範囲

内で引張応力を認める設計を採用している。このため、ダムの下流面勾配は1:0.6と極端な急勾配になっており、設計面での経済性の追求も図られている。

なお、同様な施工法はイギリスのMilton Brookダムでも計画されている²³⁾。

3. RCD用コンクリートの配合

3.1 RCD用コンクリートの配合設計

RCD用コンクリートは、振動ローラーを用いて転圧されるため、超硬練りのコンクリートでなければならない。また、温度ひび割れを防止するため、コンクリート中の単位セメント量をできるだけ小さくしなければならない。これらの特徴から、RCD用コンクリートの配合設計手法は従来のコンクリートとは若干異なったものになる。

RCD用コンクリートの配合設計法の基本的な考え方については、「RCD工法技術指針(案)」²⁴⁾に詳しく述べられている。本指針は現在改訂作業中であるが、ここではその内容を踏まえてRCD用コンクリートの配合設計について述べる。

RCD用コンクリートは超硬練りのコンクリートであるから、従来のスランプ試験によってコンクリートのコンシステンシーを求めることができない。このため、コンシステンシーの測定にはVC試験機を用いる²⁴⁾。VC試験とは、写真-7、図-3、表-2に示すように、まだ固まらないコンクリート供試体に上載荷重を作用させて振動台上で締め固め、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秒数を測定する試験である。この値をVC値と呼んで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²⁴⁾。



写真-7 VC試験機

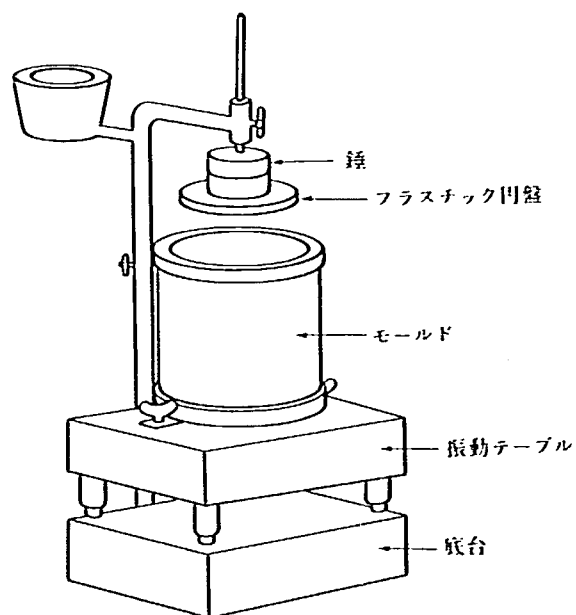


図-3 VC試験機

表-2 VC試験機仕様

部 品	項 目	仕 様
振 動 台	振 動 数	3000 rpm
	振 幅	1.0 mm
容 器	内 径	24 (48) cm
	内 高	20 (40) cm
錘	質 量	20 kg

()は大型試験機

RCD用コンクリートの配合設計は次の手順をとる。

(1) 適切なVC値を得るための単位水量の選定

RCD用コンクリートのVC値は、コンクリート中の単位水量によって大きく変化する。このため、過去の実績を参考にしながら、適当な単位結合材（セメント、フライアッシュ）量、細骨材率を設定し、コンクリート中の単位水量を種々に変化させて、適切なVC値（標準VC試験機を用いた場合で20秒程度）を得るための単位水量を選定する。

(2) 単位結合材量の確認

RCD用コンクリートの単位結合材量は、 120 kg/m^3 以上とするのが一般である。これは、コンクリート中に十分なペースト量を確保するために必要な最小量として認識されている。ここでは、(1)で求められた単位水量から計算される結合材水比がコンクリートの所要強度を得るために十分な値であるかどうかを確認し、必要に応じて単位結合材量を修正する。

(3) 細骨材率の選定

(1)、(2)で求められた単位水量、単位結合材量に対し、細骨材率を種々に変化させて、VC値を最小にするような細骨材率を定める。

(4) 配合の確認

(1)、(2)、(3)で求められた配合に対して、所要のコンシステンシー、強度、密度をもったコンクリートが得られることを確認し、必要に応じて配合を修正する。

従来の指針では、モルタルの単位容積質量試験²⁴⁾がRCD用コンクリートの配合を決定する上で必要な試験として位置づけられていたが、改訂される指針ではこの試験は省略されることになる。これは、以下に述べる2つの係数を用いることによって、上述のような試験で定められたコンクリートの配合は、十分な量のペーストを有していると判断できるためである。

RCD用コンクリートの配合を論じる上で重要な係数に、

① ペーストによる細骨材空隙充填率(α)

② モルタルによる粗骨材空隙充填率(β)

がある²⁵⁾。これらはそれぞれ次式で定義される。

$$\alpha = \frac{W/\rho_W + C/\rho_C + F/\rho_F}{(1/w_S - 1/\rho_S)S}$$

$$\beta = \frac{W/\rho_W + C/\rho_C + F/\rho_F + S/\rho_S}{(1/w_G - 1/\rho_G)G} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

W, C, F, S, G : コンクリート中の水, セメント, フライアッシュ, 細骨材, 粗骨材の
単位量 (kg/m³)

$\rho_W, \rho_C, \rho_F, \rho_S, \rho_G$: 水, セメント, フライアッシュ, 細骨材, 粗骨材の密度 (kg/m³)

w_S, w_G : 細骨材, 粗骨材の単位容積質量 (kg/m³)

である。

α, β が 1 未満であると、理論的にも骨材間の空隙を完全に充填できない。そこで、RCD 用コンクリートの配合は、 α, β がともに 1 に対してある程度余裕をもった値でなければならない。従来の RCD 用コンクリートの配合例では、 α は 1.1 以上、 β は 1.2 以上あり²⁵⁾、一般に VC 値が 20 秒程度となるようにコンクリートの配合を決定すれば、 α, β は自ずと 1 を上回ることになる。

なお、代表的な RCD 用コンクリートの配合を表-3 に示す。

3.2 RCD 用コンクリートの配合特性

3.2.1 概 説

RCD 用コンクリートは、振動ローラーによる締め固めに適した超硬練りの貧配合コンクリートであり、従来のダムコンクリートとは異なった配合特性をもつ。ここでは、神室ダムの配合設計に際して、種々検討した試験項目をもとに RCD 用コンクリートの配合特性について考察する。

3.2.2 VC 値に影響を及ぼす要因

(1) VC 値

VC 値は、RCD 用コンクリートのコンシステンシー、コンパクタビリティを表わす指標である。一般的には、40mm オーバーの骨材をウェットスクリーニングしたコンクリートに対して、標準 VC 試験機を用いて測定した VC 値で 20 秒程度、フルサイズの骨材を用いたコンクリートに対して、大型 VC 試験機によって測定した VC 値で 60 秒程度の場合が、RCD 用コンクリートとして適当とされている。VC 値がこれらの値に比べて大きくなると、コンクリートが硬すぎて振動ローラーによる締め固めが困難になり、VC 値がこれらの値よりも小さくなると、コンクリートが軟らかすぎて振動ローラーによる締め固めが困難になる。

(2) 単位水量, 単位結合材量, 細骨材率

VC 値の大きさに影響を及ぼす要素としては、RCD 用コンクリートの

① 単位水量 (W)

② 単位結合材量 (C + F)

表-3 RCD工法を採用した主要なダムのRCD用コンクリートの配合

ダム名	堤高 (m)	堤体積 (千m ³)	最大 骨材寸 法(mm)	VC値 (秒)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位結合材量 (kg/m ³) C+F	フライアッシュ 混入率(%) F/(F+C)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	セメント種類	骨材種類	AE剤等
島地川	89.0	317	80	15±10	1.5±1	105	130	30	80.8	34	普通 ポルトランド	砕砂・砕石	ボゾリス
新中野	74.9	(13)	80 150	20±10	1.5±1	95 90	120	30	79 75	34 32	中 ポルトランド	砕砂・砕石	ボゾリス
大川	75.0	(300)	80	15±10	1.5±1	102	120	20	85	32	中 ポルトランド	川砂・川砂利	ボゾリス
玉川	100.0	1154	150	20±10	1.5±1	95	130	30	73	30	中 ポルトランド	砕砂・砕石	ボゾリス
美利河	40.0	(360)	80	15±8	1.5±1	90	120	30	75	30	中 ポルトランド	砕砂・砕石	ボゾリス
真野	69.0	212	80	20±10	1.5±1	103	120	20	85.8	33	中 ポルトランド	砕砂・砕石	ボゾリス
白水川	54.5	311	80	20±15	1.5±1	102	120	20	85	31	中 ポルトランド	砕砂・砕石	ボゾリス
朝日小川	89.0	350	80	20±10	1.5±1	94	120	20	78	32	中 ポルトランド	砕砂・砕石	ボゾリス
朝里	73.9	506	80	20±10	1.5±1	103	120	20	85.8	30	中 ポルトランド	砕砂・砕石	
道平川	70.0	348	80	15±10	1.5±1	95	120	20	79.2	31	中 ポルトランド	砕砂・砕石	サンフロー
境川	115.0	626	80	20±10	1.5±1	100	130	30	76.9	32	中 ポルトランド	砕砂・砕石	ボゾリス
布目	72.0	370	150	20±10	1.5±1	95	120	35	79	27	中 ポルトランド	砕砂・砕石	ボゾリス
神室	60.6	298	80	20±10	1.5±1	103	120	20	85.8	32	中 ポルトランド	砕砂・砕石	ヴィンゾル

堤体積：新中野ダムは減勢工部のみ、大川ダムはマット部のみ、美利河ダムはコンクリートダム部のみの値

③ 細骨材率 (s/a)

がある。

図-4～図-6は、RCD用コンクリートの単位水量，単位結合材量，細骨材率を変化させた場合において，これらの諸量とVC値の関係を示したものである。図より次のことがわかる。

- ① VC値に最も大きな影響を及ぼすものは単位水量であり，単位水量が大きくなればなるほどVC値は小さくなる。
- ② 単位結合材量が大きくなればなるほどVC値は小さくなる。
- ③ 細骨材率の場合には，VC値を最小にするような細骨材率が存在する。

RCD用コンクリートの最適配合は，強度，耐久性の面から必要な結合材水比 ($C+F$) / W を確保する範囲で，単位結合材量を最小にするような配合である。したがって，RCD用コンクリートの最適配合を得るには，VC値を最小とするような細骨材率に対して，所要のVC値と結合材水比を得るような単位水量と単位結合材量を決定すればよいことになる。なお，一般の配合設計においては，単位結合材量の下限値を $120\text{kg}/\text{m}^3$ としている。これは，一般に $120\text{kg}/\text{m}^3$ がコンクリート中に十分なペースト量を確保するために必要な最小の結合材量として認識されているためである。したがって，この場合には，単位結合材量を $120\text{kg}/\text{m}^3$ に固定して，VC値を最小とするような細骨材率に対して所要のVC値を得るような単位水量を選定し，結合材水比を確認すればよいことになる。

(3) ペーストによる細骨材空隙充填率，モルタルによる粗骨材空隙充填率

VC値は，RCD用コンクリートに振動を与えることによって，ペーストがコンクリートの表面に浮上してくるまでの時間を表わしている。したがって，VC値の大小は，粗骨材の間の空隙を充填するためのモルタル量，細骨材の間の空隙を充填するためのペースト量の大小，すなわち，

- ① ペーストによる細骨材空隙充填率 (α)
- ② モルタルによる粗骨材空隙充填率 (β)

に関係しているものと考えられる。

いま，RCD用コンクリートの細骨材率を一定とした場合，ペーストによる細骨材空隙充填率とモルタルによる粗骨材空隙充填率是一对一に対応している(式(1)参照)。そこで，RCD用コンクリートの細骨材率を一定とし，単位水量を変化させた場合と単位結合材量を変化させた場合のそれぞれに対して，ペーストによる細骨材空隙充填率ないしはモルタルによる粗骨材空隙充填率とVC値の関係を求めると，図-7のようになる。図より，VC値とペーストによる細骨材空隙充填率ないしはモルタルによる粗骨材空隙充填率の間には高い相関があることがわかる。

次に，細骨材率を変化させることにより，VC値とペーストによる細骨材空隙充填率，モルタルによる粗骨材空隙充填率の間のより一般的な関係を求めることができる。図-8は，種々の単位水量，単位結合材量の組合せに対して細骨材率を変化させ，VC値とペーストによる細骨材空隙充填率，モルタルによる粗骨材空隙充填率の関係を示したものである。

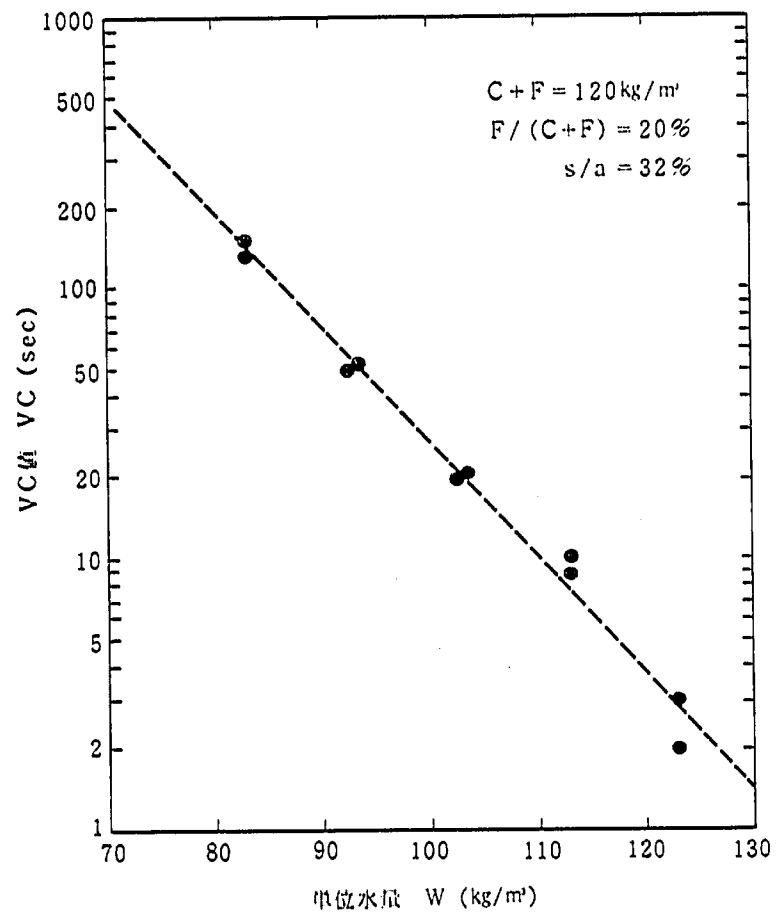


図-4 VC値と単位水量の関係

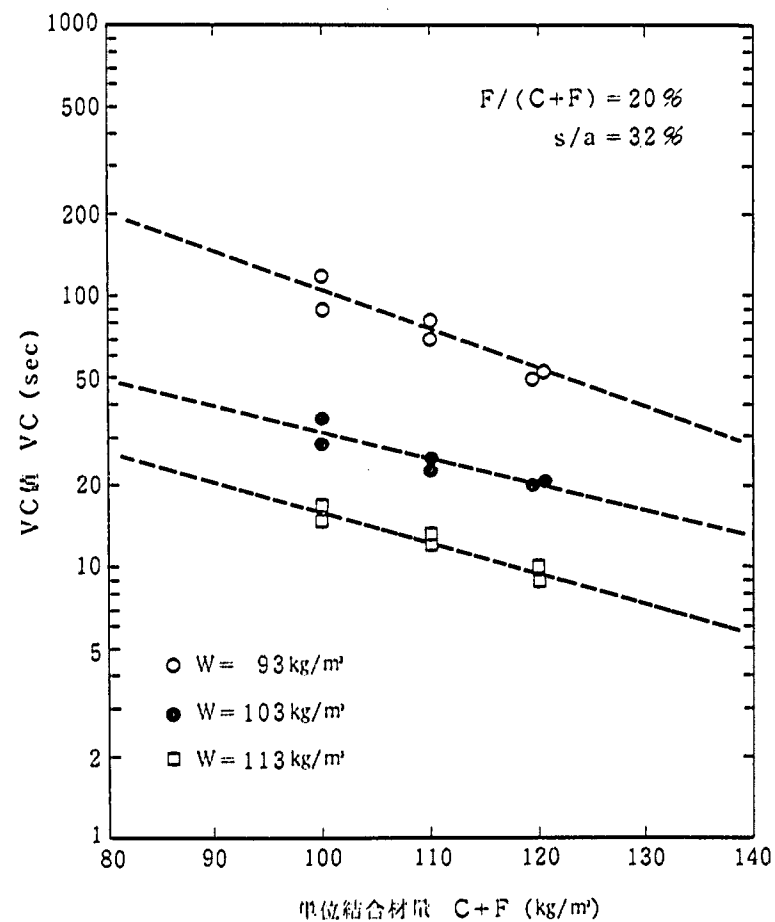


図-5 VC値と単位結合材量の関係

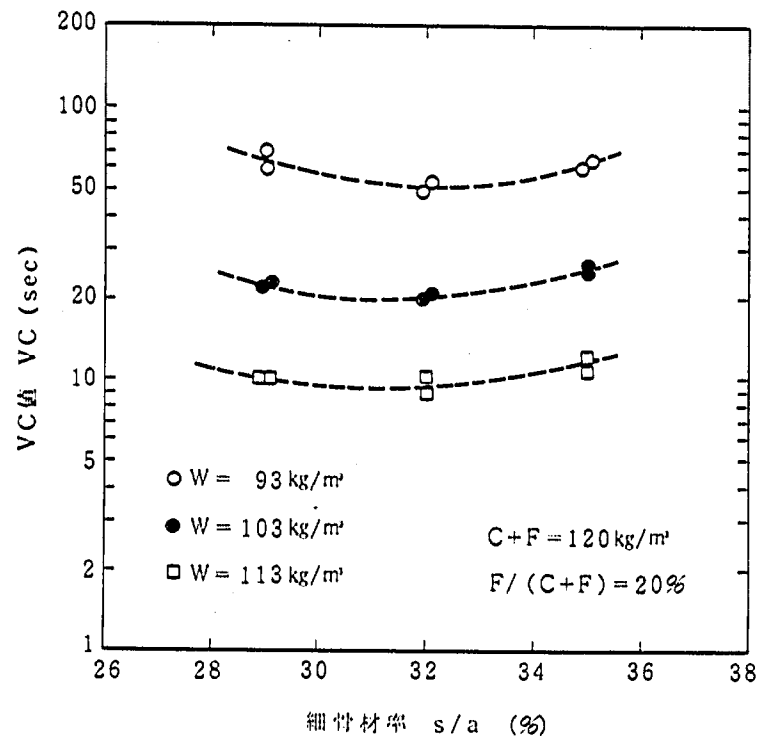


図-6 VC値と細骨材率の関係

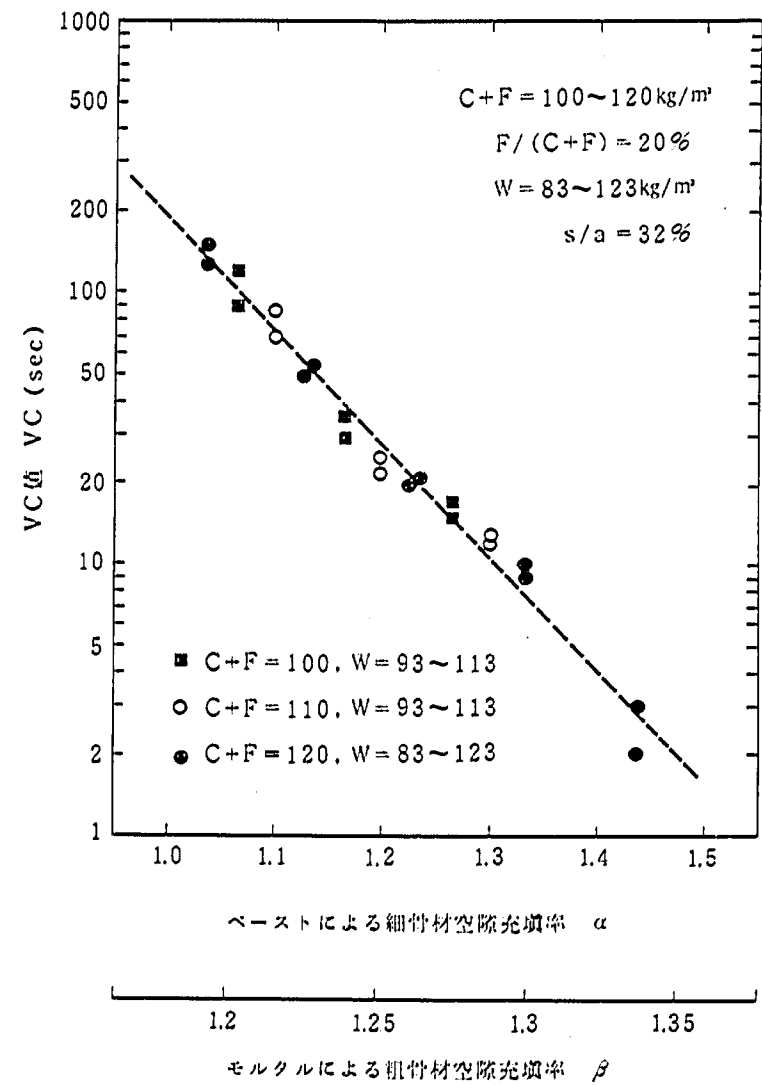
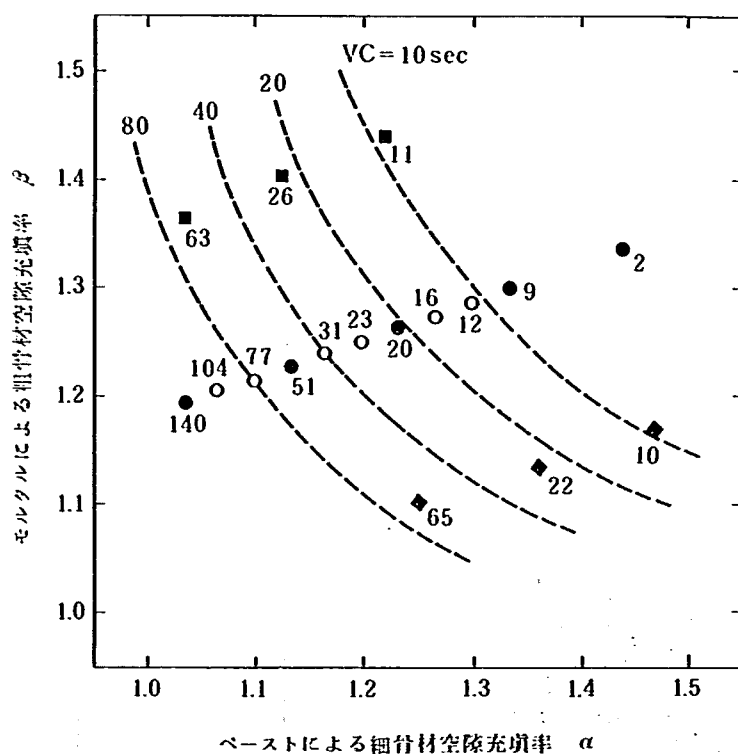


図-7 VC値とペーストによる細骨材空隙充填率ないしはモルタルによる粗骨材空隙充填率との関係



- C+F=120kg/m³, W=83~123kg/m³, s/a=32%
- C+F=100~110kg/m³, W=93~113kg/m³, s/a=32%
- C+F=120kg/m³, W=93~113kg/m³, s/a=35%
- ◆ C+F=120kg/m³, W=93~113kg/m³, s/a=29%

図—8 VC値とペーストによる細骨材空隙充填率およびモルタルによる粗骨材空隙充填率との関係

以上の図より、次のことがわかる。

- ① VC値の大きさは、ペーストによる細骨材空隙充填率、モルタルによる粗骨材空隙充填率の値に関係し、これによって表わすことができる。
 - ② 所要のVC値(概ね20秒)を得るためには、セメントペーストによる細骨材空隙充填率、モルタルによる粗骨材空隙充填率が、1に対して余裕をもった値でなければならない。
- また、これらの結果と式(1)を参考にすれば、
- ③ VC値はRCD用コンクリートの単位水量、単位結合材量の増加とともに小さくなるが、細骨材率についてはVC値を最小にするような値が存在する。

ことも容易に理解できる。

3.2.3 RCD用コンクリートの密度と強度

(1) 単位水量と密度、強度の関係

一般に、RCD用コンクリートの配合設計では、単位結合材量、細骨材率を一定として、単位

水量を変化させ、所要のVC値を得るような単位水量を決定している。そこで、RCD用コンクリートの単位水量と密度、圧縮強度の関係を、大型供試体²⁵⁾より採取したコアを用いた試験によって検討するものとした。大型供試体とは、写真-8、図-9、表-4に示すようなRCD用コンクリートの室内締め固め装置で締め固められた供試体のことである。RCD用コンクリートの密度、強度は、この装置によって締め固められた供試体から $\phi 170\text{ mm} \times 340\text{ mm}$ のコアを採取して、材令91日において試験したものである。なお、写真-9、写真-10は、RCD用コンクリートの締め固め後のペーストの上昇状況、および採取したコアの外観を示したものである。

RCD用コンクリートの単位水量と密度、圧縮強度の関係を図-10に示す。ここで、VC値が20秒（最適VC値）となる単位水量は図-4に示したように 103 kg/m^3 であり、これらの関係をま

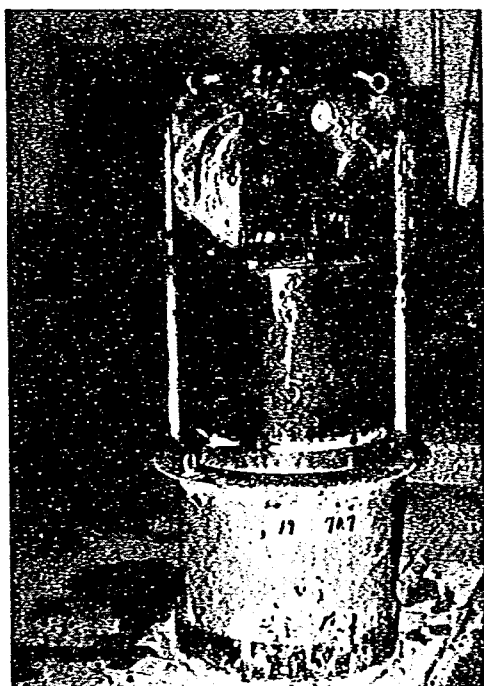


写真-8 大型供試体作製装置
(RCD用コンクリートの室内締め固め装置)

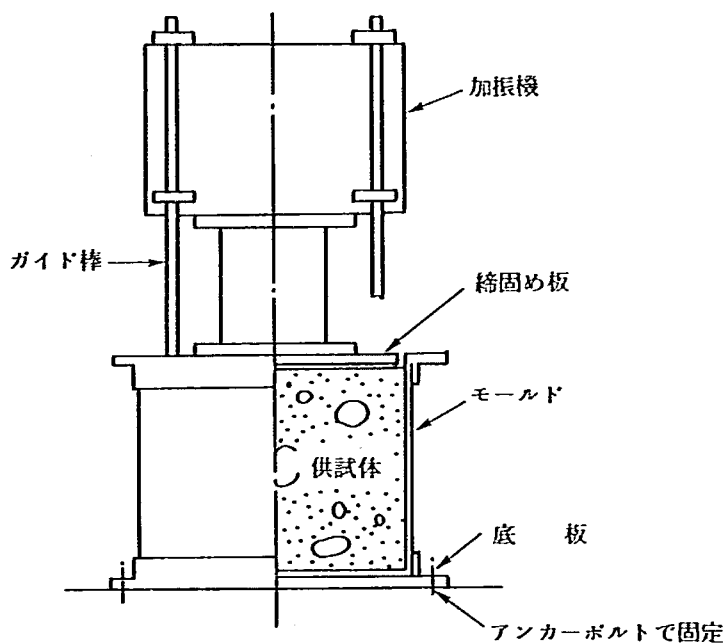


図-9 大型供試体作製装置
(RCD用コンクリートの室内締め固め装置)

表-4 大型供試体作製装置(RCD用コンクリートの室内締め固め装置)の仕様

部 品	項 目	仕 様
起 振 機	振 動 数	1900 rpm
	振 幅	2.4 mm
	起振部質量	648 kg
	締め固め板径	48 cm
容 器	内 径	50 cm
	内 高	45 cm

試 験 B - II (締固め時間 60 秒)

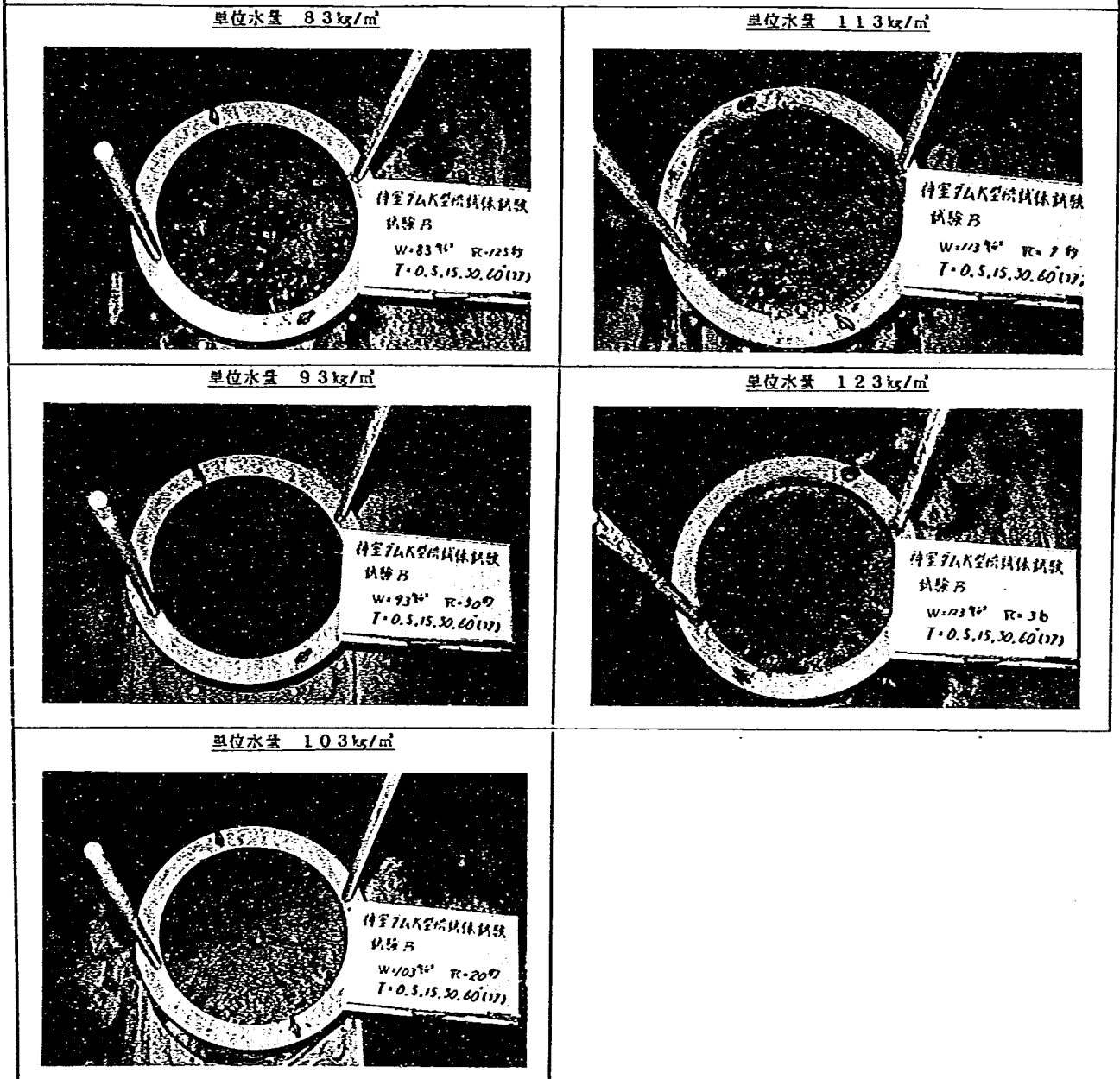


写真-9 RCD用コンクリートの締め固め後のペーストの上昇状況

試 験 B - II (締固め時間 60 秒)

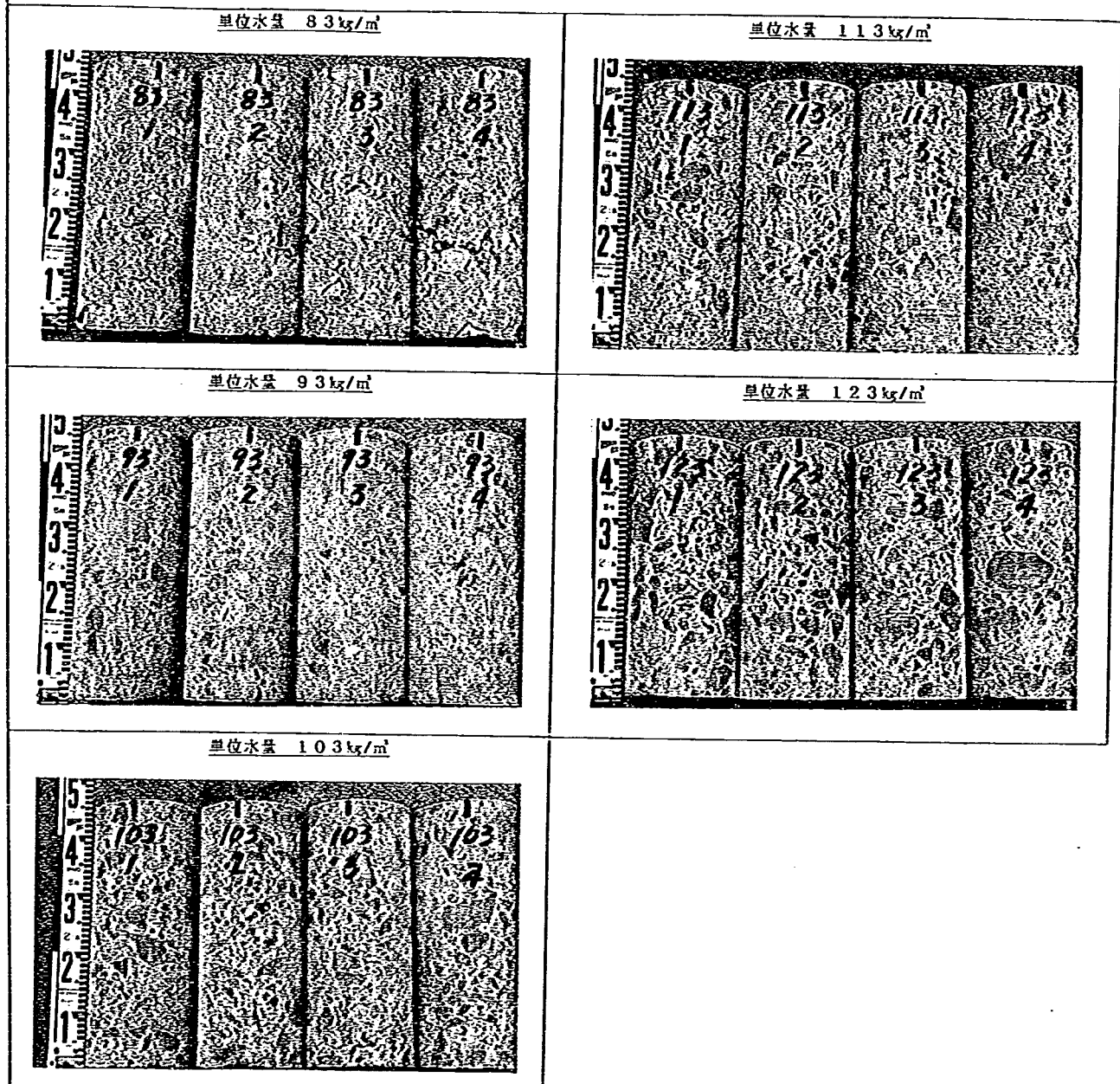


写真-10 大型供試体から採取した R C D 用コンクリートのコア(I)

とめると次のようになる。

- ① 密度が最大となる単位水量は、最適 V C 値が得られる単位水量よりも大きい。
- ② 圧縮強度が最大となる単位水量は、最適 V C 値が得られる単位水量よりも小さい。

このような関係を示す理由は図-11、図-12より説明することができる。

コンクリートの圧縮強度は、セメント水比の法則によれば、コンクリートの結合材水比 ($C + F$) / W と直線関係にある。そこで、図-10の代わりに、RCD用コンクリートの圧縮強度を結合材水比との関係で示したものが、図-11である。なお、図に示した破線は、40mmオーバーの骨材をウェットスクリーニングによって除去したRCD用コンクリートから作製した標準供試体より得られた圧縮強度と結合材水比の関係を示したものであり(図-13参照)、RCD用コンクリートがセメント水比の法則に従うことを示している。大型供試体より採取したコアの圧縮強度は、単位水量が多い場合には破線で示すセメント水比の法則にほぼ従っているが、最適 V C 値を示す単位水量である $W = 103 \text{ kg/m}^3$ 付近から、大型供試体より採取したコアの圧縮強度は徐々にこの破

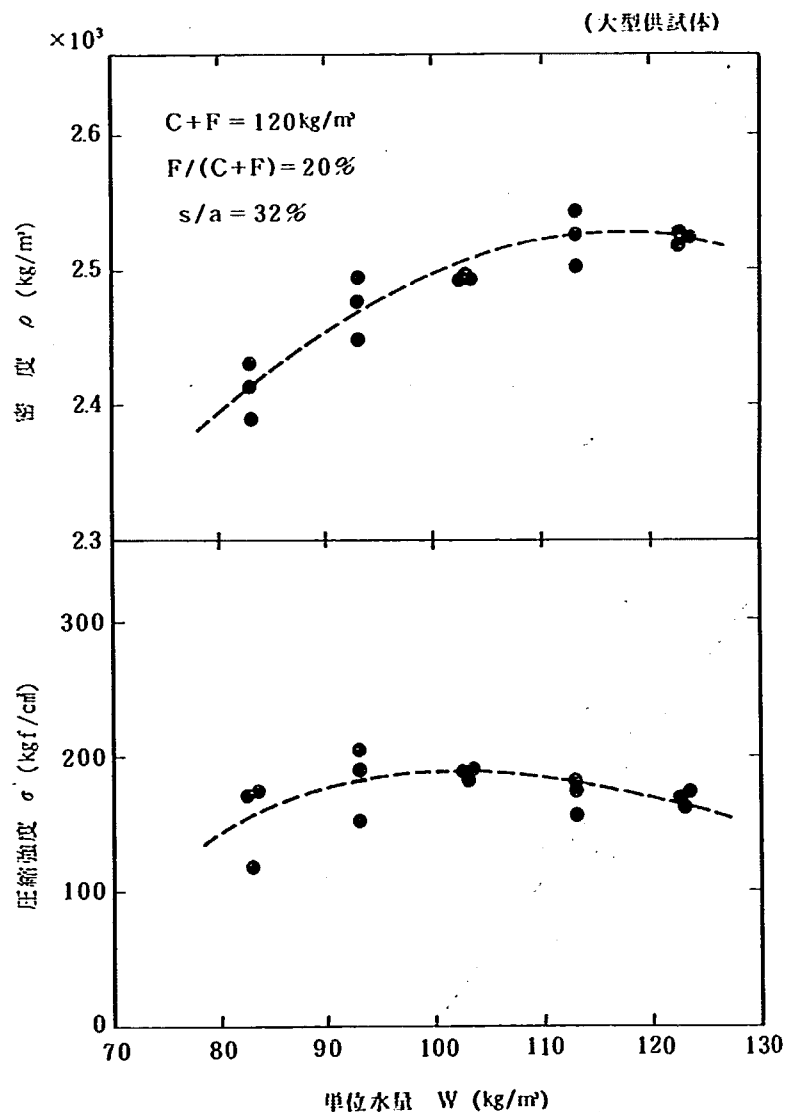


図-10 単位水量とRCD用コンクリートの密度、圧縮強度との関係

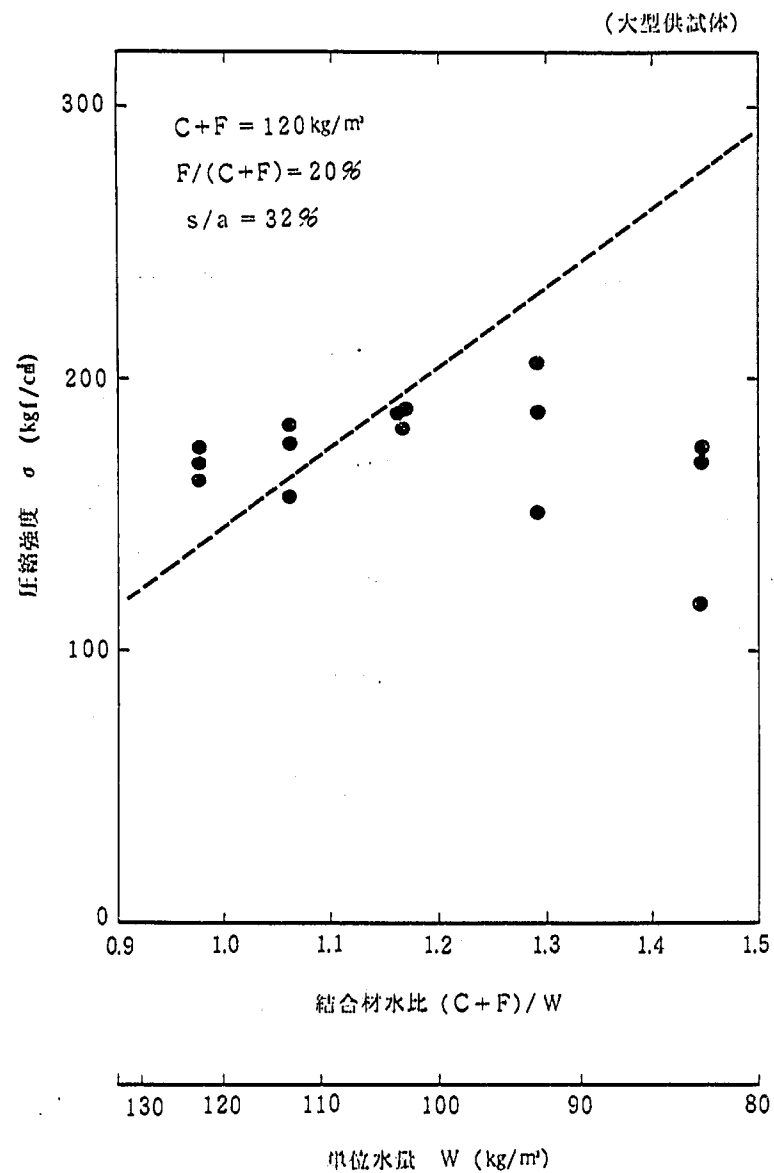


図-11 単位水量とRCD用コンクリートの圧縮強度の関係

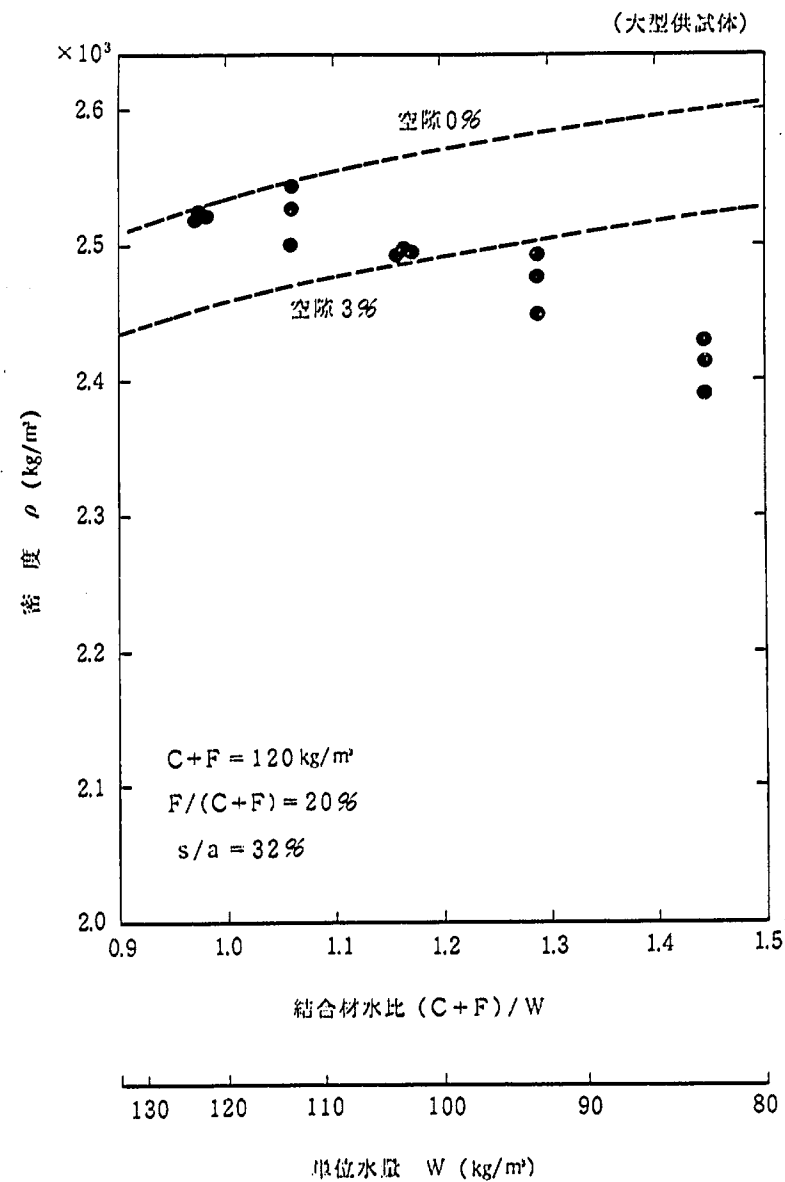
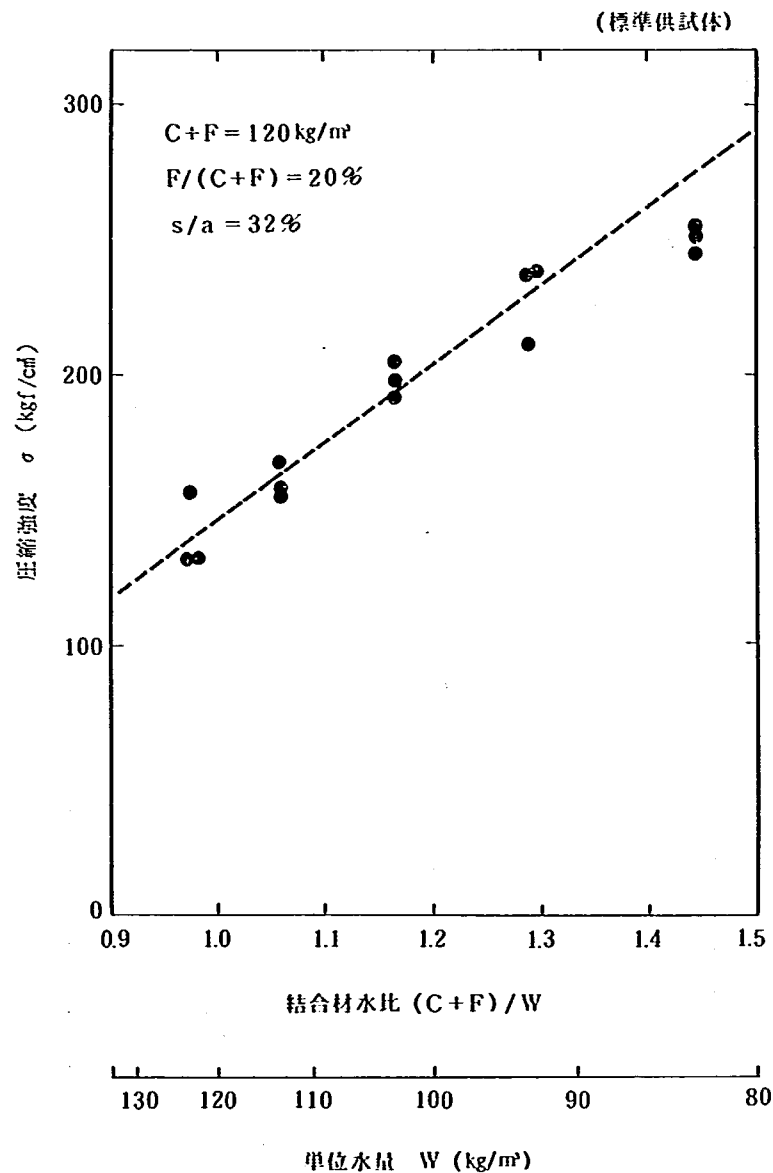


図-12 単位水量とRCD用コンクリートの密度の関係



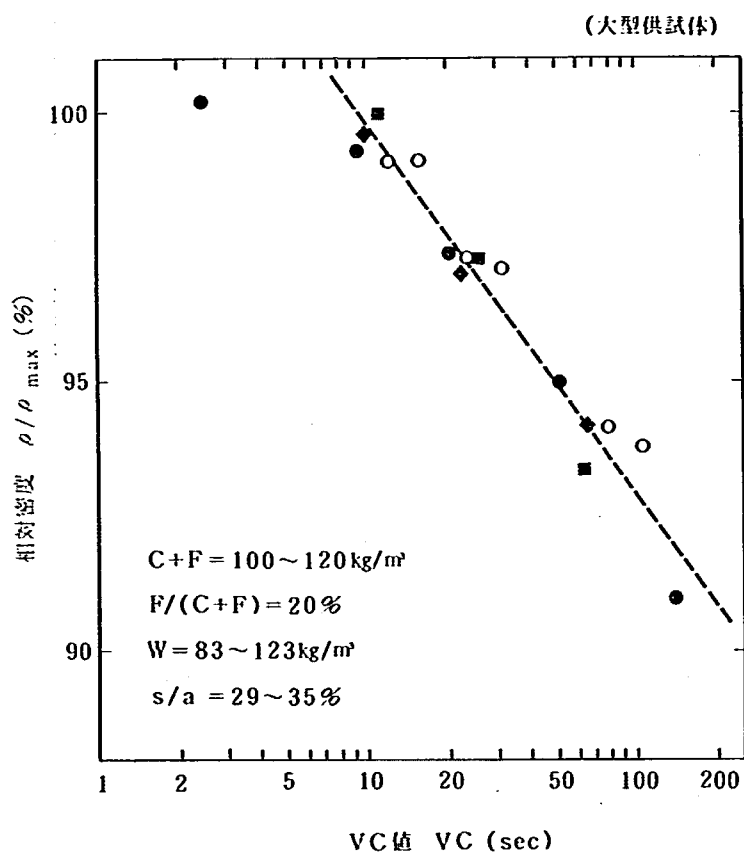
図一 13 単位水量と標準供試体の圧縮強度の関係

線からはずれてくる。これは、最適 V C 値が得られる単位水量よりも単位水量が少ない場合には、R C D 用コンクリートが十分に締め固められていないことを示している。しかし、本来の R C D 用コンクリートの強度を示す破線は右上がりの直線であるから、圧縮強度の最大値はこの直線を若干はずれた位置で生じることになる。したがって、圧縮強度が最大となる単位水量は、最適 V C 値が得られる単位水量よりも小さくなる。次に、コンクリートの密度と単位水量の関係を、図一 11 と同様に結合材水比を横軸にとって示すと、図一 12 のようになる（ここでは単位結合材量は 120 kg/m^3 で一定である）。ここで、図に示した破線は、最大理論密度および空隙率 3 % に対する密度と結合材水比（単位水量）の関係である。図より、R C D 用コンクリートの空隙率は、単位水量の減少とともに徐々に増加していることがわかる。しかし、最大理論密度を表わす曲線はずかしく右上がりの曲線となっているから、最大密度を表わす単位水量はずかしく空隙が存在する

ような場合に生じている。一方、最適VC値を与える配合は、振動ローラーがRCD用コンクリートの上を走行するのに適した硬練りの配合でなければならない。RCD用コンクリートの単位水量はある程度小さな値でなければならない。したがって、最適VC値を与える単位水量は、密度が最大となる単位水量よりも小さくなる。

(2) VC値, 相対密度, 圧縮強度

VC値は、RCD用コンクリートの締め固めやすさを表わす係数であるから、VC値とRCD用コンクリートの密度の間には、密接な関係があると考えられる。図-14は、大型供試体より採取したコアを用いた試験結果から、種々のRCD用コンクリートの配合に対して、相対密度 $\rho/\rho_{\max}$ （最大理論密度に対する実際の締め固め密度の比）とVC値の関係を示したものである。これよ



- C+F=120 kg/m³, W=83~123 kg/m³, s/a=32%
- C+F=100~110 kg/m³, W=93~113 kg/m³, s/a=32%
- C+F=120 kg/m³, W=93~113 kg/m³, s/a=35%
- ◆ C+F=120 kg/m³, W=93~113 kg/m³, s/a=29%

図-14 VC値とRCD用コンクリートの相対密度の関係

り明らかなように、相対密度とV C値の間には高い相関がある。また、RCD用コンクリート配合の種類によらずV C値が一定であれば、一定の相対密度が得られることがわかる。^⑥

次に図-15は、同一配合のRCD用コンクリートに対して、その締め固め程度の差による密度と圧縮強度の関係を示したものである。図より明らかなように、同一の配合においては、RCD用コンクリートの強度と密度の間には高い相関があり、したがって、所要の圧縮強度を得るためには、所要の密度を得ることが必要であることがわかる。なお、参考までに、図-15に示したRCD用コンクリートのコアの外観を、写真-11、写真-12に示す。

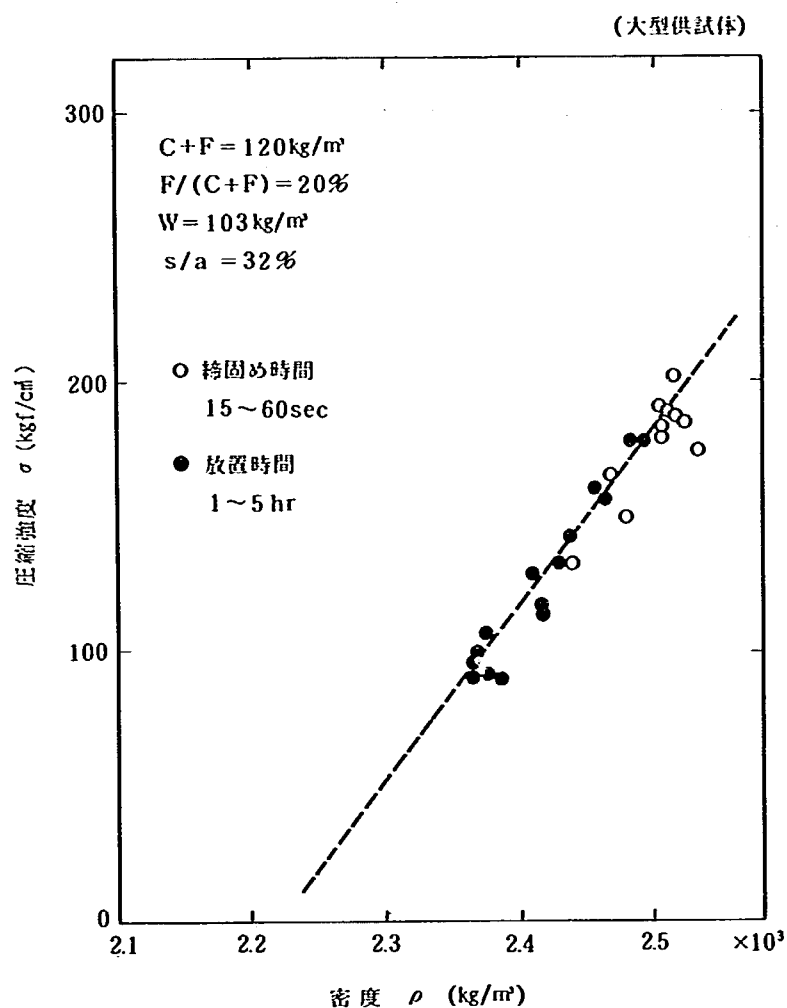


図-15 RCD用コンクリートの密度と圧縮強度の関係

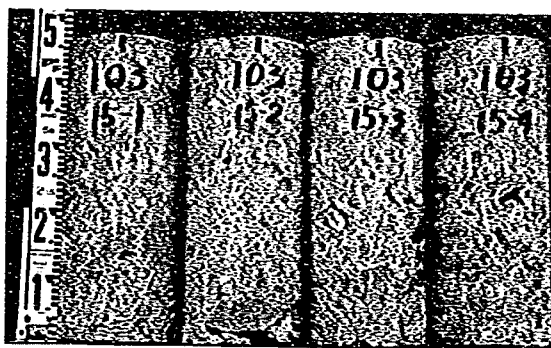
3.3 結 論

RCD用コンクリートの配合特性についてとりまとめると、次のようになる。

- ① 同一配合において、RCD用コンクリートの強度と相対密度で表わした締め固め密度の間には高い相関性がある。
- ② 相対密度で表わしたRCD用コンクリートの締め固め密度とVC値の間には高い相関性がある。
- ③ RCD用コンクリートのVC値は、ペーストによる細骨材空隙充填率、モルタルによる粗骨材空隙充填率によって定まる。
- ④ 最適VC値を得るためには、ペーストによる細骨材空隙充填率、モルタルによる粗骨材空隙充填率はともに1に対してある程度余裕をもった値でなければならない。
- ⑤ 単位水量，単位結合材量が増加すると，ペーストによる細骨材空隙充填率，モルタルによる粗骨材空隙充填率はともに大きくなる。細骨材率が増加すると，モルタルによる粗骨材空隙充填率は大きくなるが，ペーストによる細骨材空隙充填率は小さくなる。

試 験 B-I (単位水量 103 kg/m^3)

経固め時間 15 秒



経固め時間 30 秒



経固め時間 60 秒



写真-11 大型供試体から採取した RCD 用コンクリートのコア(2)

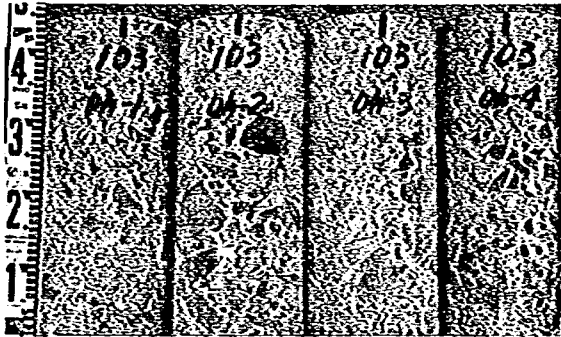
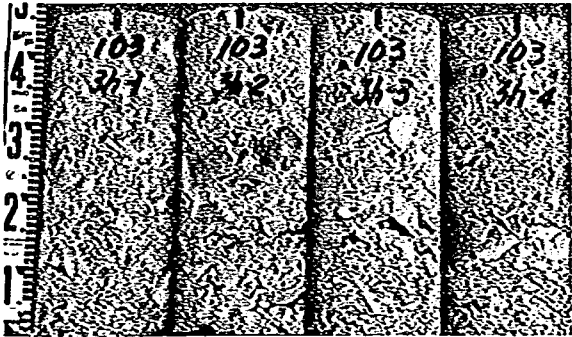
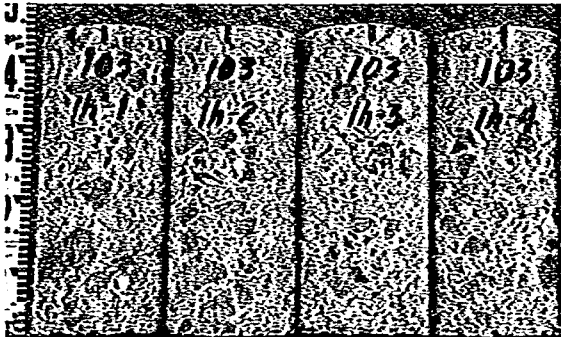
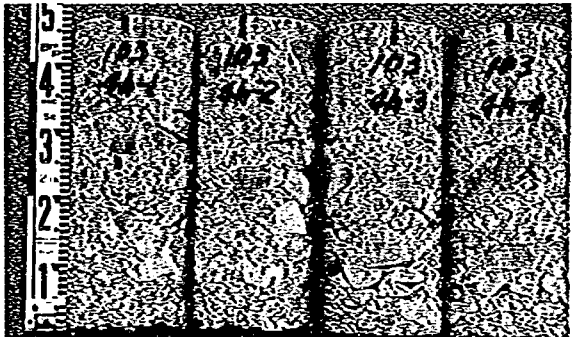
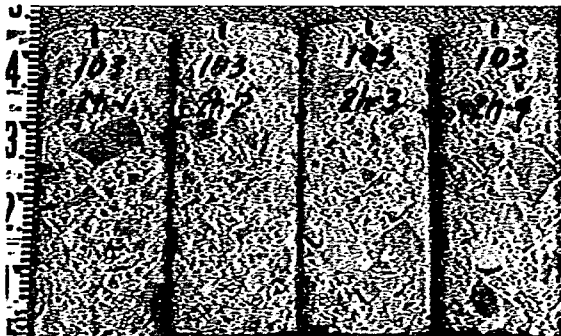
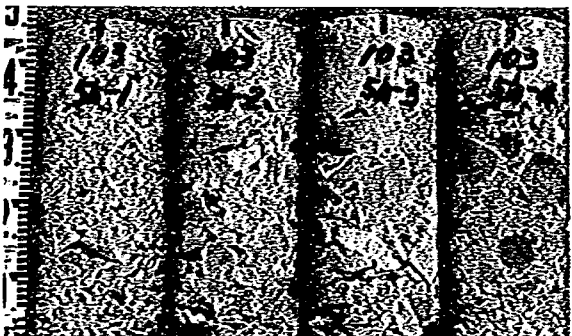
試 験 C (単位水量 103 kg/m ³)	
経過時間 0 hr (練混ぜ直後)	3 hr
	
1 hr	4 hr
	
2 hr	5 hr
	

写真-12 大型供試体から採取した R C D 用コンクリートのコア(3)

4. 堤体コンクリートの温度規制

4.1 RCD工法における温度規制の位置付け

コンクリートは、その硬化に際してセメントの水和反応に起因する発熱を生じる。ダムのようなマスコンクリートでは、この水和熱はコンクリート内部に蓄積され、その後コンクリートが冷却する過程でその収縮変形が拘束されると、コンクリート内部には引張応力が生じ、ひいては温度ひび割れが発生する。ダム堤体に生じる温度ひび割れは、ダムの構造的・一体性、遮水性などを損なうため、その発生は極力防止しなければならない。

コンクリートダムの施工においては、このような温度ひび割れを防止するために、種々の温度規制法が講じられてきた。すなわち、

- ① コンクリート中の単位セメント量の抑制、低発熱のセメントの使用
- ② コンクリートの打込みリフト厚、打上り速度の制限
- ③ バイブクーリング、ブレクーリングの実施
- ④ 収縮継目の設置

などである。このうち①～③は、コンクリートの温度上昇を抑制することによって温度ひび割れの発生を防止するものであり、④は、人工的に温度ひび割れの発生位置を規定することによって不規則な温度ひび割れを防止するものである。収縮継目は人工的な温度ひび割れであるから、ダムの構造的・一体性、遮水性を確保するための処置が必要である。前者に対する処置がジョイントグラウチング、後者に対する処置が止水板の設置である。

ジョイントグラウチングにおいては、収縮継目が再び開くことがないように、前もってこれを最大限に広げておかなければならず、このためにはバイブクーリングが必要である。RCD工法においては、ダンプトラックや振動ローラーなどがコンクリート上を走行するため、バイブクーリングを行うためのクーリングコイルをコンクリート中に設置することが困難であり、また施工の経済性を確保するためにもバイブクーリングを省略することが望ましい。したがって、ジョイントグラウチングが不可欠な縦継目を省略するための設計理論が必要となる。

4.2 コンクリートダムにおける温度応力の解析法

4.2.1 体積変化の拘束と温度応力

温度応力は温度変化による体積変化が拘束された場合に発生するが、これを拘束の原因から分類すると、

- ① 外部拘束
- ② 内部拘束

の2つに分類できる。外部拘束とは均一な体積変化が境界条件によって拘束される場合をいい、内部拘束とは均一でない体積変化がその体積変化量の差によって互いに拘束される場合をいう。外部拘束と内部拘束の概念図を図-16に示す。

従来、内部拘束は温度ひび割れの原因の一つとして考えられてきたが、このような温度ひび割れはコンクリート表面の局部的なものとされていた。したがって、内部拘束による温度ひび割れは構造的にはあまり重要視されず、主として外部拘束による温度ひび割れの検討が行われてきた。しかし、最近では、内部拘束は外部拘束と同様に重要な意味をもつことがわかっている²⁶⁾。

4.2.2 H/L理論

コンクリート内に生じた均一な温度降下による体積変化が基礎岩盤などによって拘束されると、温度応力が発生する。この時、発生する温度応力の大きさは次式で表わされる。

$$\{\sigma\} = \{R\} E_C \alpha \Delta T \quad \dots\dots\dots(2)$$

または、

$$\sigma_i = R_i E_C \alpha \Delta T \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

$\{\sigma\}$: コンクリート内の各点に発生する温度応力

$\{R\}$: コンクリート内の各点に対応する外部拘束度

E_C : コンクリートの弾性係数

α : コンクリートの熱膨張係数

ΔT : コンクリートの温度降下

である。なお、一般には温度応力の最大値が問題となるから、これが発生する点に着目して、式(3)を

$$\sigma = R E_C \alpha \Delta T \quad \dots\dots\dots(4)$$

のように表わすことが多い。

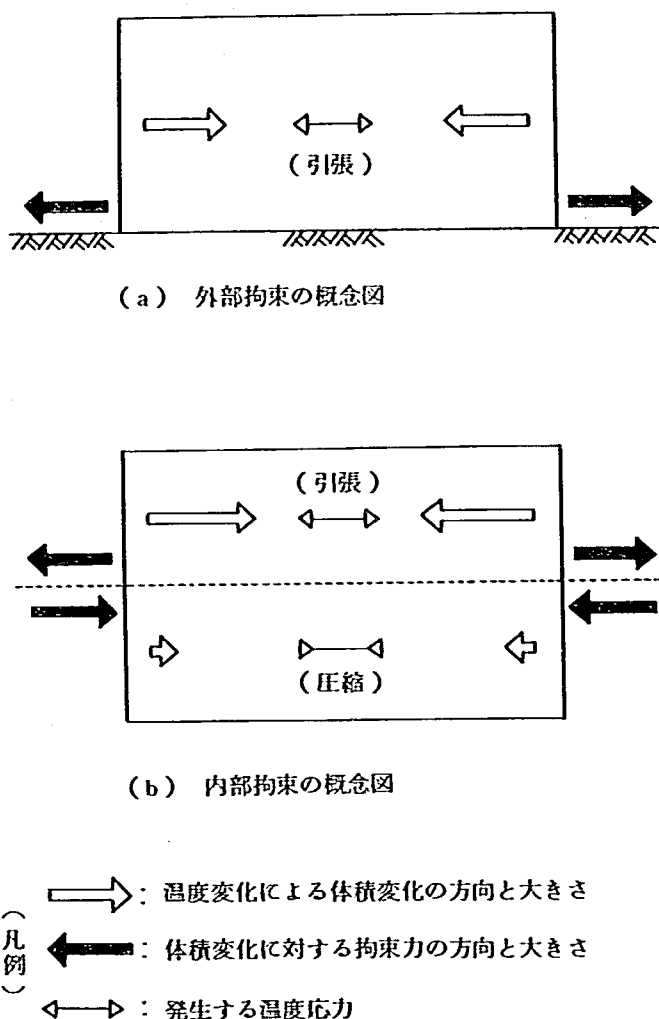


図-16 外部拘束と内部拘束の概念

外部拘束度の大きさは、コンクリートブロックの長さ L によって直接定まるのではなく、図-17に示すように、その高さ H と長さ L の比 H/L によって定まる²⁷⁾。これは「 H/L 理論」と呼ばれ、RCD工法によるダム温度規制の理論的根拠となった。すなわち、「RCD工法においては、コンクリートの打設が全面（拡張）レヤ方式によって規則的かつ迅速に行われ、しかもパイプクーリングが省略されることから、コンクリートの冷却は、実用上、コンクリートの打設完了後に生じると考えられる。したがって H/L が確保され、長大レヤのコンクリートは温度

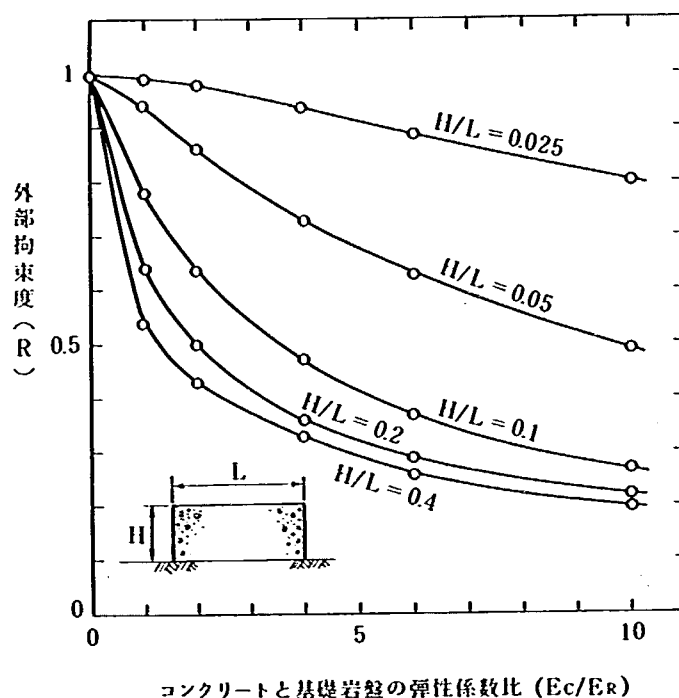


図-17 着岩面における外部拘束度の大きさ

ひび割れを生じることなく打設できる」という考え方が採用されるようになった。しかし、この考え方には、長大ブロックほど温度ひび割れが数多く発生するという経験的事実を十分に説明できない欠点があった。

4.2.3. 拘束度マトリクス

図-17に示した外部拘束度は均一な温度降下を仮定して求めたものであり、この場合、個々の点での拘束度は式(3)、式(4)で示されるように一つの変数 R_i または R で表わされる。しかし、均一でない温度降下に対する温度応力を求める場合（この場合には内部拘束の影響が含まれることになる）、個々の点での拘束度は式(3)、式(4)で示されるように一つの変数では表現できない。しかし、有限要素法のように離散化したモデルを考えると、拘束度は次のようなマトリクス表示によって表現することが可能である。

$$\{\sigma\} = [R] E_C \alpha \{\Delta T\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

または

$$\sigma_i = \sum_j R_{ij} E_C \alpha \Delta T_j \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 $[R]$ を一般化された拘束度、または拘束度マトリクスと呼ぶ²⁸⁾。拘束度マトリクスを用いれば、任意の温度降下分布 $\{\Delta T\}$ に対する温度応力 $\{\sigma\}$ を求めることができる。なお、式(5)は次のようにひずみによる表示で表わすと便利なが多い。

$$\{\epsilon\} = [R] \alpha \{\Delta T\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

これは、コンクリートの引張強度に対応するひずみ量（ひずみ能力）がコンクリートの弾性係数の値によらずほぼ一定の値をとるためである。ここで、 ϵ を拘束温度ひずみと呼ぶ。

RCD工法の場合、コンクリートが打設された後に特別な人工冷却が行われず、またコンクリートの打ち上がり速度が速いこともあって、大部分の温度降下は堤体コンクリートの打設完了後に生じると仮定しても問題はない（ただし、長期間、コンクリートの打設が中断される場合を除く）。したがって、温度応力は完成したダムに対する拘束度マトリクスを用いて求めることができる。

RCD工法では全面（拡張）レヤ打設が行われるから、水平方向の温度分布は実用上一様と考えることができる。そこで、図-18のようなモデルに対して拘束度マトリクスを算出した結果が表-5である。H/L理論より、拘束度マトリクスはダムの規模（堤高）によらない一定値である。

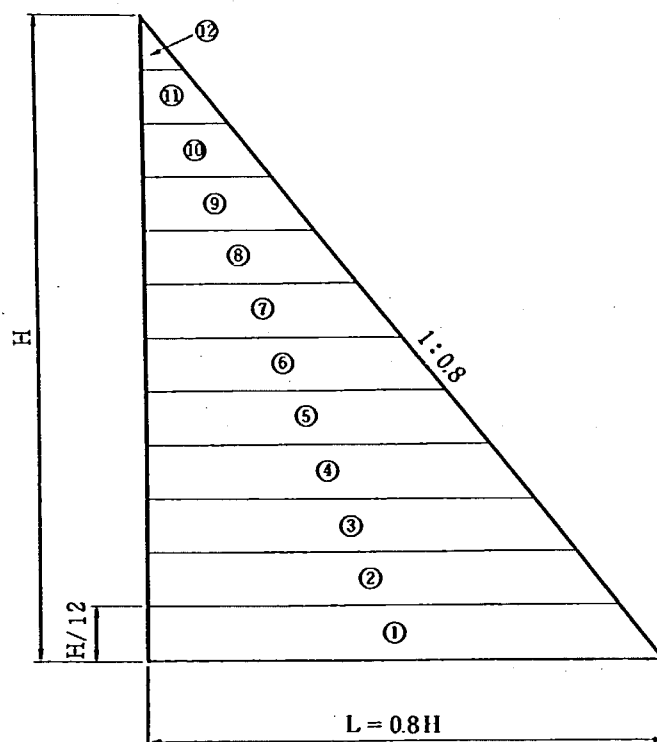


図-18 ダム堤体の層分割の例

表-5(a) 拘束度マトリクス (各層中央の水平応力, $E_C/E_R=10$)

		温度変化を与える層番号											
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
応力を求める層番号	①	564	-278	-123	-41	25	21	14	4	0	0	0	0
	②	-255	686	-151	-115	-40	-3	5	3	0	0	0	0
	③	-134	-189	778	-200	-119	-43	-4	4	3	0	0	0
	④	-48	-110	-128	693	-211	-109	-29	0	3	0	0	0
	⑤	-1	-44	-84	-196	675	-219	-103	-4	0	3	0	0
	⑥	16	-9	-36	-106	-205	650	-225	-81	-3	3	0	0
	⑦	13	5	-8	-34	-93	-213	625	-233	-64	-3	0	0
	⑧	8	6	1	-4	-25	-83	-221	590	-235	-45	-1	0
	⑨	3	3	3	4	1	-13	-63	-228	554	-239	-25	3
	⑩	0	1	1	3	4	4	-5	-50	-231	519	-238	-6
	⑪	0	0	0	0	1	1	3	0	-40	-234	509	-238
	⑫	0	0	0	0	0	0	1	3	1	-33	-469	498

($\times 10^{-3}$)

表-5(b) 拘束度マトリクス (各層中央の水平応力, $E_C/E_R=6$)

		温度変化を与える層番号											
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
応力を求める層番号	①	616	-255	-119	-46	5	18	11	4	0	0	0	0
	②	-229	698	-149	-116	-43	-4	5	3	0	0	0	0
	③	-126	-185	780	-199	-119	-43	-4	4	3	0	0	0
	④	-50	-110	-126	695	-210	-109	-29	0	3	0	0	0
	⑤	-6	-45	-83	-195	676	-218	-103	-4	0	3	0	0
	⑥	11	-11	-35	-105	-204	651	-225	-81	-3	3	0	0
	⑦	10	4	-8	-34	-91	-213	626	-233	-64	-3	0	0
	⑧	6	6	1	-4	-25	-83	-220	590	-235	-45	-1	0
	⑨	1	3	3	4	1	-13	-63	-228	554	-239	-25	3
	⑩	0	1	1	3	4	4	-5	-50	-231	519	-238	-6
	⑪	0	0	0	0	1	1	3	0	-40	-234	509	-238
	⑫	0	0	0	0	0	0	1	3	1	-33	-469	498

($\times 10^{-3}$)

表-5(c) 拘束度マトリクス (各層中央の水平応力, $E_C/E_R=4$)

		温度変化を与える層番号											
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
応力を求める層番号	①	660	-234	-115	-51	-1	13	9	4	0	0	0	0
	②	-205	709	-145	-116	-44	-5	4	3	0	0	0	0
	③	-119	-180	783	-198	-119	-43	-4	4	3	0	0	0
	④	-51	-109	-124	696	-209	-108	-29	0	3	0	0	0
	⑤	-10	-46	-81	-194	678	-218	-101	-4	0	3	0	0
	⑥	8	-11	-35	-104	-204	651	-224	-81	-3	3	0	0
	⑦	9	4	-8	-33	-91	-213	626	-233	-64	-3	0	0
	⑧	6	5	1	-4	-24	-83	-220	590	-235	-45	-1	0
	⑨	1	3	3	4	3	-13	-63	-228	554	-239	-25	3
	⑩	0	1	1	3	4	4	-5	-50	-231	519	-238	-6
	⑪	0	0	0	0	1	1	3	0	-40	-234	509	-238
	⑫	0	0	0	0	0	0	1	3	1	-33	-469	498

($\times 10^{-3}$)

4.3 RCD工法における温度応力の特性

4.3.1 ダムの規模と拘束温度ひずみ

いま、堤体コンクリートのリフト厚を75cm、打設間隔を3日、また月別のコンクリートの最高温度と最終安定温度を図-19のように仮定する。この時、打設開始時期を8月1日、コンクリートと基礎岩盤の弾性係数の比 E_C / E_R を6とし、種々の高さのダム堤体内に発生する温度応力を計算した結果を図-20に示す。図の縦軸は、図-18に示す堤体の各層の位置を底面からの高さで表わし、また横軸は、各層中央での拘束温度ひずみの大きさを表わしている。これより、発生する拘束温度ひずみの大きさは堤高Hに依存し、堤高Hが高くなるほど発生する拘束温度ひずみは大きくなることがわかる。拘束度マトリクスがダムの規模にかかわらず一定であるのに、拘束温度ひずみがダムの規模によって異なるのは、打設速度を一定としているため、特定の温度を示す区間（たとえば夏場に打設した部分）が一定の高さHとなり、その結果、ダムの規模によってレヤの長さLとの比 H / L が異なるためである。

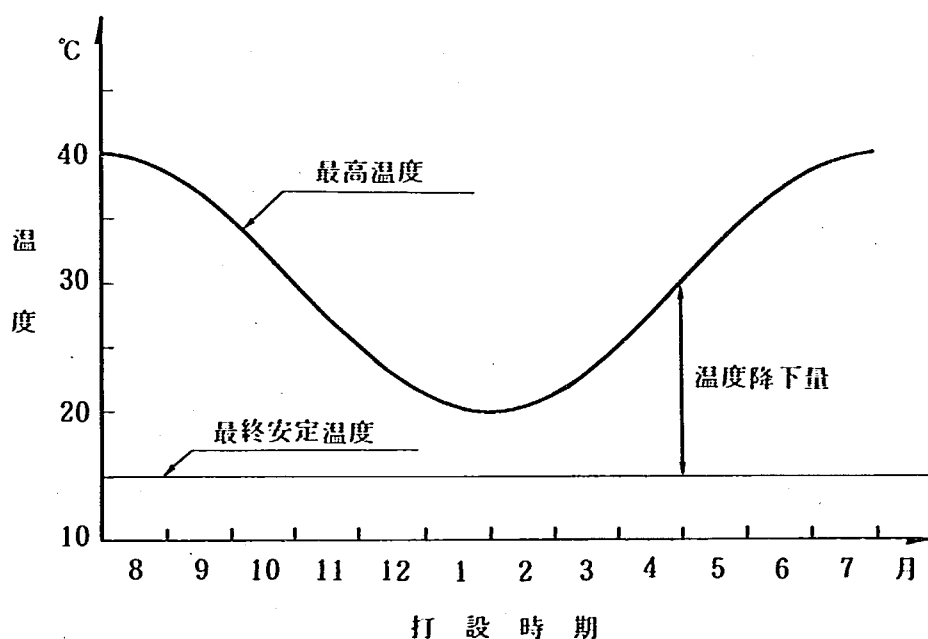


図-19 打設時期と最高温度、最終安定温度の関係

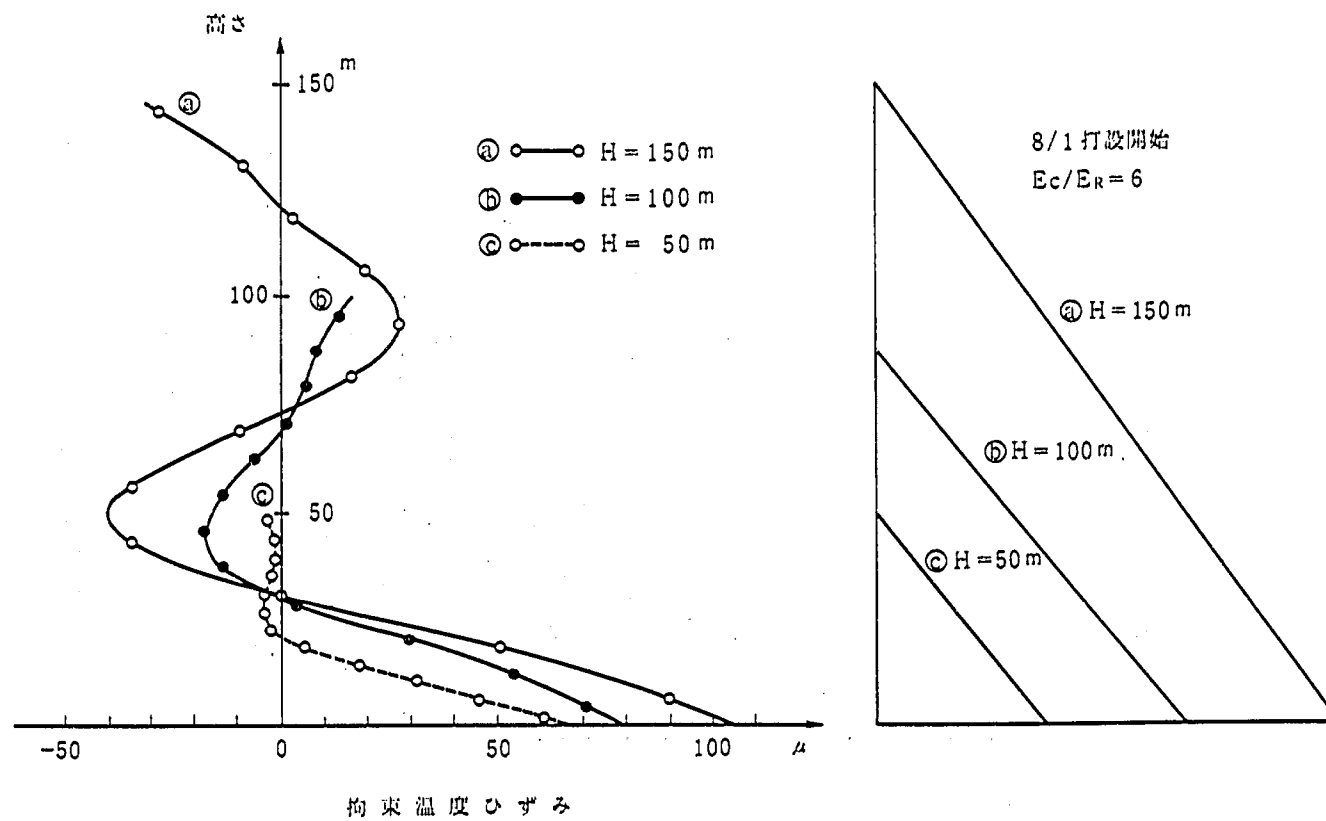


図-20 ダムの規模（堤高）と堤体内部（各層中央部）の拘束温度ひずみの分布の関係

4.3.2 最高拘束温度ひずみに影響を及ぼす因子

(1) 打設開始時期

RCD工法においては、その打設スケジュールが発生する温度応力に大きな影響を与える。RCD工法の場合、理想的には1日25cm程度の打ち上がり速度でコンクリートが一樣に立ち上がっていくから、打設スケジュールを検討することは、打設開始時期を検討することにあたる。

いま、堤高150mのダムを考え、打設開始時期別に堤体内の温度応力の分布を計算した結果を図-21に示す。図中の①～⑨などで示す破線は図-18に示すダム堤体の各層中央の拘束温度ひずみを表わしており、これを包絡した実線は図-18に示す断面に生じる最大拘束温度ひずみを表わしている。最大拘束温度ひずみを示す場所は打設開始時期によって①～⑥の範囲で変化し、その値も変化している。なお、図-22は代表的な打設開始時期に対する堤体内の拘束温度ひずみ分布を示したものである。

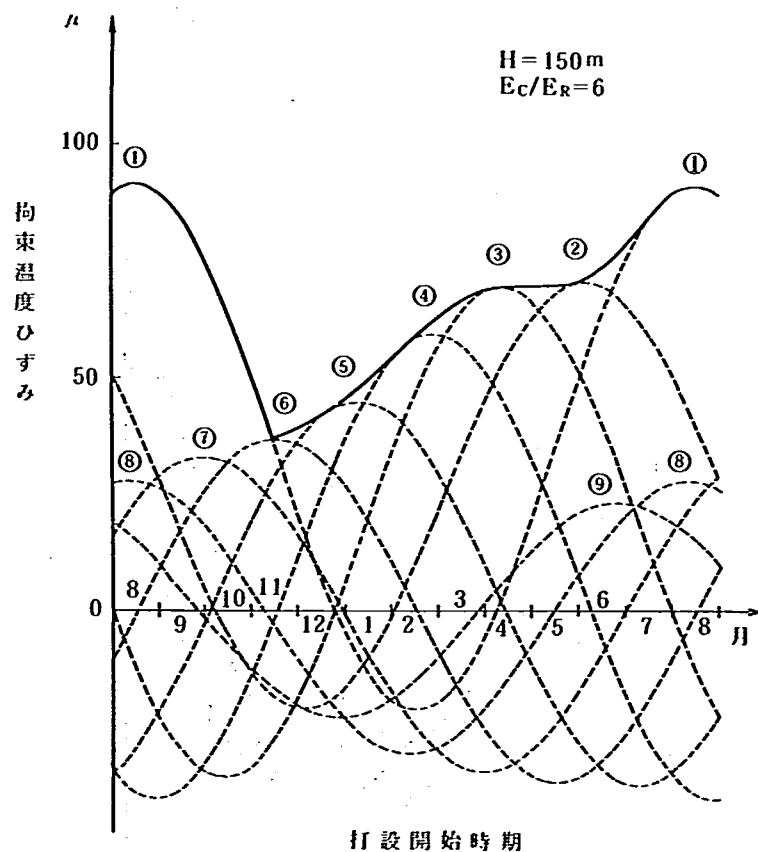


図-21 打設開始時期と各層の拘束温度ひずみの関係(1)

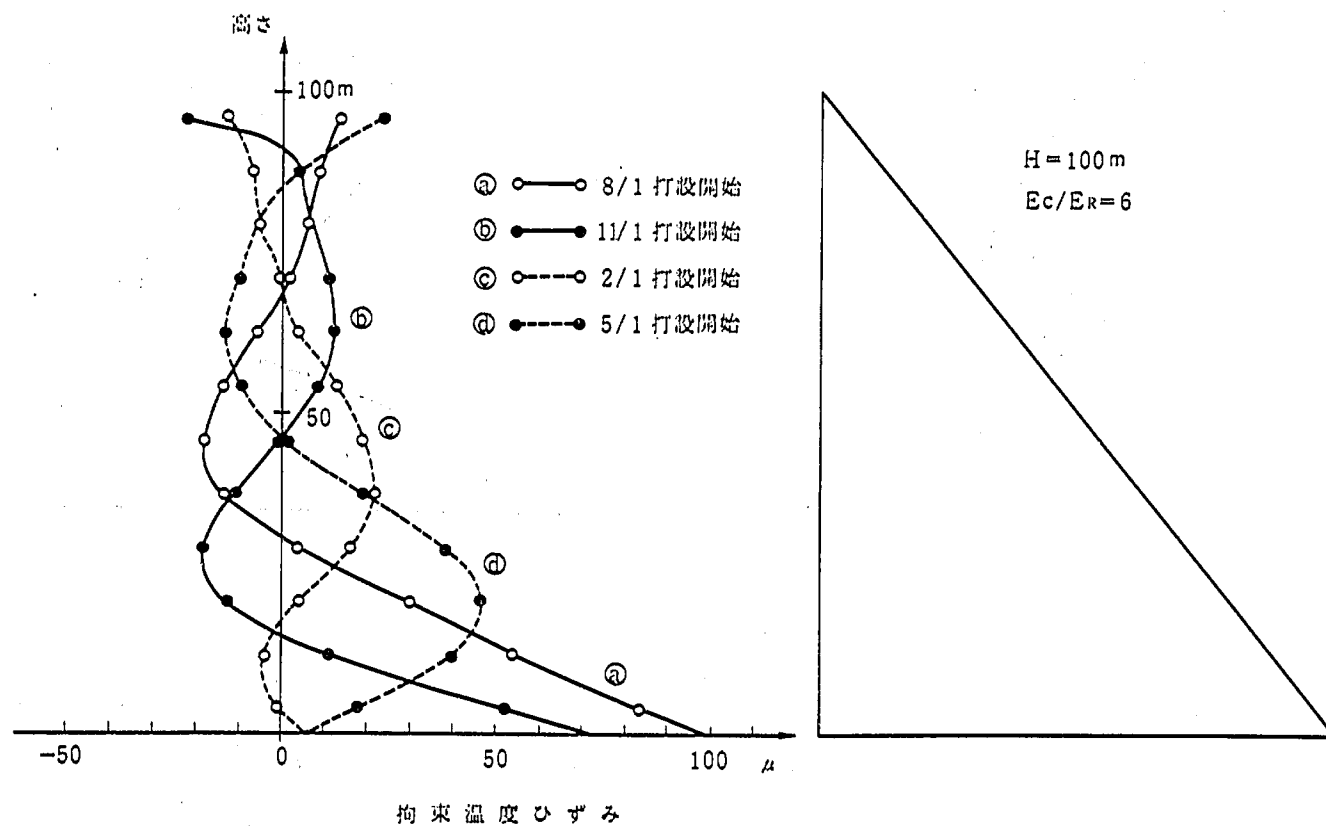


図-22 打設開始時期と堤体内部(各層中央部)の拘束温度ひずみの分布の関係

(2) ダムの規模

図-23は、堤高50mのダムに対して拘束温度ひずみを計算した結果である。前述の図-21のように堤高の高いダムの場合には、最大拘束温度ひずみの発生場所は打設開始時期によって広い範囲で変化するが、図-23のように堤高が低いダムの場合には、最大拘束温度ひずみを示す部分はダムの着岩部に限定される。このように最大拘束温度ひずみを生じる場所は、ダムの規模（堤高）によって変化する。

図-24は種々の堤高に対して打設開始時期と最大拘束温度ひずみの関係を示したものである。図より明らかなように、堤高が大きいほど最大拘束温度ひずみの大きさは大きくなる。また最大拘束温度ひずみが最小となるような打設開始時期は堤高によって変化する。

(3) 基礎岩盤の弾性係数

図-25は堤高150mのダムにおいて、2種類の基礎岩盤の弾性係数について打設開始時期と最大拘束温度ひずみの関係を示したものである。図より明らかなように、夏場にコンクリートの打設が開始される場合には、基礎岩盤の弾性係数によって最大拘束温度ひずみの大きさは変化するが、冬期にコンクリート

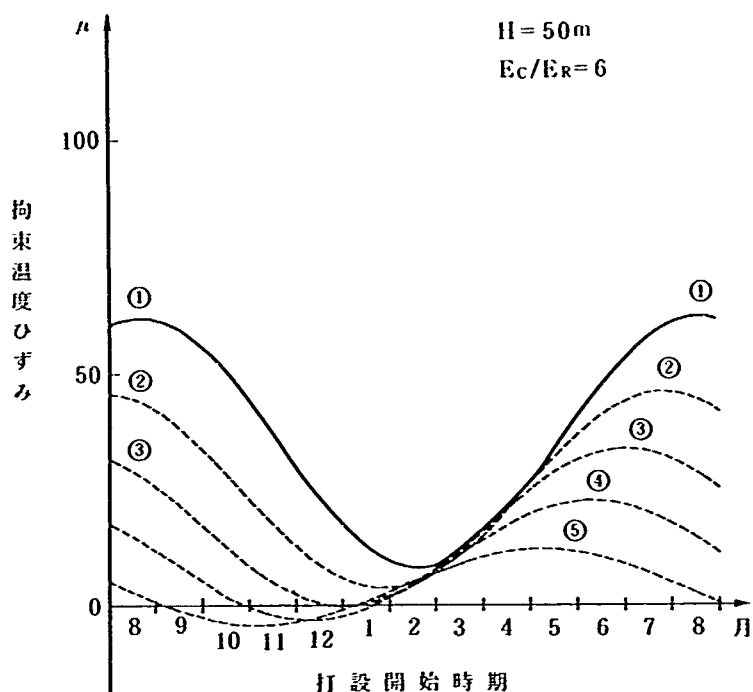


図-23 打設開始時期と各層の拘束温度ひずみの関係(2)

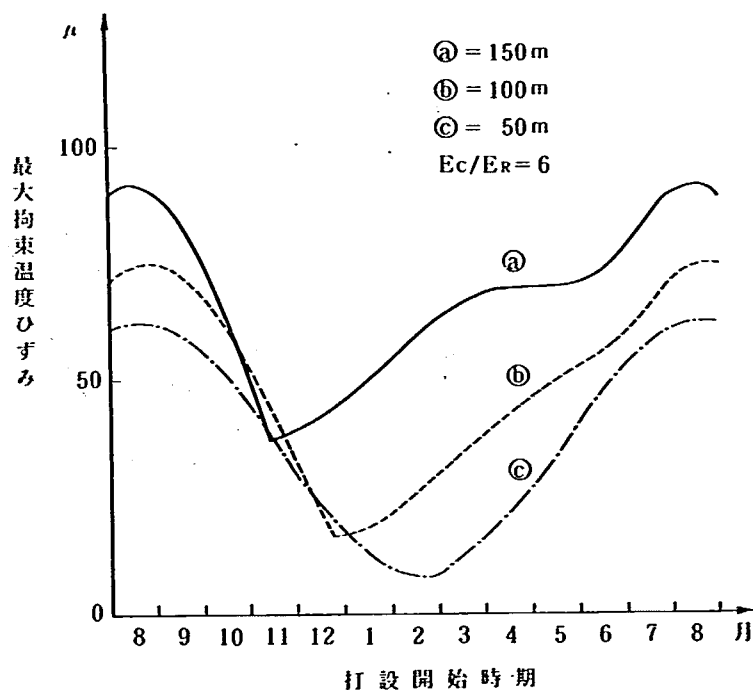


図-24 ダムの規模（堤高）による最大拘束温度ひずみの差

の打設が開始される場合には、基礎岩盤の弾性係数によって最大拘束温度ひずみの大きさは変化しない。これは、図-21に示したように、最大拘束温度ひずみは必ずしも着岩面に生じるのではなく、夏期にコンクリートが打設される層に生じるためである。すなわち、この場合、外部拘束よりも内部拘束の影響が大きいことになる。

4.3.3 最適打設開始時期

図-24は、堤高別に打設開始時期と最大拘束温度ひずみの関係を示したものであるが、これは特定の断面に限りて論じた結果である。しかし、ダムの高さは河床部から兩岸の袖部まで順次変化するから、最適打設開始時期はダム堤体内における拘束温度ひずみの最大値を最小にするものでなければならない。

図-26の破線は、河床部（最大断面部）における打設開始時期を横軸にとり、各打設開始時期毎に河床部から兩岸の袖部までの5つの断面における最大拘束温度ひずみを示したものである。ダム堤体内に生じる最大拘束温度ひずみは、各断面の最大拘束温度ひずみを表わす曲線を包絡する線（図中の実線）で表わされる。したがって、この包絡線と与えられる拘束温度ひず

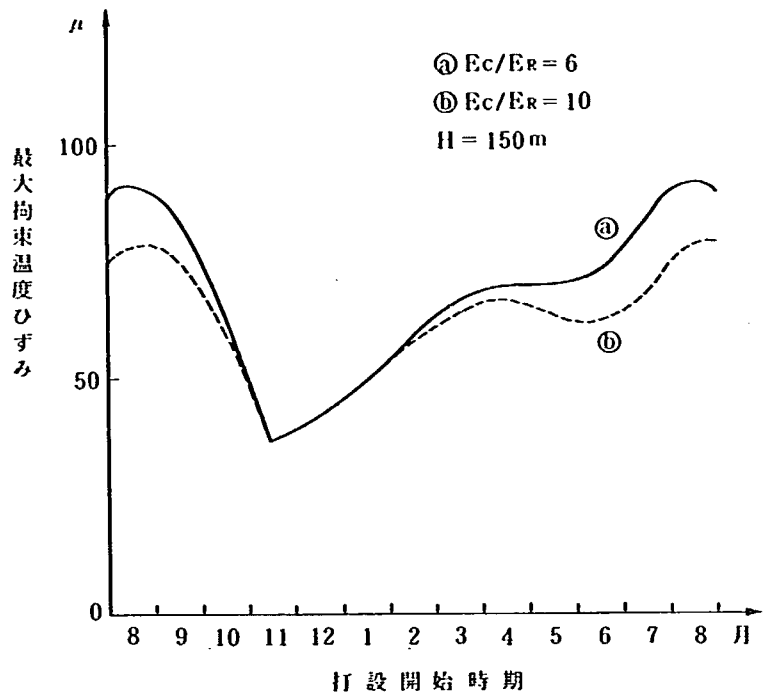


図-25 基礎岩盤の弾性係数の差によって生じる最大拘束温度ひずみの差

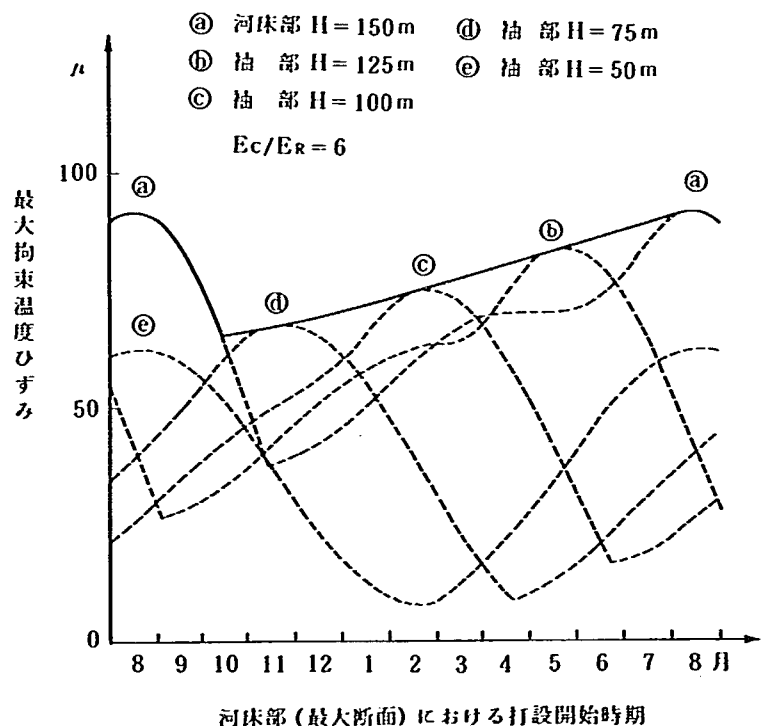


図-26 打設開始時期と堤体各断面における最大拘束温度ひずみの関係

みの最低値を与える打設開始時期が最適打設開始時期となる。一般に、最適打設開始時期は、「最大断面の着岩部付近における拘束温度ひずみと、打設開始後、最初の夏にコンクリートが打設される標高から立ち上がる断面の着岩部付近における拘束温度ひずみが等しくなるような打設開始時期」として与えられる。

4.4 結 論

RCD工法における温度応力の特性をとりまとめると次のようになる。

- ① ダム堤体に発生する拘束温度ひずみの大きさはコンクリートの打設開始時期によって大きく影響を受ける。
- ② 拘束温度ひずみの大きさは堤高が高くなるほど大きくなる。
- ③ 最大拘束温度ひずみは夏期にコンクリートが打設される層に生じる。打設時期によっては、基礎岩盤の弾性係数は最大拘束温度ひずみの大きさに影響しない。
- ④ 最適打設開始時期は、最大断面の着岩部付近における拘束温度ひずみと、打設開始後の最初の夏にコンクリートが打設される標高から立ち上がる断面の着岩部付近における拘束温度ひずみが等しくなるような打設時期として与えられる。

5. RCD用コンクリートの設計強度

5.1 ダムの構造的安定性に関する要件

重力式コンクリートダム of 構造的な安定性に関しては次の3つの要件が必要である²⁹⁾。

- ① 堤体の上流面に鉛直方向の引張応力を生じないこと
- ② せん断力による滑動に対して安全なこと
- ③ 堤体内の応力が許容応力を超えないこと

従来、重力式コンクリートダムの堤体コンクリートの配合設計に際しては、特別に堤高の大きなダムを除いて堤体コンクリートの強度が問題となることはなく、その配合は、水密性、耐久性、施工性などの条件から決定されるのが一般であった。しかし、RCD用コンクリートは、振動ローラーによる締め固めや温度規制などの要件から貧配合のコンクリートであることが必要であり、その配合設計に際して、強度に対する安全性を検討しなければならない場合が生じてきている。

このような場合、RCD用コンクリートの配合は、③の条件から決定されるべきであるが、実際には②の条件が支配的になるのが一般であり、③の条件を満足しても②の条件を満足しないという合理性を欠いた結果になっている。ここでは、RCD用コンクリートの設計強度の基本的な考え方について述べる。

5.2 コンクリートの破壊規準

5.2.1 コンクリートの破壊規準に関する諸説

コンクリートの破壊規準については、微視的、巨視的観点から多くの研究がなされている。微視的観点とは、コンクリートの破壊のメカニズムを取り扱ったものであり、Griffithの理論が広く受け入れられている³⁰⁾。これは、「材料(コンクリート)中の微細な空隙の先端における応力集中による引張破壊が、材料の巨視的な破壊を規定する」という考え方である。しかし、このような微視的破壊理論はここでの話題でないから、次に巨視的観点からみた破壊規準について述べる。

(1) せん断破壊説

せん断破壊説とは、破壊面に作用する垂直応力 σ とせん断応力 τ の関係が破壊を規定するとする説であり、破壊規準は次式で表わされる³⁰⁾。

$$\tau = f(\sigma) \quad \dots\dots\dots(8)$$

特にせん断応力と垂直応力の関係が直線関係にある場合は、Mohr-Coulombのせん断破壊説と呼ばれる。

(2) 正八面体応力説

正八面体応力説とは、3つの主応力の方向と等しい向きをなす面に作用する垂直応力 σ_{oct} とせん断応力 τ_{oct} の関係が破壊を規定するとする説であり、破壊規準は次式で表わされる³⁰⁾。

$$\tau_{oct} = f(\sigma_{oct}) \quad \dots\dots\dots(9)$$

本規準は、等方性材料においては破壊規準が応力の不変量で表わされるという条件から、せん断破壊説を発展させたものとして捉えることができるが、 τ_{oct}^2 がせん断ひずみエネルギー、 σ_{oct}^2 が体積ひずみエネルギーに比例することから、物理学的にはエネルギー説を支持したものと考えることができる。

(3) 最大最小主応力説

最大最小主応力説とは、最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 の関係が破壊を規定するとする説であり、破壊規準は次式で表わされる³⁰⁾。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = f(\sigma_1 + \sigma_3) \quad \dots\dots\dots(10)$$

本式は、数学的にはせん断破壊規準を表わす式(8)と等価である。しかし、物理学的にはGriffithの理論を拡張したものと考えられる。

5.2.2 ダム工学におけるコンクリートの破壊理論

(1) Hennyの実験

Hennyは、コンクリートの一軸圧縮強度試験におけるコンクリートの破壊形態がせん断破壊を呈していると考え³¹⁾、コンクリートダム堤体の安定性を検討する方法を提案している。これは、一般にHennyの式と呼ばれている。

$$N_s = \frac{\tau_0 \ell + fV}{H} \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここに、

N_s : 安全率

τ_0 : せん断強度

f : 内部摩擦角

ℓ : せん断面の長さ

V : 単位幅あたりのせん断面に作用する垂直力

H : 単位幅あたりのせん断面に作用するせん断力

である。したがって、Hennyはせん断破壊説をとっていたといえることができる。

(2) 伊東の実験

伊東はコンクリートの二軸圧縮強度、三軸圧縮強度試験を行い³²⁾、その結果、コンクリートの破壊は正八面体応力説に従うとしている。しかし実用的には、Mohr-Coulombのせん断破壊説を用いて、Hennyの式によりダムの安全性を検討してよいとしている。

(3) 畑野の実験

畑野はコンクリートの二面せん断強度試験を行い³³⁾、その結果、コンクリートの破壊はせん断

破壊説に従うとしている（厳密には、畑野は破壊理論について触れていないが、せん断破壊を前提として議論を展開している）。また、せん断強度と圧縮強度の関係を検討し、図-27に示すように、圧縮強度を表わすMohrの円はせん断強度の規準を表わす線に接することを示している。

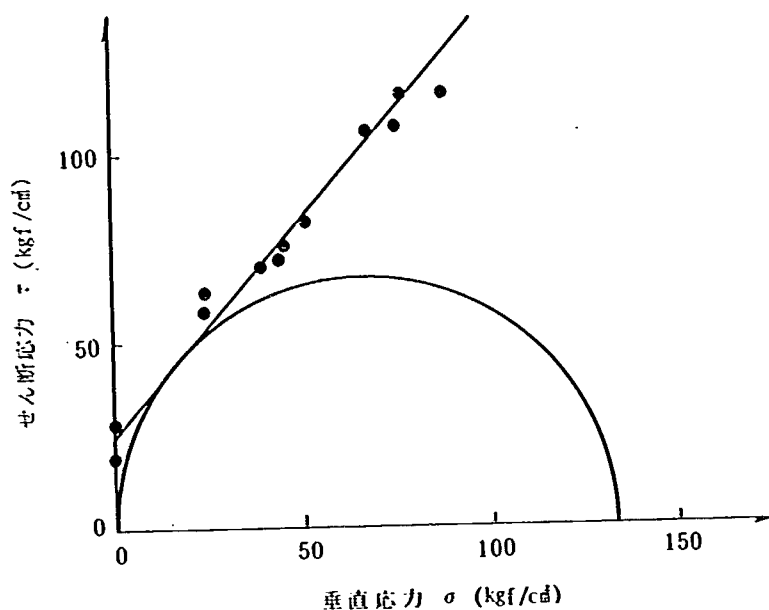


図-27 一軸圧縮強度とせん断強度との関係

5.3 コンクリートの設計強度

5.3.1 圧縮強度に対する安全率とせん断強度に対する安全率の関係

コンクリートの圧縮破壊に対する安全率は、コンクリートの一軸圧縮強度を σ_c 、コンクリート内に生じる最大主応力を σ_1 として、次式で表わされる。

$$n_c = \frac{\sigma_c}{\sigma_1} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに所要の安全率は4である。重力式コンクリートダム最大の主応力は一般にダムの下流面に生じ、そこでは他の主応力は0であるから、一軸圧縮強度との比較は妥当であるといえる（アーチ式コンクリートダムの場合、その応力状態は一軸応力状態とならないから、組合せ応力を考慮した安全率の修正が行われている³⁴⁾）。

一方、せん断破壊に対する安全率は、上述のHennyの式で表わされる。

$$N_s = \frac{\tau_0 \ell + f V}{H} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに所要の安全率は4である。

式(2)と式(3)では、安全率の視点がそれぞれ点と面であり互いに異なっている。そこで比較のため、式(3)を点での表示、すなわち応力表示に改めると次のようになる。

$$n_s = \frac{\tau_0 + f \sigma}{\tau} \quad \dots\dots\dots(4)$$

これは、局所せん断摩擦安全率（通称、点安全率）の式である。基礎岩盤に対して局所せん断摩擦安全率の所要値は2であるが、コンクリートに対して、圧縮強度とせん断強度が等価であるとすれば、所要の安全率は圧縮強度に対する安全率4に等しくなければならない。

一方、図-28によれば、コンクリートの一軸圧縮強度、せん断強度の間には次の関係がある。

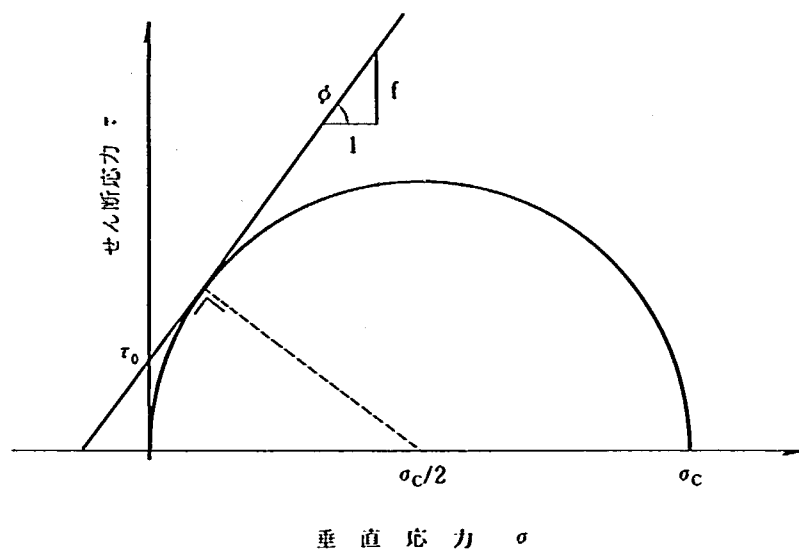


図-28 一軸圧縮強度 σ_c とせん断強度 τ_0 , f の関係

$$\tau_0 = \frac{\sigma_c}{2} \{ \sqrt{1 + f^2} - f \} \quad \dots\dots 09$$

そこで、例えば $f = 1$ として、 n_c と n_s の関係を図示すると図-29 のようになる。図より、 $n_c = n_s = 1$ の場合を除き、 n_c と n_s は等値にならないことがわかる。

いま、式09の関係をを用いると、式09は次のように変形できる。

$$\tau = \frac{\tau_0}{n_c} + f \sigma \quad \dots\dots 09$$

一方、式09は次のように変形される。

$$\tau = \frac{\tau_0}{n_s} + \frac{f}{n_s} \sigma \quad \dots\dots 09$$

したがって、安全率 n_c はせん断強度 τ_0 についての安全率であるのに対して、安全率 n_s はせん断強度 τ_0 、内部摩擦係数 f についての安全率となっており、両者のもつ意味は互いに異なっている。これが、図-29 のような結果が生じた理由である。

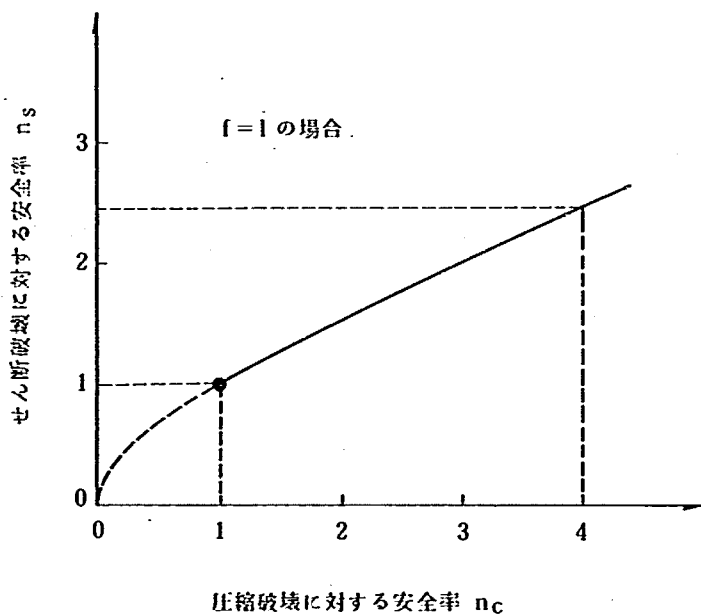


図-29 圧縮破壊に対する安全率 n_c とせん断破壊に対する安全率 n_s の関係

5.3.2 Henny の式の意味

上述のように、圧縮強度に対する安全率のもつ意味と Henny の式における安全率のもつ意味とは互いに異っており、本来、コンクリートの許容応力から定めるべき配合強度を、Henny の式から決定するのは不合理であることがわかる。

Henny の式は、強度に対する安全率（点での安全率）を示したのではなく、滑動に対する安全率（面での安全率）を示したものであると考えられる。したがって、

- ① ダム堤体内に滑動を生じるような弱面が存在し、その安全性が問題となる場合（たとえば、水平打継目が強度的に劣る場合など）には、Henny の式を用いてその安全性を確認する必要がある。
- ② ダム堤体内に滑動を生じるような弱面は存在せず、コンクリートの強度が一様であると考えられる場合には、Henny の式を用いてその安全性を確認する必要はなく、圧縮強度に対する安全性の検討だけで十分である。

ということになる。

後述のように、十分に処理した水平打継目の強度はコンクリート自身の強度に比べて遜色はなく、水平打継目に強度低下があるとすれば、むしろこれは施工上の問題と考えることができる。したがって、打継目に沿った滑動に対する安全性の問題は、コンクリートの配合設計の問題と区別して考えるべきであるといえる。

5.3.3 水平打継目に要求されるせん断強度

水平打継目に要求されるせん断強度は、水平打継目が構造上の弱面とならないような値でなければならない。水平打継目に要求されるせん断強度として、Henny の式による安全率 4 を確保するような値と規定すると、所要のせん断強度は、所要の圧縮強度から求められるせん断強度（式 49 参照）とは一致せず、一般にこれよりも大きな値となる。これは、水平打継目のせん断強度がコンクリート自身（水平打継目でない部分）のせん断強度よりも大きくなければならないことを意味するから、不合理である。このような不合理さを解消するためには、水平打継目に要求されるせん断強度は式 49 より求められる強度としなければならない。すなわち、水平打継目のせん断強度がコンクリート自身のせん断強度よりも劣ることがなければ、滑動に対する安定性の検討を行う必要がないと考えるべきである。

一般に、十分に処理し、モルタルを敷均した水平打継目のせん断強度はコンクリート自身のせん断強度に比べて遜色はない。したがって、水平打継目のせん断強度が問題となるのは、これに対して十分な打継目処理が行われない場合のみである。なお、この場合、RCD 用コンクリートの配合を変えても必要な打継目強度を確保できるとは限らないから、その対応は堤体形状の変更によって行うべきである。

5.4 コンクリートのせん断強度の試験例

ここでは、RCD工法によって打設されたRCD用コンクリートの一般部（水平打継目でない部分）と水平打継目の部分に対するせん断強度について、試験施工を行った個所で原位置せん断試験を行った結果、ならびに採取したボーリングコアに対して室内一面せん断試験を行った結果について述べる。

(1) 玉川ダムの例

玉川ダムでは、RCD用コンクリートの一般部および水平打継目の部分に対して、原位置せん断試験を実施している³⁶⁾。表-6にRCD用コンクリートの配合を示す。

表-6 RCD用コンクリートの配合（玉川ダム）

RCD用コンクリート		数 モ ル タ ル	
G_{max}	150 mm	C + F	470 kg/m ³
C + F	130 kg/m ³	F / (C + F)	30 %
F / (C + F)	30 %	W	270 kg/m ³
W	95 kg/m ³	S	1391 kg/m ³
S	657 kg/m ³		
G	1544 kg/m ³		

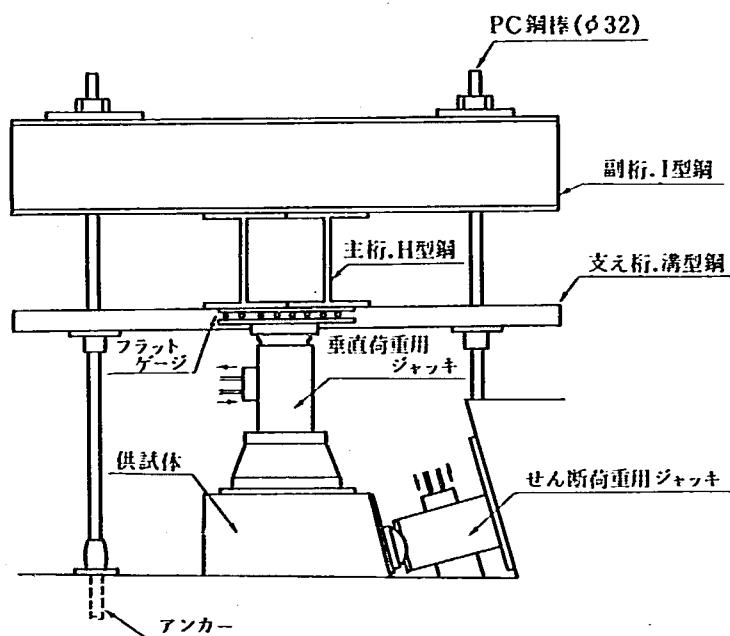


図-30 原位置一面せん断試験装置概略図

試験方法は、岩盤に対するロックせん断試験³⁵⁾とほぼ同様な方法であり、その概要を図-30に示す。せん断時のRCD用コンクリートの材令はおおよそ6カ月である。なお、水平打継目は、通常の打継目処理（グリーンカット、打継目清掃（ウォータージェット）、敷モルタル）を行ったものであり、グリーンカットは打設から24時間後に行っている。

試験結果を図-31に示す。実験精度を考えれば、両者のせん断強度は等しいと考えてよい。したがって、水平打継目は構造上の弱点になっていないことがわかる。

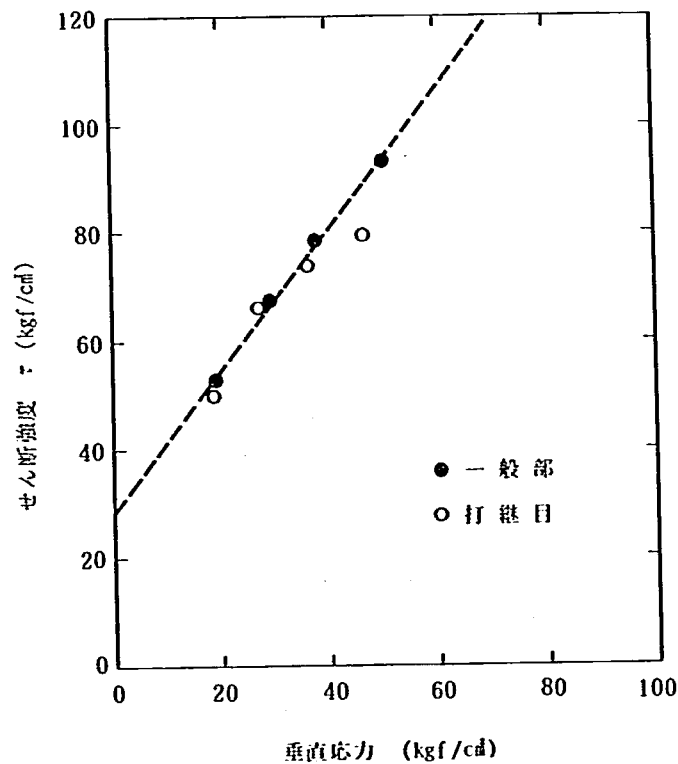


図-31 原位置せん断試験結果(玉川ダム)

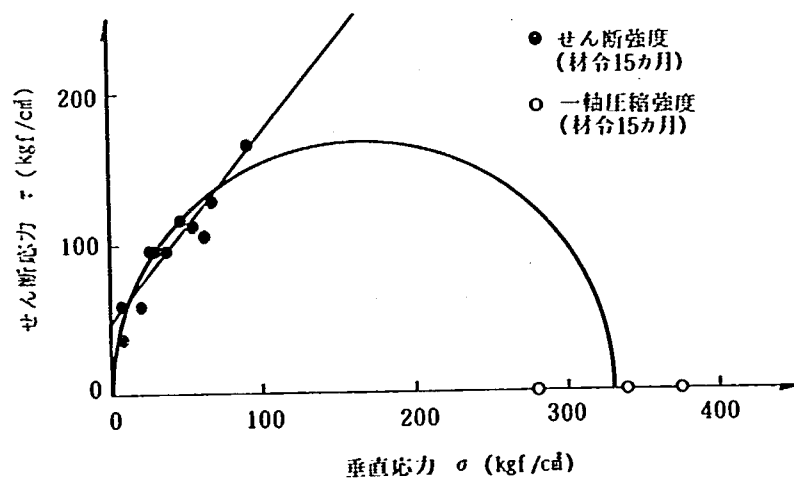


図-32 一軸圧縮強度とせん断強度の比較(玉川ダム)

また、図-32は、RCD用コンクリートの一般部から採取したボーリングコア($\phi 100$ mm)に対して、室内一面せん断試験を行い、一軸圧縮強度とせん断強度の関係を示したものである。これより、一軸圧縮強度とせん断強度の間には式(9)のような対応関係があることがわかる^{*2}。

(2) 境川ダムの例

境川ダムでは、RCD用コンクリートの試験施工個所からコンクリートのボーリングコア($\phi 170$ mm)を採取し、一般部および水平打継目に対して室内せん断試験を実施している³⁶⁾。表-7にRCD用コンクリートの配合を示す。

表-7 RCD用コンクリートの配合(境川ダム)

RCD用コンクリート		敷きモルタル	
G_{max}	80 mm	C + F	470 kg/m ³
C + F	130 kg/m ³	F / (C + F)	30 %
F / (C + F)	30 %	W	323 kg/m ³
W	100 kg/m ³	S	1449 kg/m ³
S	706 kg/m ³		
G	1546 kg/m ³		

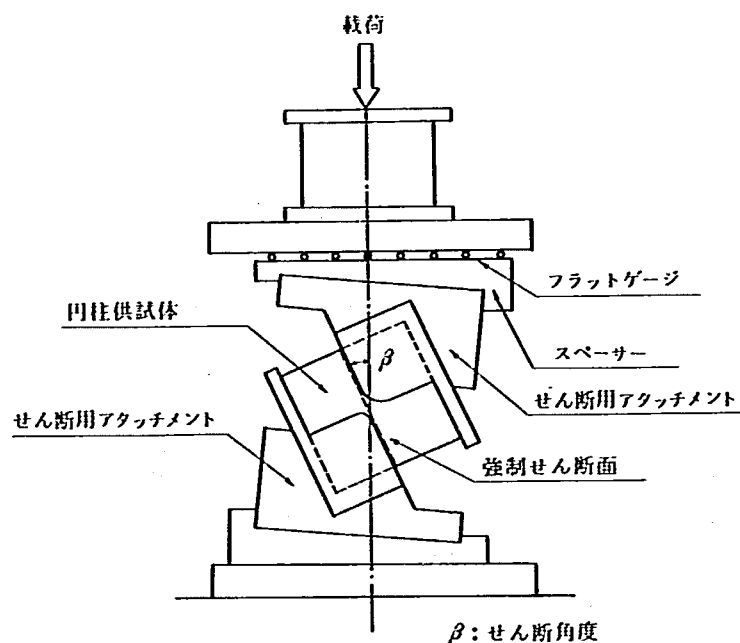


図-33 一面せん断試験機概略図

〔脚注2〕 厳密に言えば、図-32におけるせん断強度を表わすMohr-Coulombの破壊規準線は、一軸圧縮強度を表わすMohrの円と交差する結果となっている。しかし、これは一面せん断試験ではせん断面の応力分布が一様とならないため、求められたせん断強度が真のせん断強度よりも若干小さくなることに関係している。

試験は、図-33に示すように、アタッチメントを利用して、圧縮試験機によって一面せん断試験を行えるように工夫した方法によっている。なお、せん断の方向はアタッチメントの角度 β （図-33参照）によって調節でき、この角度を変えることにより、せん断強度と内部摩擦係数を求めることができるようになっている。試験時のコンクリートの材令は99日である。

水平打継目の処理は、次の3方法である。

- ① 通常の完全な打継目処理（グリーンカット、打継目清掃（ウォータージェット）、敷モルタルを実施）
- ② 打継目清掃、敷モルタルのみ（グリーンカットを省略）
- ③ 打継目清掃のみ（グリーンカット、敷モルタルを省略）

なお、グリーンカットは打設から24時間後に行っている。試験結果を図-34に示す（ただし、③のボーリングコアは水平打継目で破損して、供試体の採取ができなかった）。これより、①、②の処理を行った水平打継目のせん断強度は、一般部のせん断強度と同等またはそれ以上の値を示し、水平打継目が構造の弱点になっていないことがわかる。

(3) 神室ダムの例

神室ダムでは、RCD用コンクリートの試験施工箇所からコンクリートのボーリングコア（ ϕ 170 mm）を採取し、一般部および水平打継目に対して室内一面せん断試験を実施している³⁶⁾。表

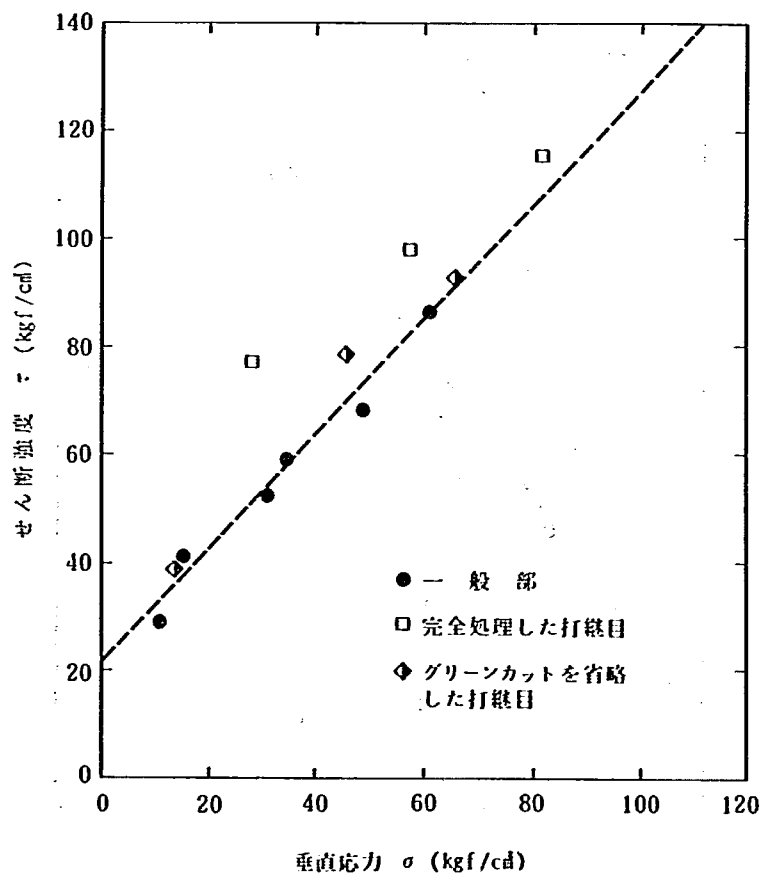


図-34 一面せん断試験結果（境川ダム）

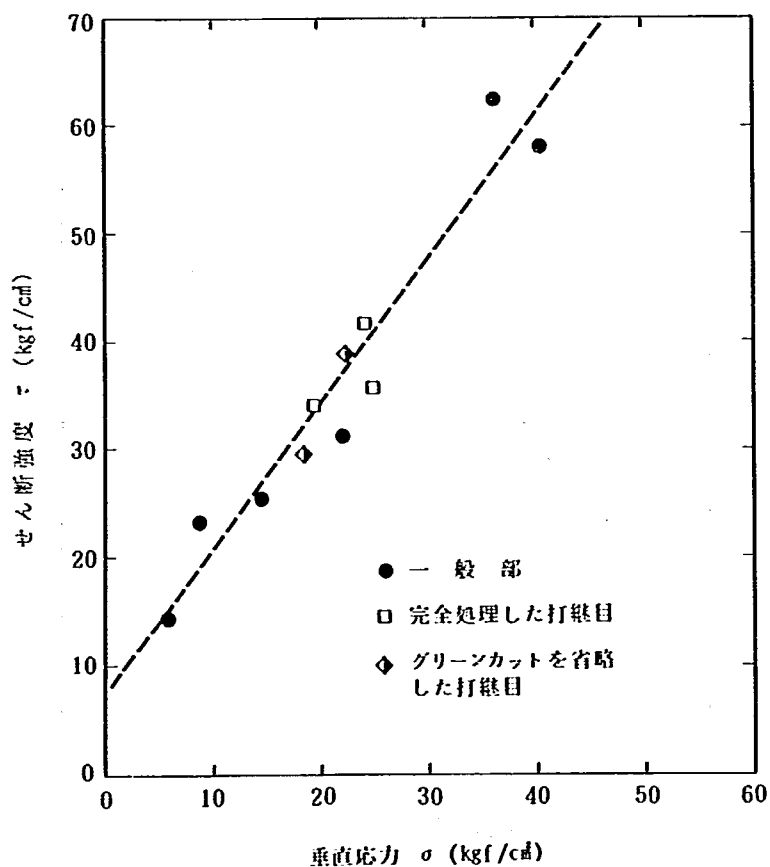
－8にRCD用コンクリートの配合を示す。試験時のコンクリートの材令は93日である。

水平打継目の処理方法は境川ダムと同様な3方法であり、グリーンカットは打設から48時間後に行っている。

試験結果を図－35に示す(ただし、③のボーリングコアは水平打継目で破損して、供試体の採取ができなかった)。供試体の数は少ないが、①、②の処理を行った水平打継目のせん断強度は、一般部のせん断強度と同等の値を示し、水平打継目が構造の弱点になっていないことがわかる。

表－8 RCD用コンクリートの配合(神室ダム)

RCD用コンクリート		数 モ ル タ ル	
G_{max}	80 mm	C + F	550 kg/m ³
C + F	120 kg/m ³	F / (C + F)	20 %
F / (C + F)	20 %	W	297 kg/m ³
W	100 kg/m ³	S	1362 kg/m ³
S	681 kg/m ³		
G	1603 kg/m ³		



図－35 一面せん断試験結果(神室ダム)

(4) Aダムの例

Aダムでは、RCD用コンクリートの試験施工箇所からコンクリートのボーリングコア($\phi 170$ mm)を採取し、一般部および水平打継目に対して室内一面せん断試験を実施している³⁶⁾。表-9にRCD用コンクリートの配合を示す。試験時のコンクリートの材令は91日である。

水平打継目の処理方法は境川ダムと同様な3方法であり、グリーンカットは打設から18時間後に行っている。

試験結果を図-36に示す(ただし、③のボーリングコアは水平打継目で破損して、供試体の採取ができなかった)。①、②の処理を行った水平打継目のせん断強度は、一般部のせん断強度よ

表-9 RCD用コンクリートの配合(Aダム)

RCD用コンクリート		数 モ ル タ ル	
G_{max}	80 mm	C + F	470 kg/m ³
C + F	120 kg/m ³	F / (C + F)	20 %
F / (C + F)	20 %	W	283 kg/m ³
W	103 kg/m ³	S	1445 kg/m ³
S	729 kg/m ³		
G	1574 kg/m ³		

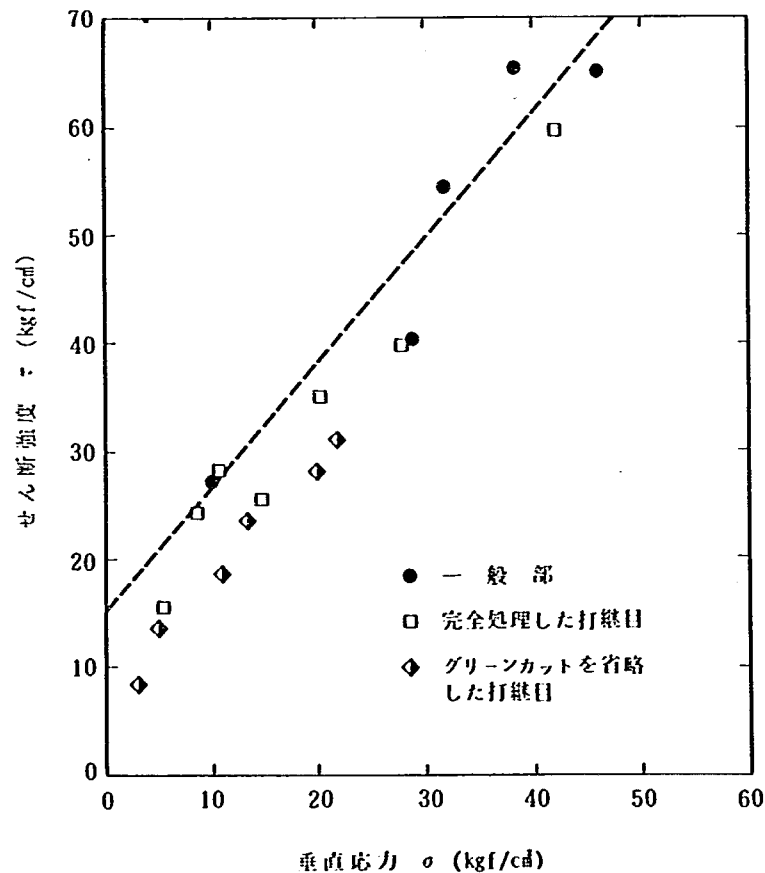


図-36 一面せん断試験結果(Aダム)

りも小さい値を示す結果となっている。①については、試験データのばらつきを考えると明かな強度差があるとは断定できないが、②の結果は、一般部よりもかなり低い値を示し、水平打継目の処理方法がせん断強度に影響を与える結果となっている。

5.5 結 論

コンクリートの設計強度と安全率に関する考察および実験結果をとりまとめると次のようになる。

- ① 圧縮強度に対する安全率の考え方と Henny の式におけるせん断に対する安全率の考え方には、基本的な相違がある。したがって、Henny の式よりコンクリートの配合強度を決定するのは適当でない。
- ② Henny の式は、滑動が考えられるような構造上の弱面に対して、これに対する安全性を検討する式である。したがって、水平打継目が強度が低下した弱面と考えられる場合のみ、Henny の式を用いた安全性の検討が必要である。
- ③ 十分な打継目処理を実施する限り、水平打継目のせん断強度がコンクリート自身のせん断強度より低下することはなく、水平打継目の強度低下はむしろ施工上の問題と考えられる。
- ④ 敷モルタルは水平打継目のせん断強度を確保する上で不可欠である。

6. あ と が き

以上、RCD工法によるコンクリートダム設計上の課題のいくつかについて考察してきたが、このほか、RCD工法によるコンクリートダム設計に関して、今後検討すべき課題がいくつか考えられる。ここでは参考までに、今後解決すべき設計上の課題を列挙しておく。

(1) RCD用コンクリートの設計強度を求める基準材令

RCD用コンクリートにおいては、コンクリートの水和熱を抑制するため、またペーストによる細骨材空隙充填率、モルタルによる粗骨材空隙充填率を確保して所要のコンシステンシー、コンパクタビリティを得るために、通常、セメントの20～30%をフライアッシュで置き換えている。このため、コンクリートの設計強度を求める基準材令91日以後も、その強度の発現が著しい。したがって、コンクリートの設計強度を求める基準材令について検討する必要がある。

(2) RCD工法に適した堤体形状、堤内構造物の設計

RCD工法においては、堤体の断面幅が狭くなる天端付近、堤体を横断する放流設備などの堤内構造物が、効率的な施工上の障害になっている。このため、RCD工法に適した堤体断面形状の決定、堤内構造物の合理的配置計画について検討する必要がある。

(3) RCD用コンクリートに要求される品質

RCD工法の経済性は、機械化による施工の効率性にあるが、コンクリート中の単位セメント量の節減もまた大きなメリットとなっている。現在、RCD用コンクリートは外見的にも従来コンクリートとほとんど遜色のないような密実なコンクリートとして設計されている（単位結合材量の下限値を 120kg/m^3 に設定している）が、RCD用コンクリートに要求される品質の限界を明らかにするとともに、高い強度が必要とされない小規模なダムにおいては、単位セメント量の低減の可能性についても検討する必要がある（この場合、RCD用コンクリートの品質だけでなく、例えば、外部コンクリートによる止水性の確保など、これに代わる設計上の対処法の確実性についても検討する必要がある）。

(4) 外部コンクリートの合理的設計

RCD工法では、外部コンクリートの設計施工は従来工法に準じて行っている。外部コンクリートは、ダム堤体の耐久性を確保するために必要とされているが、その配合、所要厚さについては確たる根拠があるわけでない。小規模なダムでは、この外部コンクリートによってRCD用コンクリートの施工範囲が限定され、RCD工法の有利性が十分に発揮されない場合が多い。このため、外部コンクリートの必要性を含めて（たとえばプレキャスト型枠の利用など）、その合理的設計法の確立が必要である。また、併せて外部コンクリートに要求される配合についても検討する必要がある。

(5) RCD用コンクリートの引張強度

コンクリートダムの耐震設計の合理性は、過去に何ら重大な被害を被っていないことで十分実証済みである。RCD工法によるダムの設計体系は、従来工法のコンクリートダムの設計体系と

変わりはなく，その耐震性は基本的には問題がないと考えてよいが，R C D用コンクリートの引張強度の特性についてはいまだ明らかな部分もあり，今後の検討が必要である。また適切な温度規制を実施するためにも，R C D用コンクリートの引張強度の特性を十分に把握する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Williams, R. T. : Cement Stabilized Materials in Developments in Highway Pavement Engineering Vol. 1, Applied Science Publishers, London, 1978
- 2) Paton, J. : Discussion to Q 39, Trans. of 10th ICOLD Congress, Vol. 6, 1970
- 3) Raphael, J. M. : The Optimum Gravity Dam, Rapid Construction of Concrete Dams, ASCE, 1970
- 4) Cannon, R. W. : Concrete Dam Construction using Earth Compaction Method, Economical Construction of Concrete Dams, ASCE, 1972
- 5) Cannon, R. W. : Compaction of Mass Concrete with Vibrating Roller, ACI Journal, Vol. 71-10, 1974
- 6) Moffat, A. I. B. : A Study of Dry Lean Concrete Applied to the Construction of Gravity Dams, Trans. of 11th ICOLD Congress, Vol. 3, 1973
- 7) Gentile, G. : Study, Preparation and Placement of Lean Cement Concrete, with Special Regard to its Use in Solid Gravity Dams, Trans. of 8th ICOLD Congress, Vol. 3, 1964
- 8) Chao, P. C. & J. A. Johnson : Rollcrete Usage at Tarbela Dam, Concrete International, Vol. 1-11, 1979
- 9) Kennard, M. F. : Introduction to Rolled Concrete Dams, CIRIA Conference, 1981
- 10) 広瀬利雄, 志水茂明, 竹村公太郎 : RCDコンクリート工法によるダムに関する研究, 土木学会論文集, 303号, 1980
- 10) 小宮山克治 : 大川ダムのマット部におけるRCDコンクリート, セメントコンクリート, №407, 1981
- 11) 鈴木徳行, 田中道弘, 岩田泰之, 坂田俊之 : RCDコンクリートによる島地川ダムの合理化施工, 土木学会誌, Vol. 65-11, 1980
- 11) 建設省中国地方建設局 : 島地川ダム工事誌, 1982
- 12) 村田孝雄, 古屋稔, 南勲 : ダム嵩上げ工事の施工とその計画—新中野ダムの建設—, 土木学会誌, Vol. 68-6, 1983
- 13) 山内彪, 原田譲二, 岡田輝夫, 島田昭一 : RCD工法による玉川ダムの施工, 大ダム, №114, 1985
- 14) 柳川城二 : 観音閣ダムの近況について, ダム技術, №25, 1988
- 15) Hopman, D. R. & D. R. Chambers : Construction of Elk Creek Dam, Roller Compacted Concrete II, ASCE, 1988

- 16) Schrader, E. K. & C. H. J. Thayer : Willow Creek Dam—A Roller Compacted Concrete Fill, Trans. of 14th ICOLD Congress, Vol. 4, 1982
- 17) US Army Corps of Engineers : Willow Creek Lake Project, Periodic Inspection Report No 2, 1985
- 18) Lowe, J. : Roller Compacted Concrete Dams — An Overview, Roller Compacted Concrete II, ASCE, 1988
- 19) Court Challenge Stops Records at Elk Creek, Engineering News Record, Dec. 24, 1987
- 20) Dunstan, M. R. H. : Rolled Concrete for Dams — Construction Trial, CIRIA Tech. Note, No 106, 1981
- 21) Dolen, T. P., A. T. Richardson & W. R. White : Quality Control / Inspection—Upper Stillwater Dam, Roller Compacted Concrete II, ASCE, 1988
- 21) Speed and Grit Beat Problems on BuRec Dam—Upper Stillwater is RCC Benchmark, Engineering News Record, Oct. 29, 1987
- 22) Bureau of Reclamation : Design Criteria for Concrete Arch and Gravity Dams, Engineering Monograph, No 19, 1974
- 23) Dunstan, M. R. H. : Design Considerations for Roller—Compacted Concrete Dams, Water Power & Dam Construction, Jan., 1986
- 24) 国土開発技術研究センター : R C D工法技術指針 (案), 1981
- 25) 志水茂明, 柳田力 : R C D工法における大型供試体試験, ダム技術, No 26 (増刊号), 1988
- 26) 藤沢侃彦, 永山功 : コンクリートダムの温度応力発生機構とひび割れ防止法, 大ダム, No 114, 1985
- 27) 永山功, 矢沢克敏 : コンクリートダムの温度応力解析 (Ⅱ), 土木技術資料, Vol. 22-9, 1980
- 28) 廣瀬利雄 : コンクリートダムの合理化施工に関する研究, 東京大学博士論文, 1988
- 28) 廣瀬利雄, 永山功 : R C D工法における温度規制の設計法, ダム技術, No 26 (増刊号), 1988
- 29) 建設省 : 河川管理施設等構造令施行規則, 1976
- 30) 例えば, コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 1981
- 31) Henny, D. C. : Stability of Straight Concrete Gravity Dams, Trans. of ASCE. Vol. 99, 1934
- 32) 伊東茂富 : 組合せ応力状態におけるコンクリートの強度について, 土木研究所報告, 100号, 1958

- 32) 伊東茂富：コンクリートのせん断強度—コンクリートダムの滑動安定に関連して，セメントコンクリート，148号，1959
- 33) 畑野正：コンクリートダムの滑動安定度について，土木学会論文集，6号，1951
- 33) 畑野正：堰堤コンクリートの強度規準並びにせん断強度について，土木学会論文集，6号，1951
- 34) 建設省河川局：河川砂防技術基準(案)設計編，1987
- 35) 原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針，土木学会，1983
- 36) 永山功，渡辺和夫，田中靖：重力式コンクリートダムの設計におけるコンクリートのせん断強度について，ダム技術，№26(増刊号)，1988

RCD工法によるコンクリート
ダム設計上の諸問題に関
する考察

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2675号
平成元年1月(1989)
建設省土木研究所ダム構造研究室
永山 功, 渡辺和夫, 田中 靖
大槻英治, 小林政登

要旨 近年, コンクリートダムの施工の合理化を目指して各種の工法が研
究, 開発されている。その一つにRCD(Roller Compacted
Dam-Concrete)工法がある。

RCD工法とは, 超硬練り貧配合コンクリートをダンプトラックなどによ
って運搬し, これをブルドーザーで撒き出し, 振動ローラーで締め固めるコン
クリートダムの新しい施工法である。本報文は, RCD工法における設計上
の諸問題のうち, RCD用コンクリートの配合特性と強度特性, 温度応力と
温度規制, 水平打継目の強度とその設計上の取扱いについて検討した結果を
とりまとめたものである。

キーワード: RCD工法, RCD 用コンクリート, 配合設計, 温度
規制, 水平打継目, 圧縮強度, せん断強度

郵便はがき

305-□□

を40円切
下はいて

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

○



土木研究所資料第2675号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

⑩

