

土 木 研 究 所 資 料

フィルダムの挙動解析（その1）

—— 天端最大断面の外部変位 ——

平成3年3月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

「Copyright © (1991) 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。」

フィルダムの挙動解析（その1）

—— 天端最大断面の外部変位 ——

フィルダム研究室 室 長 松 本 徳 久
主任研究員 安 田 成 夫
伊 藤 基 博

要 旨

本報告は、実ダムにおいて測定された外部変位量のうち天端変位量に着目し、次の三つの項目に分けて整理を行った。

①マクロ的なダム天端の変位傾向の把握。つまり、各ダムにおける外部変位量を測定している標的のなかで、最大断面の天端部の標的の変位量に着目して、その沈下量、上下流方向水平変位量の変位傾向についてとりまとめた。②長期間にわたる変位予測方法の確立。つまり、その実測された沈下量の記録より、沈下傾向をつかむとともに、約100年後（40,000日）沈下量の予測を試み、他の研究例との比較を行った。③堤体内の応力－ひずみ関係の推定。つまり、ダムが貯水位変動を受けたときの天端水平変位量の実測記録と水圧荷重の関係から、逆解析を行い堤体内の応力－ひずみ関係を推定した。

キーワード：ロックフィルダム、実測挙動、外部変位、逆解析

ANALYSES OF BEHAVIORS OF FILLDAMS (PART 1)

— Deformation at crest of maximum cross section —

Norihisa MATSUMOTO
Head, Filltype Dam Section
Nario YASUDA
Senior Research Engineer, ditto
Motohiro ITOH
Engineer, ditto

Synopsis

The following three items are arranged concerning the deformations observed at the crest of real filldams.

- ① Arrangement of a macroscopic inclination of deformations at the dam crest: The inclination of settlements and horizontal displacements of the up and down stream direction at the crest of maximum cross section of each filldam.
- ② Establishment of the method predicting long-pending deformations: The inclination of the settlements is investigated from observed record, and the value of settlement after 100 years is predicted and compared with the results from previous researchers.
- ③ Assumption of the relationship between stress and strain of the dam body: This is assumed by relationship between hydraulic load from reservoir and observed horizontal displacements through backanalysis.

Key Words: Rockfill dams, observed behavior, deformation back-analysis

ま え が き

ロックフィルダムの設計では、ある仮定のもとに堤体および基礎の解析計算を行い、さらには設計条件を満足するように施工を実施している。したがって、堤体および基礎の挙動を計測し、仮定の適合性を評価することは重要なことである。

そのために、観測計器の適切な配置方法および頻度を含めた計測方法の最適化を図ること、さらには、それらを取りまとめて安全管理のための指針とすることを目的に本調査解析を実施した。

本報告は、実ダムにおいて測定された外部変位量のうち天端変位量に着目し、次の3つの項目に分けて整理を行った。

① マクロ的なダム天端の変位傾向の把握

各ダムにおける外部変位量を測定している標的のなかで、最大断面の天端部の標的の変位量に着目して、その沈下量、上下流方向水平変位量（以降、水平変位量）の変位傾向についてとりまとめた。

また、天端変位の要因として考えられる材料物性値、施工条件について天端変位量との関係について整理した。

② 長期間にわたる変位予測方法の確立

その実測された沈下量の記録より、沈下傾向をつかむとともに、約100年後（40000日）沈下量の予測を試み、他の研究例との比較を行った。

③ 堤体内の応力－ひずみ関係の推定

ダムが貯水位変動を受けたときの天端水平変位量の実測記録と水圧荷重の関係から、逆解析を行い堤体の弾性係数の変化傾向を解析し、堤体内の応力－ひずみ関係を推定した。

対象としたロックフィルダムは、21ダムで完成後3～30年経過したダムである。

目 次

まえがき

第1章 天端部の変位特性	1
1.1 沈下	1
1.2 水平変位	1
1.3 まとめ	2
第2章 沈下量の予測	9
2.1 既往報告例	9
2.2 沈下量とダム高の関係より求まる関係式	9
2.3 沈下率曲線のあてはめ	10
2.4 まとめ	11
第3章 天端変位の要因	15
3.1 概 要	15
3.2 沈下と水平変位	15
3.3 水平変位タイプ	15
3.4 間隙比, 乾燥密度	16
3.5 締固め厚さ, 施工速さ	16
3.6 まとめ	17
第4章 天端水平変位量と弾性係数	30
4.1 概 要	30
4.2 測定された天端の水平変位	30
4.3 FEMとたわみ法による解析	30
4.4 まとめ	32
第5章 結 論	38
謝 辞	39
参考文献	40
付表・付図	41

第1章 天端部の変位特性

1.1 沈下

図-1.1に沈下量の経年変化図の代表的なものを示す。この沈下曲線は時間の経過とともに沈下量が収束していく傾向を示している。また、その沈下曲線は比較的初期の時期に沈下量が急に増加する変曲点を示すものが、21ダム中19ダムである。なお、残り2ダムについては測定時間、測定頻度などの条件で判断できない。この変曲点の生ずる時期は、貯水位が最高水位に達した時点である。つまり、この現象は、最高水位時から水位を低下させる過程において上流側透水ゾーンの鉛直方向の有効応力が増加することが一因と考えられる。

図-1.2に沈下量と貯水位の関係図を示す。Qダムは、水位上昇時にはあまり沈下していないが、貯水位の低下と共に沈下が進行している現象が認められる。二度の大きな水位変動（試験湛水時）を受けた後は、測定頻度の関係により、明瞭な沈下と貯水位変動の関係は認められない。Tダムは、前述のダムと異なり、水位上昇時にも沈下が進行しているような現象が認められる。しかし、このような水圧荷重の载荷に起因すると思われるような比較的大きな沈下は、既往文献¹⁾によれば、築堤中の変位が未だ収束しないままに湛水が開始されたために生じているクリープ的な沈下量と推定されると報告されている。

図-1.3は、ダム高と計測開始より1000日経過後の沈下量の関係について示したものである。なお、計測開始時点は必ずしも盛立て完了時点に一致していないため図-1.3はかなりばらついているが、ダム高が高くなるにつれ沈下量が大きくなる傾向が確認される。破線は、中央コア型、傾斜コア型タイプのダムの計測開始時点と盛立て完了時点が比較的一致しているダムにおける1000日後の沈下を意味している。この曲線より上（沈下量が大きい）にある2ダムは、どちらも昭和30年代以前に建設された表面遮水壁型ダムで、堤体材料の盛立ては Dumped rock 工法により行われている。また、これらの2ダム以外は、重機械による十分な締固めが行われている。

1.2 水平変位

図-1.4に水平変位量の経時変化図を示す。この図で(+)側が下流側変位を示す。変位の傾向は2つのタイプに区分され、①下流側変位量増加型、②一旦下流側へ変位するがその後上流側に戻って来る、一旦下流側変位後上流側変位型がある。また、下流側変位量増加型のなかで、①-1下流側変位量単純増加型と、①-2下流側へ変位しているが上流側へ多少揺れ戻りの傾向を示しながら収束傾向を示す型がある。①-1型は、昭和30年代以前に建設されたダムで、かつ、表面遮水壁型のダムにおいて認められる。①-2型は21ダム中12ダムで認められる。昭和50年以降に建設されたダムでは、ほとんどのダムでこのような傾向を示す。②型は5ダムで、昭和50年代前半までに建設されたダムの中では、6ダム中4ダムでこのような傾向を示す。

図-1.5に初期湛水時の下流側最大水平変位量と、初期湛水以来現在までに測定された下流側最大

水平変位量（以降、最大水平変位量）の関係を示す。これは、初期湛水時に示す水平変位量と最大水平変位量を比較することによって、最大水平変位量が初期湛水時に生じる傾向を見てみたものである。この図より、この関係はほとんどのダムで 1 : 1 にあり最大水平変位量は初期湛水時におおむね生じていることがわかる。

図-1.6 に、ダム高と最大水平変位量の関係について示す。これより、最大水平変位量とダム高の関係の上限値は、ほぼ次式で与えられる。

$$dh_{MAX} \leq 0.001 \cdot H \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここに、

dh_{MAX} : 最大水平変位量 (m)

H : ダム高 (m)

図-1.7 に最大水平変位量と 1000 日後の沈下量の関係を示す。この関係は次式で表される。

$$dh_{MAX} = \alpha \cdot dv \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここに、

dh_{MAX} : 最大水平変位量 (m)

dv : 1000 日後の沈下量 (m)

α : 係数 (0.1 ~ 1.0)

この関係は、係数 α が 0.1 ~ 1.0 の範囲でばらつきが大きい、約 7 割のダムが 0.1 から 0.5 の範囲にある。また、係数 α が 1.0 より大きい範囲にも分布するダムもある。係数 α が 1 より大きいと言うことは 1000 日後の沈下量より、下流側最大水平変位量が多いことを示す。

1.3 まとめ

各ダムにおける外部変位量を測定している標的のなかで、天端部の最もダム高の高い地点の標的の変位量に着目して、その沈下量、水平変位量の変位傾向についてとりまとめると、次のようになる。

- ① 沈下量の経時変化曲線は、湛水開始時、最高水位時に沈下量が促進する変曲点を示すものがほとんどである。
- ② 水平変位量の経時変化の傾向は、下流側変位収束型と一旦下流側変位後上流側変位型に大別される。
- ③ 最大下流側水平変位量は、初期湛水時の最高水位時に生じるケースが多い。
- ④ ダム高と最大水平変位量の間では、変位量の上限値が次式で与えられる。

$$dh_{MAX} \leq 0.001 \cdot H$$

- ⑥ 最大水平変位量と 1000 日後の沈下量の間は、次式の関係にある。

$$dh_{MAX} = (0.1 \sim 1.0) \cdot dv$$

- ⑥ 昭和30年代以前に建設された表面遮水壁型ダムと、それ以外のダムの変位傾向が大きく異なる。

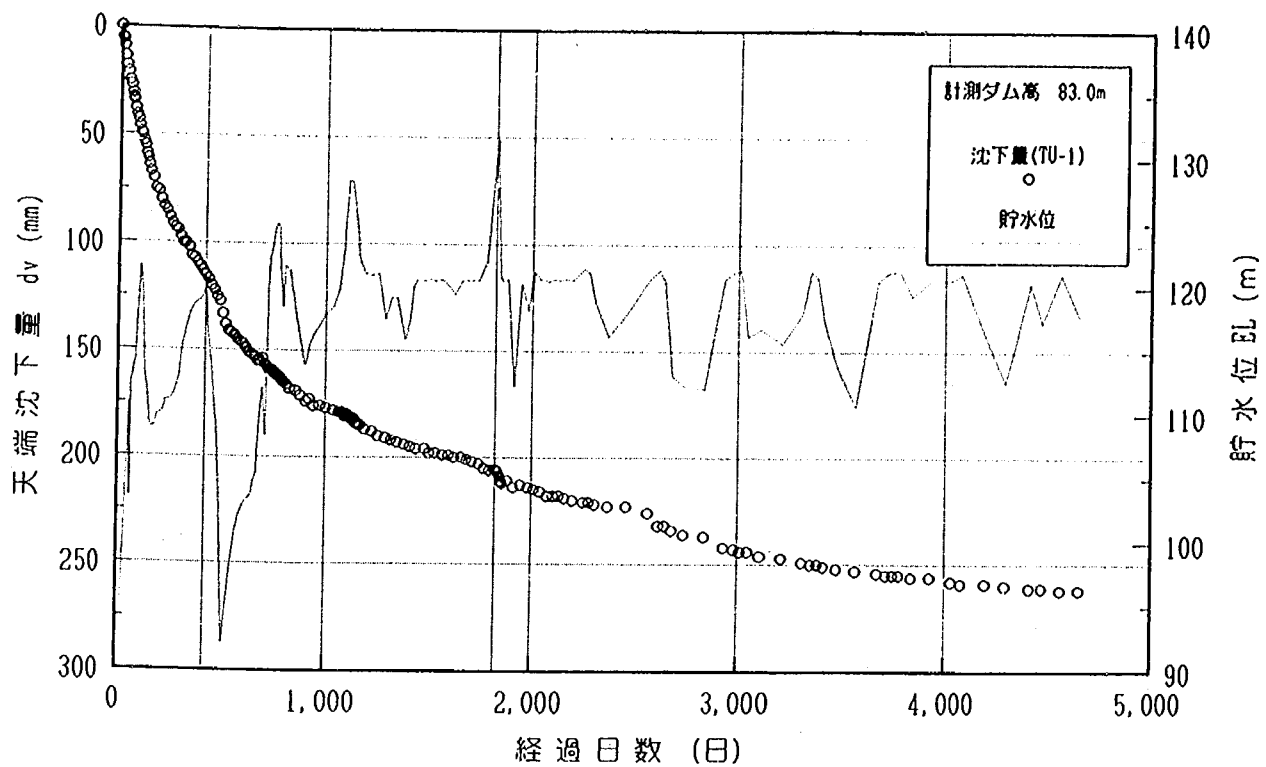


図-1.1(a) 天端沈下量の経年変化 (Iダム)

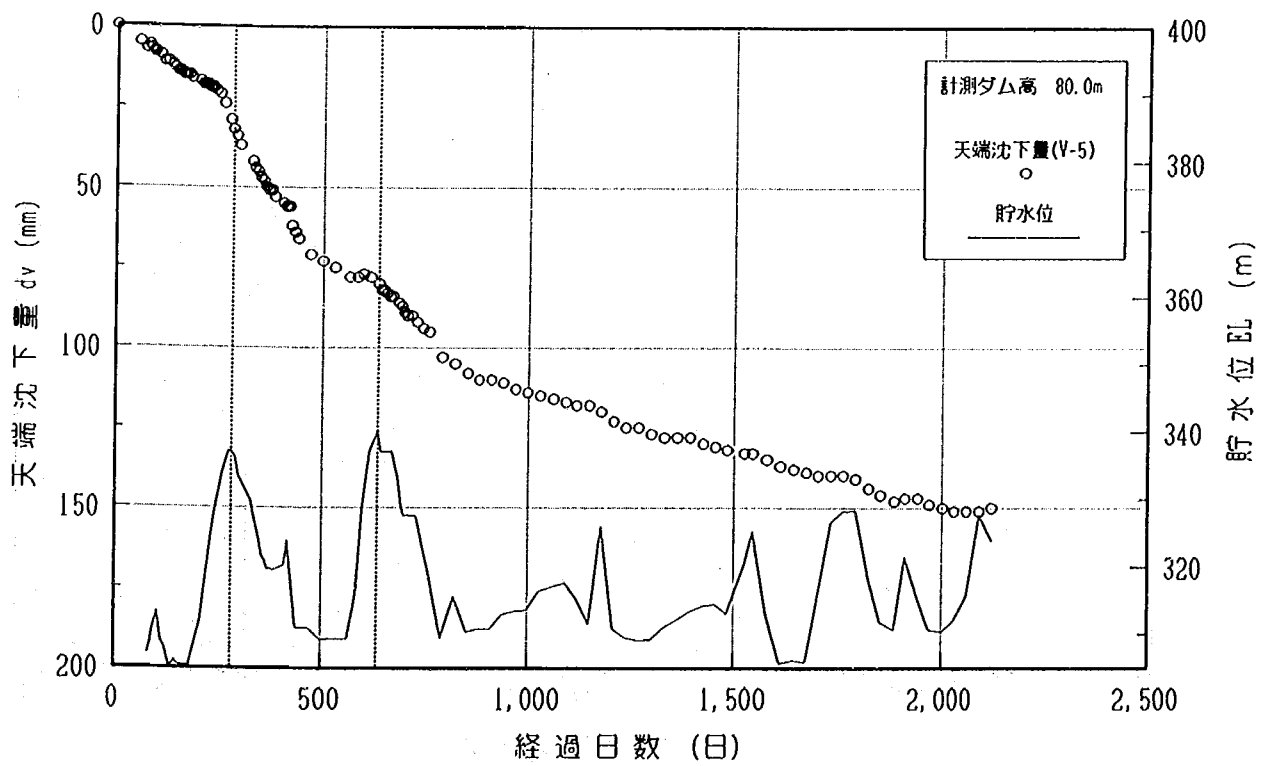


図-1.1(b) 天端沈下量の経年変化 (Qダム)

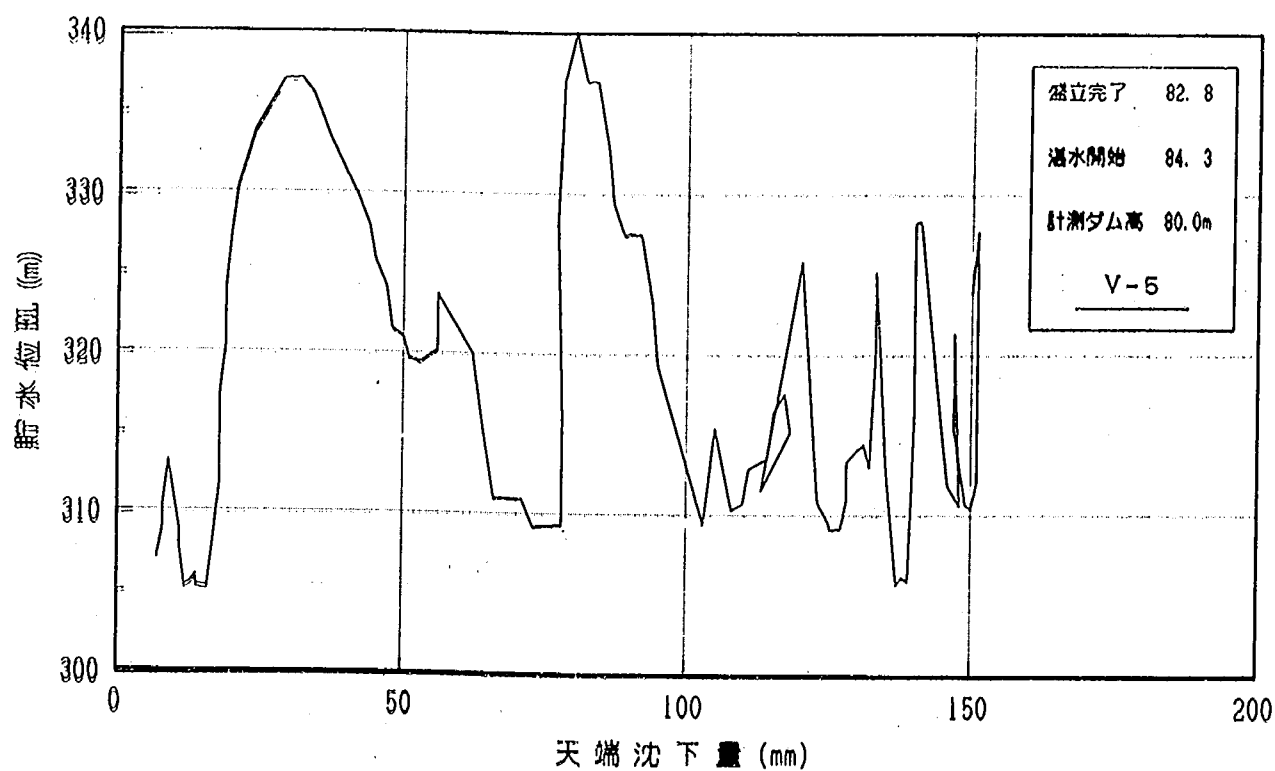


図-1.2(a) 貯水位と天端沈下量 (Tダム)

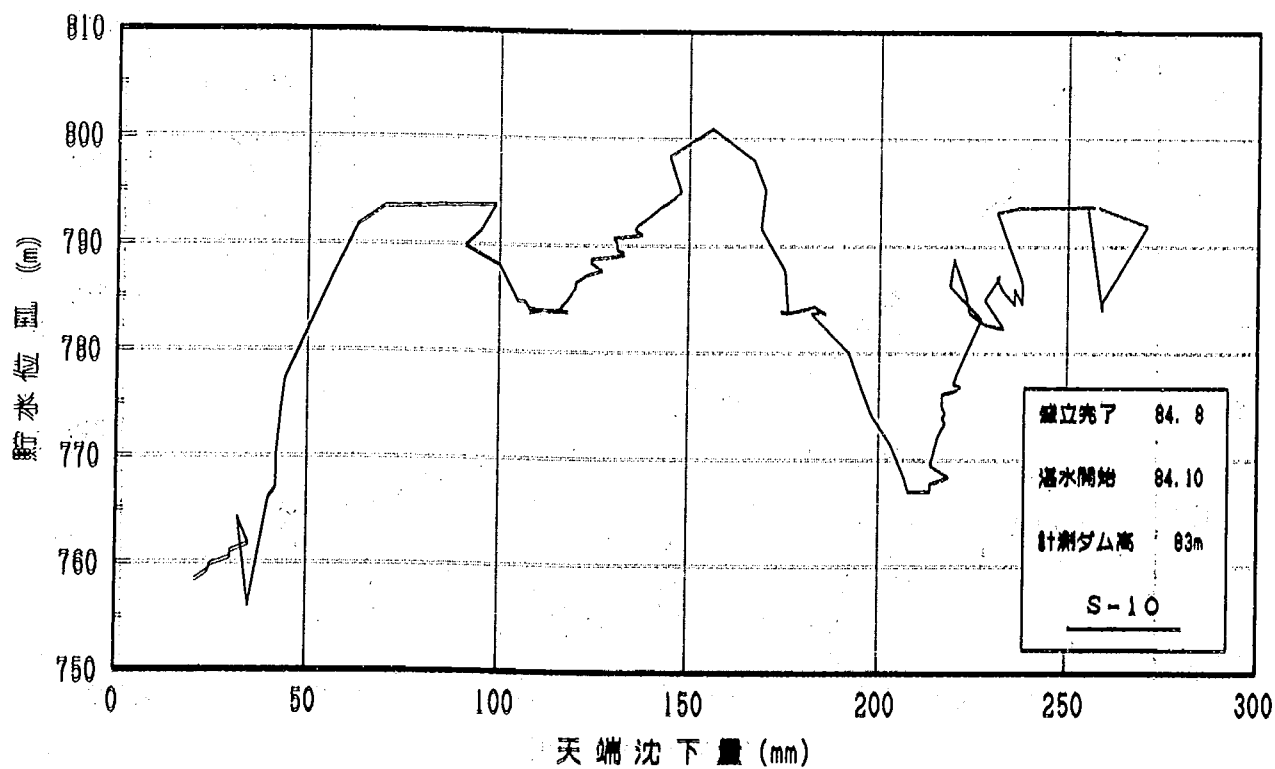


図-1.2(b) 貯水位と天端沈下量 (Qダム)

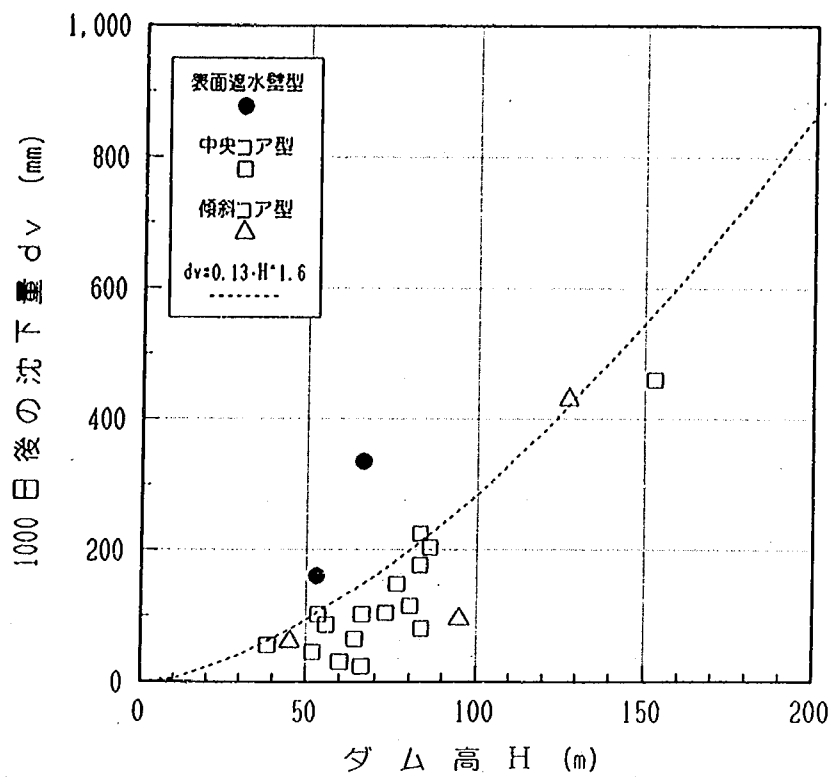


図-1.3 ダム高と1000日後沈下量

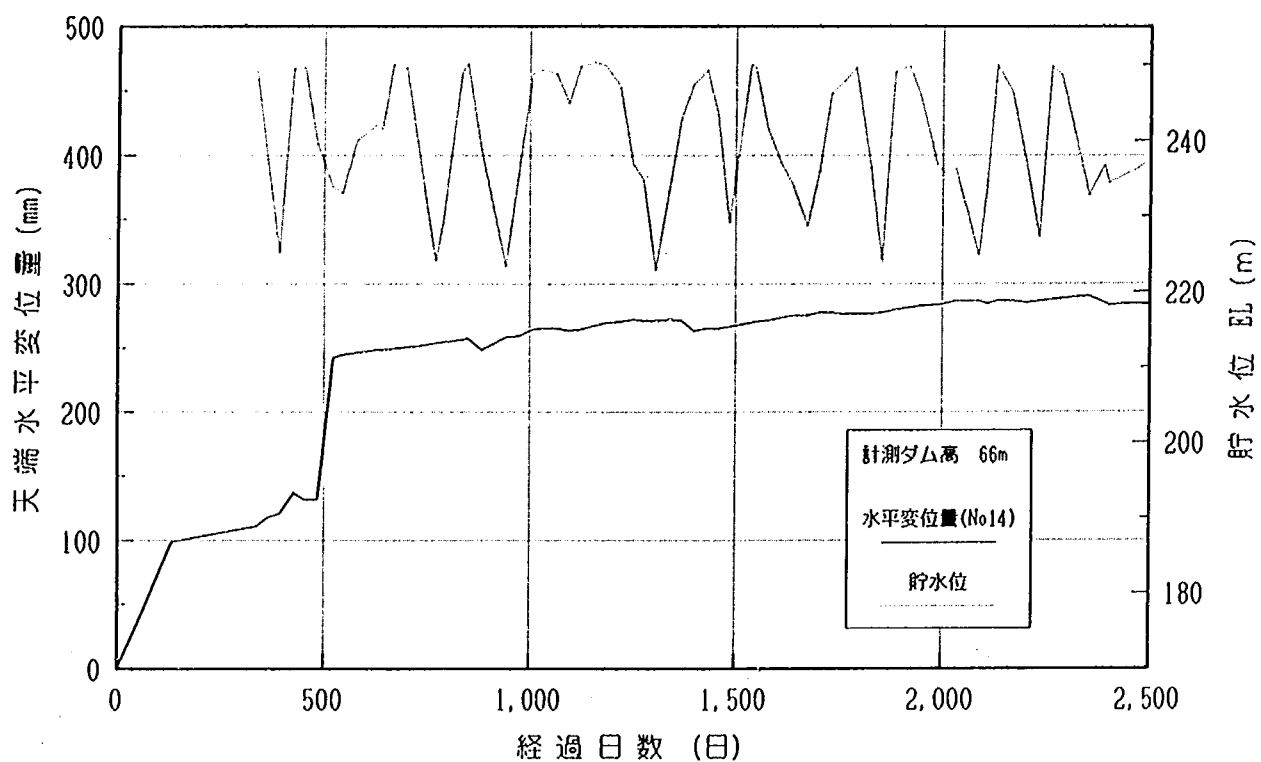


図-1.4(a) 天端水平変位量の経年変化 (B ダム) ①-1 型

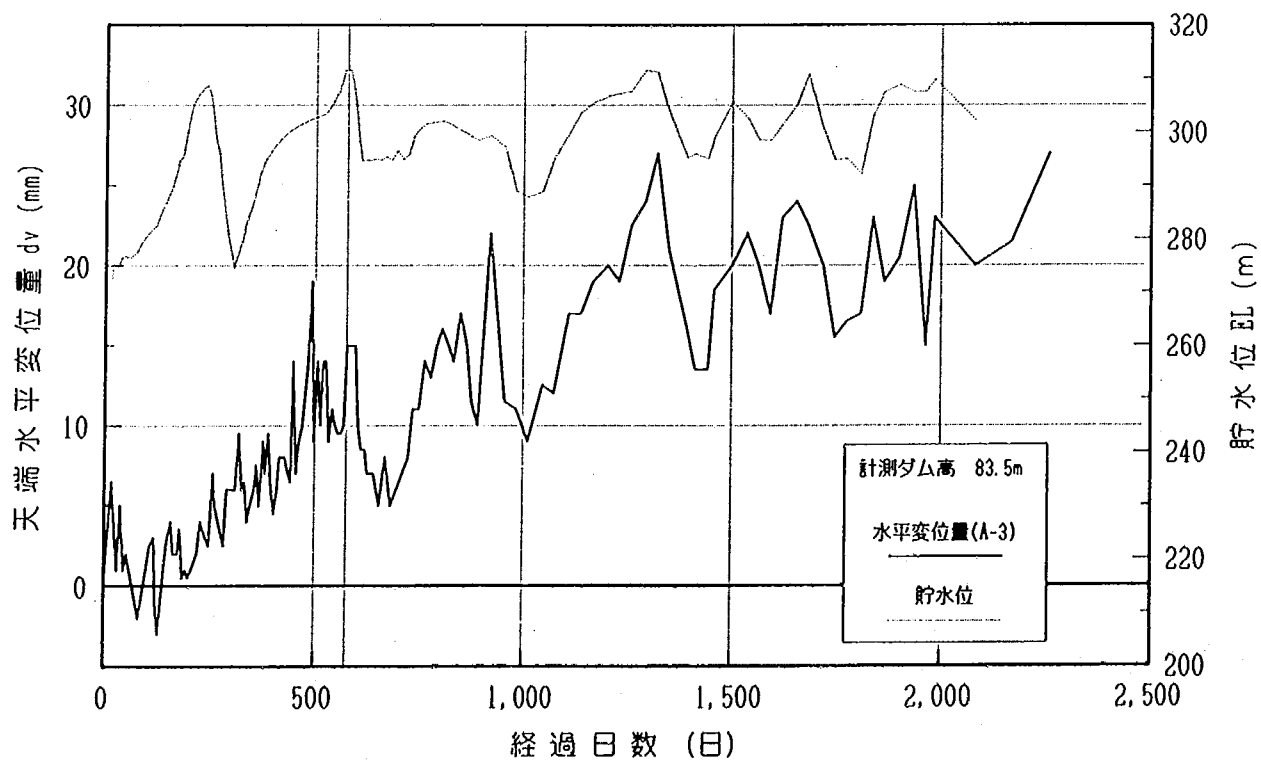
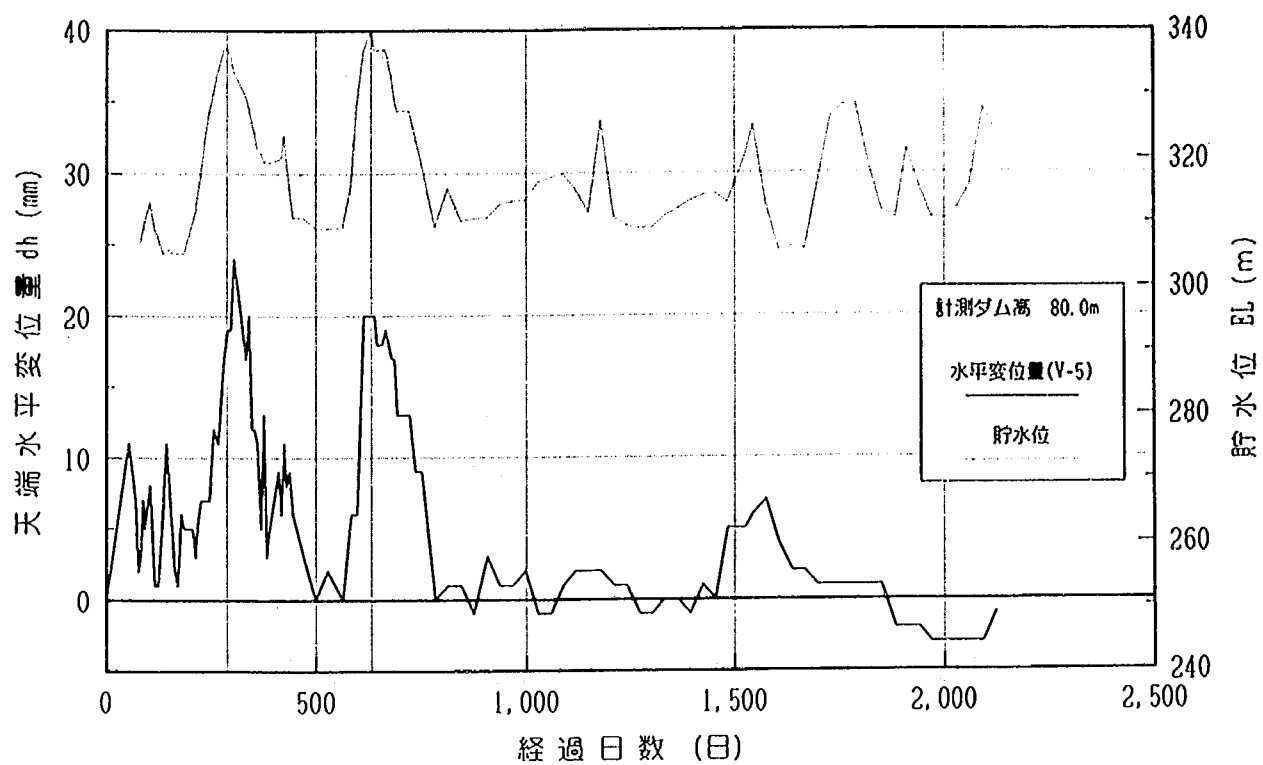
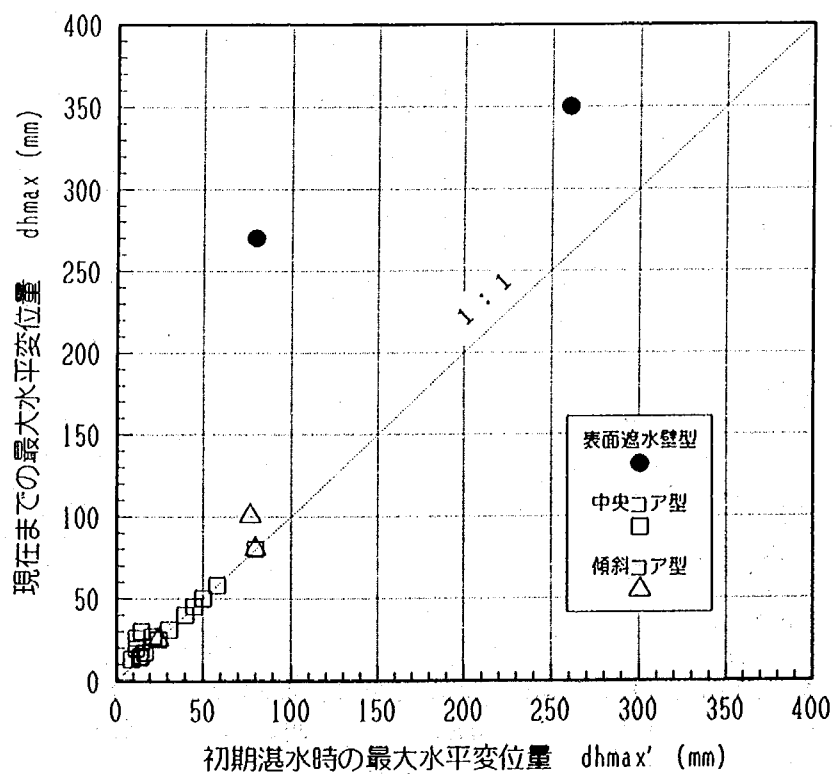


図-1.4(b) 天端水平変位量の経年変化 (S ダム) ①-2 型



図－1.4(c) 天端水平変位量の経年変化 (Q ダム) ②型



図－1.5 下流側最大水平変位量の比較

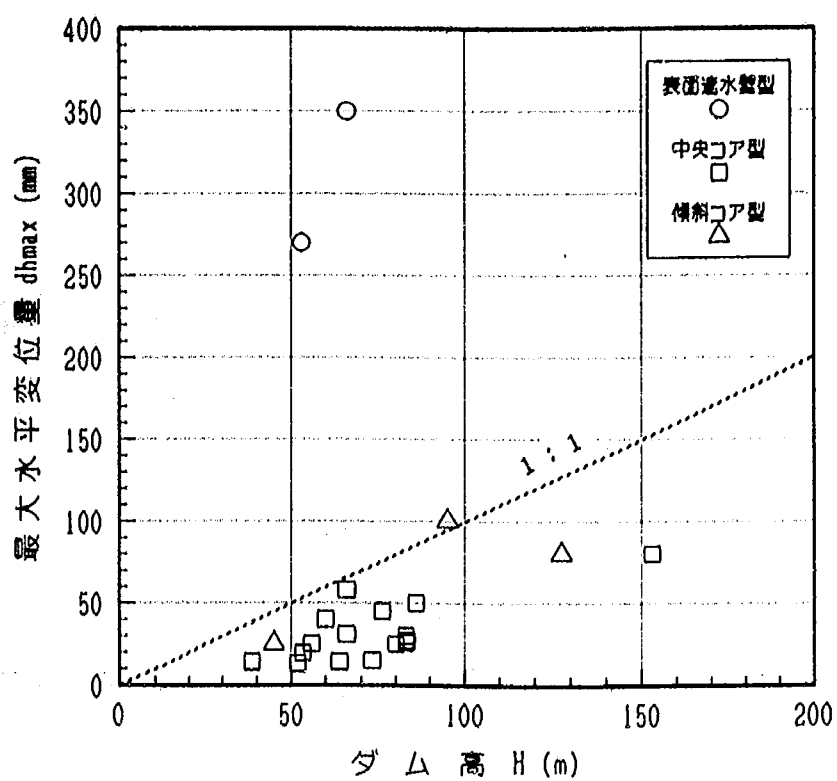


図-1.6 ダム高と最大水平変位量

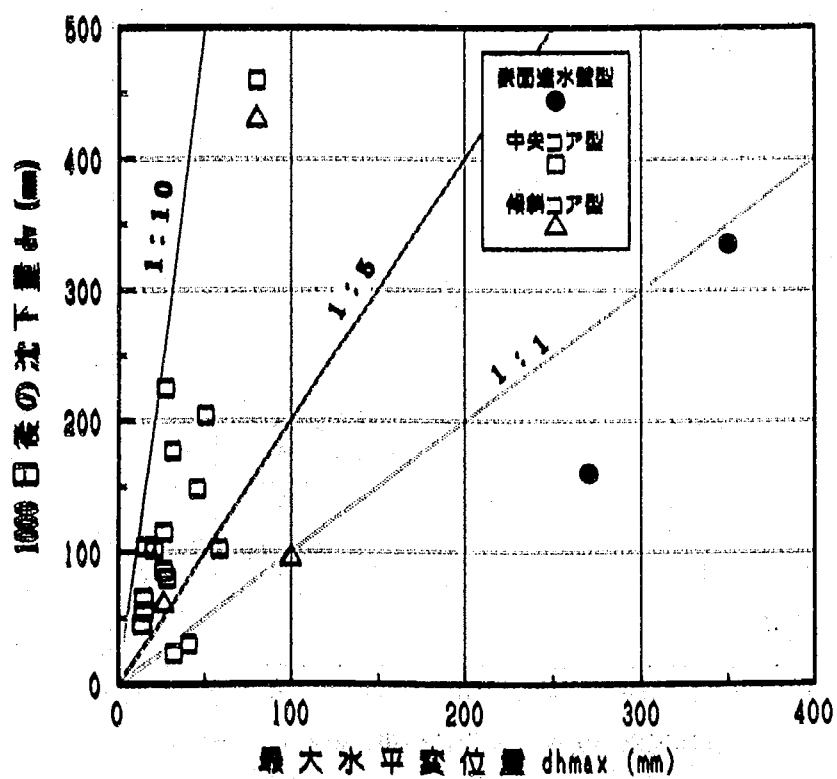


図-1.7 最大水平変位量と1000日後の沈下量

第2章 沈下量の予測

2.1 既往報告例

Lawton and Lester²⁾ は、1925年から1964年までに建設された11のダムを例にとり、次式を導いている。

$$dv = 0.001 \cdot H^{3/2} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$dh = 0.5 \cdot dv \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに、

dv : 天端における最終垂直変位量 (m)

dh : 天端における最終水平変位量 (m)

H : ダム高 (m)

なお、ダムの形式や湛水速度によって変形の違いが違ふとし、①表面遮水壁型ダムおよび短期間で湛水するダムでは、変位の85%が1年以内におこる。②センターコア型のダムおよび長期湛水のダムでは、変位の50%が1年以内でおこると述べている。

Sowers et. al³⁾ は、14ダムを例にとり、定常状態での沈下量を次式で示した。

$$dv = (0.0025 \sim 0.01) \cdot H \quad (\text{施工後10年}) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Dascal⁴⁾ は、カナダにおける15ダムを例にとり、次式を導いている。

$$dv \leq 0.003 \cdot H \quad (\text{施工後10年}) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

しかし、ロックゾーンの方がコアゾーンの沈下量より大きくなっている例を用いて、沈下量をコアゾーンで代用する事の不合理的を述べている。そこで、ロックとコアを分けて沈下予測を行っている。

$$dv_c = (0.002 \sim 0.0025) \cdot H \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$dv_r = (0.005 \sim 0.007) \cdot H \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

ここに、

dv_c : 天端の沈下量 (m)

dv_r : ロック (下流側) の沈下量 (m)

「最新フィルダム工学」⁵⁾ においては、最終的な沈下量を表す式として次式を導いている。

$$dv = (0.1 \sim 1.7) \cdot H^{5/2} \cdot 10^{-5} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

なお、最終的な沈下量は、この文献では1年あたりの沈下量が0.02%以下 (100mの高さで年間2cm以下の沈下量) となったときの総沈下量としている。

また、その最終的な沈下量を示す状態に達するまでの年月は、短期間のもので1年、長期間のもので35年以上にわたると述べている。

2.2 沈下量とダム高の関係より求まる関係式

沈下量とダム高の関係は、図-1.3に示した通りであるが、沈下量の上限値を包絡するような曲線

は、ほぼ盛立て完了後1000日における沈下量の回帰曲線と考えられる。このような傾向は2000日、3000日、4000日経過後の沈下量とダム高の関係でも認められた。これらデータから回帰式を求めると、べき乗回帰式と相関が高く、図-2.1に破線で示すような次式が求まる。

$$dv = a \cdot H^b \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

ここに、

dv : 沈下量 (mm)

H : ダム高 (m)

a : 係数 (0.13 ~ 0.22)

b : 係数 (1.58 ~ 1.64)

ここで、傾き b は経過日数に関係なく一定値であるとし、平均値から $b = 1.6$ として a を求めると、次式が求まる。

$$dv = (0.15 \sim 0.21) \cdot H^{1.6} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

この切片 a を、経過日数の関係で示すと次式で表される。

$$a = 0.05 \cdot \ln(\text{day}) - 0.18 \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

(2.9) 式と (2.10) 式より、沈下量の予測式は、次式となる。

$$dv = (0.05 \cdot \ln(\text{day}) - 0.18) \cdot H^{1.6} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

ここに、

dv : 沈下量 (mm)

day : 計測開始からの日数 (日)

H : ダム高 (m)

図-2.2に、(2.11) 式で求まる10年後の沈下量と、既往報告例による沈下量を重ね書きしたものを示す。

2.3 沈下率曲線のあてはめ

図-2.3に代表的なダムの沈下率曲線を示す(沈下率とは、沈下量を計測部のダム高で除した値)。1000日では0.08~0.3%, 5000日では、0.12~0.5%の範囲内にあるようである。この曲線は、おおむね500日以降に着目してみると、直線的な沈下傾向を示している。

物質のクリープ変形に関する既往の報告によれば、土のクリープ沈下は、時間の対数に対し直線的に増加するという一次元圧密で近似されている。コンクリートでは、Ross⁶⁾ はクリープと経過時間の関係を双曲線で表し、米国開拓局⁷⁾ は時間の対数関係で表されるとしている。

堤体材料は単体としてはコンクリートに近い挙動を示し、集合体としては土に近い挙動となることから考えられる。したがって、このようなクリープ変形表示方法の報告により、各ダムの実測沈下率データを、対数 ($dv/H = a \cdot \ln(\text{day}) - b$)、べき乗 ($dv/H = a \cdot \text{day}^b$)、双曲線 ($dv/H = \text{day}/(a + b \cdot \text{day})$) との回帰計算を行って相関性を求めてみた。なお、回帰計算を行ったデータは計測開始

より 500 日経過以降のものである。その結果、21 ダムの平均値として相関係数を比較すると、双曲線、対数、べき乗の順に相関係数は低くなっていく。しかし双曲線回帰式と対数回帰式の差はほとんどない。よって、沈下率曲線は、双曲線回帰式あるいは対数回帰式であてはめられる。

図－2.4 に K ダムの実測値と回帰線を示す。回帰線による 5000 日以降の沈下率の予測傾向としては、べき乗回帰式が一番大きな値を示す。片対数表示で沈下率曲線が上に凸になることを考えると、べき乗回帰式で予測される沈下率は実際より大きめの値となるのではないかと考えられる。

図－2.5 に対数回帰式と双曲線回帰式による 40000 日後の各ダムの予測される沈下率を示す。なお、図中に実線で示される曲線は、(2.11) 式による予測値である。(2.11) 式は経過日数の対数関係で沈下量が表される。図中の (◎) が (2.11) 式を求めたダムにおける対数回帰式によって予測される沈下率であるが、おおむね一致していることがわかる。

対数回帰式と双曲線回帰式の予測値の比較では、対数回帰式による予測値の方が全般的に大きめの値となる。その予測沈下率は、ダム高 150 m 程度でそれぞれ 0.8% と 0.6% の値となる（沈下量では、1.2 m と 0.9 m）。

2.4 まとめ

沈下率の予測についてまとめると、以下のとおりである。

- ① ダム高と沈下量の関係の平均的な関係は $dv = a \cdot H^b$ のべき乗関係にある。
- ② この関係式は経過日数の関係で表され (2.11) 式が与えられる。また、本式は既往報告例で示される予測値の帯状の範囲内にある。

$$dv = (0.05 \cdot \ln(\text{day}) - 0.18) \cdot H^{1.6}$$

- ③ 各ダムの沈下率曲線は、定常状態に達したと思われる 1000 日以降の記録をみると、対数、べき乗、双曲線回帰式のうち双曲線および対数回帰式と相関が高い。
- ④ 約 100 年後の沈下率を予測すると、ダム高 150 m で 0.8% 程度の沈下率となるようである。また、ダム高が低くなるにつれ、沈下率は小さな値を示す。

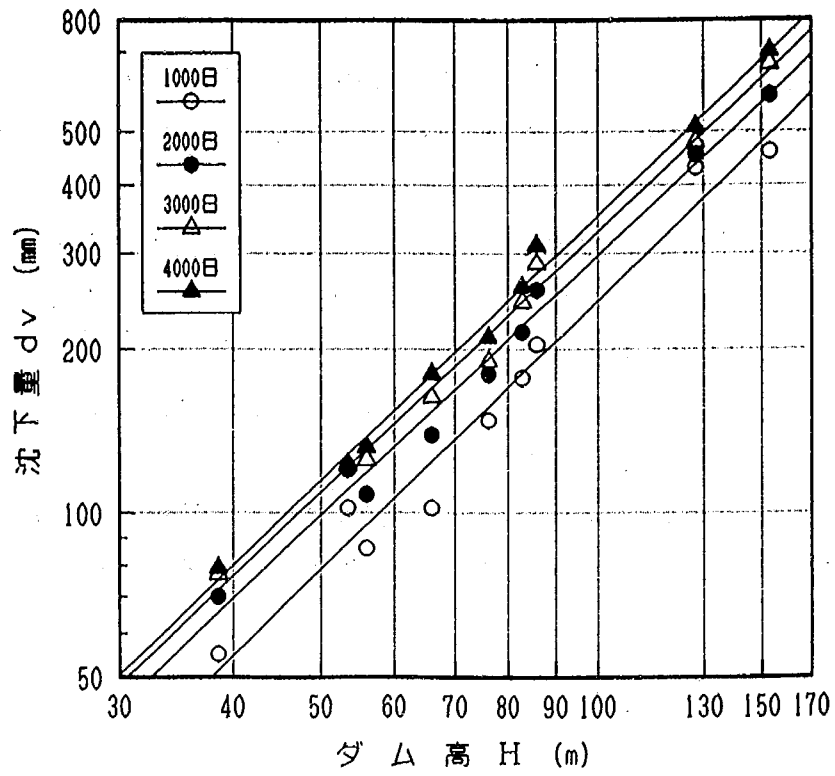


図-2.1 ダム高と沈下量の回帰線

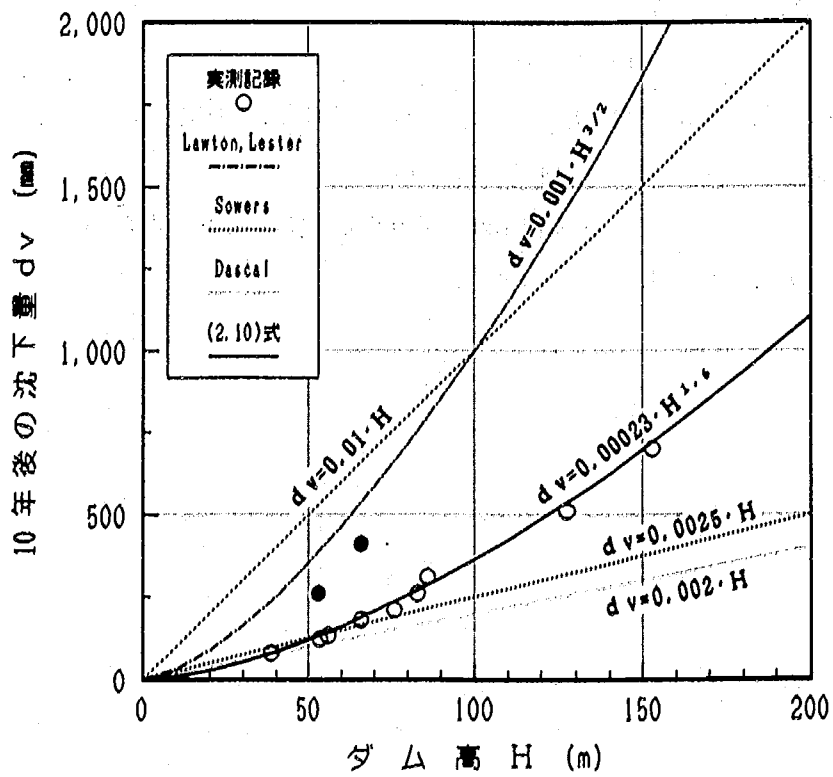


図-2.2 ダム高と10年後沈下量

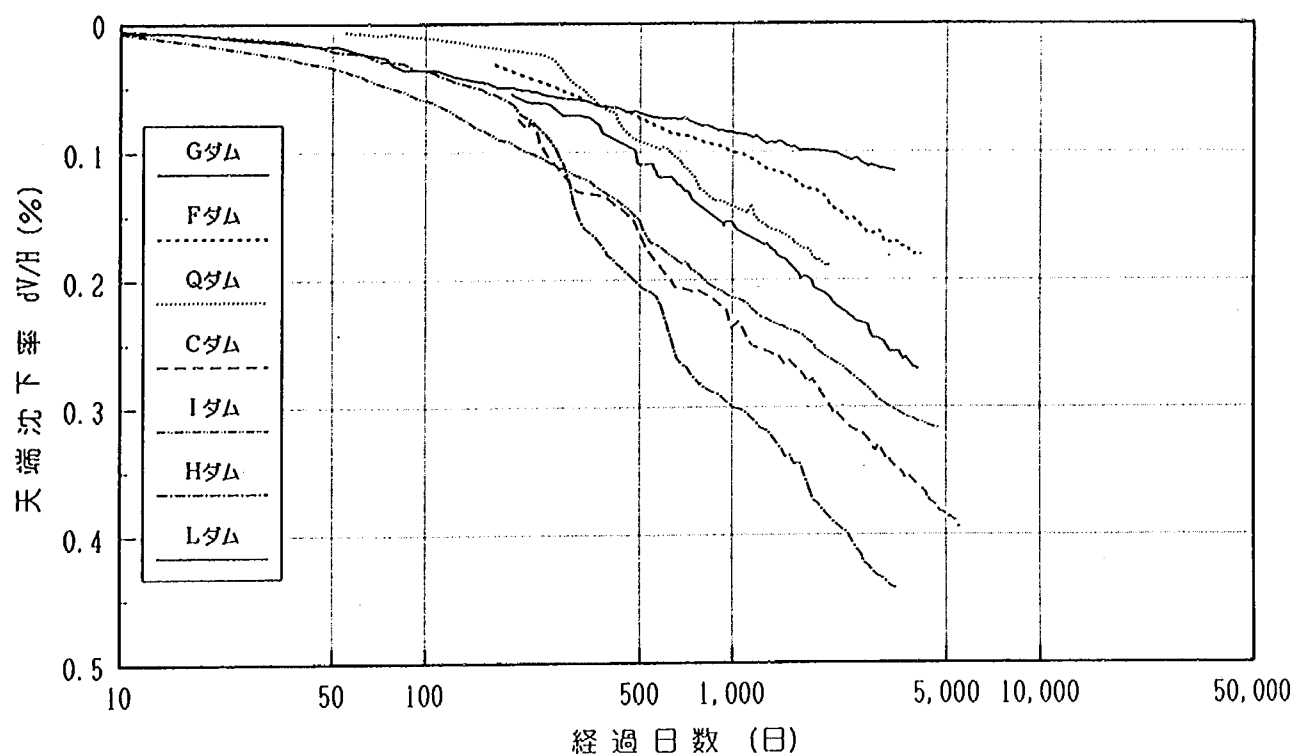


図- 2.3 天端沈下率の経年変化

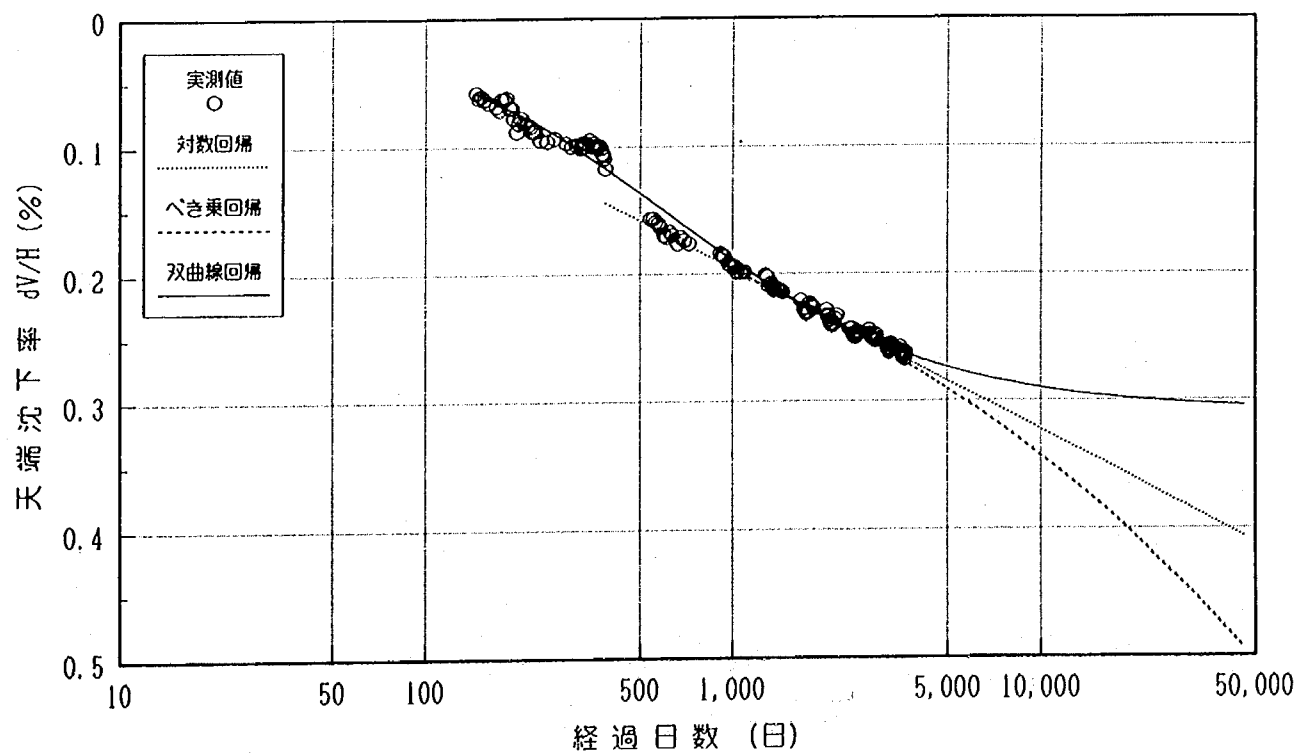


図- 2.4 天端沈下率の経年変化 (K ダム)

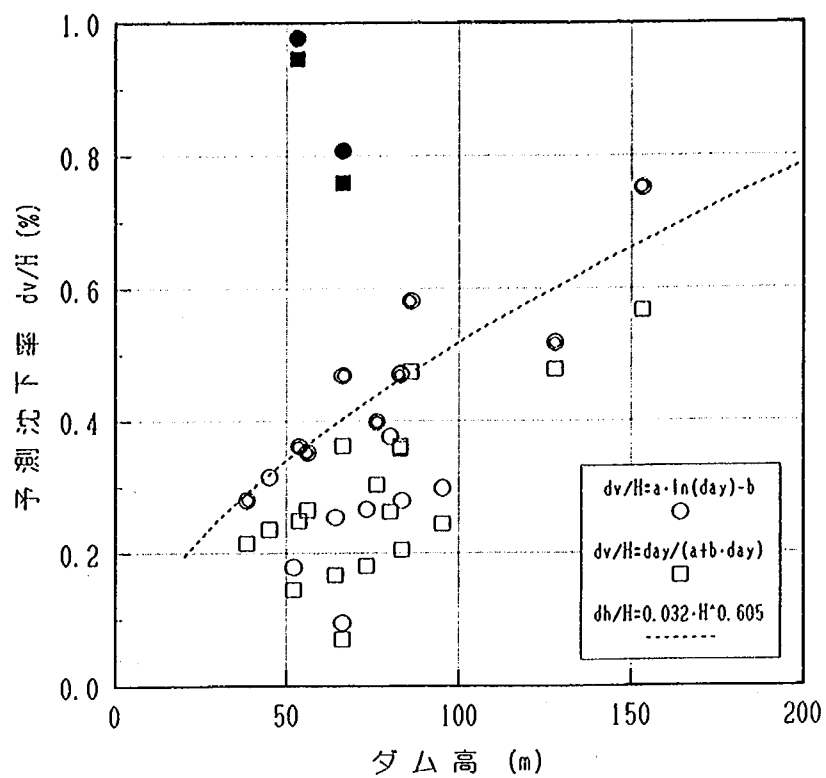


図- 2.5 ダム高と予測沈下率 (40000 日)

第3章 天端変位の要因

3.1 概 要

フィルダムの堤体が変形する要因として考えられるものには、次のようなものがある。

- ① 戦荷重（ダム高さの違い）
- ② 盛立方法
- ③ 盛立材料物理的特性値
- ④ 基礎地盤状態および形状

堤体変形はこのような条件が複雑に影響しあって生じるものである。本資料の第1章、第2章においては、ダム高さと沈下量、水平変位量の関係についてとりまとめたわけであるが、本項においては、盛立方法、材料物性値と変位量の関係について考察してみた。

なお、基礎地盤の性状については、盛立完了後の堤体変形に及ぼす影響は小さいと思われること、基礎地盤の形状については、各ダムの全データを調査しなければならず、今回の最大断面天端部のデータの評価だけからは検討できないことより、後の検討項目とした。

3.2 沈下と水平変位

沈下量と水平変位量それぞれの変位傾向については第1章でとりまとめているが、ここでは、沈下量と水平変位量の関係について調査した。

図-3.1～3.3に水平変位量と沈下量の関係について、Bダム、Sダム、Lダムの例について示す。

Bダムは、水平変位量と沈下量が直線的な関係にあることが認められる。この関係は、次式で示される。

$$dv = 4/3 \cdot dH \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

Sダムは、水平に揺れながら、沈下量、水平変位量ともに増加している。沈下量が増加する時は、水平変位量が多少上流側へもどる時であることが認められる。このダムの沈下量と水平変位量の関係は、次式で示される。

$$dv = 4 \cdot dH + 20 \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

Lダムも、Sダムと同様な動きを示しているが、沈下量が120mmを超える付近より、水平変位量の動きは小さくなってきている。

ここに示したダム以外についても、水平変位量と沈下量の関係について調査してみたが、相関性はあまり認められなかった。これは「本文1.2」で求められたとおり、水平変位のタイプが数種類あるためである。

3.3 水平変位タイプ

「本文1.2」で求められた水平変位タイプと、ダム高、1000日後沈下率、最大水平変位率の關係に

ついてとりまとめた。

なお、水平変位タイプを次のように区分した。

A：下流側変位増加型（単純増加型）

B：下流側変位増加型（揺れ戻り型）

C：一旦下流変位後上流側変位型

また、図中の黒塗りマークは、沈下量の予測において対象としたダムのデータである。

図=3.4～3.6に、これらの関係図を示す。どれも明瞭な関係は認められないが、ダム高との関係では、C型に近くなるほどダム高が高いダムになること、1000日後沈下率では、C型に近づくほど沈下率が高くなること、最大水平変位率との関係では、C型に近づくほど、変位率が小さくなる傾向が多少認められる。

3.4 間隙比、乾燥密度

堤体材料の物理的性質として、間隙比および乾燥密度を選択し、変位量との関係について調査した。間隙比および乾燥密度の値は、堤体盛立時の品質管理試験値の平均値とした。また、材料は、コアおよびロック材とした。

(1) 間隙比

図=3.7～3.10にコア、ロック間隙比と1000日後沈下率、最大水平変位率の関係について示す。

この関係においても、特に明瞭な相関性は認められない。

(2) 乾燥密度

図=3.11～3.14にコア、ロック間隙比と1000日後沈下率、最大水平変位率の関係について示す。

この関係もあまり明瞭な相関性は認められないが、乾燥密度が大きくなるにつれ、沈下率、水平変位率が高くなる傾向が多少認められ、上限値の包絡線を描くことができる。

3.5 締固め厚さ、施工速さ

施工条件としては、ここでは締固め厚さと施工速さについて調査した。なお、その他の施工条件としては、施工含水比、施工方法などもあるが、今回調査したダムでは、ほとんどのダムにおいて w_{opt} 主0～+4%の範囲の含水比であること。施工方法については2ダムにおいて投石方法、その他は薄層撤き出し方法であることより、施工方法および施工含水比と変位率の比較は実施しなかった。ただし、三国⁸⁾は施工含水比などの条件と天端沈下率の関係について報告している。

(1) 締固め厚さ

図=3.15～3.20に、コア、ロックの締固め厚さと変位傾向について示す。コア締固め厚さは15～25cm、ロック締固め厚さは50～200cmである。コアおよびロックともに、締固め厚さが厚くなるにつれ、変位率が高くなる傾向が認められる。しかし、ダム高さが高くなるほど、締固め厚さが高くなる傾向が認められることより、単純に締固め厚さだけの影響として整理できない。

(2) 施工速さ

施工速さは、各ダムにおけるコア材盛立て開始から盛立完了までの暦日数でダム高さを除した値である。

図－3.21～3.23に、施工速さと変位率の関係について示す。施工速さと1000日後沈下率では相関性が認められるが、最大水平変位率との関係では相関性が認められない。

ただし、施工速さは、ダム高との相関性が高く、締固め厚さと同様に、施工速さだけの影響として整理できない。

3.6 まとめ

以上の結果についてまとめると、次のようになる。

- ① 沈下量の水平変位量の関係は、水平変位タイプが数タイプあるため、単純に比較できないが、 $dv = 3 \sim 10 \cdot dH$ 程度のダムが多い。
- ② 水平変位タイプとダム高、沈下傾向の関係は、明確な相関性は認められない。
- ③ 間隙比、乾燥密度と変位傾向の関係は、乾燥密度との関係において、上限値を示す線は描くことができる。しかし、間隙比との関係では、乾燥密度との関係と比較し相関性が高くない。
- ④ 締固め厚さ、施工速さと、ダム高、変位率との関係においては、1000日後沈下率と、締固め厚さ、施工速さとの相関性が認められた。しかし、これら条件はダム高さとも相関性が高く、単純にこれら条件の影響だけとはいえない。

ダム最大断面天端部の変位傾向と、その変位傾向の要因と思われる条件との関係について調査したが、特に明瞭な相関性の認められる項目はなかった。つまり、今回対象としたダムにおける堤体物性値、施工条件の範囲内においては、天端変位量の傾向は、ダム高との相関性が高いといえる。

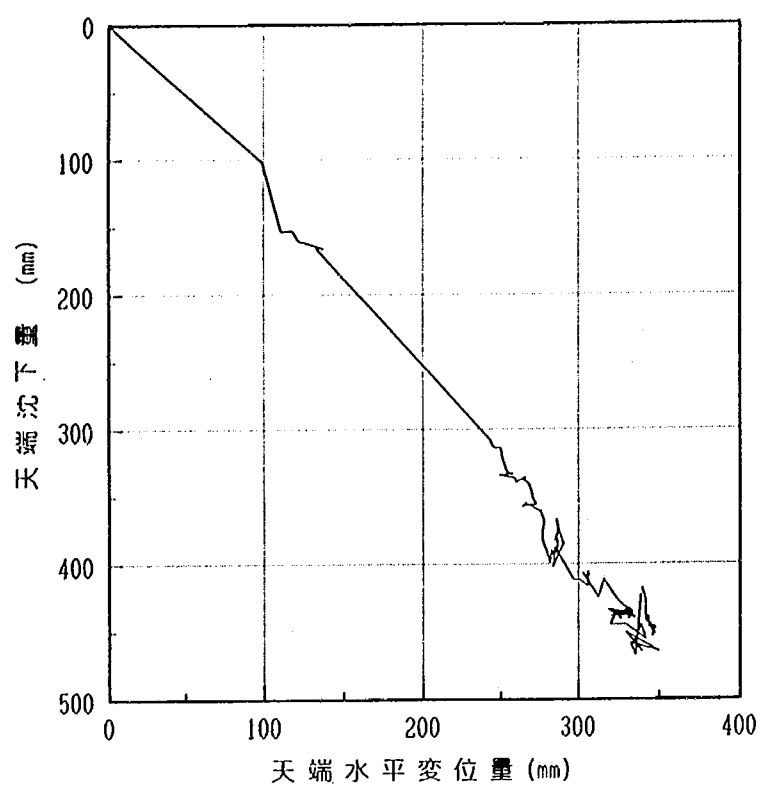


図- 3.1 天端水平変位量と天端沈下量 (Bダム)

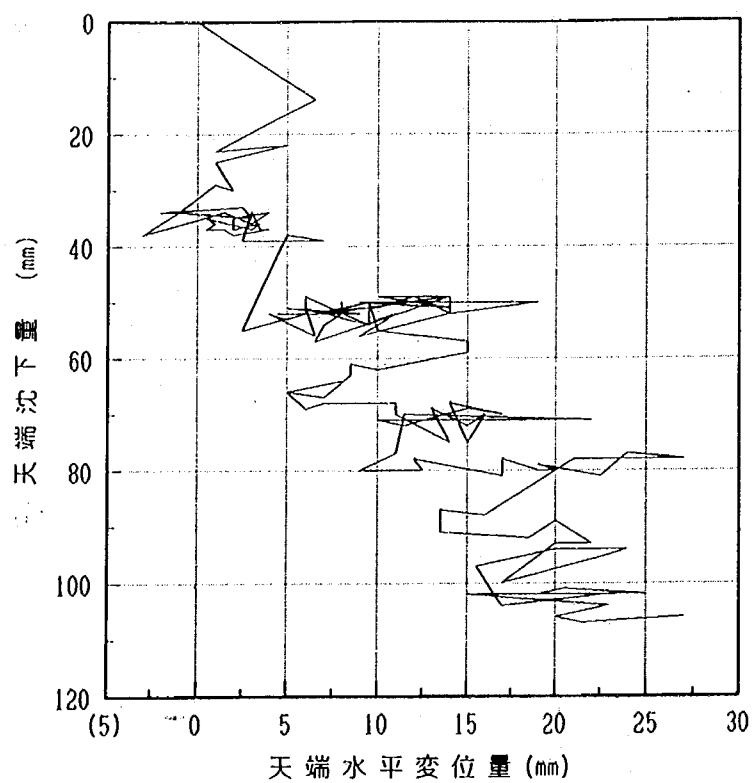


図- 3.2 天端水平変位量と天端沈下量 (Sダム)

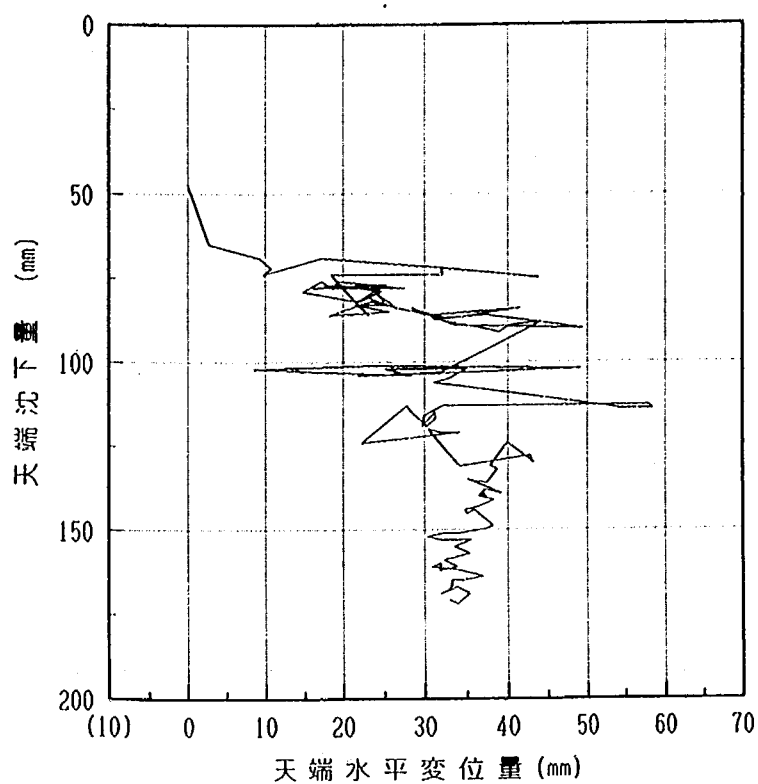


図- 3.3 天端水平変位量と天端沈下量 (Lダム)

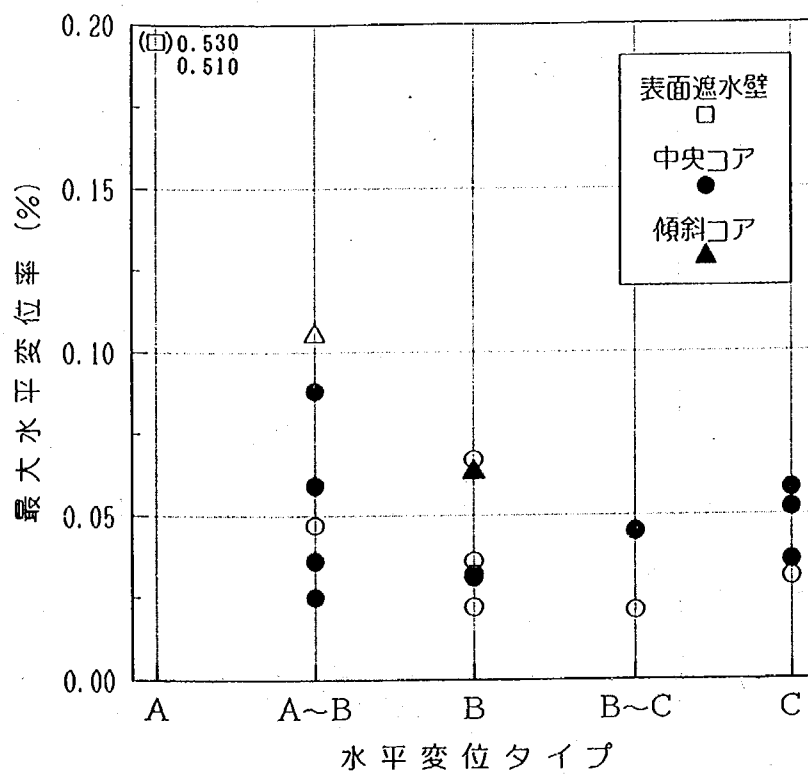


図- 3.4 水平変位タイプとダム高

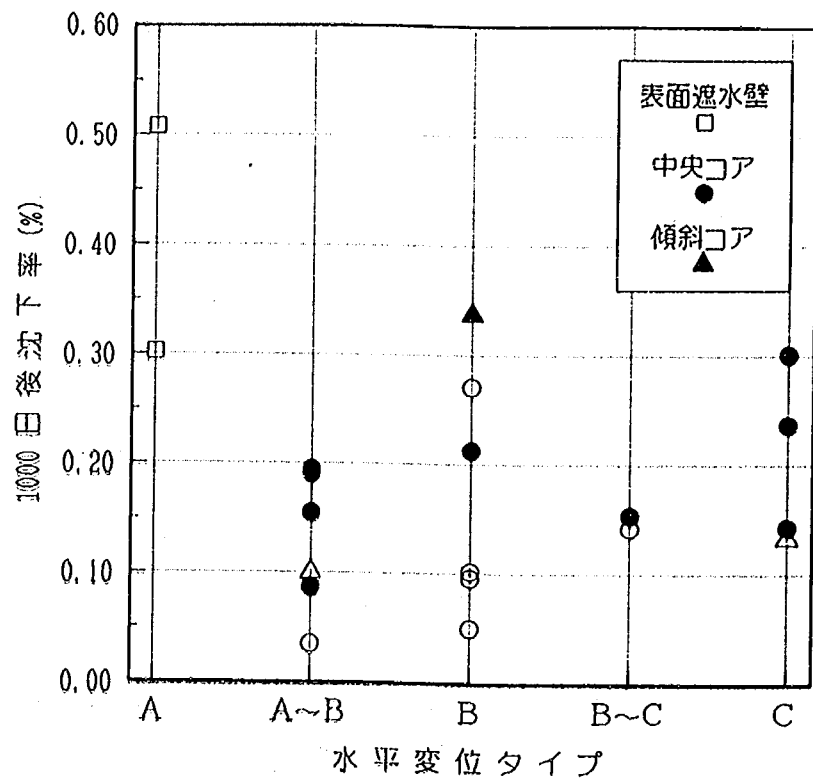


図-3.5 水平変位タイプと1000日後沈下率

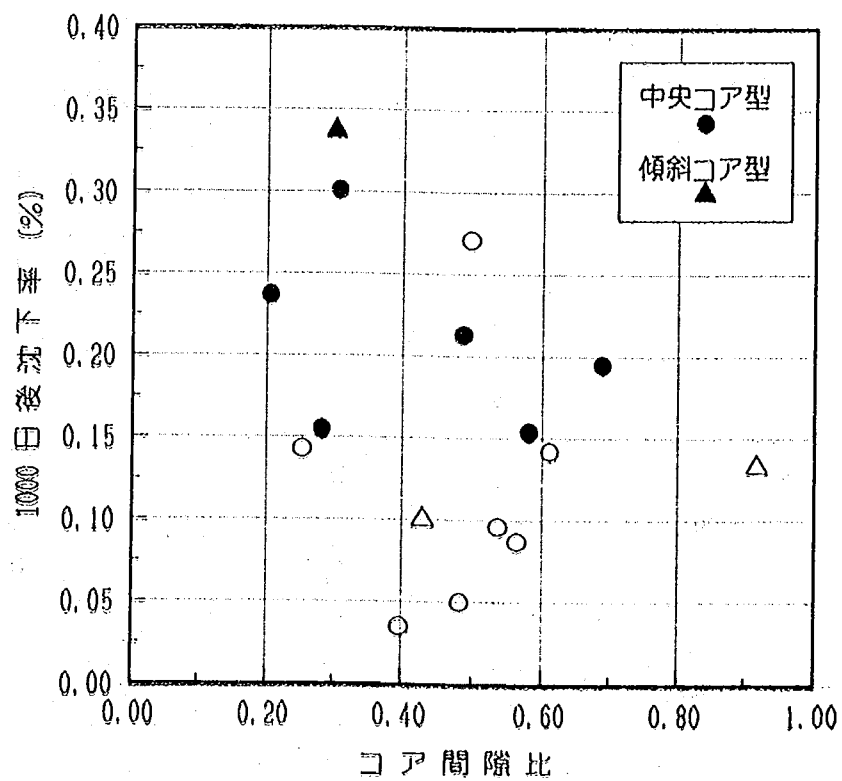


図-3.6 水平変位タイプと最大水平変位率

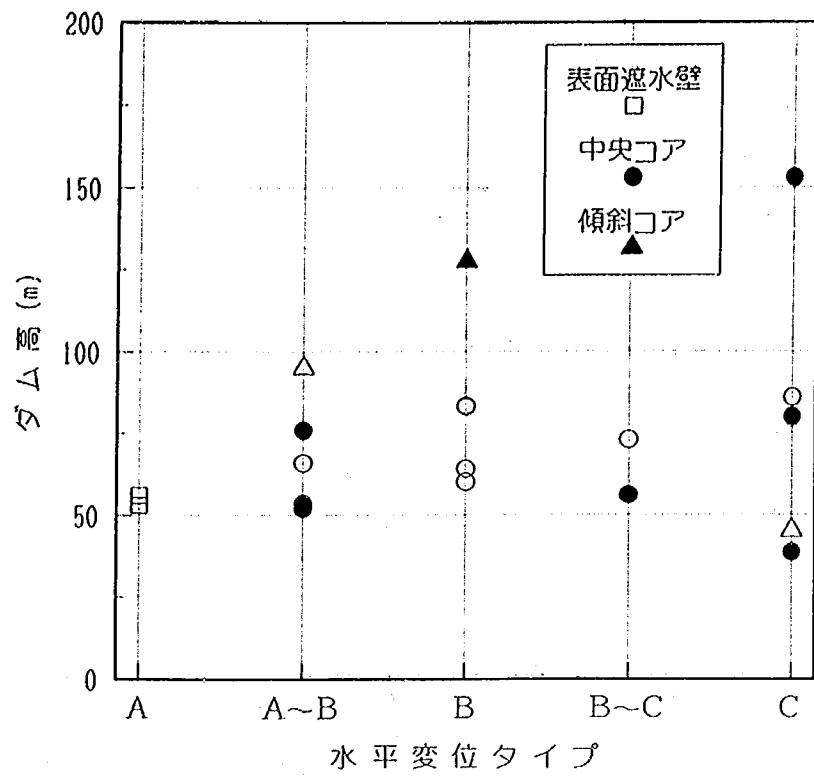


図-3.7 コア間隙比と1000日後沈下率

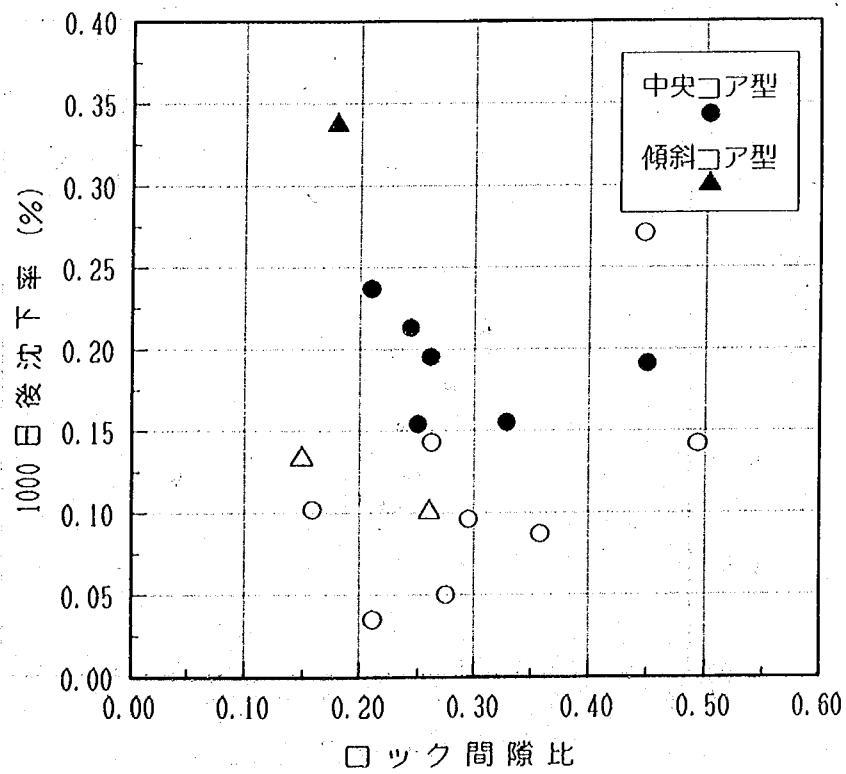


図-3.8 ロック間隙比と1000日後沈下率

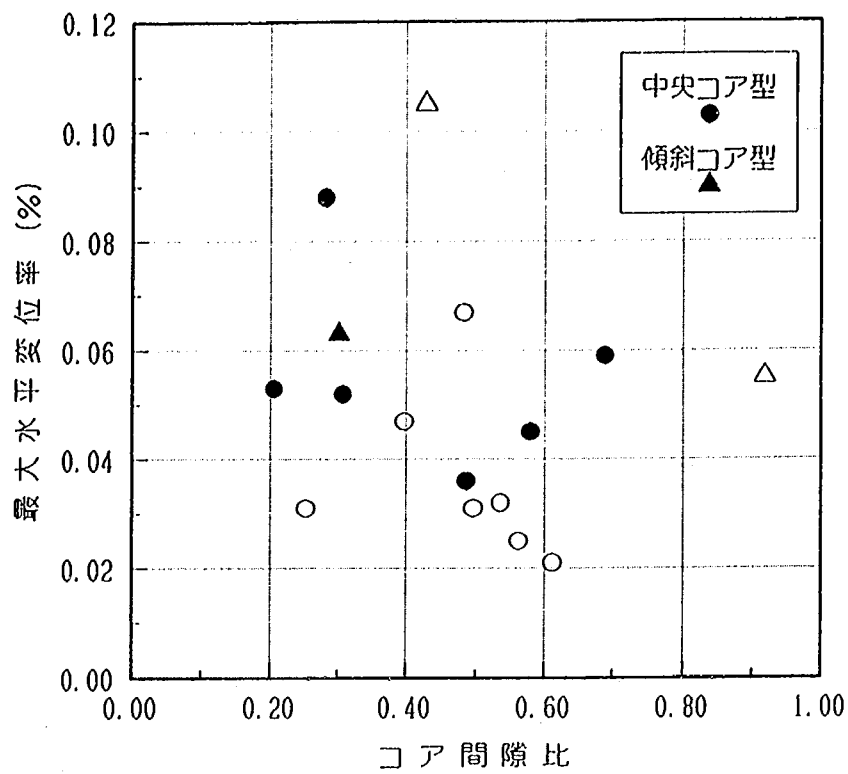


図- 3.9 コア間隙比と最大水平変位率

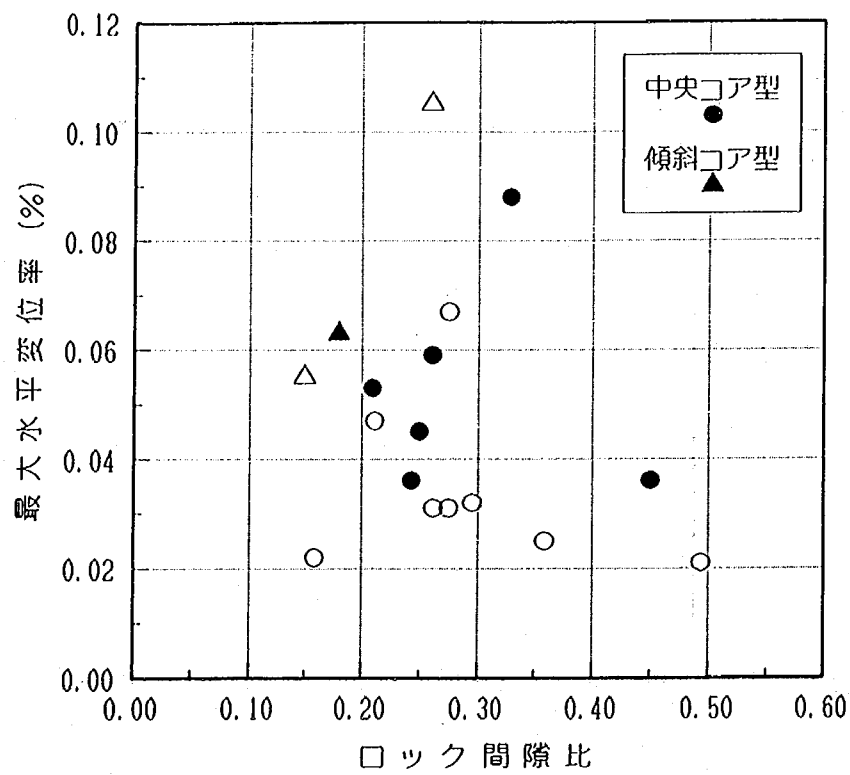


図- 3.10 ロック間隙比と最大水平変位率

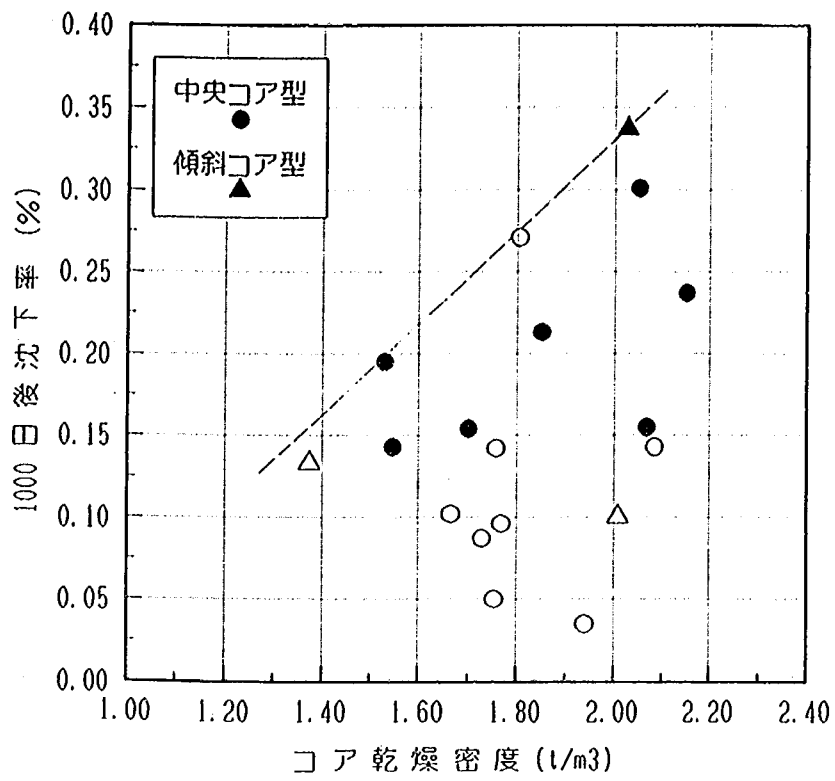


図- 3.11 コア乾燥密度と 1000 日後沈下率

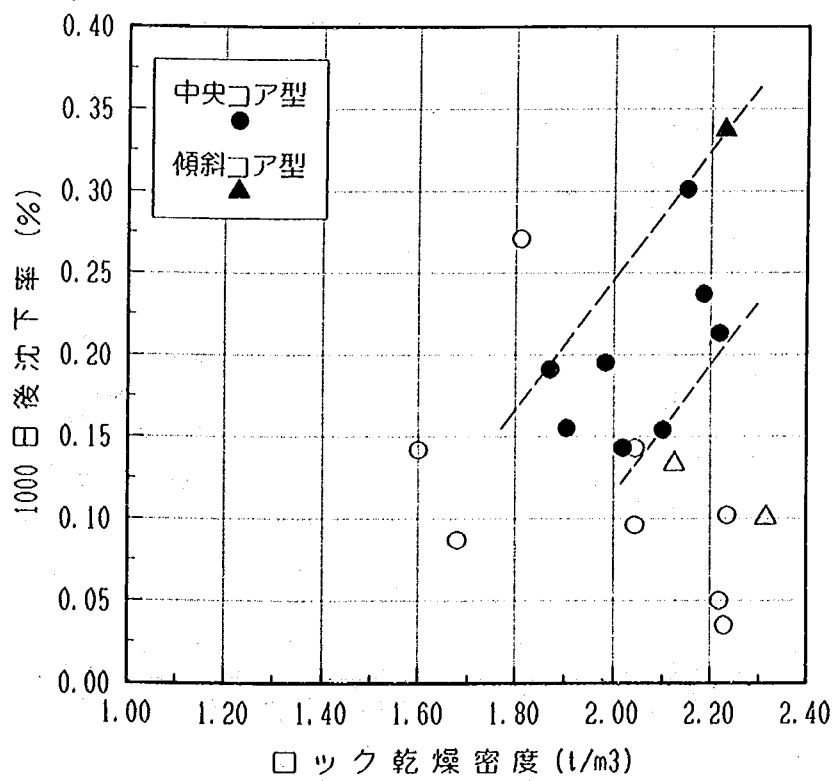


図- 3.12 ロック乾燥密度と 1000 日後沈下率

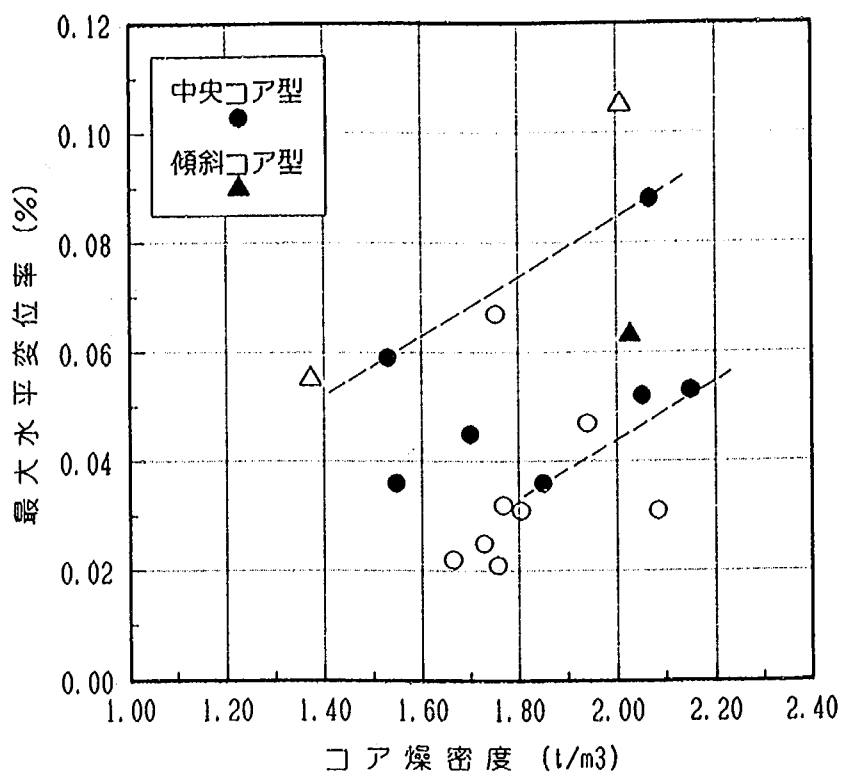


図-3.13 コア乾燥密度と最大水平変位率

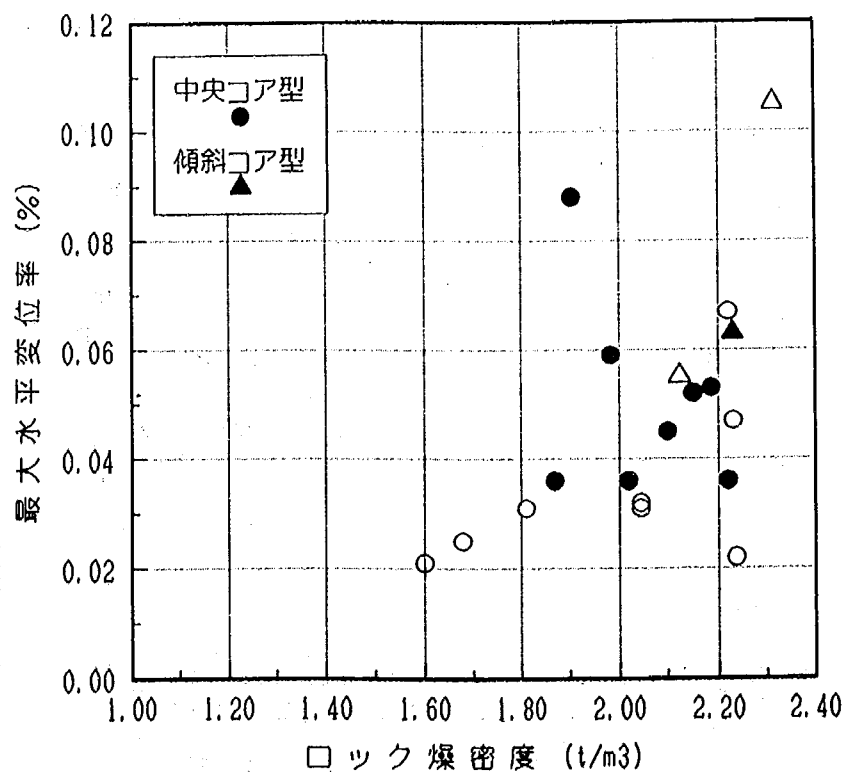


図-3.14 ロック乾燥密度と最大水平変位率

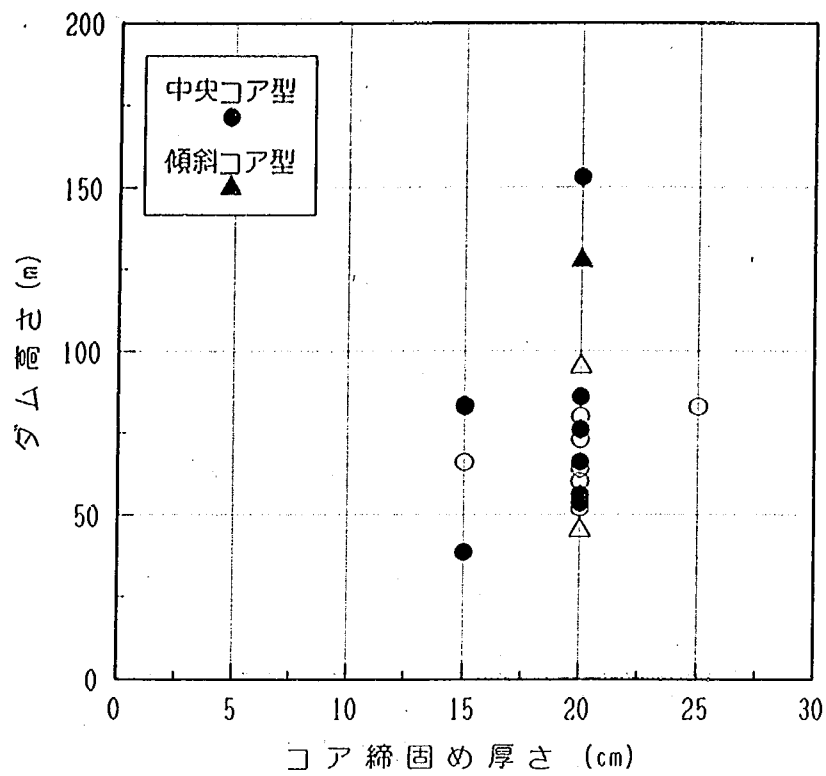


図- 3.15 コア締固め厚さとダム高さ

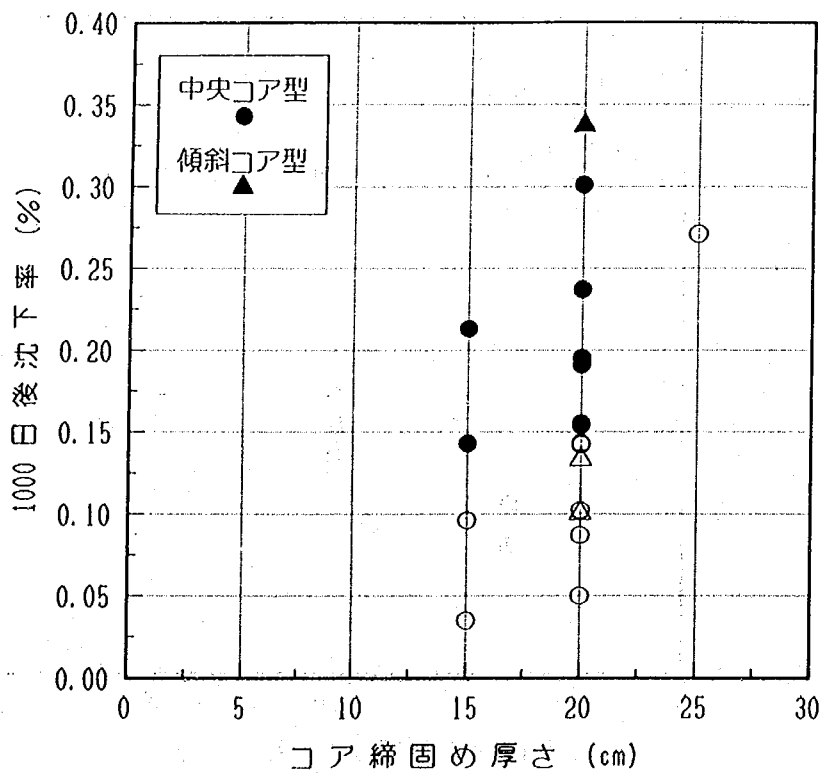


図- 3.16 コア締固め厚さと1000日後沈下率

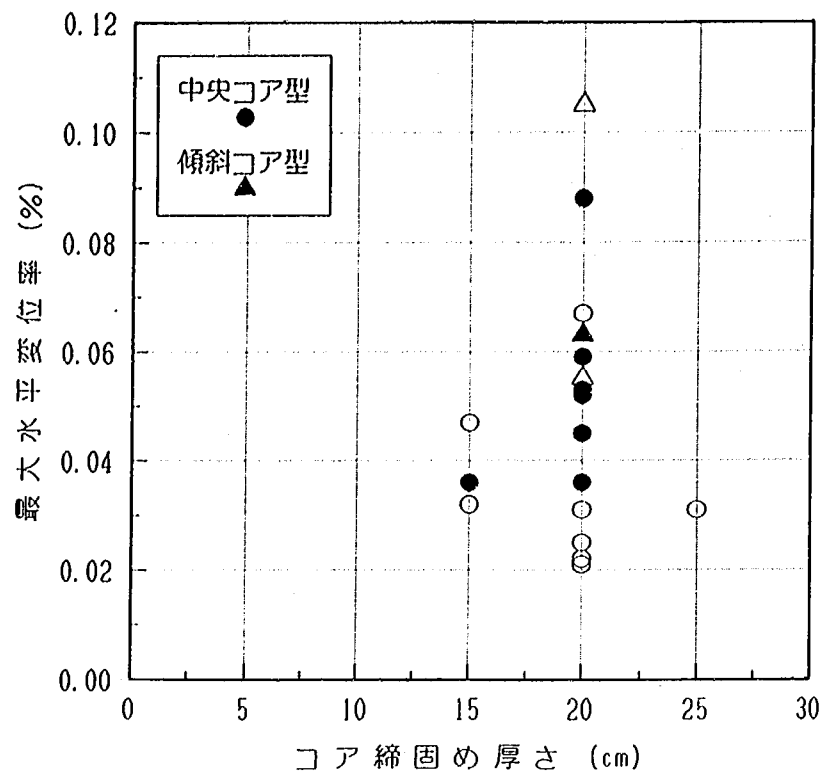


図- 3.17 コア締固め厚さと最大水平変位率

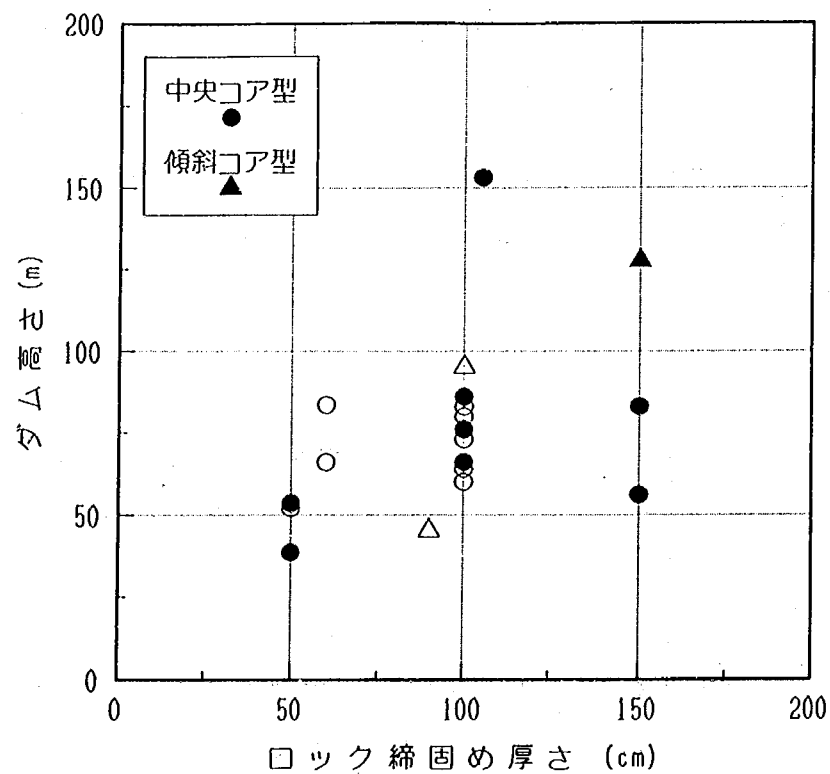


図- 3.18 ロック締固め厚さとダム高さ

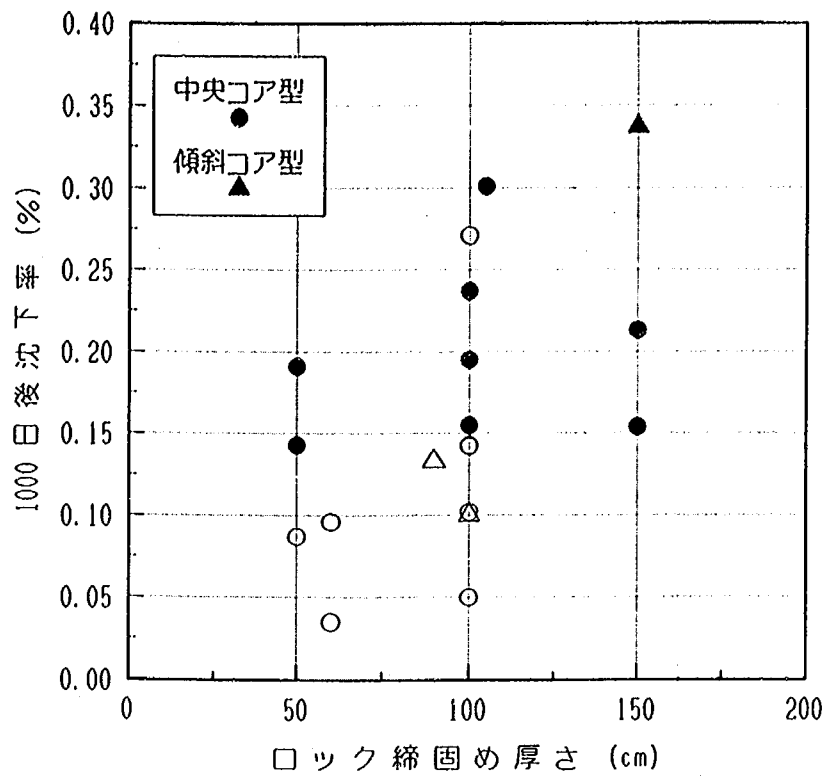


図-3.19 ロック締固め厚さと 1000 日後沈下率

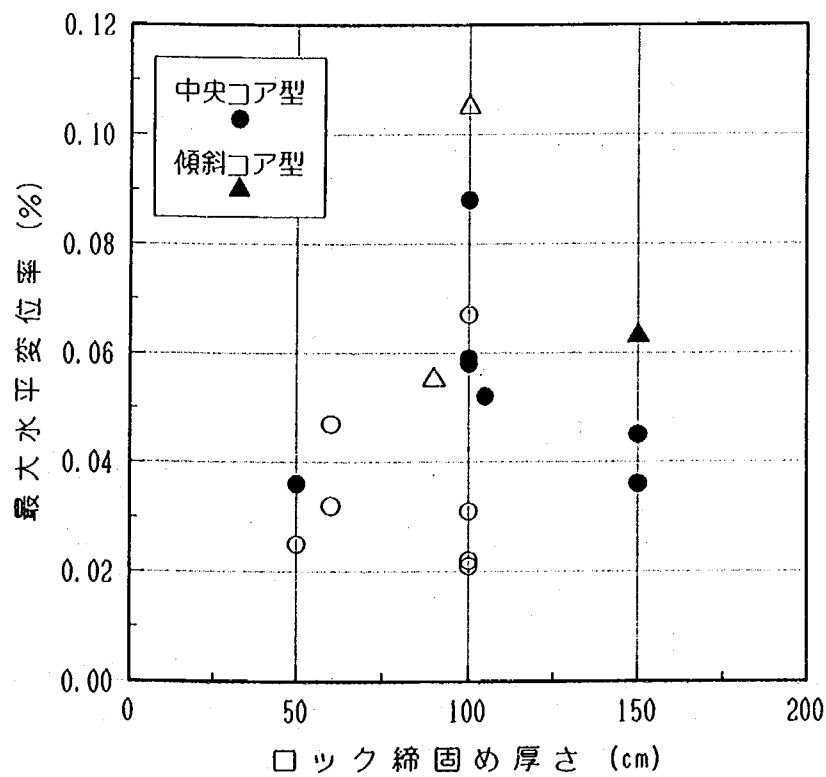


図-3.20 ロック締固め厚さと最大水平変位率

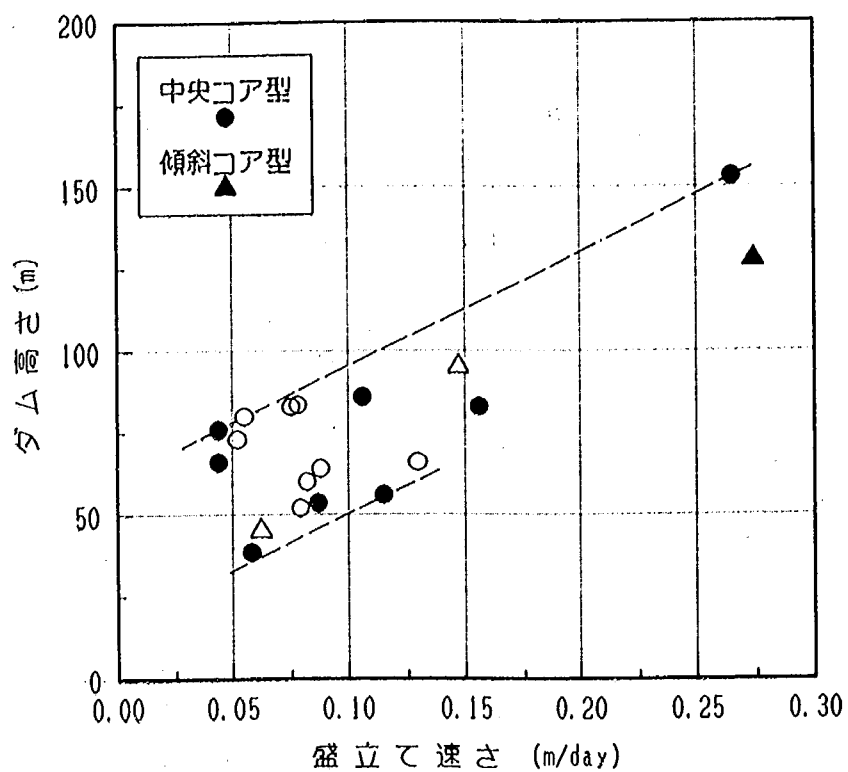


図-3.21 盛立て速さとダム高さ

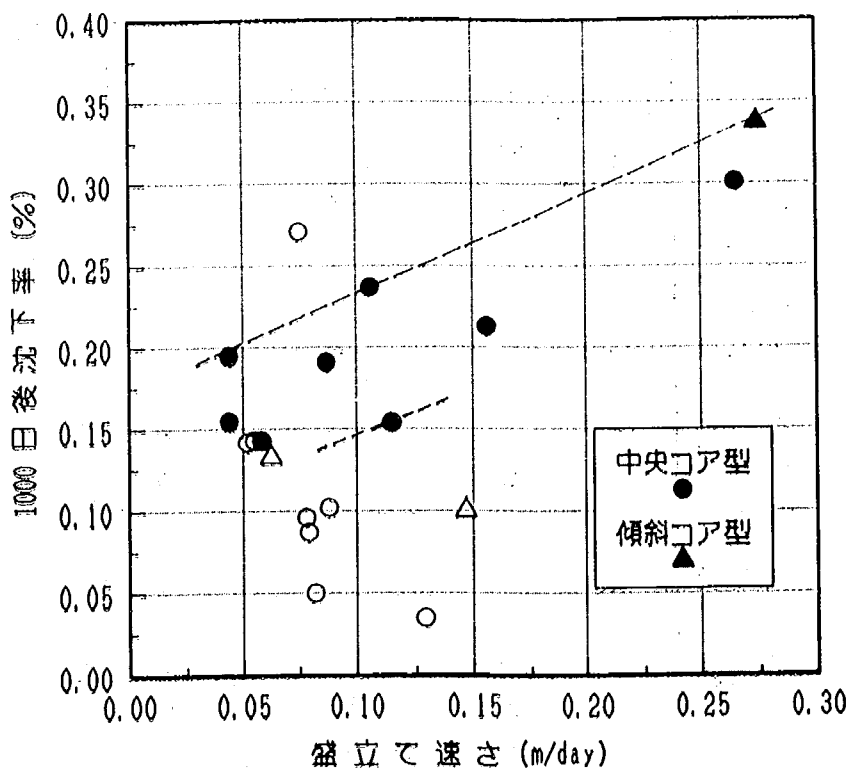


図-3.22 盛立て速さと1000日後沈下率

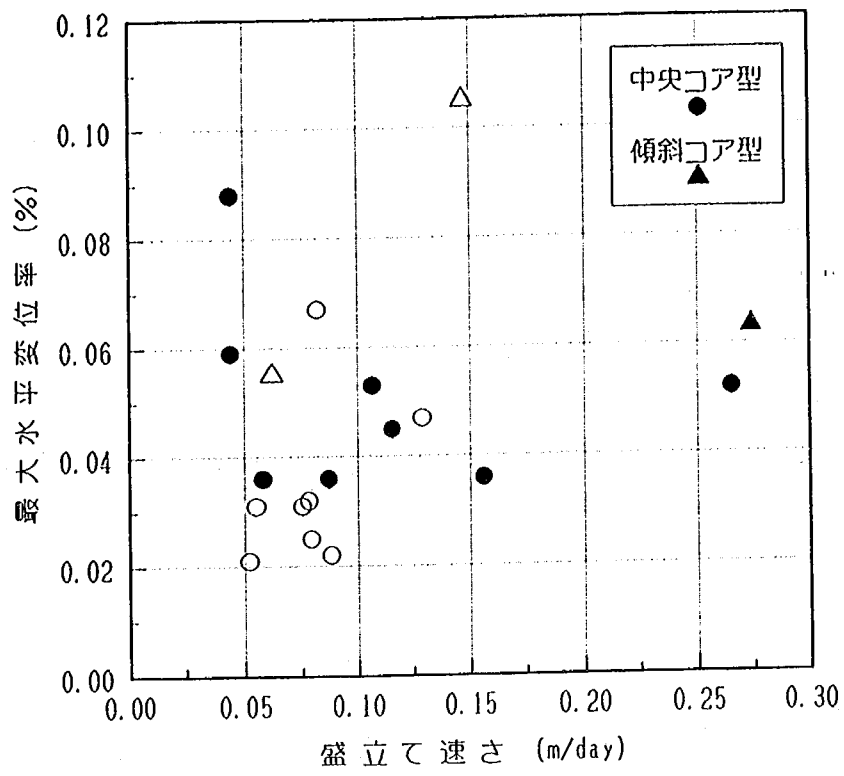


図- 3.23 盛立て速さと最大水平変位率

第4章 天端水平変位量と弾性係数⁹⁾

4.1 概要

ロックフィルダムが地震動を受けると堤体に繰返し荷重が作用し、ダム内のある地点を想定すると、ここには、繰返しの応力が働き、それに対応した歪が発生している。ロックフィルダムの耐震設計の高度化のためには、ロックフィル材料の繰返し荷重下での応力-歪関係を知ることが重要であるが、本章では、ダムが貯水変動を受けたときの変位の実測記録から、繰返しの応力-歪関係を求めることを試みた。すなわち、実物ダムにおいて、地震時における堤体内の応力や歪が実測されれば、これが一番望ましいが、現在までのところ、このような目的の使用に耐え得る実測データはなく、地震時の記録としては加速度記録が一般的である。加速度記録を積分して変位を求めても、残留変形量を推定するだけの精度を得るのは困難である。一方、静的な変形は、多くのロックフィルダムで精度よく求められており、長期間のうちには、貯水位の変動を受け、水位変動量が大きい場合には、水位の増減による応力の変動分は、かなり大きな地震慣性力のそれに匹敵するものである。ただし、地震動と水位変動では、荷重速度が大きく異なるから、上流側ロックゾーンの排水条件については同一でなく、この点注意が必要であるが、少なくとも下流側のロックゾーンについては、貯水変動による応力-歪関係から、地震時の応力-歪関係をある程度推論できるはずである。

4.2 計測された天端の水平変位

解析の対象としたダムは白川ダムである。このダムは、山形県を流れる最上川の左支川白川に、洪水調節、発電等を目的として、東北地方建設局が1980年に建設したダムである。図-4.1に天端変位量の測定位置を、表-4.1にダムの諸元を示す。

図-4.2に実測された天端の水平変位量と貯水位の関係について示す。1979～1980年の初期湛水時と、その後6年経過した1986～1988年について区分して示してある。初期湛水時は、貯水位の上昇とともに下流側への天端水平変位量は増大し、H.W.L.の338m付近まで貯水位が達すると約50mmの水平変位量を示した。1985年からは（以降、繰返し後）天端水平変位量はある値に収束する傾向を示し、WL 310～334mの区間の貯水位変動（24m）に対して、6mmの水平変位量を示していた。

4.3 FEMとたわみ法による解析

(1) FEMとたわみ法による解析

このような、実測されたダム天端水平変位量をもとに、FEMとたわみ法を用いて逆解析を行った。つまり、実測されたダム天端水平変位量を示すような、堤体のせん断弾性係数を求めた。ここで、たわみ法とは、ダム堤体を片持梁と仮定して計算を行う方法である。

図-4.3にモデル図を示す。堤体中央にあるコアと下流ロックによって、水圧荷重を受けるモデルである。また、せん断弾性係数は深さ方向に変化するものであるが、ここでは、ダム全体が一樣

なせん断弾性係数を有するものとして考えた。(4.1)式にせん断力によるたわみの式を示す。

$$\delta = \frac{0.864}{G \cdot (m+n)} \cdot \iint \frac{x}{L_2 + x} \cdot dx \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ここに、

δ : 水圧による堤体の下流側への水平変位量 (m)

x : 水深 (m)

G : 堤体のせん断弾性係数 (t/m²)

m : 上流面勾配 (1 : m)

n : 下流面勾配 (1 : n)

L_2 : 上下流面を延長して求まる交点から貯水面までの距離 (m)

水平荷重として作用する水圧は、上流ロック部が湿潤状態から水中状態に変わることによる土圧の減少を考慮し、水圧に係数 $0.72 (r_w - K_H \cdot (r_t - r_{sub}) = 1 - 0.4 \cdot (1.8 - 1.1))$ を乗じたものを水平荷重と考えた。

図-4.4に、FEM とたわみ法による計算結果を実測記録に重ね書きしたものを示す。また、表-4.2に求められたせん断弾性係数を示す。

2方法ともほぼ同様の変位傾向および、せん断弾性係数の値を示した。実測されたダム天端変位量と、計算上のダム天端水平変位量が一致する場合のせん断弾性係数は初期湛水時は $G = 1000 \text{ kgf/cm}^2$ 、貯水位変動を繰返し受けた後は $G = 4000 \text{ kgf/cm}^2$ となった。よって、せん断弾性係数は繰返し荷重を受けることにより増加し、初期値の4倍程度になることがわかった。

また、前述のように天端変位量が収束する傾向は、下小島ダム⁵⁾、喜撰山ダム¹⁰⁾、岩屋ダム等においても観測されており、FEM およびたわみ法により、せん断弾性係数を求めてみたところ、図-4.5に示すようにほぼ同様の値を示した。

図-4.6に、FEM によって求まるある点 (図-4.3に●で示す。EL310) のせん断ひずみとせん断応力の関係を示す。いま、堤体が一様に $0.1g$ (g : 重力加速度) の地震時慣性力を受けたとすると、例えば、EL310 mにおける平均せん断応力は、 0.4 kgf/cm^2 程度で、図-4.6における応力範囲とはほぼ一致した。

なお、以上の結果は、堤体のせん断弾性係数を一定とした計算であり、堤体のせん断弾性係数を分布させた場合についても計算を実施してみたが、応力-歪関係は、堤体内の場所によって異なるものの傾向は同じで、以上は代表的な場所の応力-歪関係とみなせる。

(2) せん断弾性係数の比較

フィルダム堤体の変形特性を表現する主な物理定数として弾性係数 (ここでは、弾性係数=変形係数) がある。この弾性係数は、材料の三軸試験によって求まる鉛直応力と鉛直方向ひずみの関係より求められる。また、築堤時に計測された鉛直土圧と層別沈下計測値より求まる鉛直ひずみ量の関係からも求めることができる。これら2つの方法より求められる弾性係数は築堤解析を行う場合

に特に重要な値である。一方、堤体内部の弾性波速度S波を計測し、(4.2～3)式より弾性係数を求め、地震応答解析に用いる場合もある。

$$G = \frac{1}{g} \cdot \rho \cdot V_s^2 \dots\dots\dots (4.2)$$

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G \dots\dots\dots (4.3)$$

ここに、

G：せん断弾性係数 (kgf/cm²)

E：弾性係数 (kgf/cm²)

g：重力加速度 (cm/sec²)

ρ ：密度 (kg/cm³)

V_s ：S波速度 (cm/sec)

ν ：ポアソン比 (0.35)

このように、弾性係数といってもいろいろな方法によって求められるものである。よって、今回ダム天端水平変位量より求められたせん断弾性係数と、以上のような方法で求められたせん断弾性係数について比較し、今回求められた値の妥当性について検討してみた。なお、弾性係数は(4.3)式よりせん断弾性係数に変換して比較を行った。

表-4.3に各ダムで実施された試験と求められるせん断弾性係数を示す。この表より、せん断弾性係数の値は試験方法によって大きな違いのあることが認められる。しかし、せん断弾性係数のひずみ依存性を考えると、各試験方法のひずみ量の違いからして、このような傾向は異常なものではない。

図-4.7にせん断弾性係数とひずみの関係を示す。図中の破線は、一般的ひずみ依存性を考慮して描かれる曲線である。

つまり、今回の逆解析で用いた方法は単純な解析モデルではあるが、フィルダム挙動をある程度正確に表現できているのではないかと考えられる。

4.4 まとめ

実測されたダム天端水平変位量および解析結果より、次のようにまとめられる。

- ① 実測された天端の水平変位量と貯水位の関係は、初期湛水時は、貯水位の上昇とともに天端水平変位量は累積していくが、繰返し荷重を受けた後は、天端水平変位量はある値に収束する傾向を示す。
- ② FEM とたわみ法による逆解析を行ってみると、2方法ともほぼ同様の変位量、せん断弾性係数を示した。
- ③ せん断弾性係数は、繰返し荷重を受けることにより増加し、初期値の4倍程度になる。
- ④ 堤体が一様に0.1gの地震時慣性力を受けたとすると、例えば、EL310mにおける平均せん断応力は、0.4 kgf/cm²程度で、FEMによって求まる応力-ひずみ関係の応力範囲とほぼ一致する。
- ⑤ 逆解析を行い求められたせん断弾性係数は、他の方法で求められるせん断弾性係数と値は異なるが、ひずみ依存性を考えるとおおむね適当な値である。

表-4.1 諸 元

ダム形式	中央コア型
堤 高	66.0m
堤 頂 長	348.2m
堤 体 積	2,233,000m ³
上・下流面勾配	1:2.5 , 1:2.3
盛 立 完 了	1978.6
湛 水 開 始	1978.11

表-4.2 せん断弾性係数

	FEM	たわみ法
初期湛水	930	1,100
繰返し後	3,900	4,400

単位:(gkf/cm²)

表-4.3 せん断弾性係数の比較

	築堤時実測値 から得られた G (kg/cm ²)	静的三軸試験 から得られた G (kg/cm ²)	動的三軸試験 から得られた G (kg/cm ²)	堤体の弾性波速 度から得られた G (kg/cm ²)	繰返し荷重を受け た後の天端水平変 位量より求まる G (kg/cm ²)
ひずみ量	1~3×10 ⁻²	1~3×10 ⁻²	1~10×10 ⁻³	1×10 ⁻⁶	1~2×10 ⁻⁴
白川ダム	110	————	————	————	3,900
岩屋ダム	————	110~150 ¹¹⁾	740~3,400 ¹¹⁾	1,800~10,000 ¹¹⁾	4,800
喜撰山ダム	————	110~150 ¹²⁾	————	1,800~10,000	3,400
下小島ダム	110 ¹³⁾	————	————	1,800~10,000	4,100

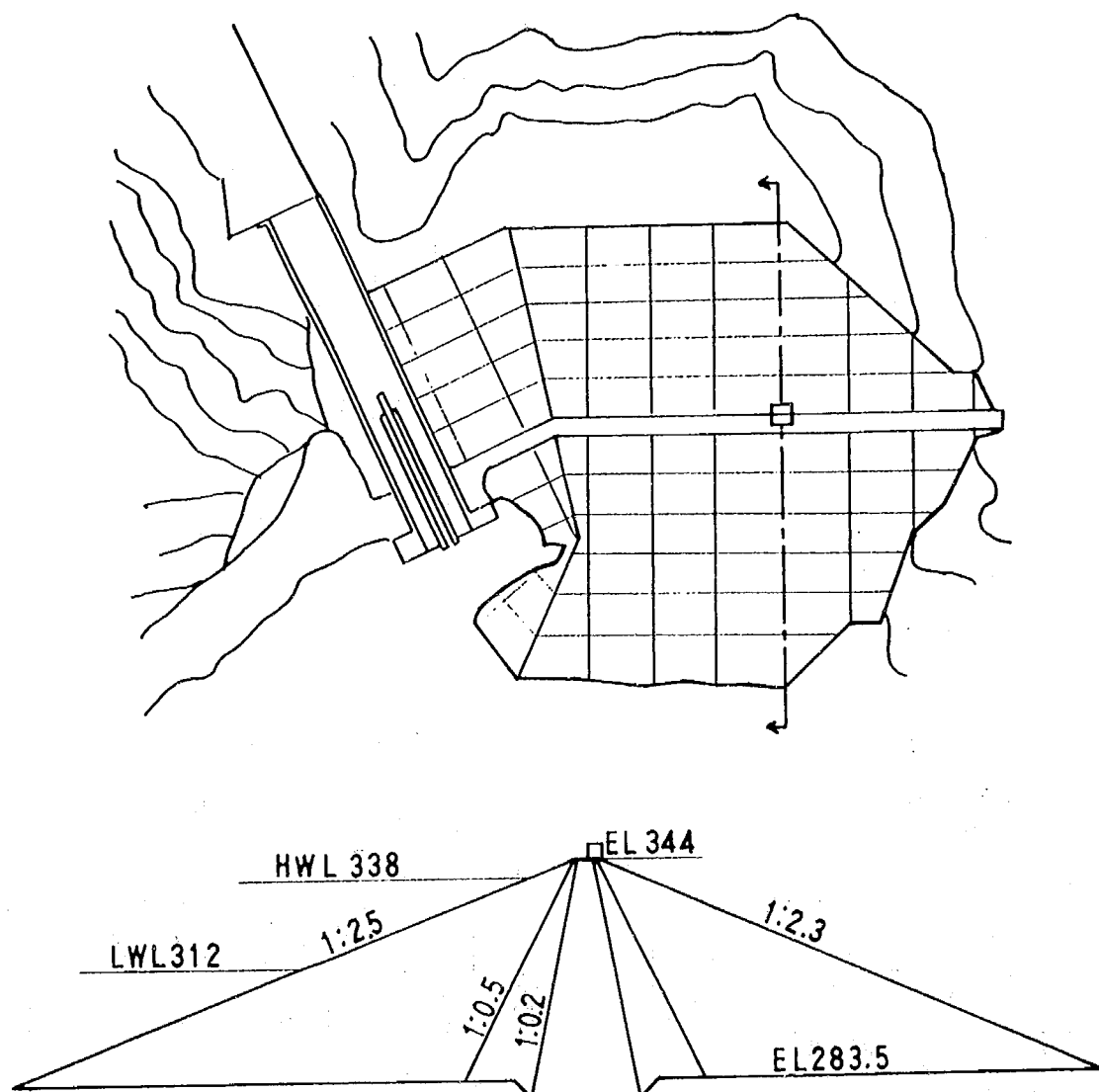


图-4.1 测定位置图

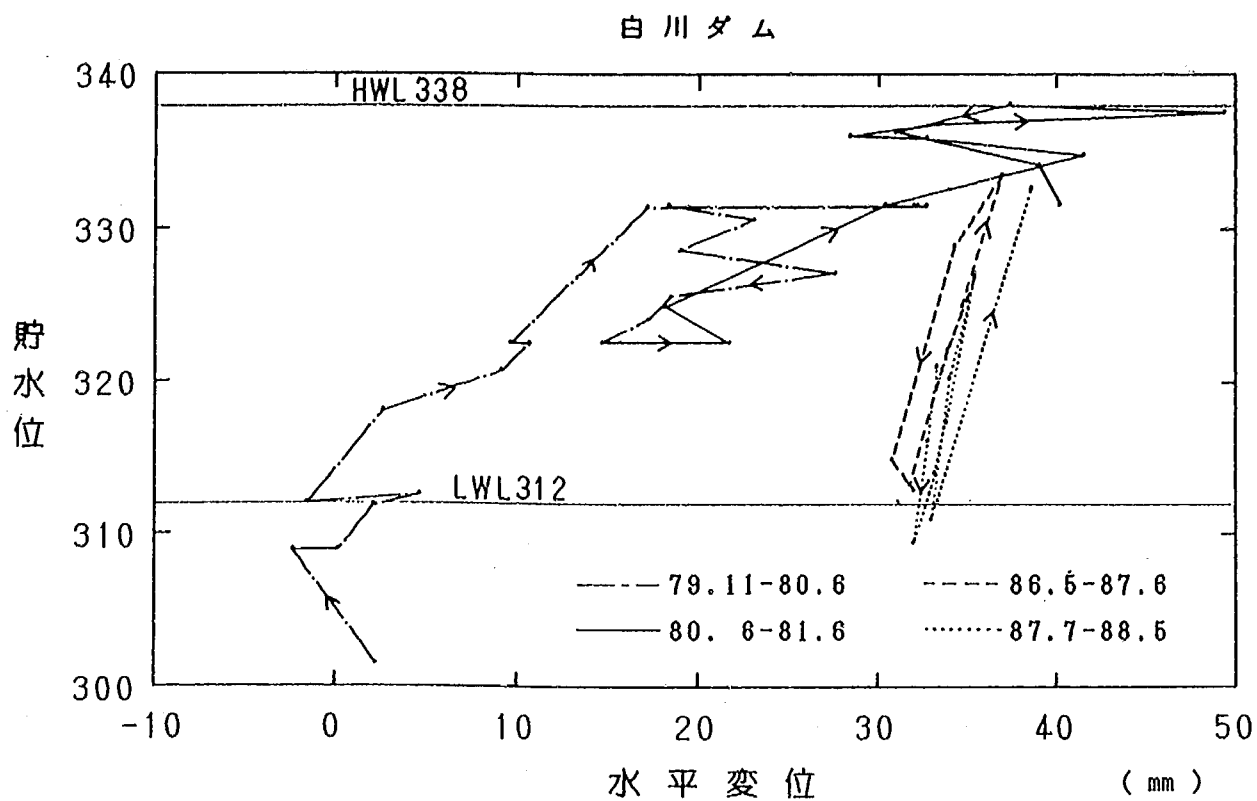


図-4.2 天端水平変位と貯水位

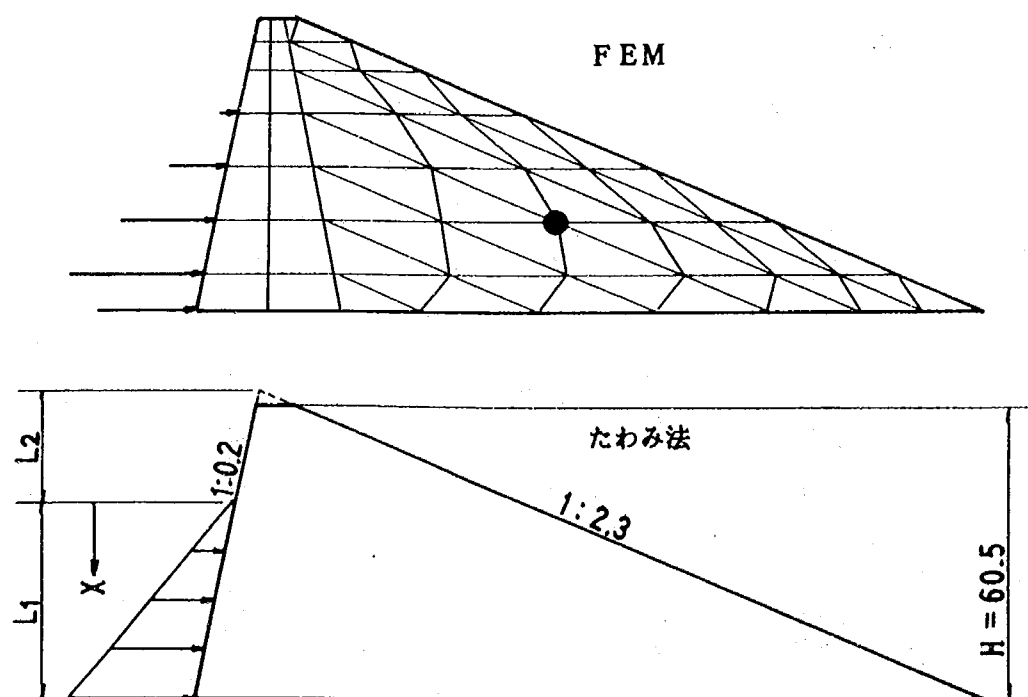


図-4.3 解析モデル図

白川ダム

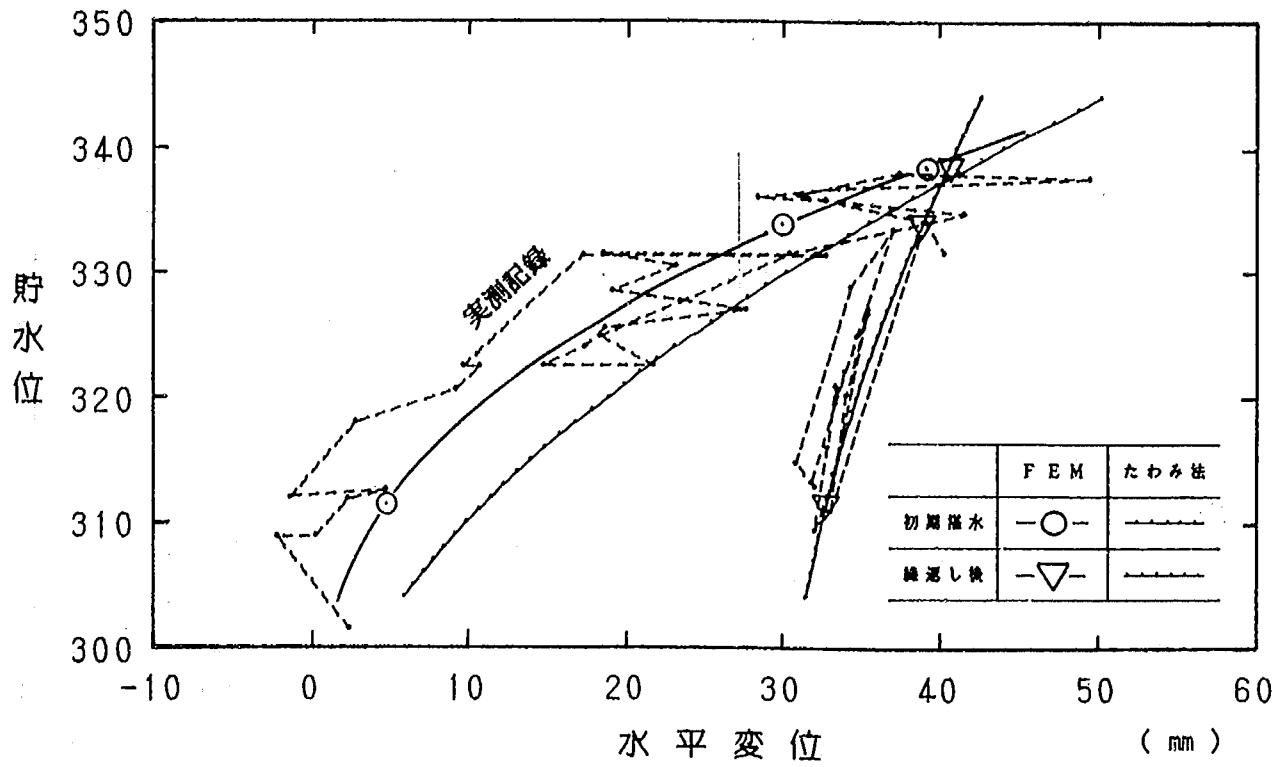


図-4.4 実測記録と解析結果

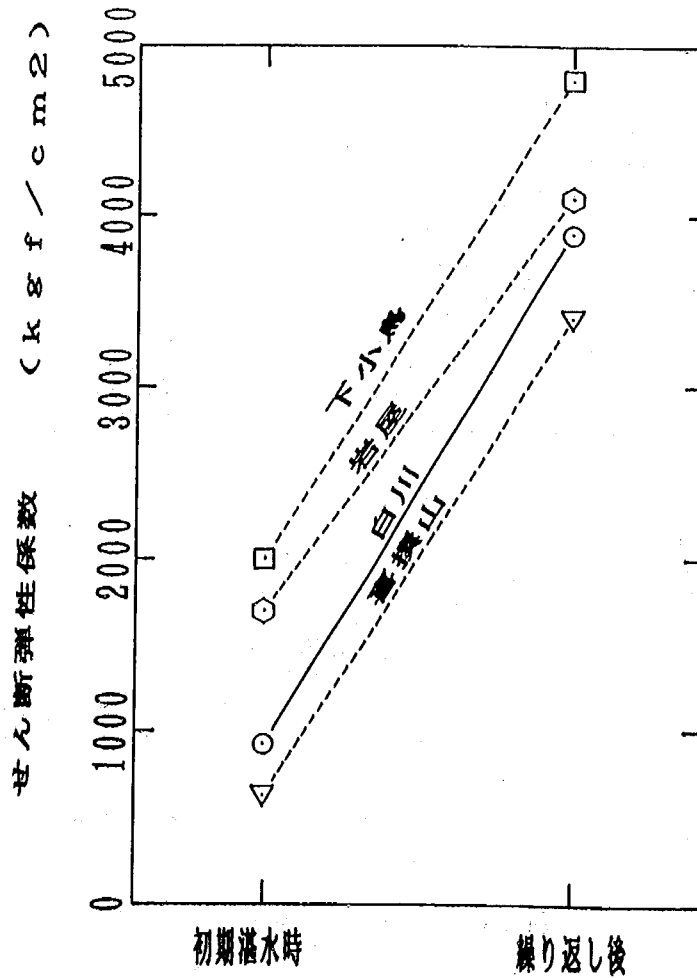


図-4.5 せん断弾性係数の変化

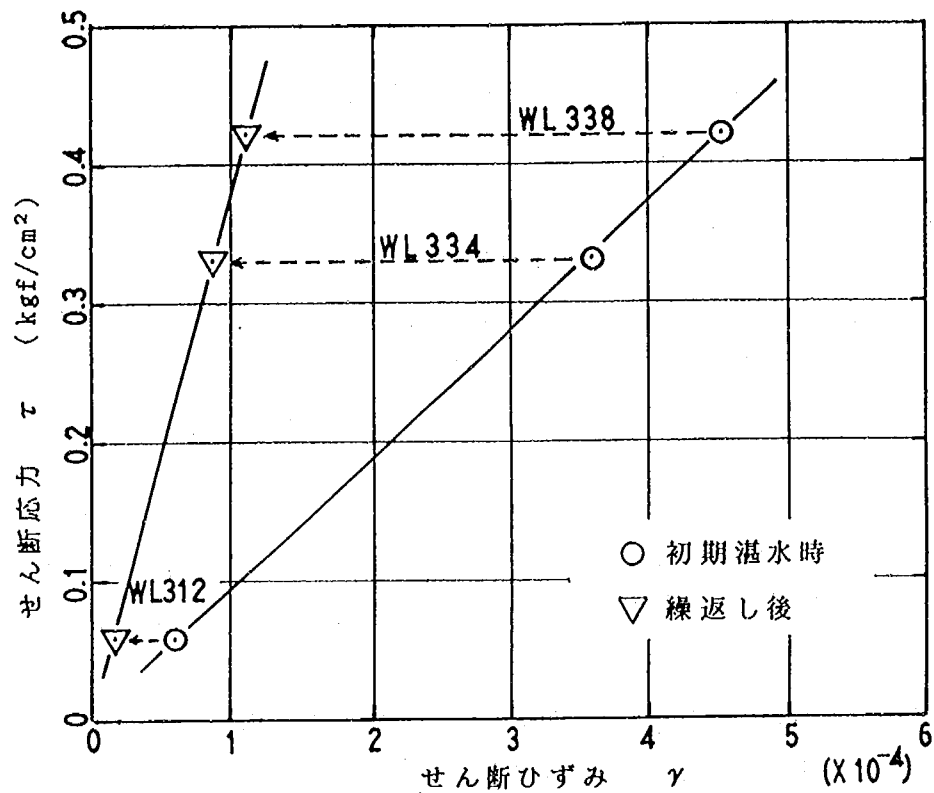


図-4.6 せん断応力とせん断ひずみ

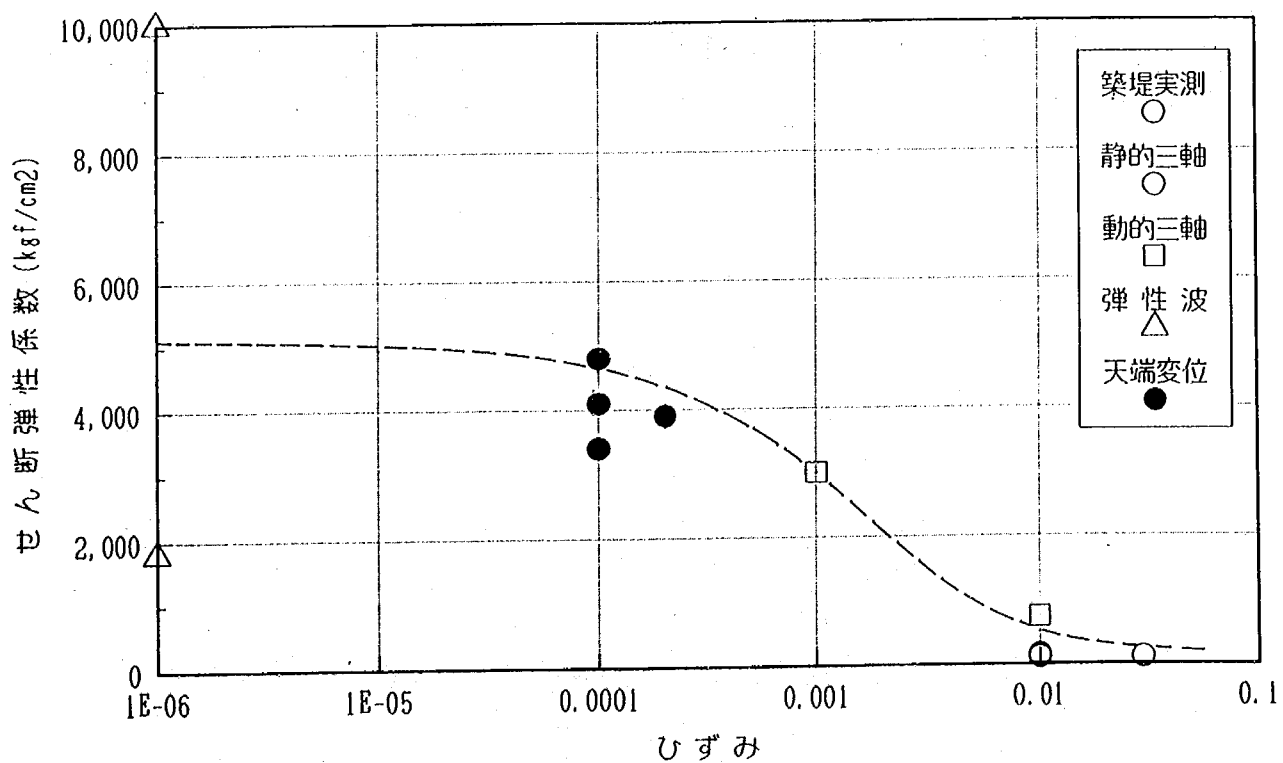


図-4.7 ひずみとせん断弾性係数

第5章 結 論

本資料は、フィルダム挙動解析の一環としてとりまとめたものである。よって、本資料がフィルダムの堤体の変形特性について総合的に検討したものではなく、今後とりまとめられていく資料と合わせて、「フィルダムの挙動解析」としての、ある1つの結論が得られるものと考えられる。

特に変形特性について述べれば、ダム天端の変形性、上下流面（ロック部）の変形性、三次元的変形性の解析、あるいは内部変位量の把握として、層別沈下量、水平変位量の調査等がある。このように、まだ多くの検討項目が残されていることより、今後逐一資料としてとりまとめていく方針である。

本資料の検討結果を簡単にまとめると次のようになる。

ダム最大断面天端部のマクロ的な変位傾向についてはダム高さとの関係で、概ね表現することができることがわかった。また、その変位量の1つである沈下量については、ダム高さと計測開始からの経過日数を用いて、長期的な沈下量の予測が可能である事が認められ、100年後の沈下量としてはダム高100m程度で60cm程度になると予測された。

堤体内の応力ひずみ関係の推定では、単純なモデルではあったが、概ね一般的に考えられているせん断弾性係数の値が求められた。今後は、室内試験において、せん断応力-歪関係を求める試験を行う予定である。つまり、大型ねじり単純せん断試験機を用いて、貯水位変動に対応するダム堤体内（ロックゾーン）の応力-歪関係を再現し、本報告で求められた応力-歪関係の妥当性を検証していく予定である。

なお、本資料の「長期的なダム天端の変位傾向」については、フィルダムの長期的な安全管理上の1つの重要な資料となると思われます。ダム管理担当者の一参考資料となれば幸いです。

謝

辞

本資料をとりまとめるにあたり、貴重な計測データを収集および提出していただいた各ダム担当者の皆様には、大変な御協力を賜ったことをここに記し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土質基礎工学ライブラリー 18 「土と基礎の変形の実態と予測」, 土質工学会, p.145, 1979.
- 2) Lawton, F. P., and Lester, M. D., "Settlement of Rockfill Dams", Proceedings, Eighth International Congress on Large Dams, Vol. III, Q.32 R. 2, Edinburgh, Scotland, 1964.
- 3) Sowers, G. F., Williams, R. C., and Wallace, T. S., "Compressibility of Broken Rock and the Settlement of Rockfill", Proceedings, Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. II, Montreal, Canada, 1965.
- 4) Dascal, O. "Postconstruction Deformations of Rockfill Dams", Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 113, No 1, January, 1987.
- 5) 改訂新版「最新フィルダム工学」, 社団法人電力土木技術協会, p. 263, 1981. 3.
- 6) Ross, A. D. "Concrete creep data", The Struct. E., 15, pp 314 - 26, London, 1937.
- 7) Concrete Manual 8th Edition". U, S. Bureau of Reclamation, 1983.
- 8) 三国英四郎: 「ロックフィルダム - 材料の締固めと堤体の挙動」, 大ダム, No 54, pp. 17 ~ 31, 1970.
- 9) 松本徳久・伊藤基博・安田成夫: 「繰り返し荷重を受けたロックフィルダムの応力-ひずみ関係」, 土木学会第45回年次学術講演会第1部門, p. 1234, 1990.
- 10) 本郷忠夫: 「ロックフィルダムの初期湛水時の挙動について」, 大ダム, No 100, pp. 76 - 85, 1982. 6.
- 11) 「岩屋ダム工事誌」, 水資源開発公団・中部電力株式会社, p. 105, 1978.
- 12) 林 正夫: 「ロックフィルダム築造中および湛水中の内部挙動-喜撰山ダム- (弾性解析ならびに実測値との比較)」, 電中研報告, No 70012.
- 13) 原田次夫・松井家孝: 「ロックフィルダムの築造中および湛水後の挙動」, 土と基礎, Vol. 25, No 5, pp. 67 - 74, 1977.

付 表 ・ 付 図

ダ ム 諸 元	(表 - 1)
変 位 量 一 覧	(表 - 2)
盛立材料物性値一覧	(表 - 3)
施 工 条 件 一 覧	(表 - 4)
天端沈下量の経年変化図	(図 - 1 ~ 図 - 21)
天端沈下率の経年変化図	(図 - 22 ~ 図 - 42)
天端沈下量と貯水位の関係図	(図 - 43 ~ 図 - 62)
天端水平変位量の経年変化図	(図 - 63 ~ 図 - 83)
天端水平変位量と貯水位の関係図	(図 - 84 ~ 図 - 103)
天端沈下量と天端水平変位量の関係図	(図 - 104 ~ 図 - 123)

表-1 ダム諸元

No	ダム	管理者 又は 発注者	ダム形式 CC IC CF			天端標高	堤 高 (m)	堤頂長 (m)	堤 体 積 (千m ³)	盛立開始 (年月)	盛立完了 (年月)	測定開始 (年月)	試験湛水 開 始 (年月)	最高水位 (年月)	計 測 ダム高 (m)	測 点
1	A	東北地方建設局			○	EL 323	53.0	345.0	411.3	50.05	53.06	53.07	53.12	54.04	53	J0No20
2	B	秋田県			○	EL 255	66.5	215.0	482.0	60.06	62.06	63.02	63.02	63.05	66	No14
3	C	北海道開発局	○			EL 814	86.5	440.0	3,874.6	72.05	74.08	74.10	74.11	75.06	86	C-5
4	D	宮城県	○			EL 64	43.0	256.5	550.8	73.08	75.08	76.01	76.02	76.11	38.5	No9
5	E	水資源開発公団		○		EL 428	127.5	366.0	5,780.0	74.08	75.11	75.11	76.03	76.11	127.5	D-14
6	F	神奈川県		○		EL 325	95.0	587.7	5,816.0	76.03	77.12	78.01	78.02	78.11	95	T-11
7	G	富山県		○		EL 110	45.0	224.0	224.0	75.08	77.07	77.12	78.04	78.12	45	No10
8	H	北陸地方建設局	○			EL 469	153.0	420.0	10,102.0	77.04	78.10	79.05	79.06	80.03	153	D-5
9	I	水資源開発公団	○			EL 136	83.0	420.0	3,000.0	75.08	77.01	77.04	77.04	77.07	83	TU-1
10	J	滋賀県	○			EL 263.5	56.0	192.8	980.0	76.08	78.11	80.02	80.02	80.05	56	T-2
11	K	宮城県	○			EL 280	76.0	310.0	2,200.0	74.09	79.06	79.11	79.11	80.12	76	A-7
12	L	東北地方建設局	○			EL 344	66.0	348.2	2,233.0	74.09	78.10	79.10	79.11	80.11	66	M-21
13	M	東北地方建設局	○			EL 186.5	52.5	210.0	980.0	78.09	80.06	80.11	80.11	81.03	52	DCM02
14	N	山形県	○			EL 270	50.0	265.5	689.4	79.05	80.10	80.12	82.01	82.04	50	No. 13
15	O	長野県	○			EL1070	60.0	180.0	952.0	80.05	81.08	82.01	82.01	82.10	66	T-5
16	P	宮城県	○			EL 254	73.0	420.0	2,606.0	79.09	83.07	83.10	83.10	84.05	73	No. 26
17	Q	北海道開発局	○			EL 343	84.3	443.0	3,658.0	78.08	82.08	84.02	84.03	84.12	80	V-5
18	R	栃木県	○			EL 412	62.2	260.0	1,240.0	81.08	83.08	84.10	84.11	85.04	60	No14
19	S	埼玉県	○			EL 316.5	83.5	250.0	1,600.0	81.08	84.07	84.10	84.10	85.06	83.5	A-3
20	T	山梨県	○			EL 808	88.0	320.0	3,010.0	81.09	84.08	84.10	84.10	86.05	81.5	S-10
21	U	静岡県	○			EL 156	64.0	323.0	1,084.0	84.11	86.11	87.04	88.10	89.04	64	C-4

表-2 変位量一覧

	ダム	計測 ダム高 (m)	沈下量 (mm)						沈下率 dV/H (%)				最大水平変位				1000日 の時点 の水平 変位量	沈下曲 線の 変曲点 の有無	水平 変位の タイプ
			計測開始からの経過日数				現在	経過 日数					変位量(mm)		変位率(%)				
			1000日	2000日	3000日	4000日			1000日	2000日	3000日	現在	上流側	下流側	上流側	下流側			
1	A	53.0	160	210	242	260	410	13000	0.302	0.396	0.457	0.774		270		0.509	80	○	A
2	B	66.0	335	390	400	410	455	10000	0.508	0.591	0.606	0.689		350		0.530	260	△	A
3	C	86.0	204	257	287	310	340	5500	0.237	0.299	0.334	0.395	10	50	0.012	0.058	50	△	C
4	D	38.5	55	70	77	79	80	4900	0.143	0.182	0.200	0.208	20	14	0.052	0.036	14	△	C
5	E	127.5	430	455	479	510	530	5100	0.337	0.357	0.376	0.416		80		0.063	80	○	B
6	F	95.0	95	128	154	----	170	4100	0.100	0.135	0.162	0.179		100		0.105	77	△	A～B
7	G	45	60	----	----	----	77	1900	0.133	----	----	0.171	5	25	0.011	0.055	25	△	C
8	H	153.0	460	583	664	700	680	3500	0.301	0.381	0.440	0.444	20	80	0.013	0.052	80	○	C
9	I	83.0	177	215	244	260	262	4600	0.213	0.259	0.294	0.316	15	30	0.018	0.036	15	○	B
10	J	56.0	86	108	125	132	132	3900	0.154	0.193	0.223	0.236		25		0.045	25	-	B～C
11	K	76.0	148	180	190	(210)	200	3600	0.195	0.236	0.250	0.263		45		0.059	45	○	A～B
12	L	66.0	102	139	163	180	180	4000	0.155	0.211	0.247	0.273		58		0.088	58	△	A～B
13	M	52.0	45	54	60	----	60	3200	0.087	0.104	0.115	0.115		13		0.025	9	△	A～B
14	N	53.5	102	120	122	(122)	122	3700	0.191	0.224	0.228	0.228	15	195	0.003	0.036	120	-	A～B
15	O	66.0	23	30	33	----	34	3300	0.035	0.045	0.050	0.052		31		0.047	31	△	A～B
16	P	73.0	104	117	----	----	118	2600	0.142	0.160	----	0.162	9	15	0.012	0.021	15	△	B～C
17	Q	80.0	115	150	----	----	150	2100	0.143	0.188	----	0.188	3	25	0.004	0.031	25	○	C
18	R	60.0	30	----	----	----	30	1000	0.050	----	----	0.050		40		0.067	40	△	B
19	S	83.5	80	105	----	----	107	2300	0.096	0.126	----	0.128	3	27	0.004	0.032	22	○	B
20	T	83	225	(260)	----	----	260	1900	0.271	0.313	----	0.313		26		0.031	12	○	B
21	U	64	(65)	----	----	----	68	1300	0.102	----	----	0.102	6	17	0.009	0.022	17	△	B

○：変曲点がある

△：明確でない

*：変曲点がない

A：下流方向単純増加

B：揺れはあるが下流方向増加収束

C：一旦下流変位の後上流方向変位に変化

表-3 盛立材料物性値一覧

No	ダム	コア材料			フィル材料			ロック材料			盛立速さ (m/day)
		比 重	乾 燥 密	間 隙 比	比 重	乾 燥 密	間 隙 比	比 重	乾 燥 密	間 隙 比	
1	A										
2	B										
3	C	2.591	2.151	0.205	2.615	2.248	0.163	2.642	2.186	0.209	0.106
4	D	——	1.547	——	——	2.08	——	——	2.018	——	0.058
5	E	2.635	2.026	0.301	2.596	2.121	0.224	2.628	2.229	0.179	0.274
6	F	2.87	2.008	0.429	2.877	2.303	0.249	2.917	2.315	0.260	0.147
7	G	2.634	1.373	0.918	2.655	2.050	0.295	2.441	2.124	0.149	0.062
8	H	2.68	2.05	0.307	——	2.22	——	——	2.15	——	0.265
9	I	2.75	1.85	0.486	2.78	2.17	0.281	2.76	2.22	0.243	0.156
10	J	2.69	1.70	0.58	2.63	2.05	0.28	2.63	2.1	0.25	0.115
11	K	2.583	1.53	0.688	——	1.67	——	2.5	1.983	0.261	0.044
12	L	2.65	2.067	0.282	2.52	2.137	0.179	2.53	1.905	0.328	0.044
13	M	2.7	1.728	0.563	2.71	2.247	0.206	2.278	1.678	0.358	0.079
14	N	——	——	——	1.9	1.838	0.45	2.0	1.870	0.45	0.087
15	O	2.71	1.94	0.397	2.6	2.18	0.193	2.7	2.23	0.211	0.129
16	P	2.83	1.757	0.611	——	2.2	——	2.39	1.6	0.494	0.052
17	Q	2.61	2.083	0.253	2.673	2.107	0.269	2.578	2.043	0.262	0.055
18	R	2.6	1.754	0.482	2.8	2.32	0.207	2.83	2.22	0.275	0.082
19	S	2.716	1.768	0.536	2.64	2.038	0.295	2.645	2.043	0.295	0.078
20	T	2.70	1.804	0.496	2.61	1.936	0.35	2.62	1.81	0.447	0.075
21	U	——	1.664	——	2.60	2.156	0.206	2.59	2.236	0.158	0.088

表-4 施工条件一覧

	ダム	コア			フィルター			ロック		
		締固め 厚さ	転圧機種	転圧 回数	締固め 厚さ	転圧機種	転圧 回数	締固め 厚さ	転圧機種	転圧 回数
1	A									
2	B									
3	C	20cm	シーブスフートローラ 20t	12回	30cm	ブルドーザ 21t	4回	100cm	ブルドーザ 32t	4回
4	D	15cm	タンピングローラ 21t	12回	15cm	ブルドーザ 23t	8回	50cm	ブルドーザ 23t	6回
5	E	20cm	タンピングローラ 30t	12回	35cm	振動ローラ 8t	4回	100~200cm	32tダンプ 1回、ブルドーザ	2回
6	F	20cm	シーブスフートローラ 20t	12回	40cm	ブルドーザ 32t	6回	100cm	振動ローラ 13.5t	4回
7	G	20cm	振動ローラ 8t	6回	40cm	振動ローラ 8t	6回	90cm	ブルドーザ 21t	4回
8	H	20cm	シーブスフートローラ 20t	12回	40cm	振動ローラ 13.5t	4回	60~150cm	振動ローラ 13.5t	4~6回
9	I	15cm	タンピングローラ 30t	12回	30cm	振動ローラ 21t	4回	150cm	振動ローラ 21t	4回
10	J	20cm	タンピングフートローラ 21t	10回	30cm	タイヤローラ 20t	7回	150cm以下	ブルドーザ 21t	5回以上
11	K	20cm	振動ローラ 8t	6回	20cm	振動ローラ 8t	6回	100cm	ブルドーザ 32t	5回
12	L	20cm	コンバクタドーザ 15t	8回	40cm	振動ローラ 8t	4回	100cm	振動ローラ 8t	6回
13	M	20cm	タンピングローラ 30t	12回	40cm	振動ローラ 21t	4回	50cm	振動ローラ 21t	6回
14	N	20cm	タンピングローラ 22.5t	12回	30cm	振動ローラ 8t	5回	50cm	振動ローラ 8t	5回
15	O	15cm	シーブスフートローラ 20t	8回	30cm	振動ローラ 8t	5回	60cm	振動ローラ 15t	6回
16	P	20cm	自走タンピングローラ 20t	12回	40cm	振動ローラ 15t級	5回	100cm	振動ローラ 15t	4回
17	Q	20cm	自走コンバクタ 30t	8回	40cm	ブルドーザ 21t	4回	100cm	ブルドーザ 32t	4回
18	R	20cm	タンピングローラ 18t	12回	30cm	振動ローラ 8t	5回	100cm	振動ローラ 8t	5回
19	S	15cm	コンバクタドーザ 30t	12回	30cm	振動ローラ 20t	6回	60cm	振動ローラ 20t	6回
20	T	25cm	自走式タンピングローラ 30t	12回	30cm	振動ローラ 20t	5回	100cm	振動ローラ 20t	4回
21	U	20cm	タンピングローラ 30.8t	12回	35cm	振動ローラ 11.2t	5回	100cm	振動ローラ 11.2t	5回

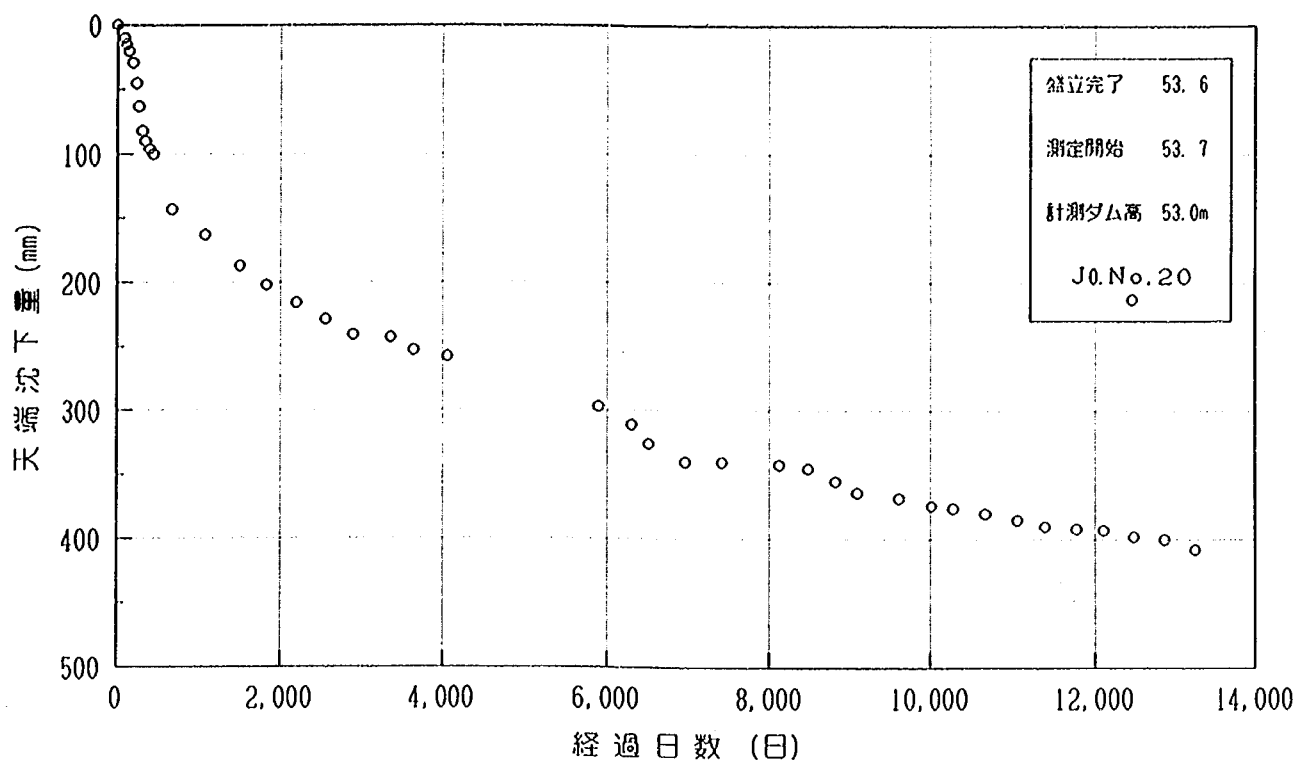


図-1 天端沈下量の経年変化 (Aダム)

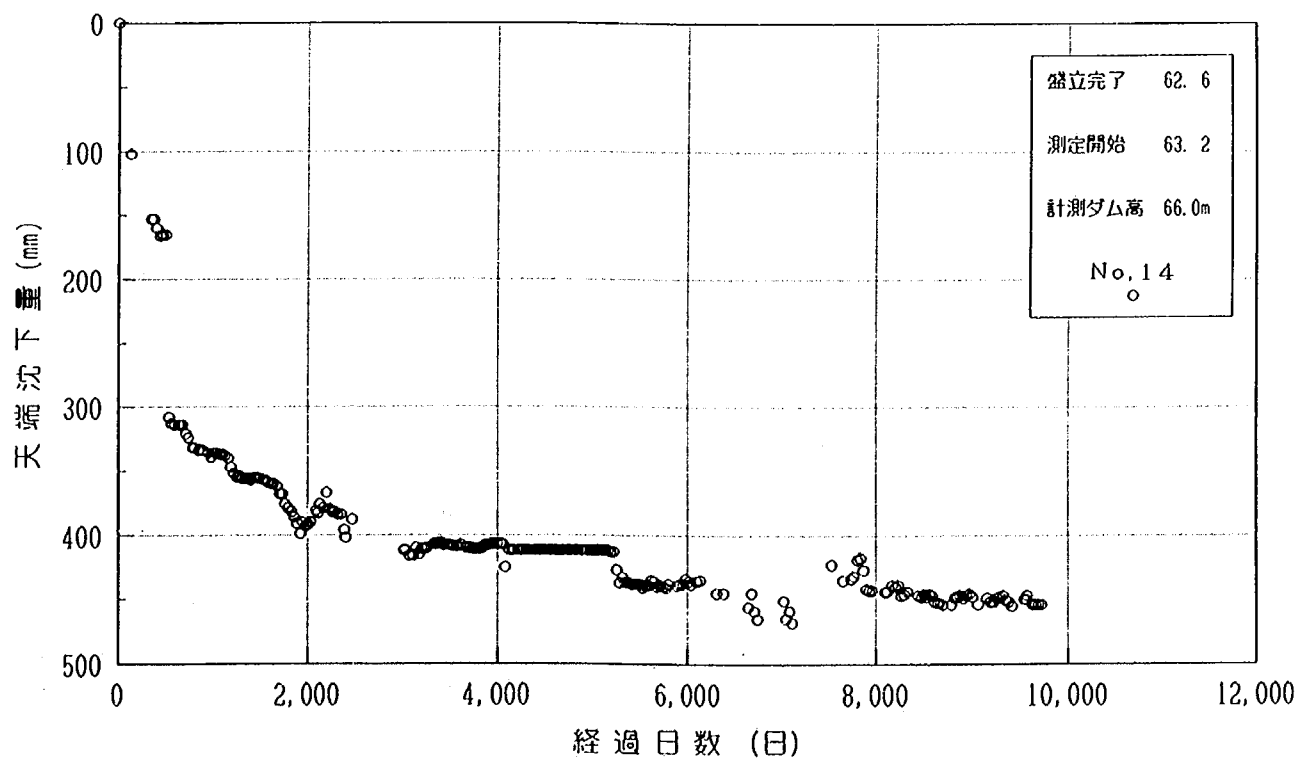


図-2 天端沈下量の経年変化 (Bダム)

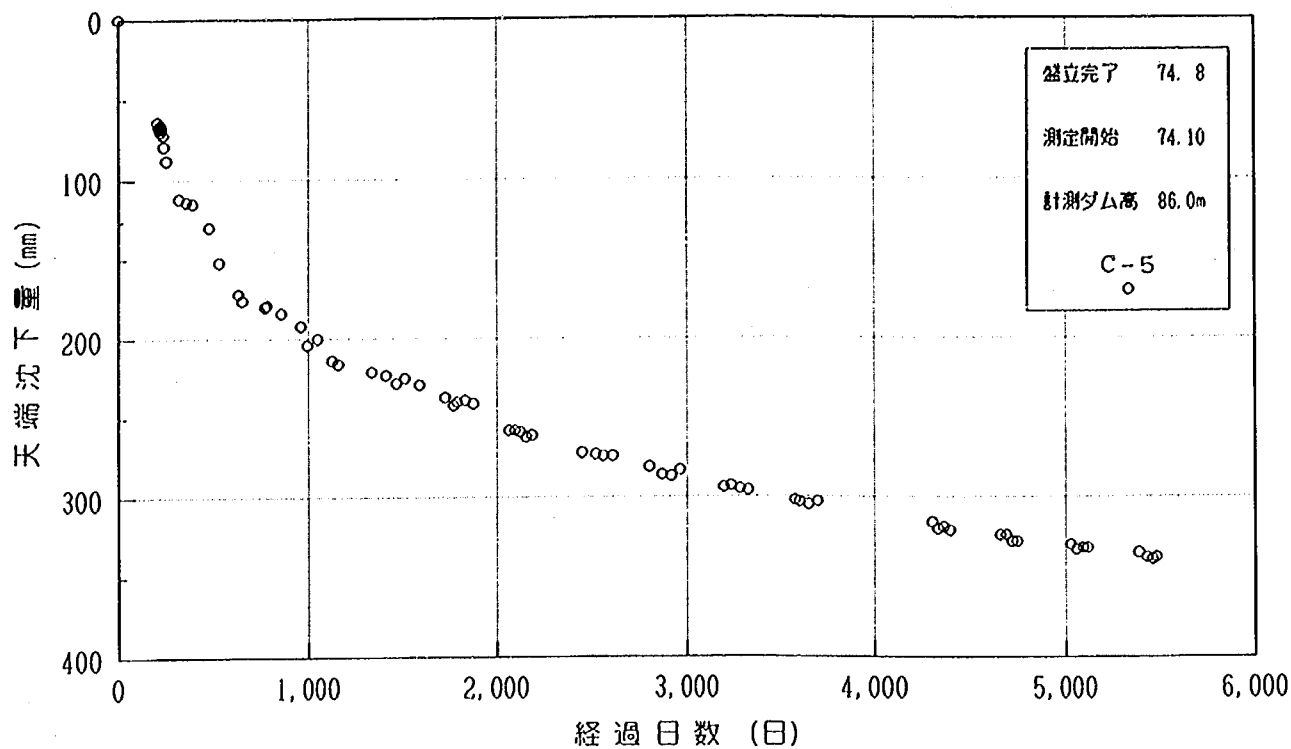


図-3 天端沈下量の経年変化 (Cダム)

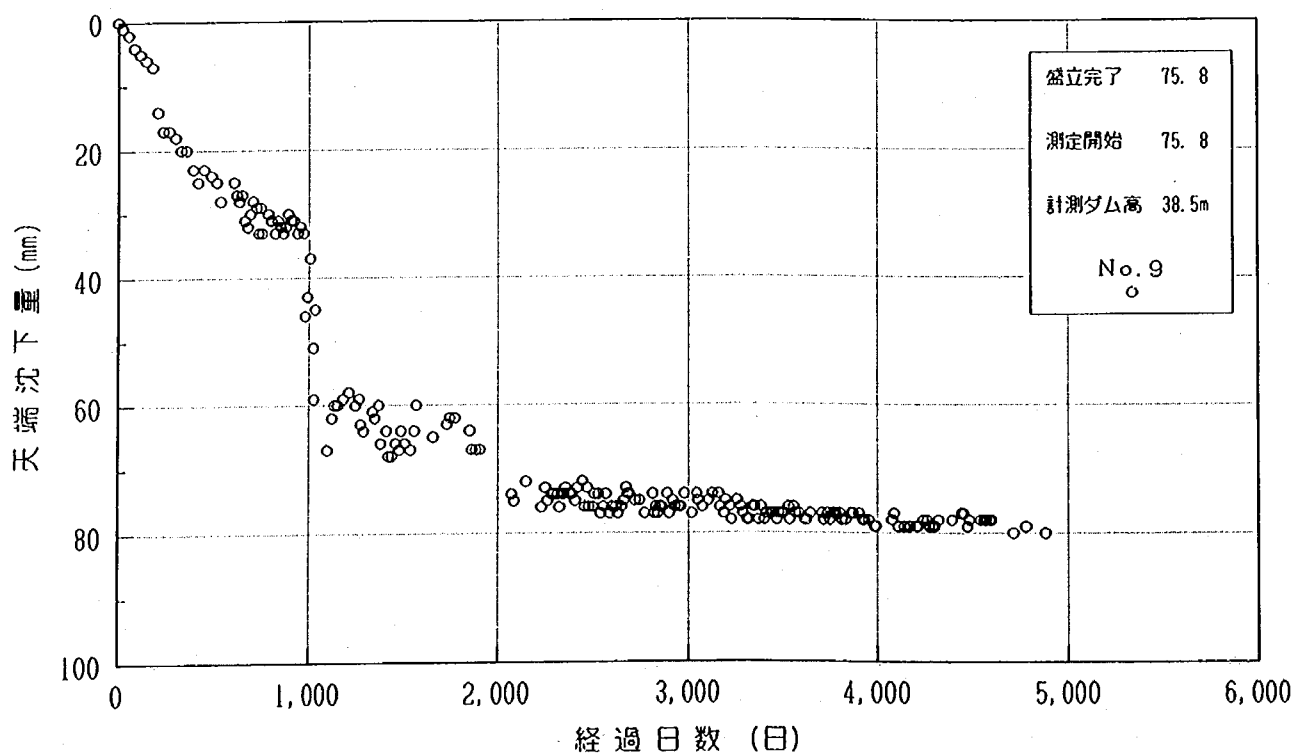


図-4 天端沈下量の経年変化 (Dダム)

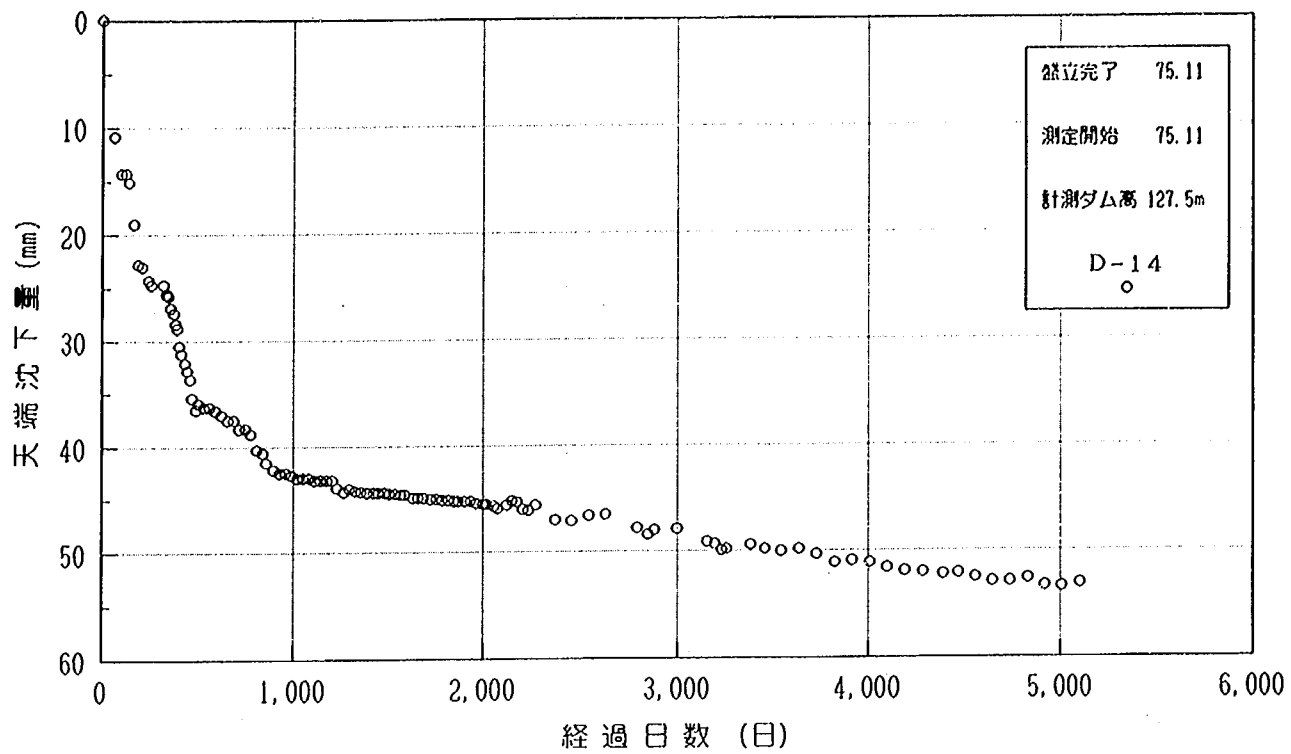


図-5 天端沈下量の経年変化 (Eダム)

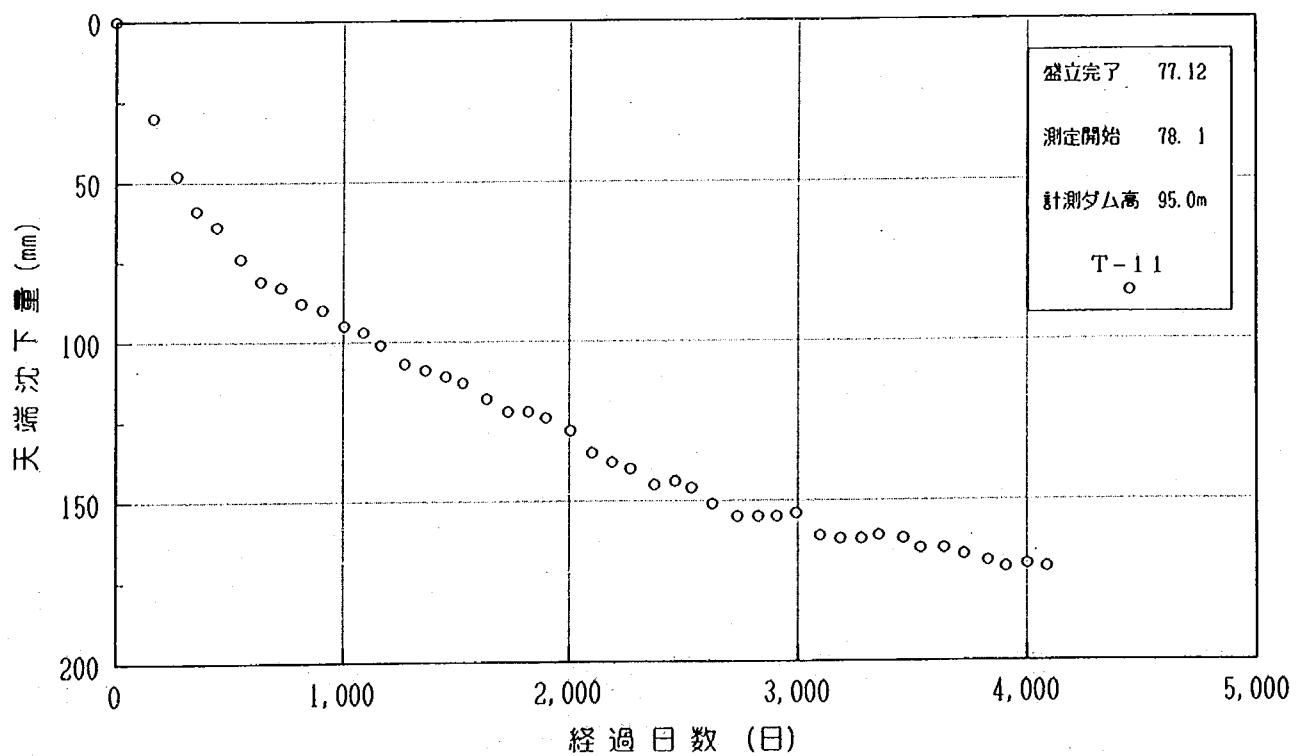


図-6 天端沈下量の経年変化 (Fダム)

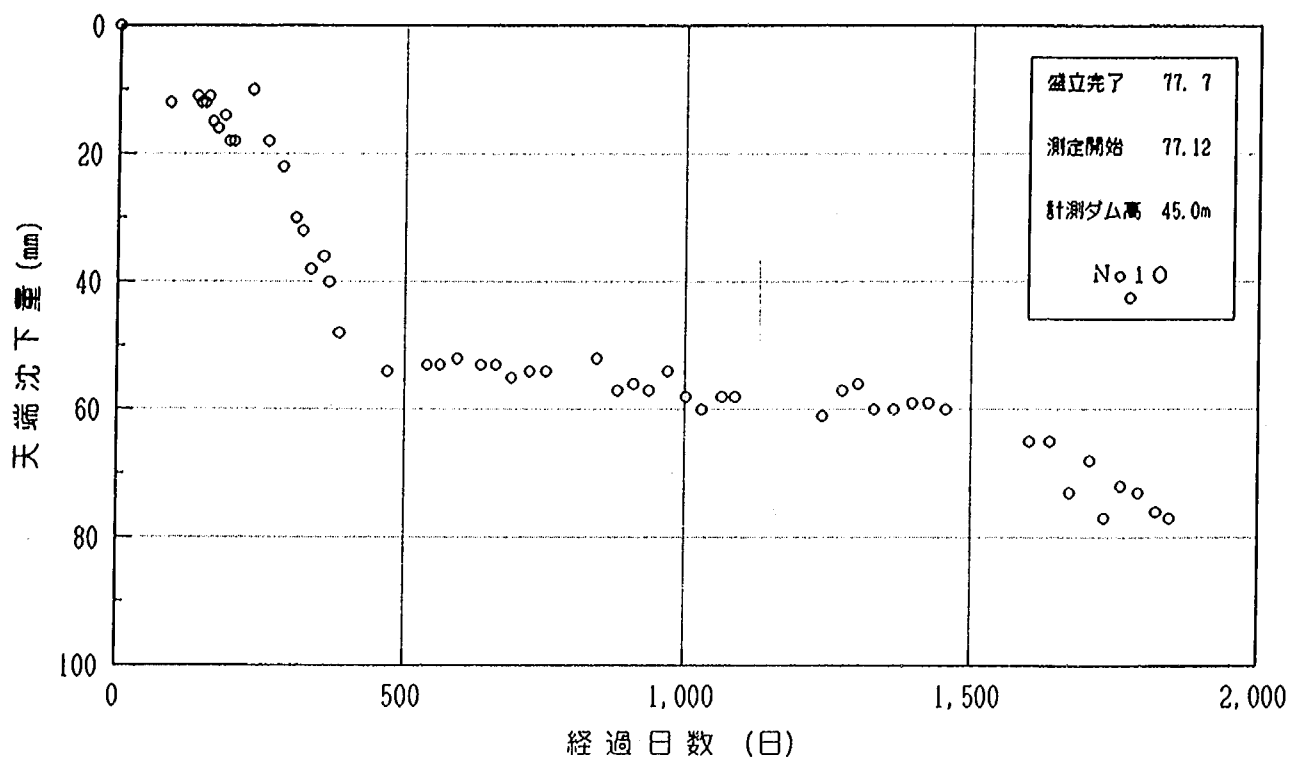


図-7 天端沈下量の経年変化 (Gダム)

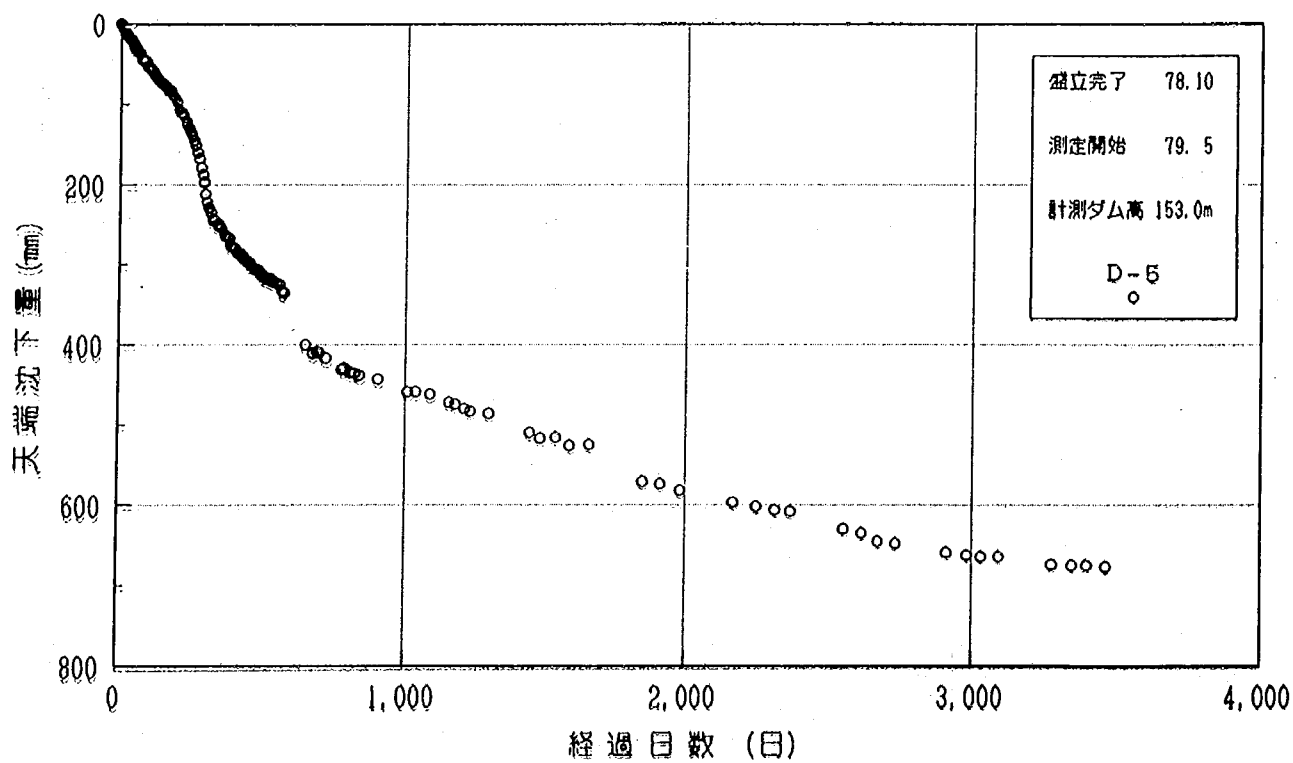


図-8 天端沈下量の経年変化 (Hダム)

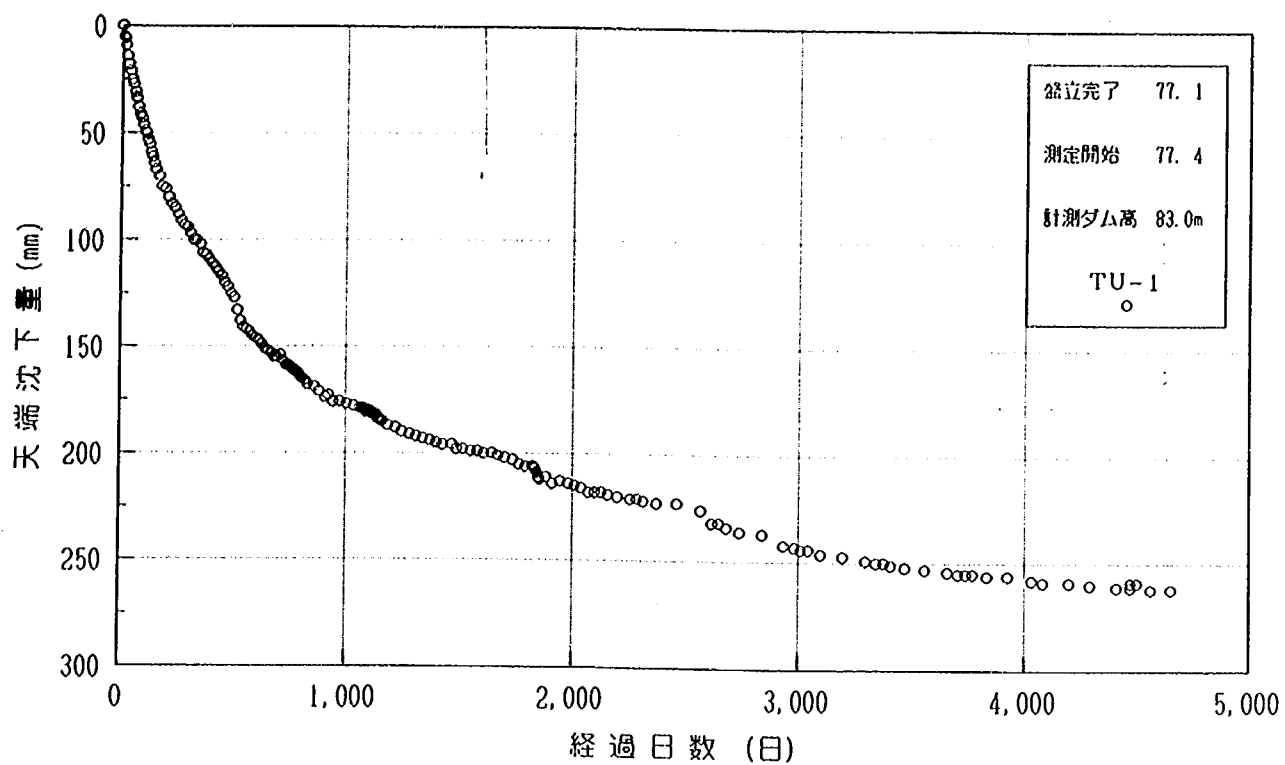


図-9 天端沈下量の経年変化 (Iダム)

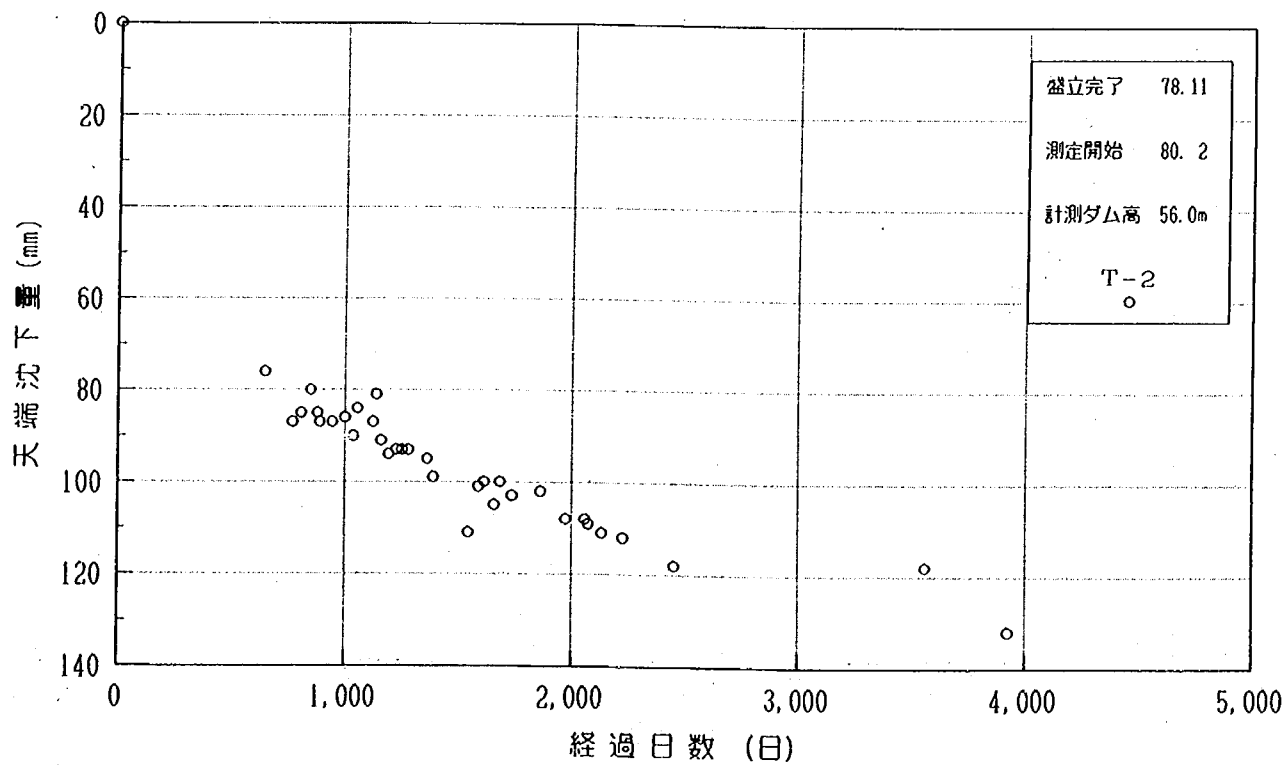


図-10 天端沈下量の経年変化 (Jダム)

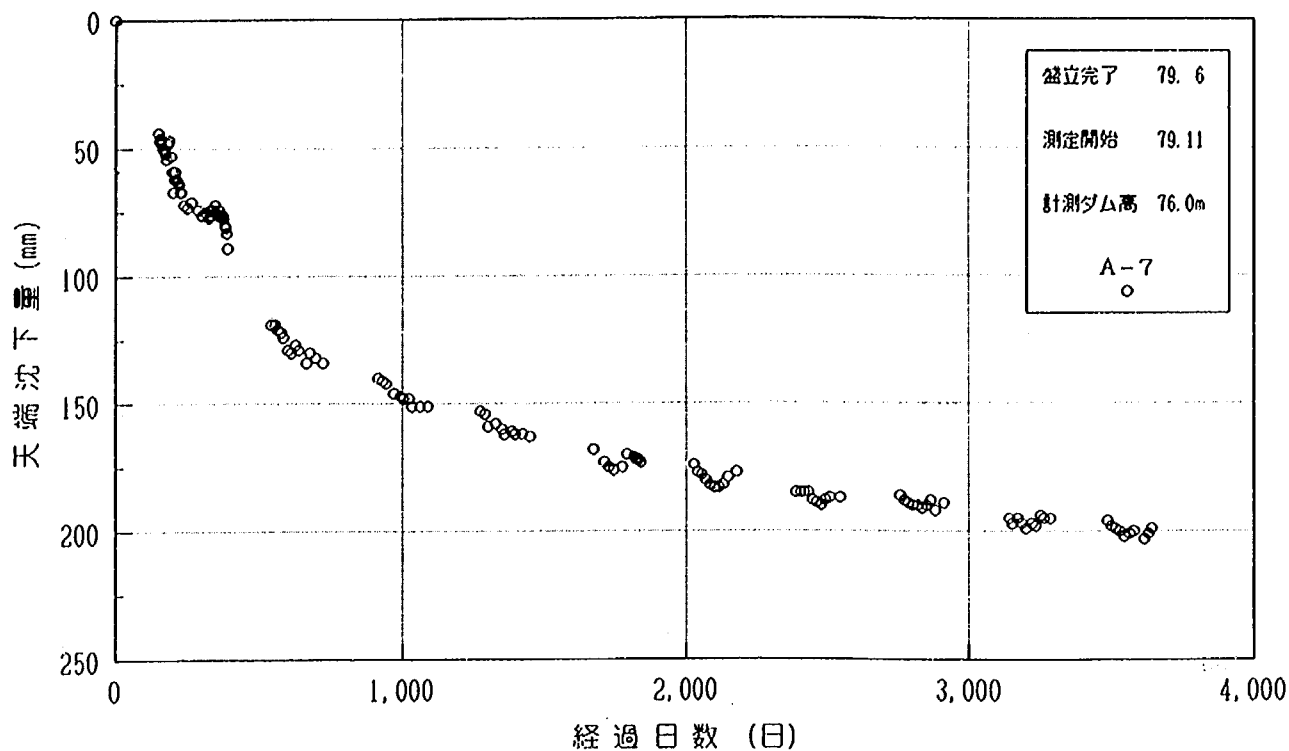


図-11 天端沈下量の経年変化 (Kダム)

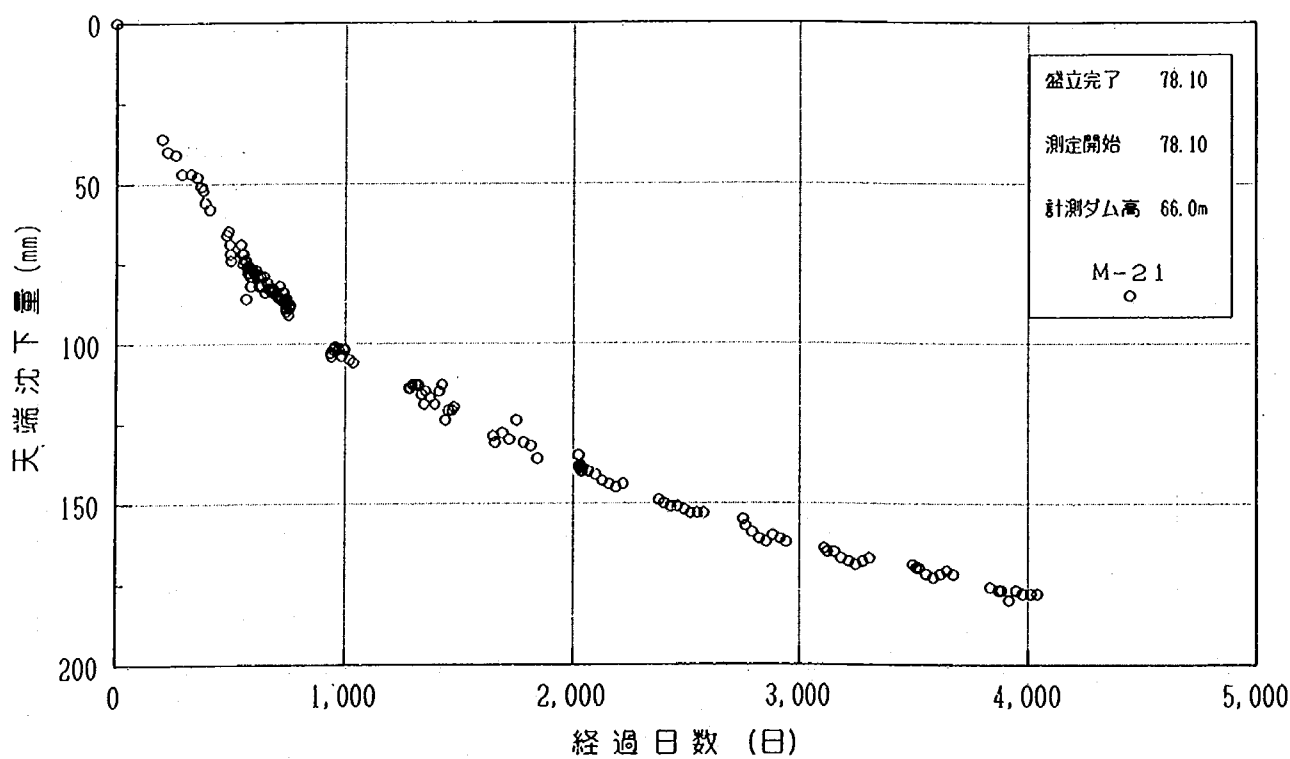


図-12 天端沈下量の経年変化 (Lダム)

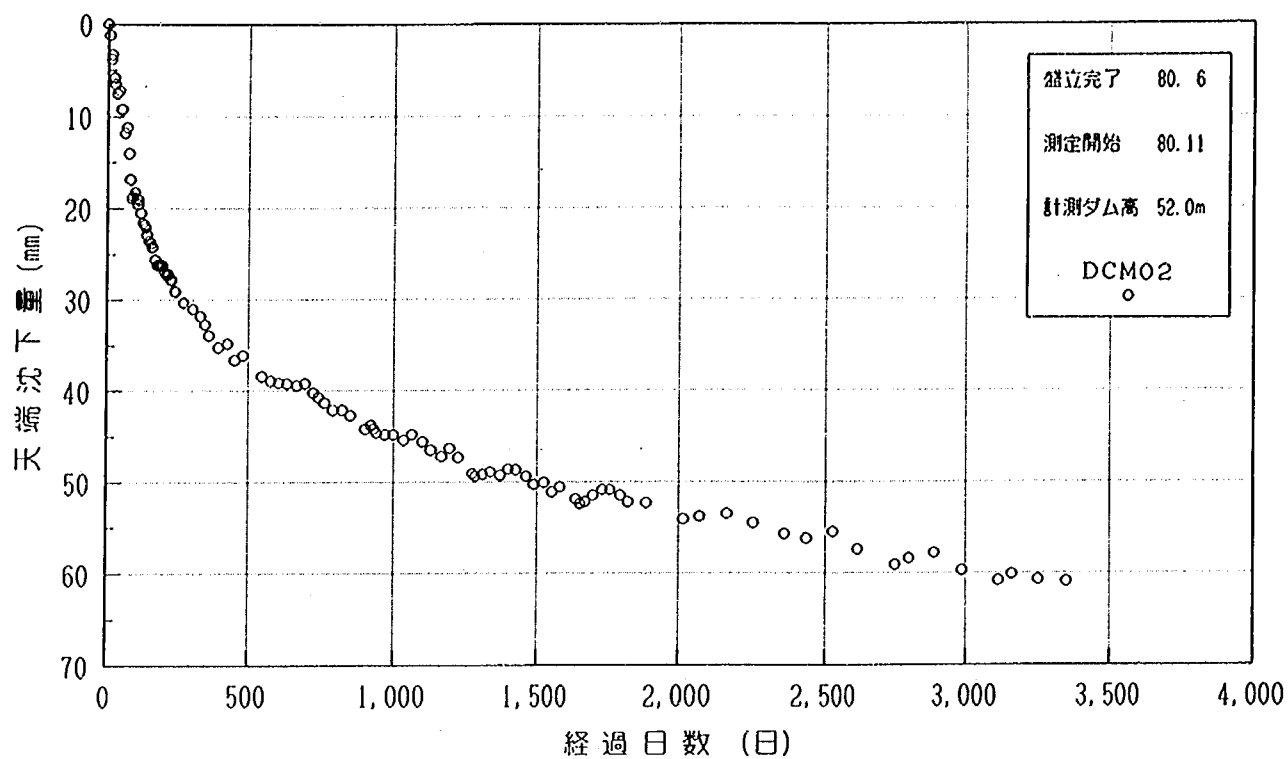


図-13 天端沈下量の経年変化 (Mダム)

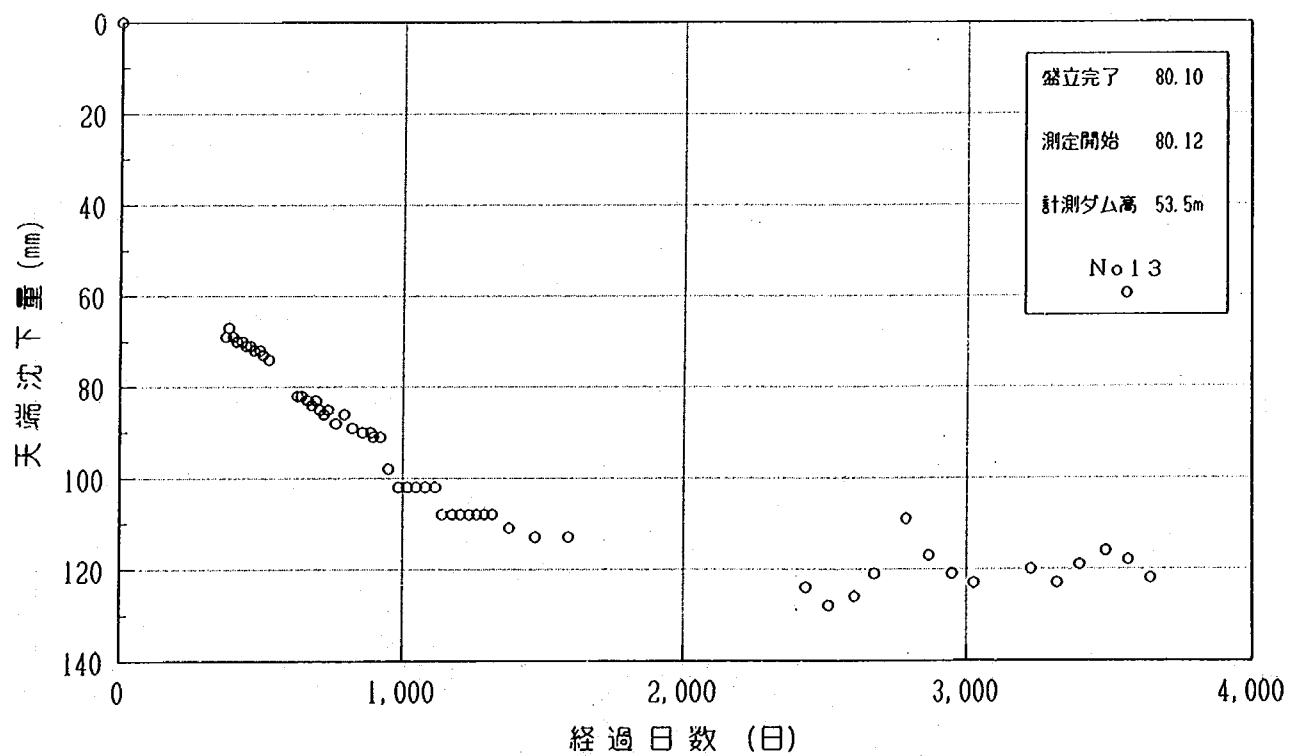


図-14 天端沈下量の経年変化 (Nダム)

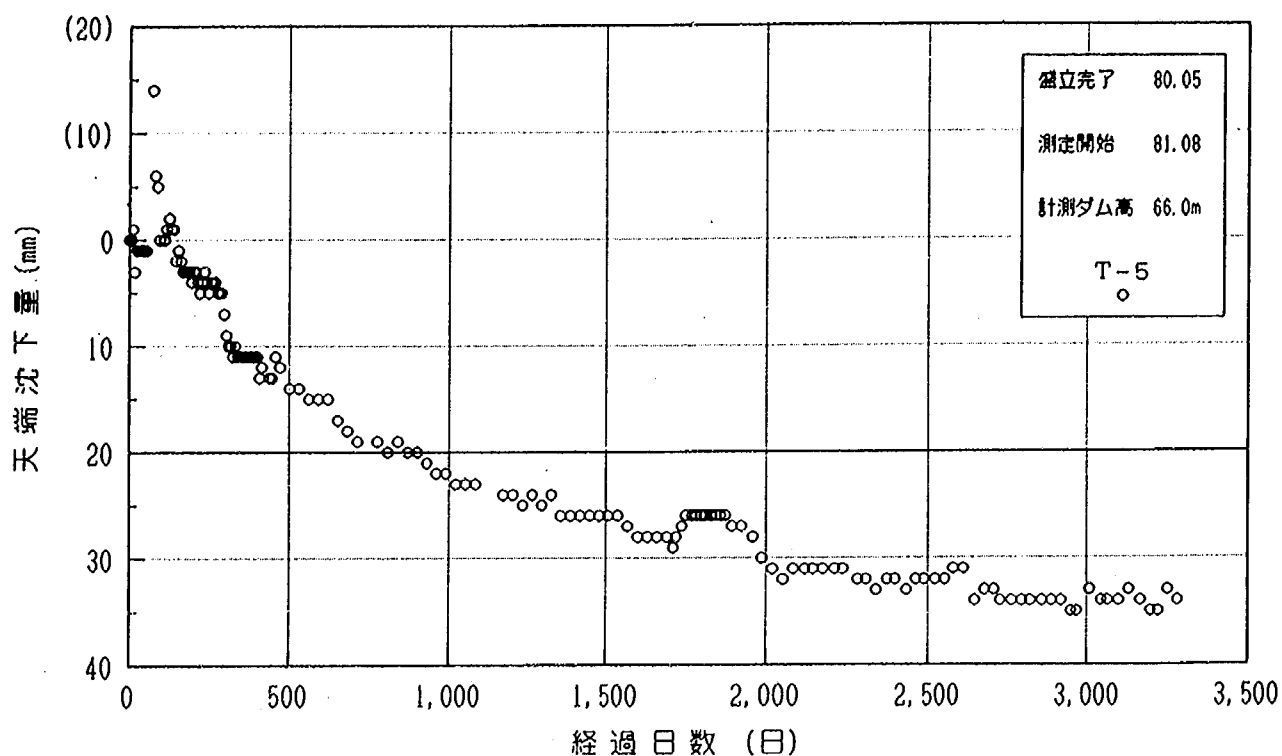


図-15 天端沈下量の経年変化 (Oダム)

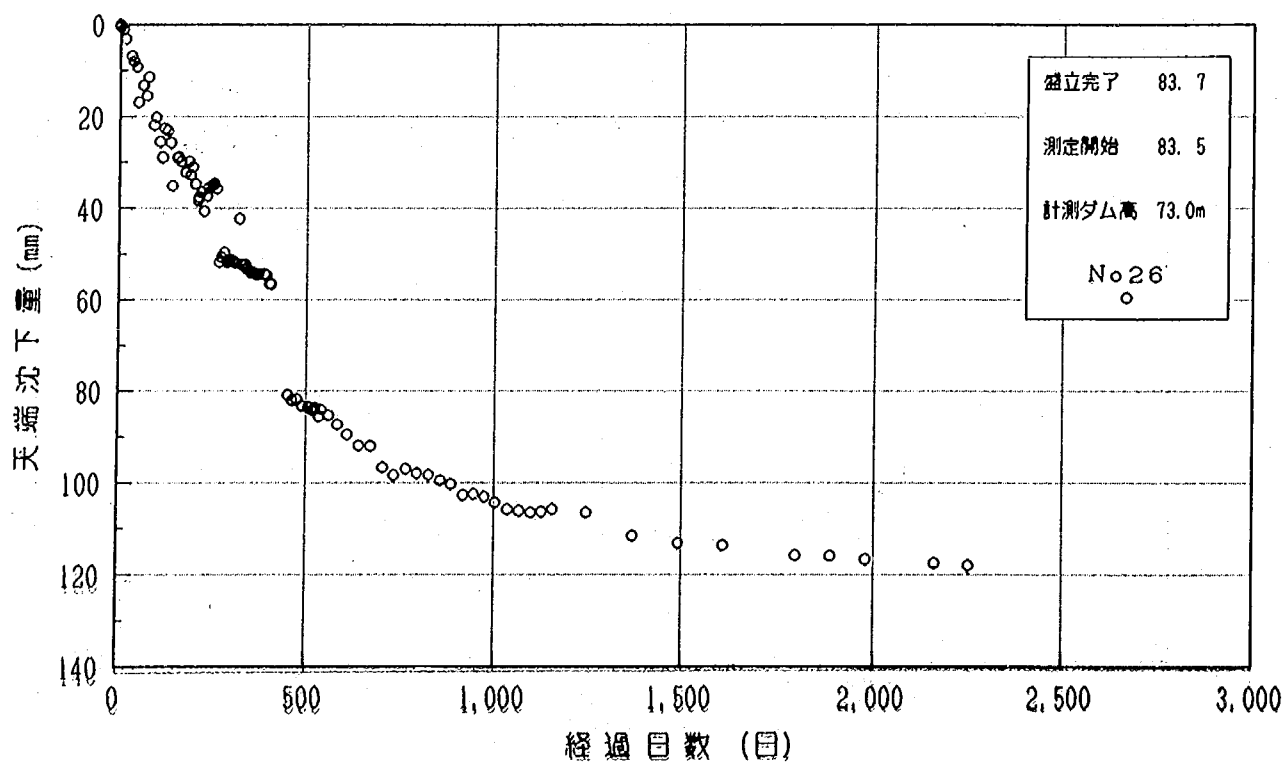


図-16 天端沈下量の経年変化 (Pダム)

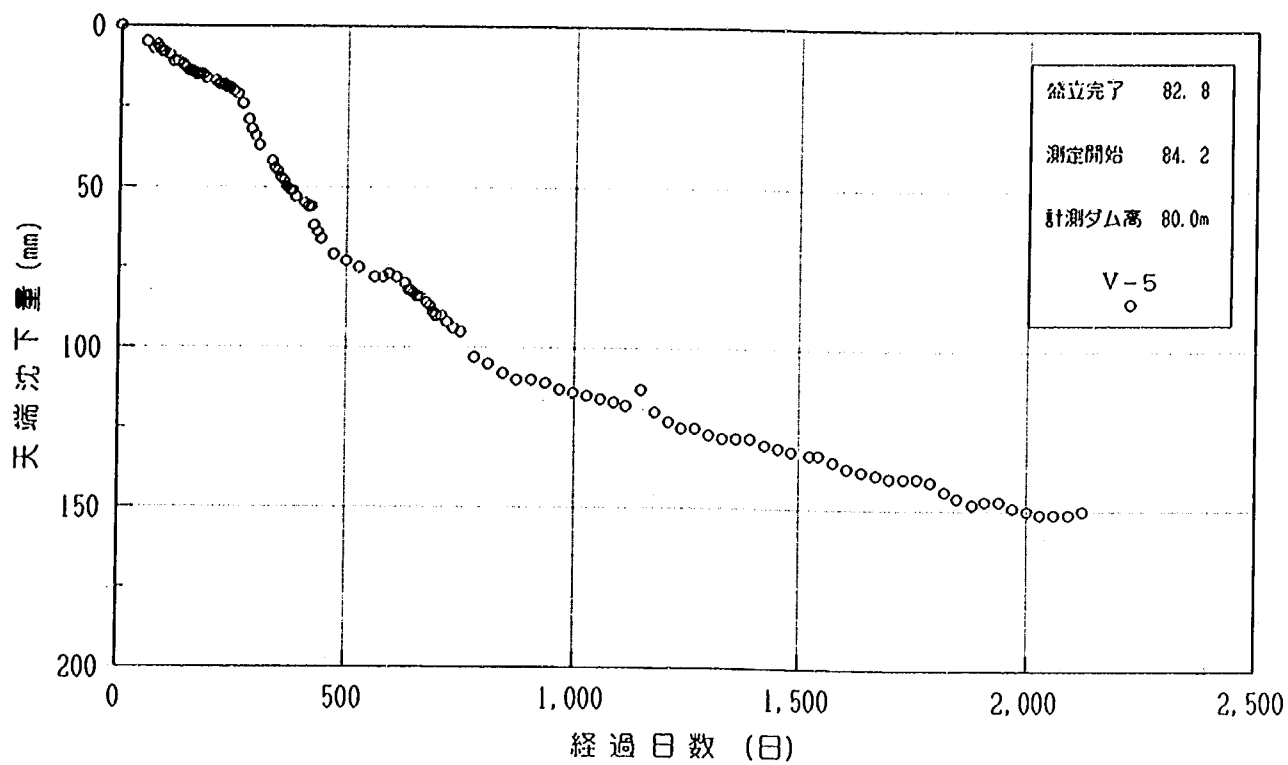


図-17 天端沈下量の経年変化 (Qダム)

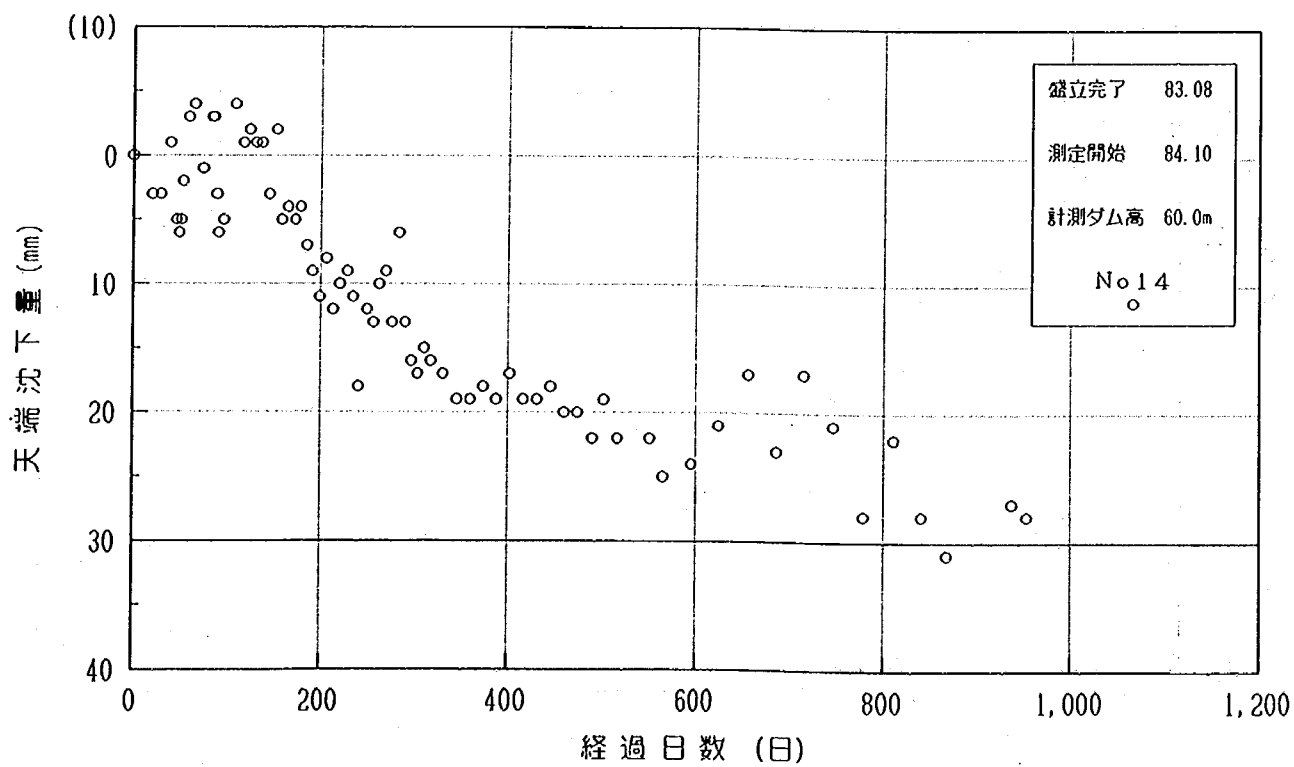


図-18 天端沈下量の経年変化 (Rダム)

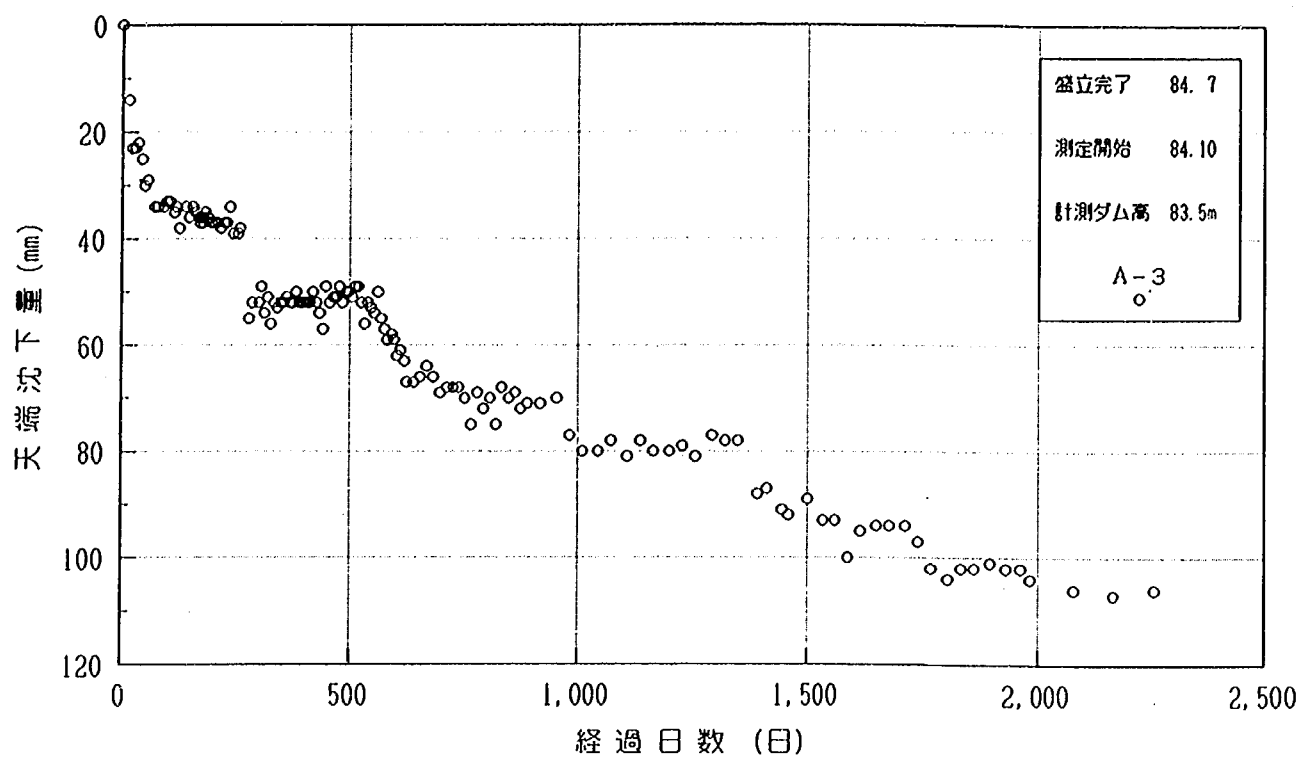


図-19 天端沈下量の経年変化 (Sダム)

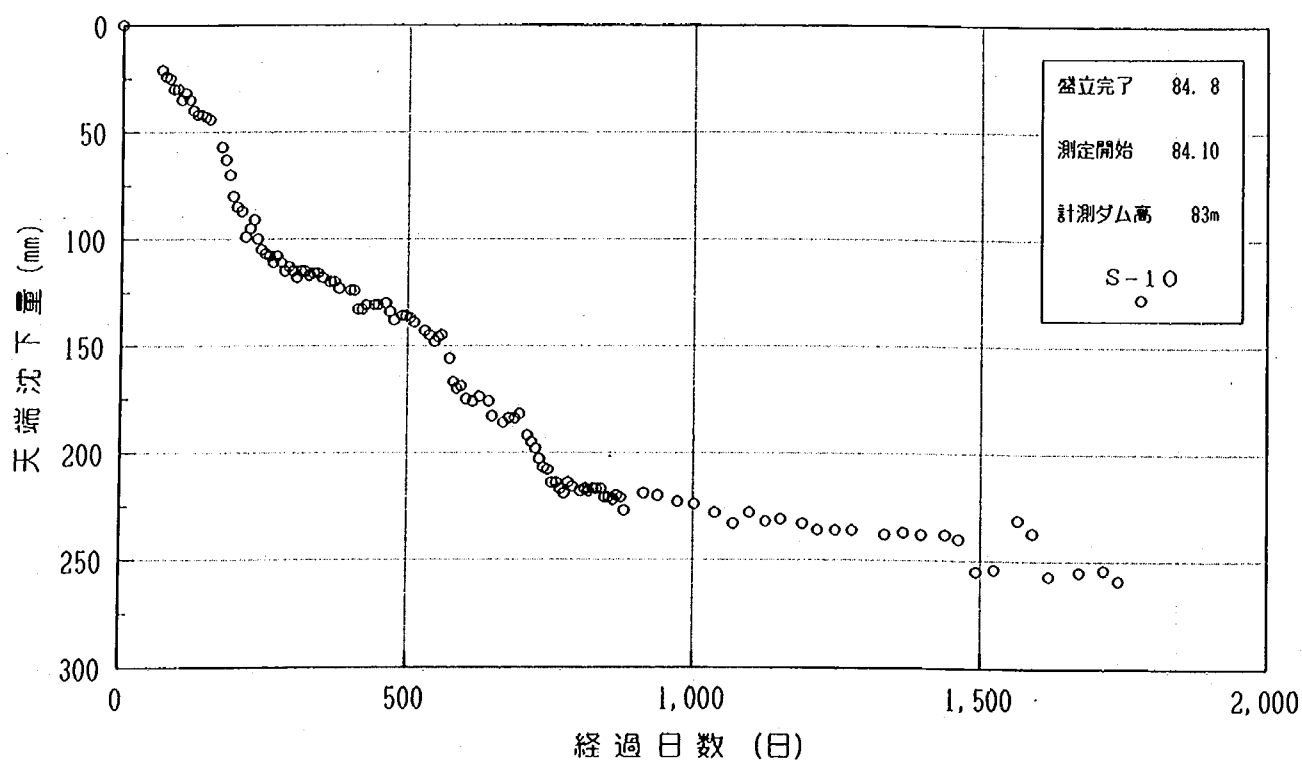


図-20 天端沈下量の経年変化 (Tダム)

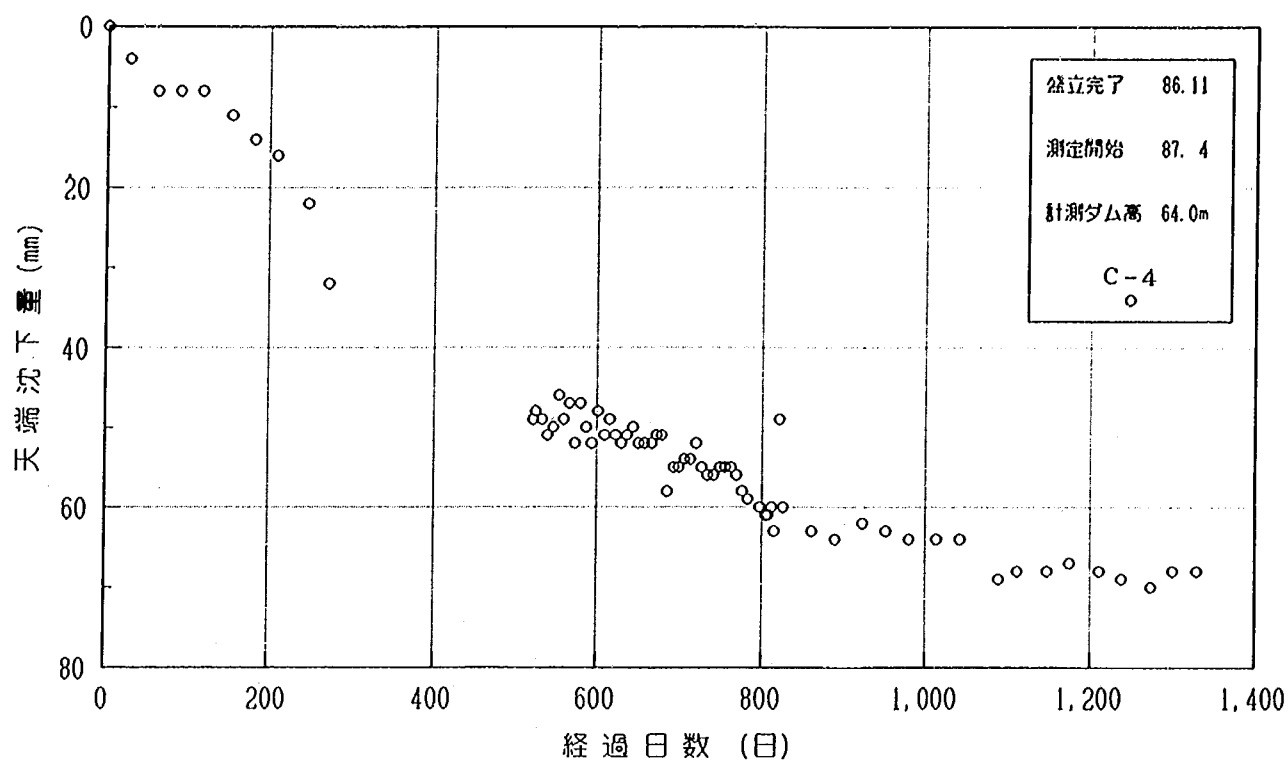


図-21 天端沈下量の経年変化 (Uダム)

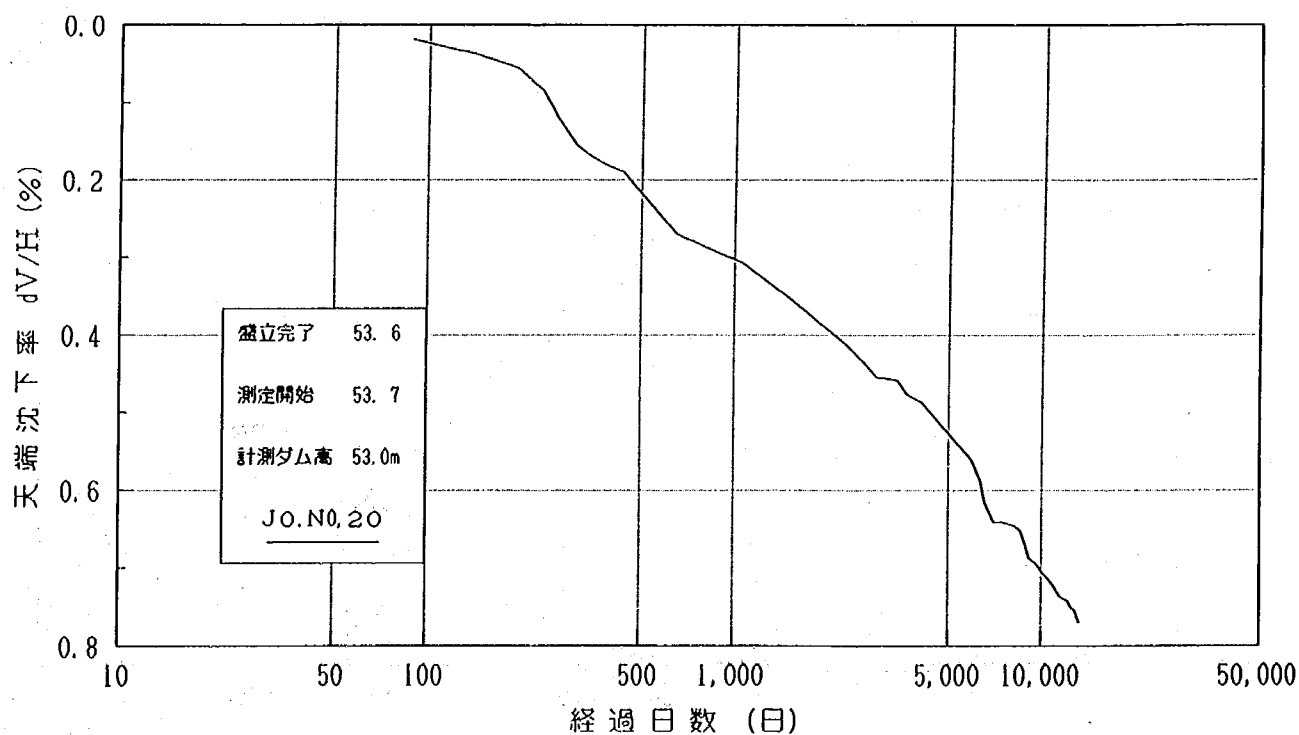


図-22 天端沈下率の経年変化 (Aダム)

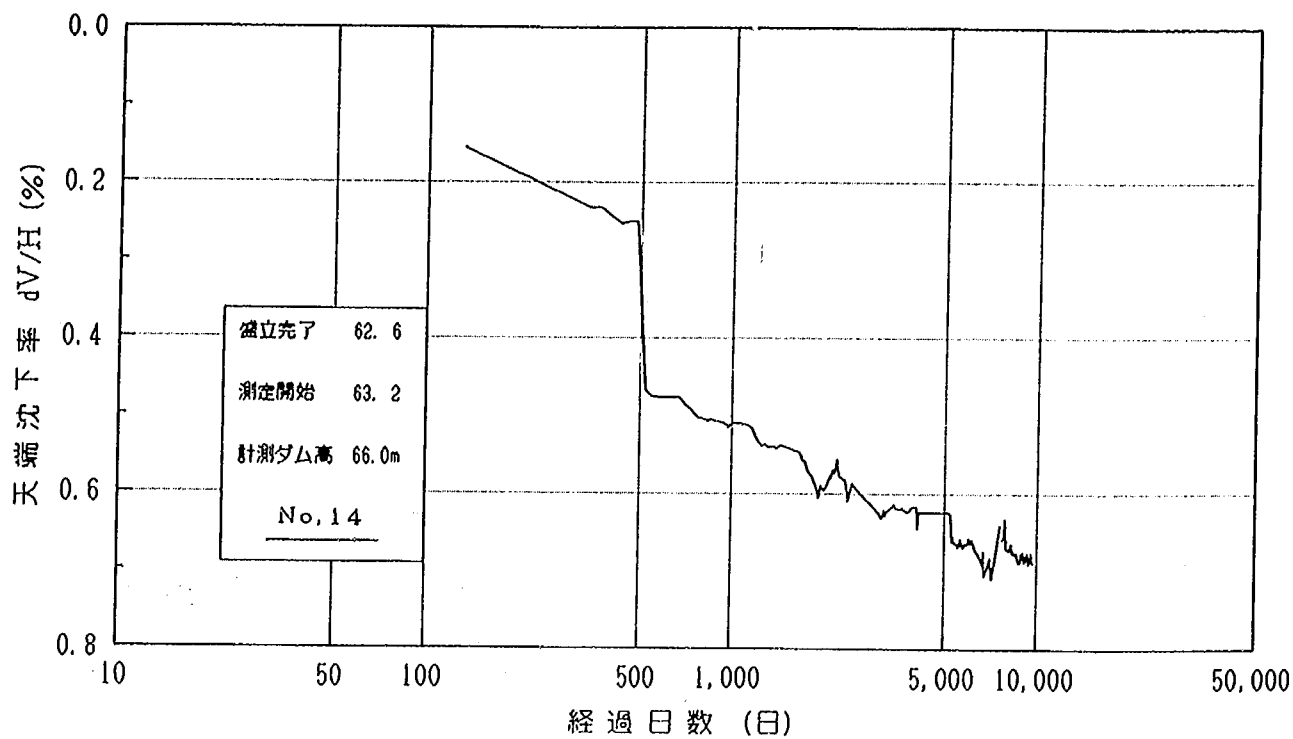


図-23 天端沈下率の経年変化 (Bダム)

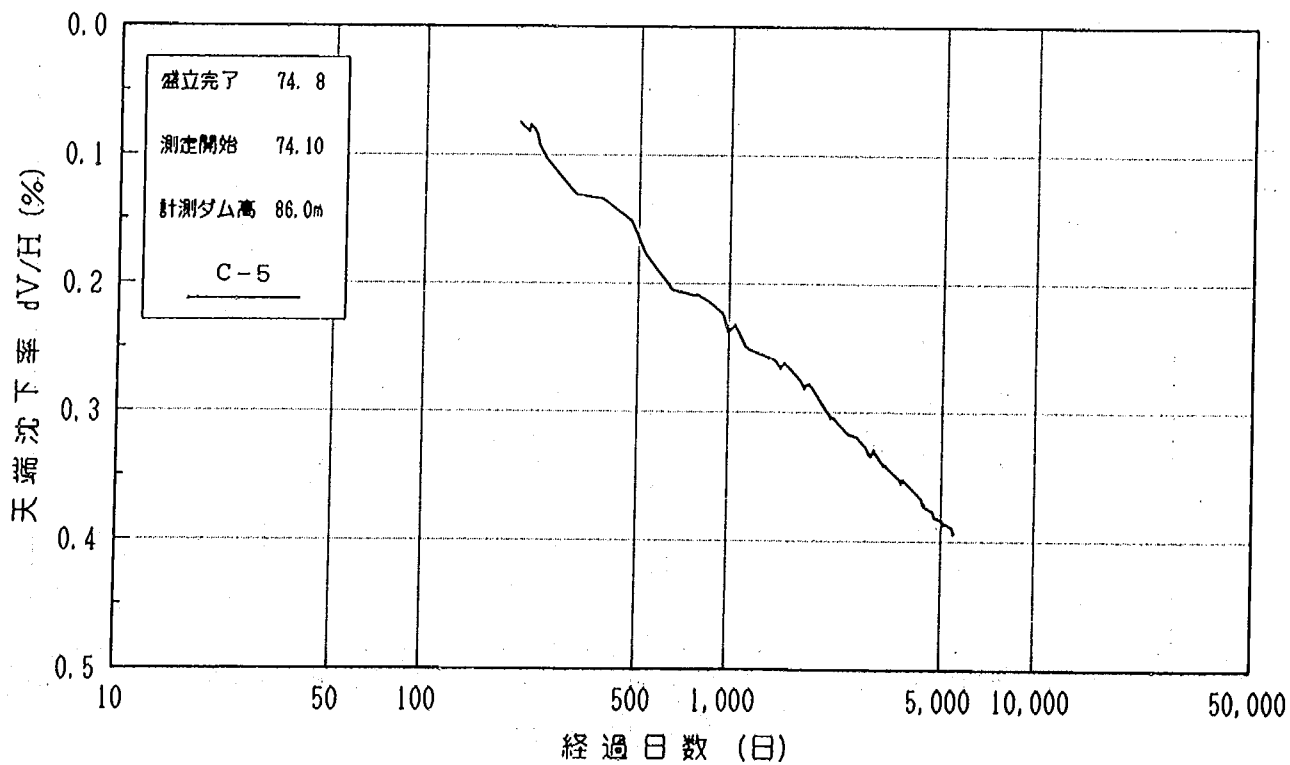


図-24 天端沈下率の経年変化 (Cダム)

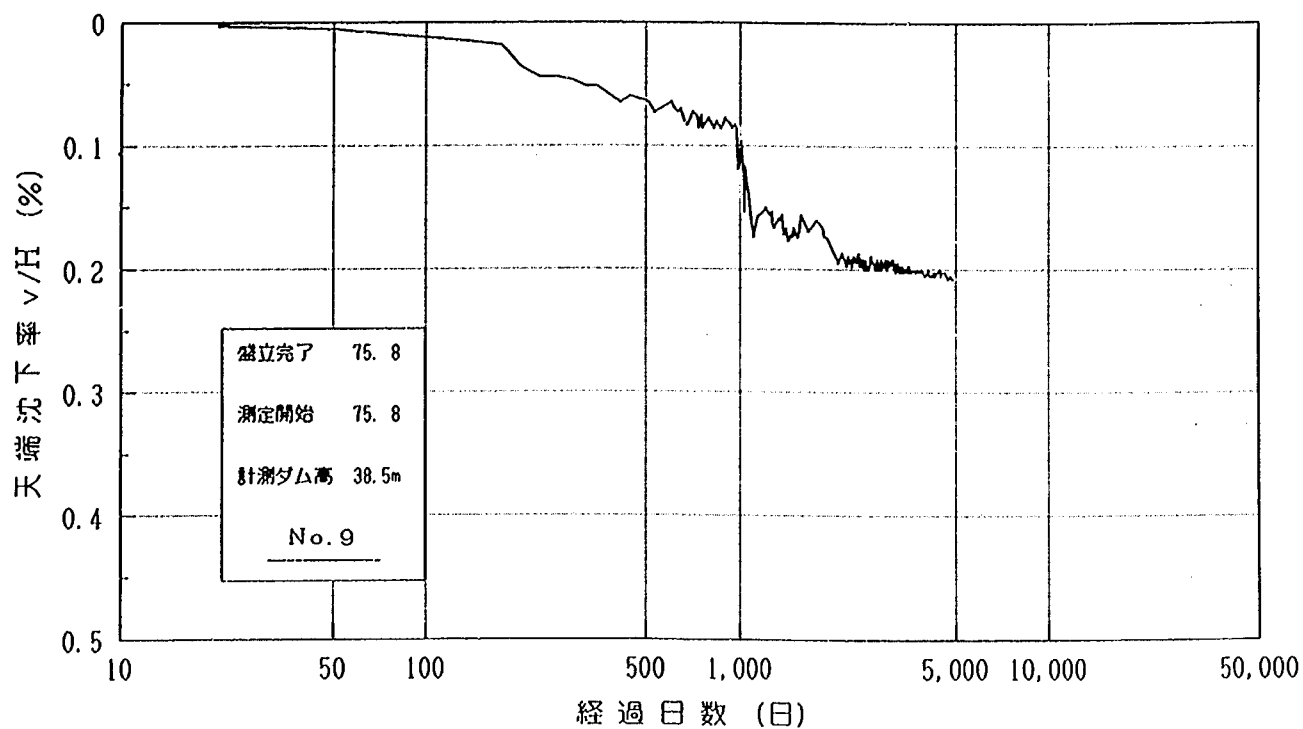


図-25 天端沈下率の経年変化 (Dダム)

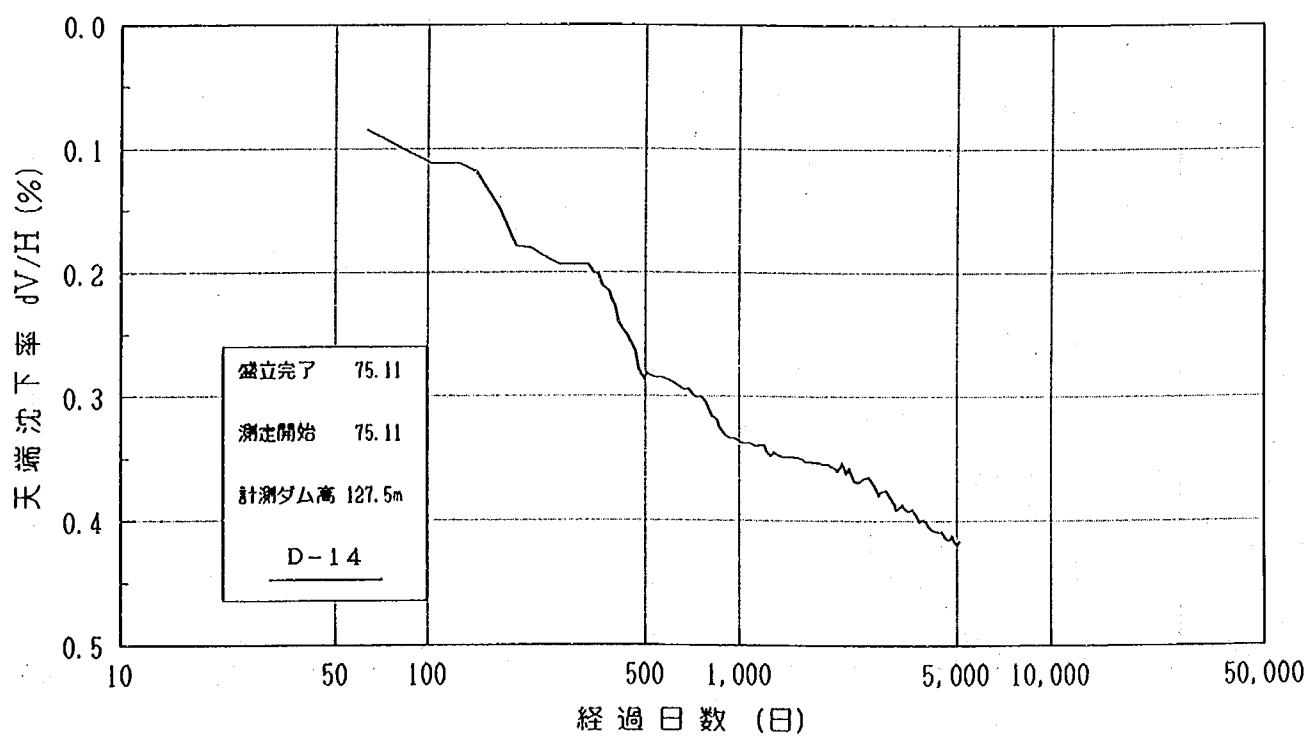


図-26 天端沈下率の経年変化 (Eダム)

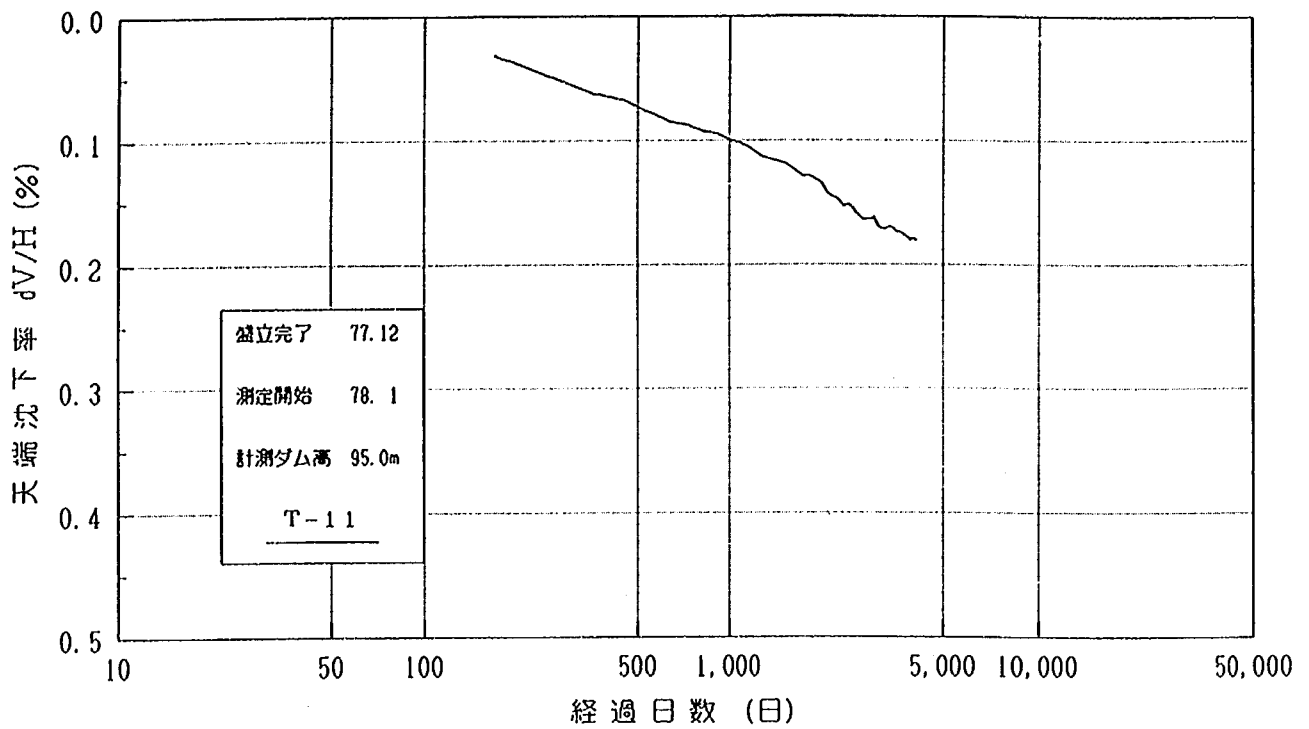


図-27 天端沈下率の経年変化 (Fダム)

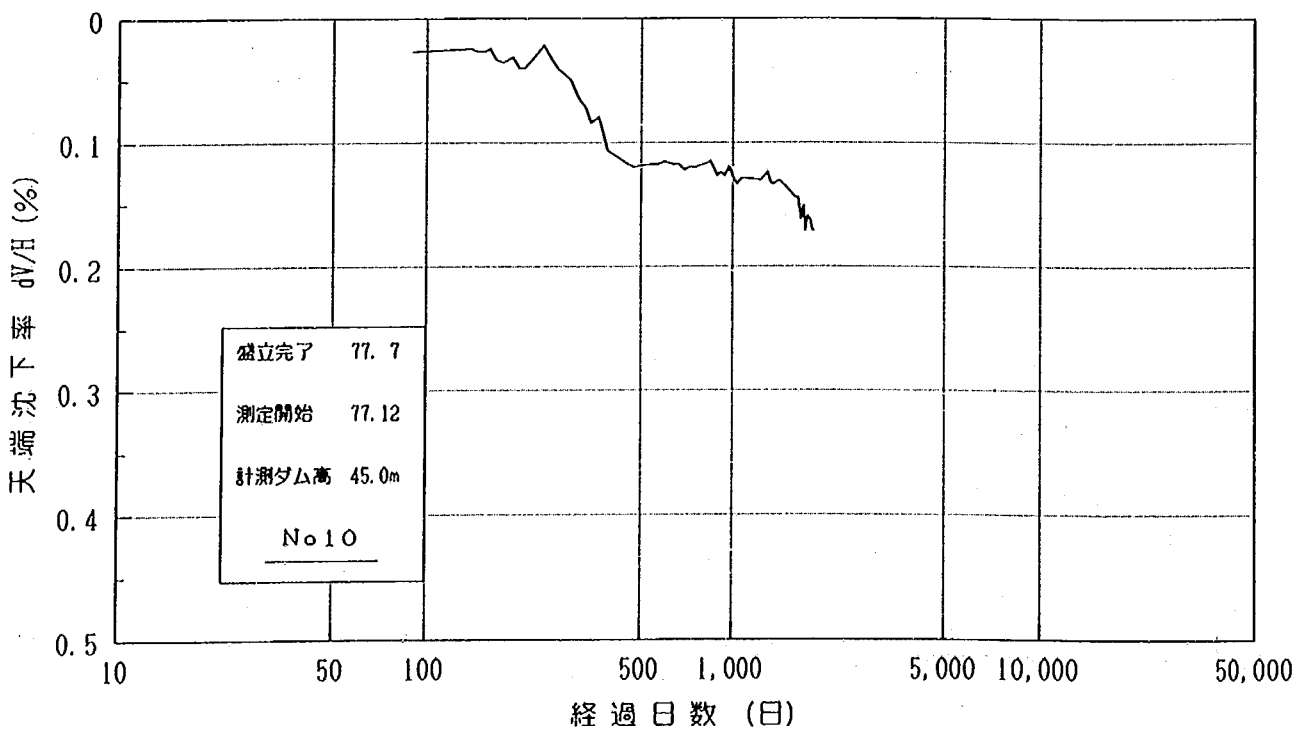


図-28 天端沈下率の経年変化 (Gダム)

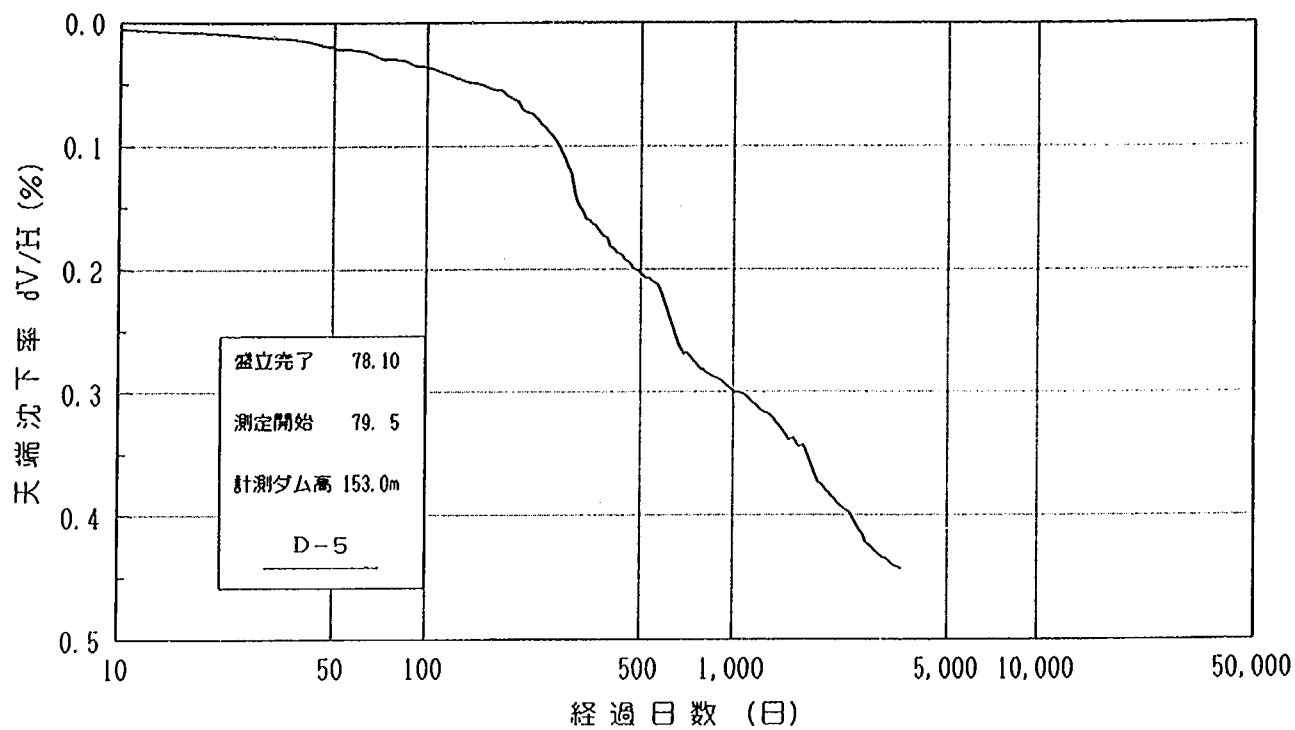


図-29 天端沈下率の経年変化 (Hダム)

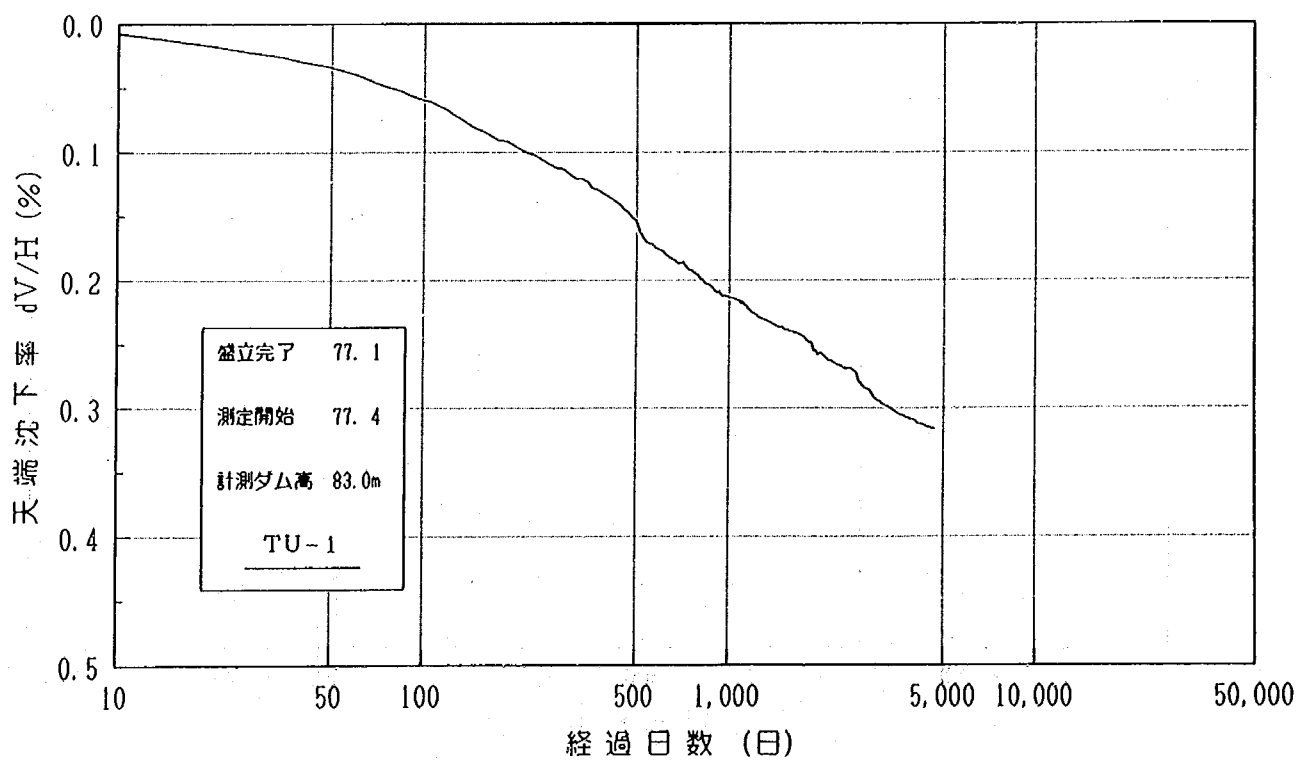


図-30 天端沈下率の経年変化 (Iダム)

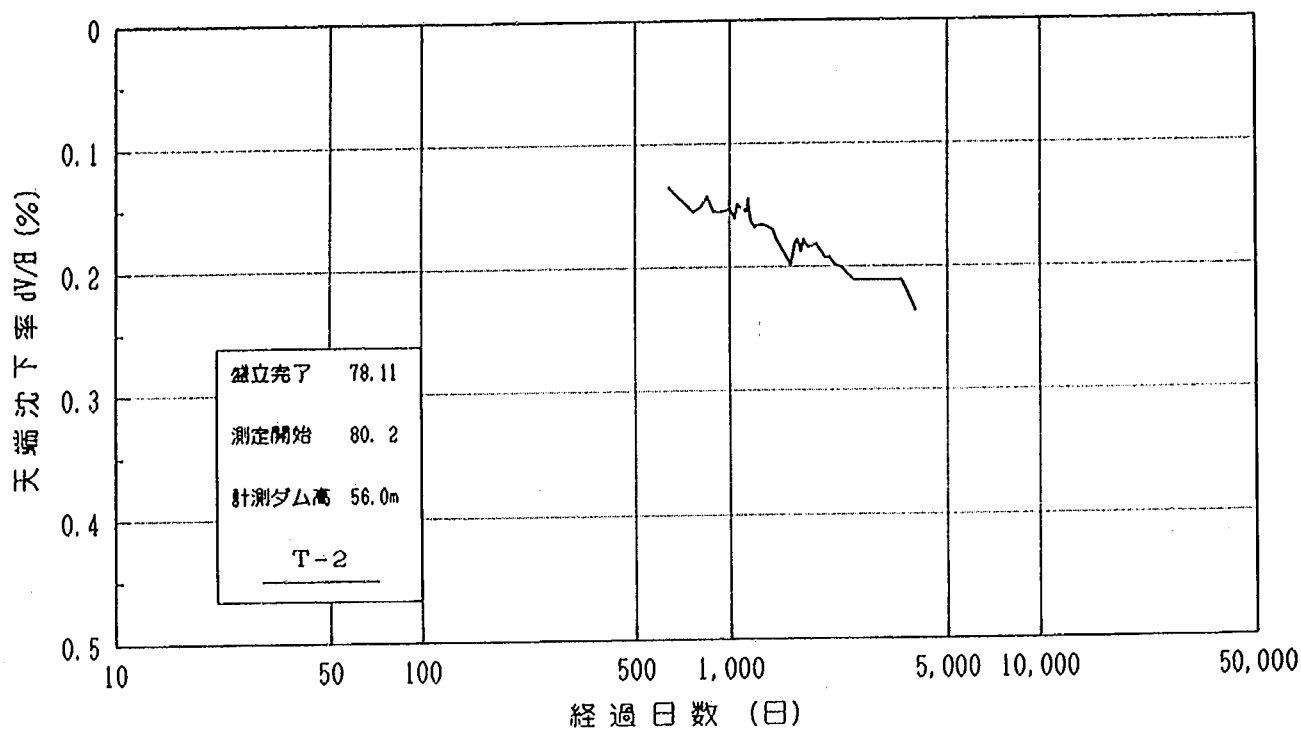


図-31 天端沈下率の経年変化 (Jダム)

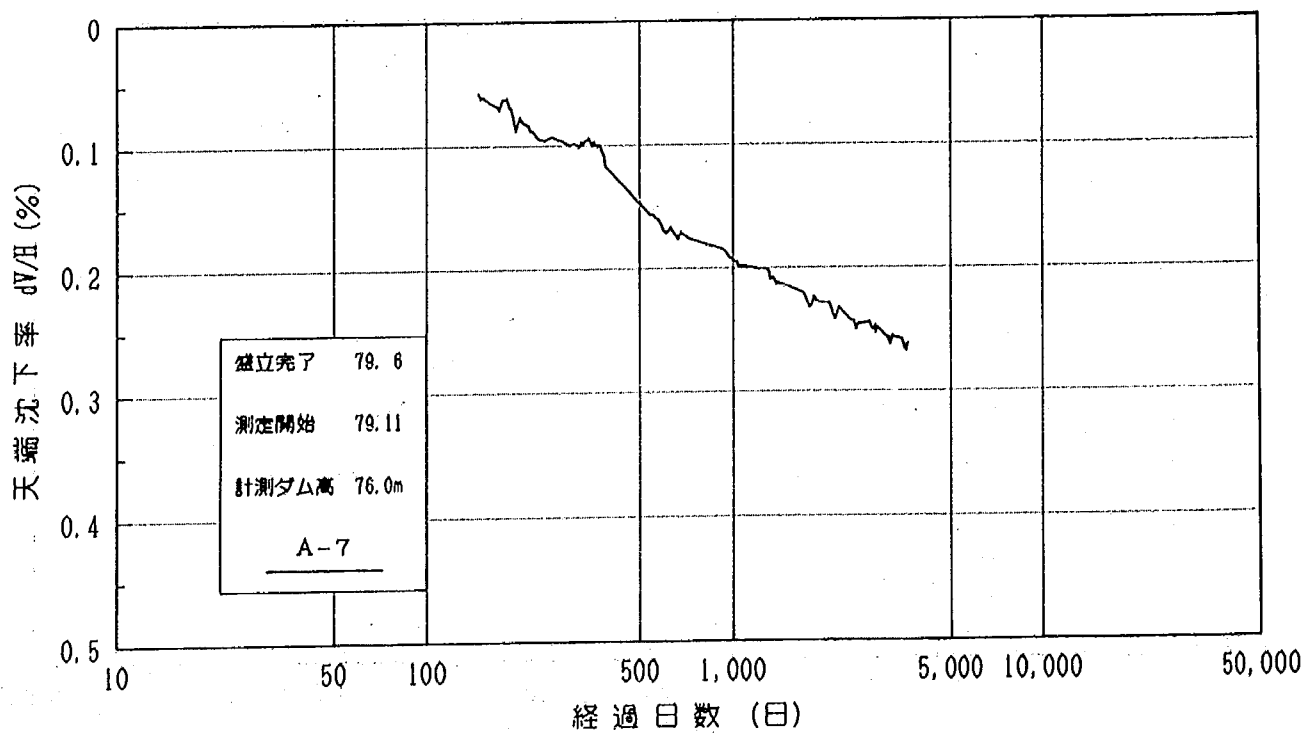


図-32 天端沈下率の経年変化 (Kダム)

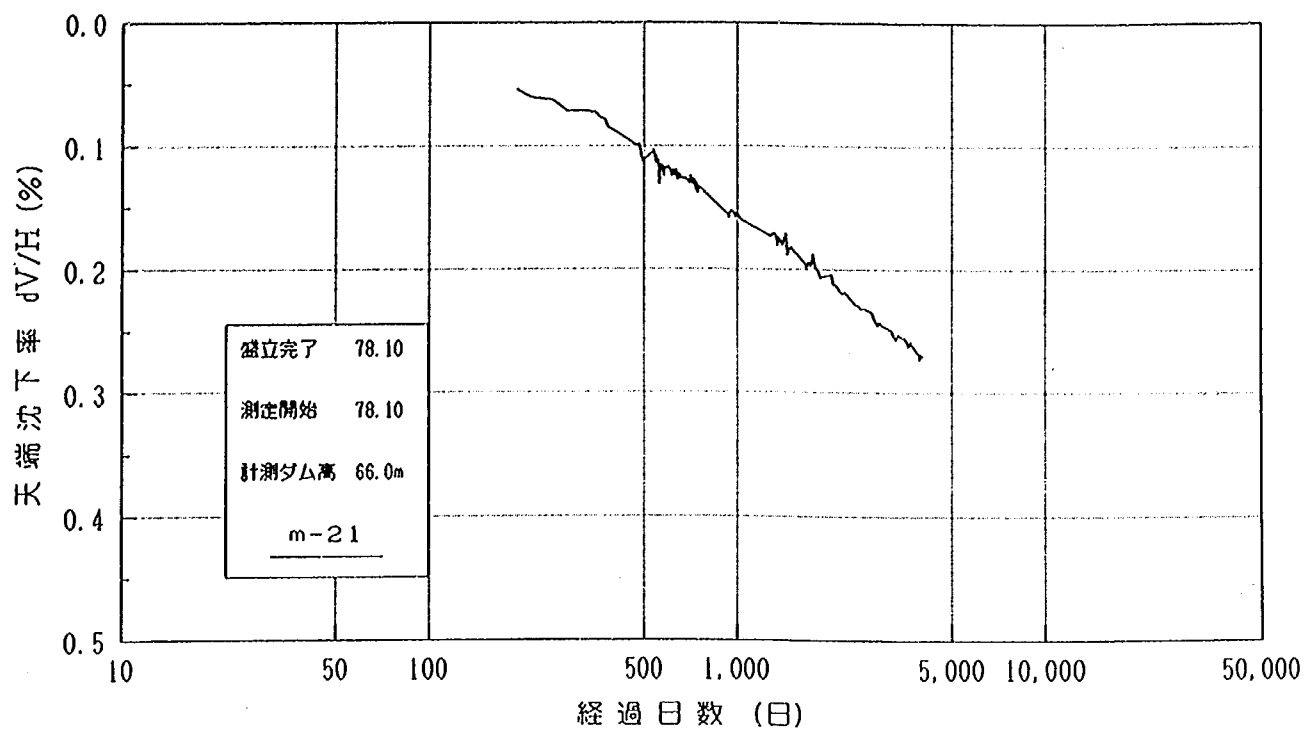


図-33 天端沈下率の経年変化 (Lダム)

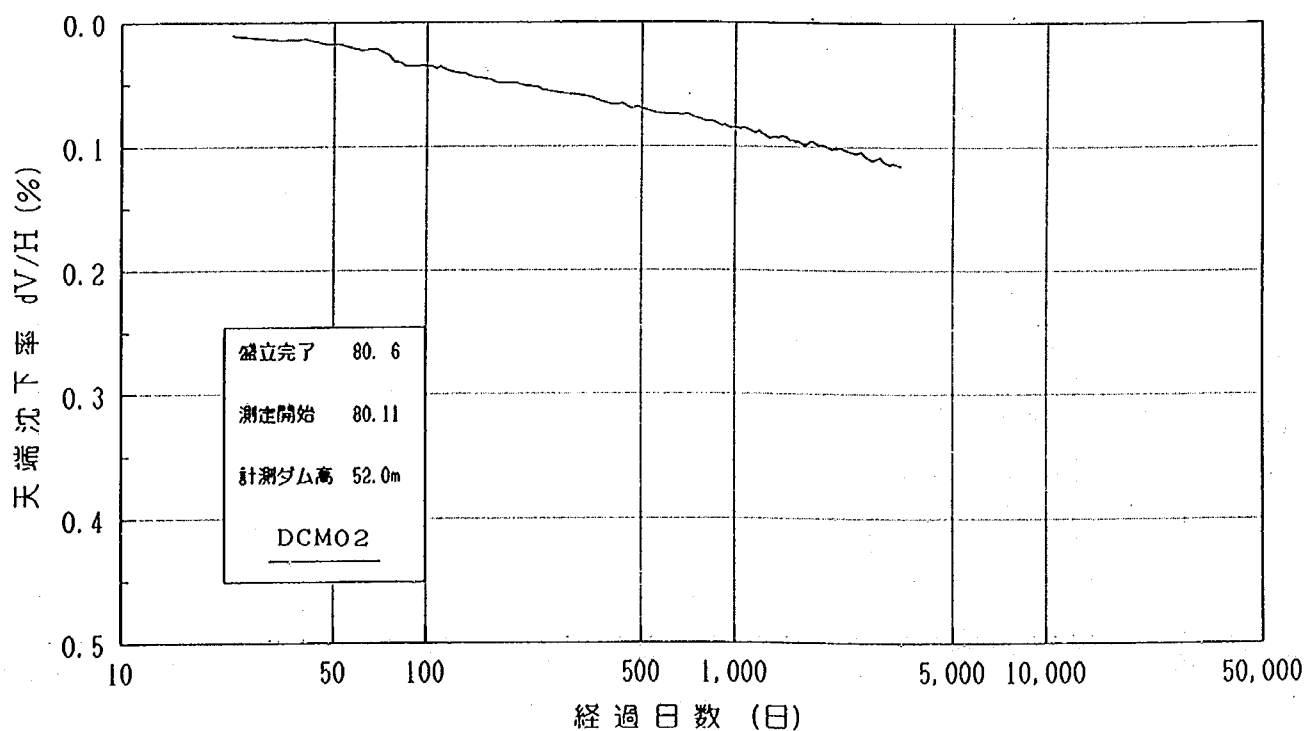


図-34 天端沈下率の経年変化 (Mダム)

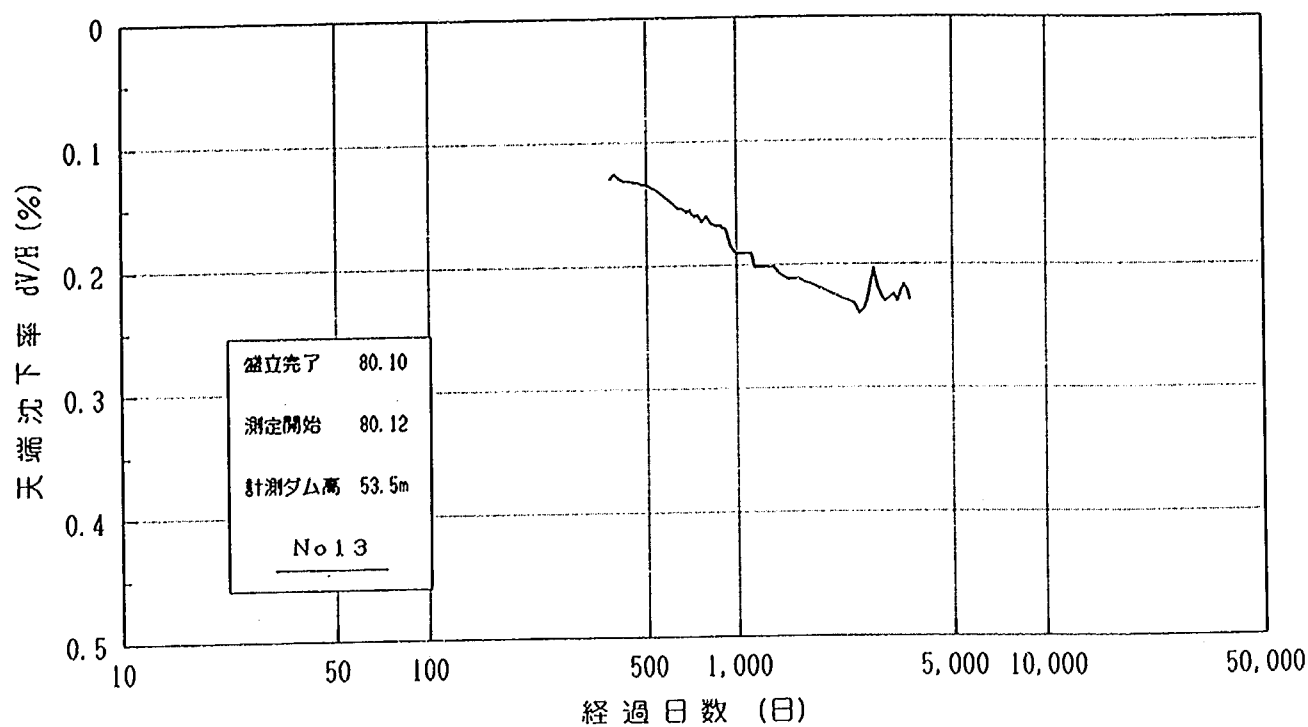


図-35 天端沈下率の経年変化 (Nダム)

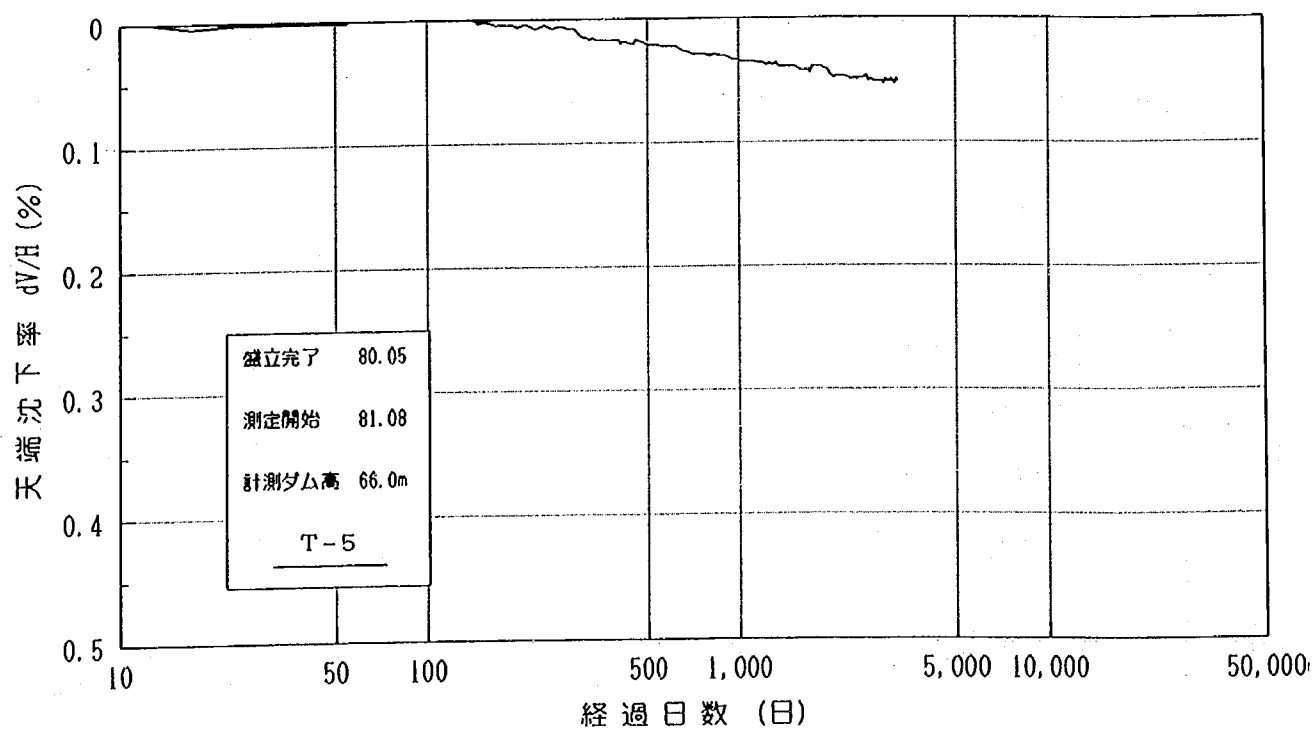


図-36 天端沈下率の経年変化 (Oダム)

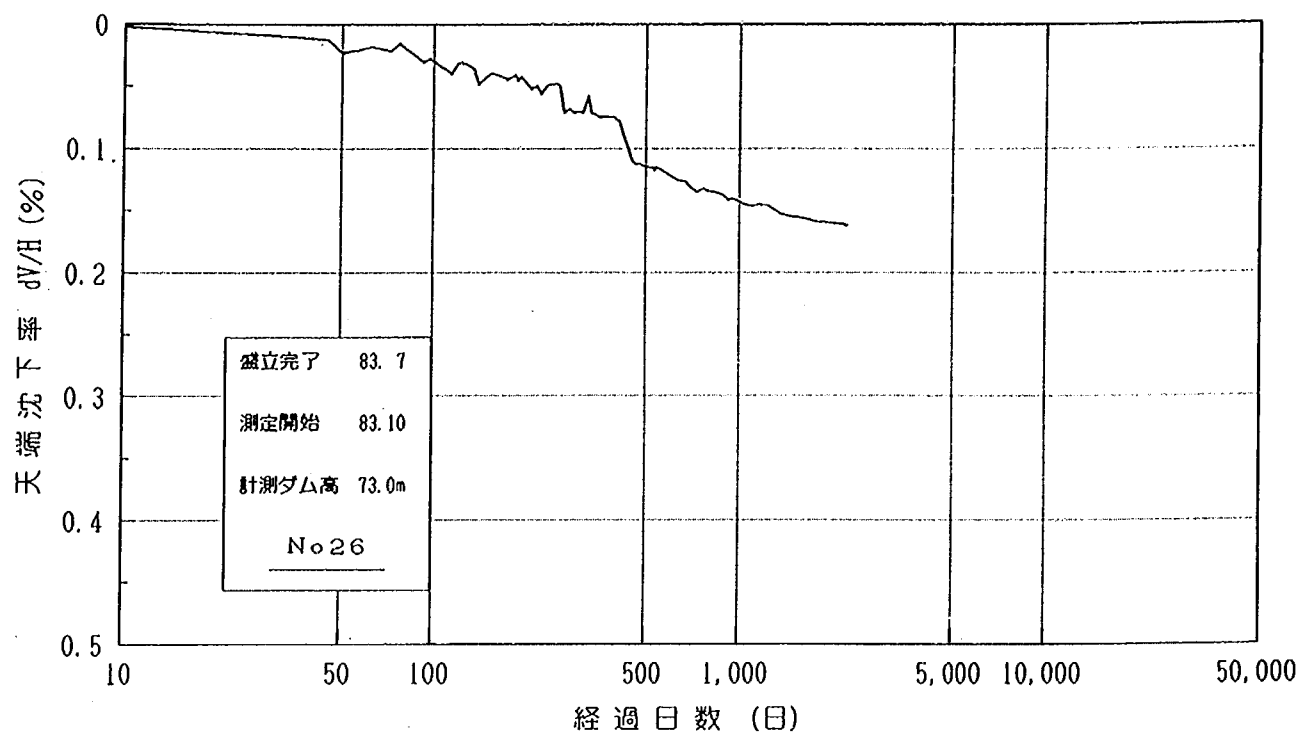


図-37 天端沈下率の経年変化 (Pダム)

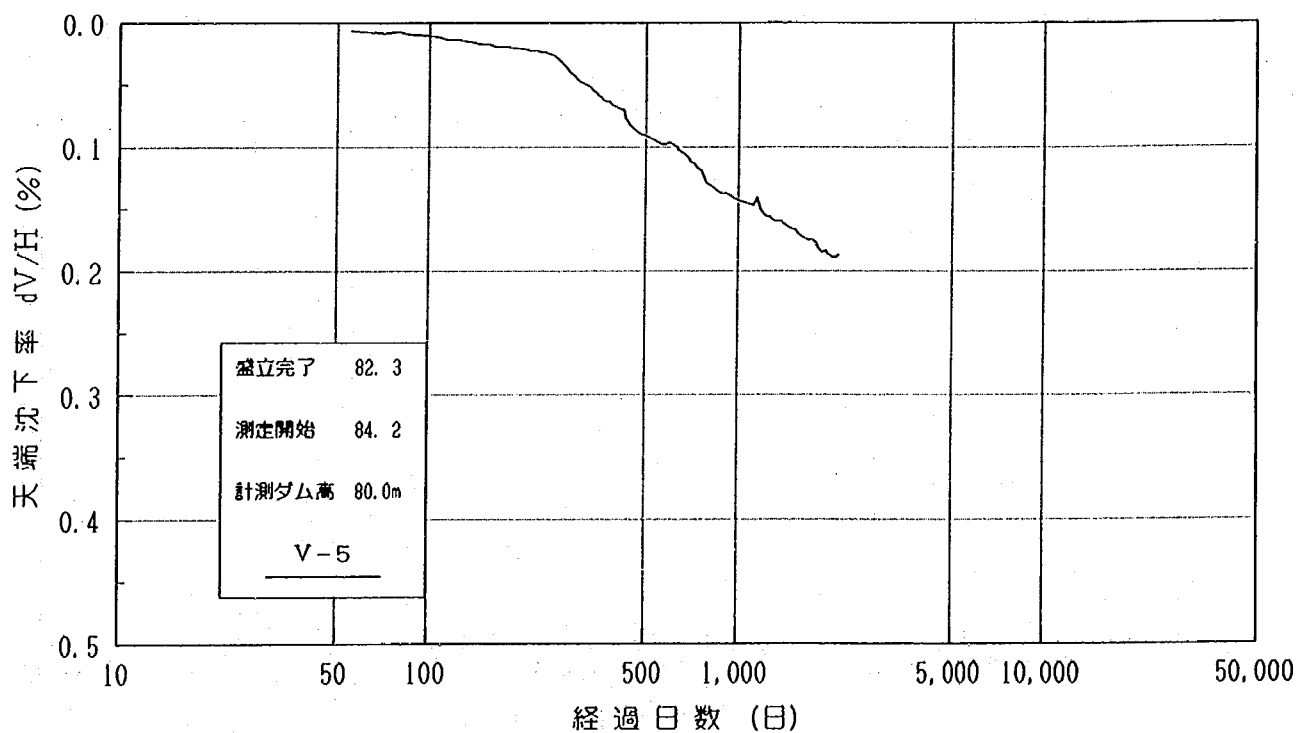


図-38 天端沈下率の経年変化 (Qダム)

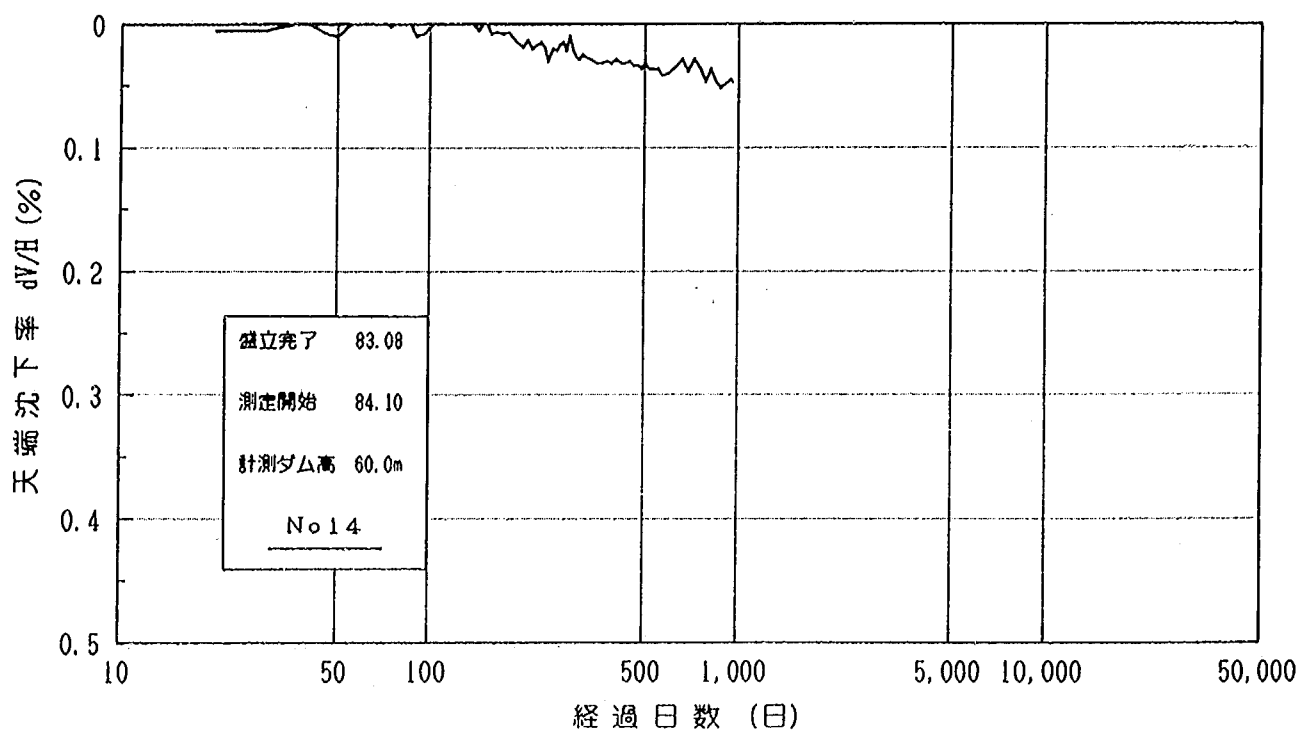


図-39 天端沈下率の経年変化 (Rダム)

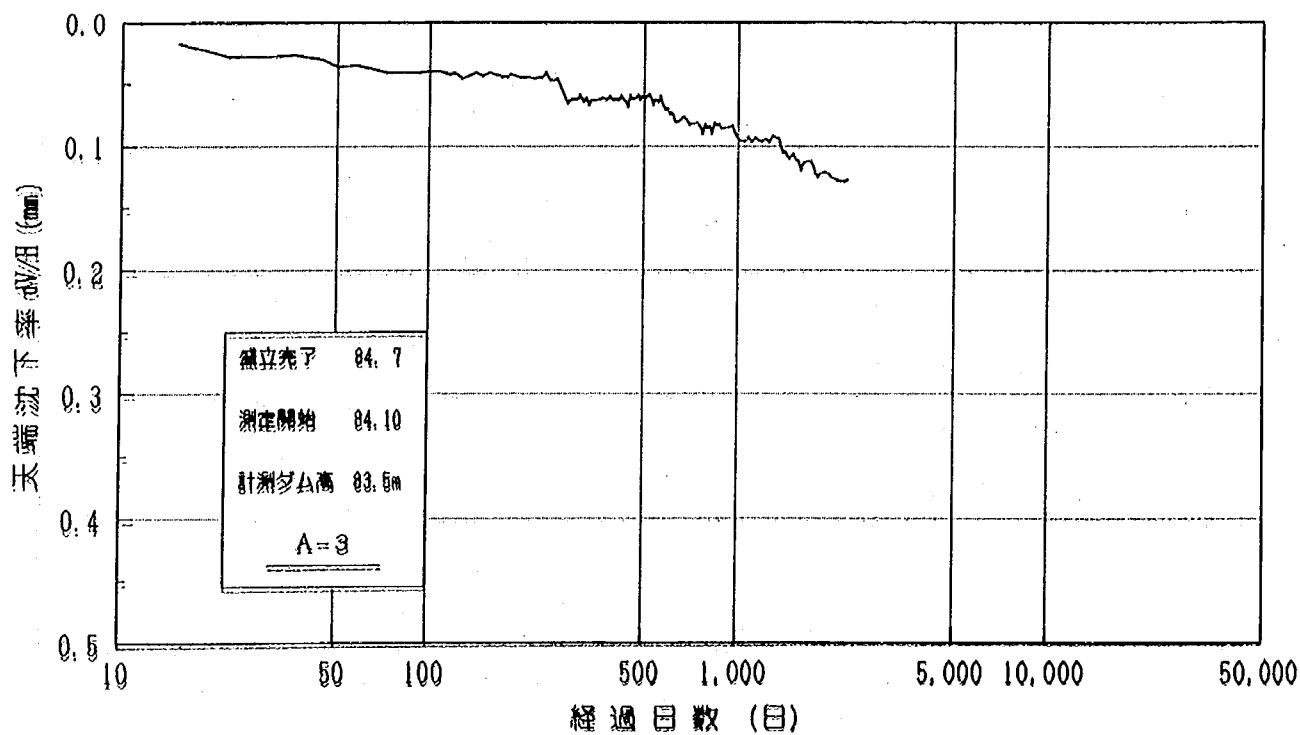


図-40 天端沈下率の経年変化 (Sダム)

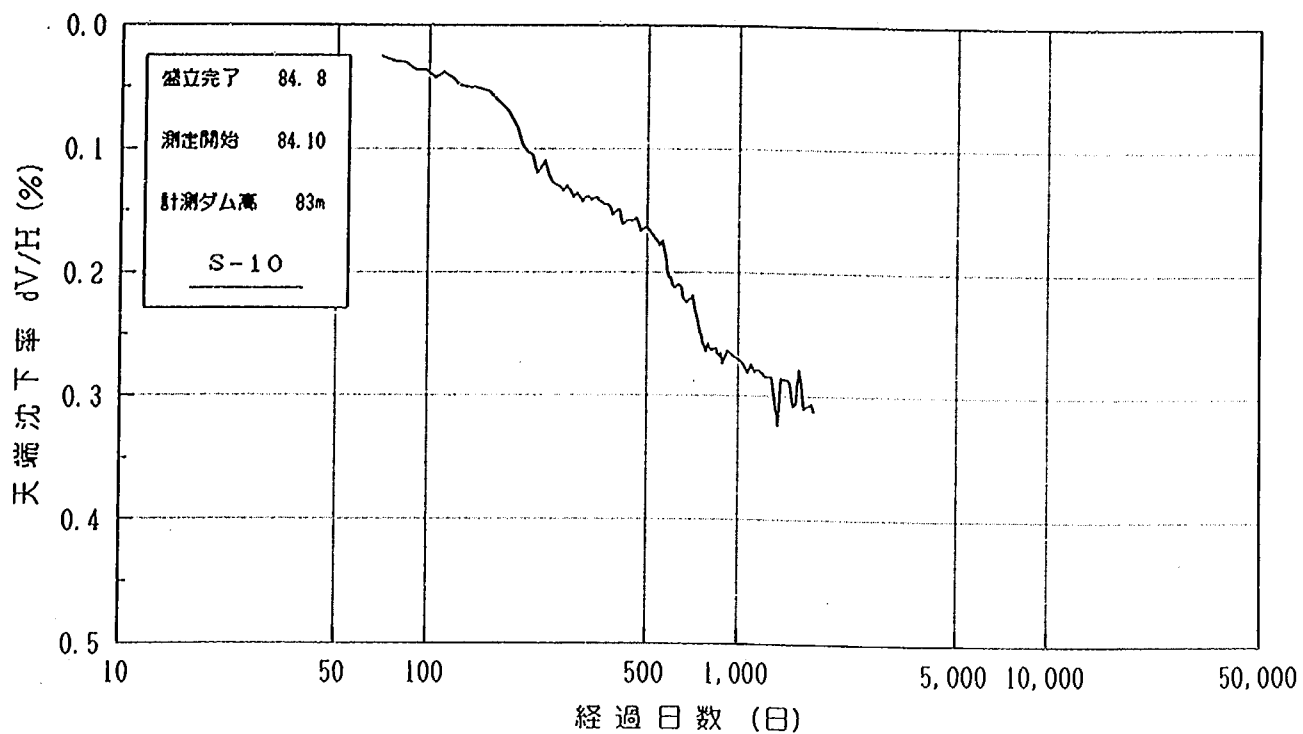


図-41 天端沈下率の経年変化 (Tダム)

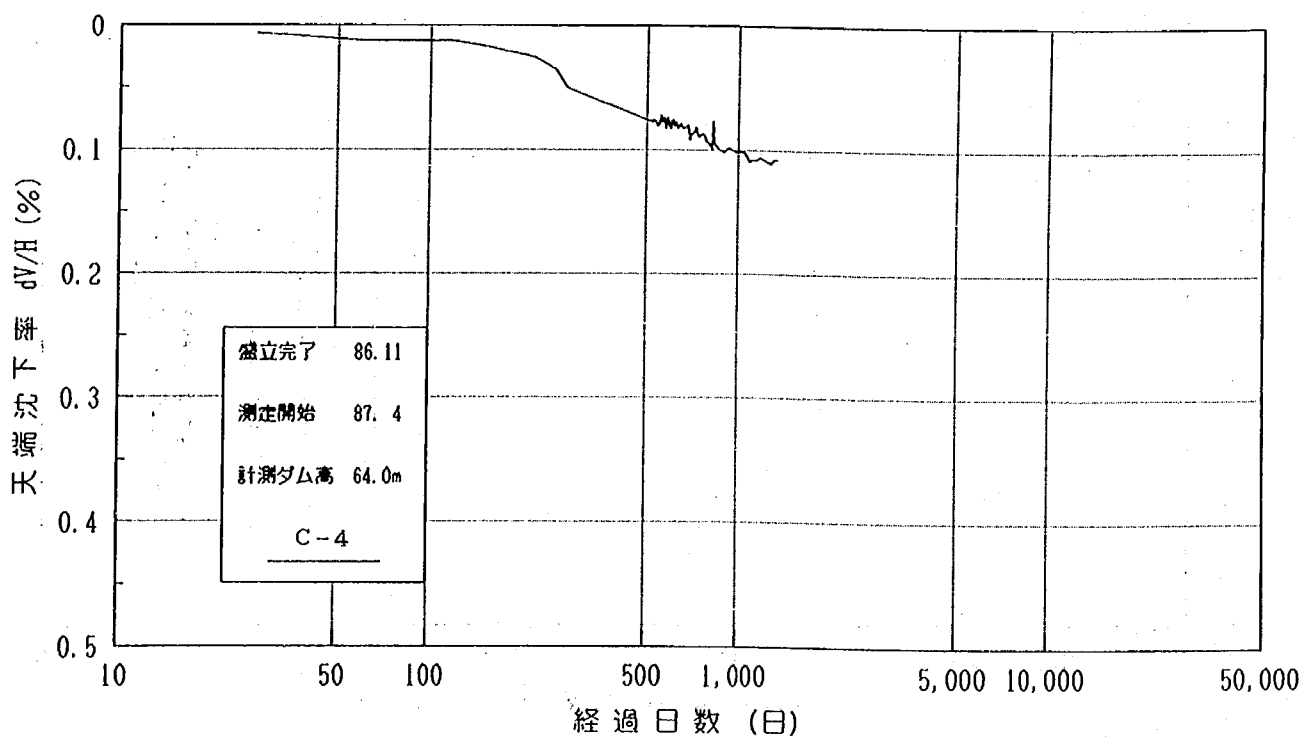


図-42 天端沈下率の経年変化 (Uダム)

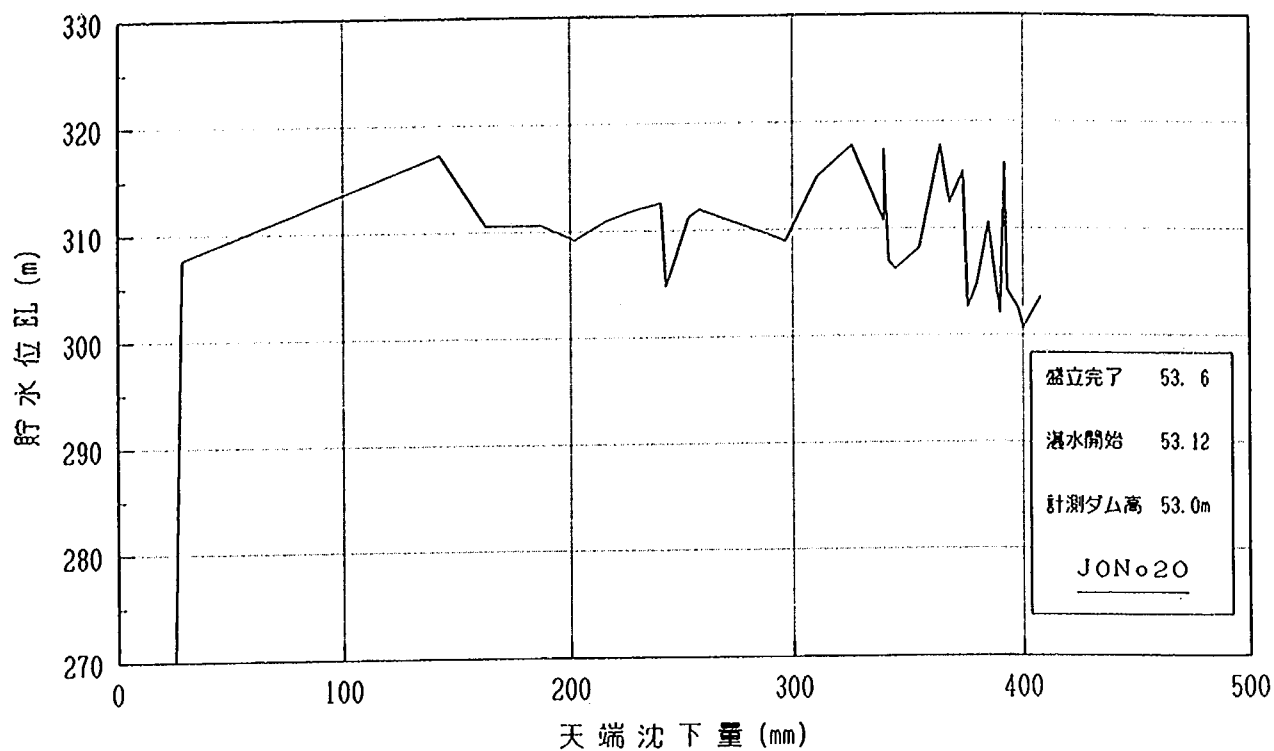


図-43 貯水位と天端沈下量 (Aダム)

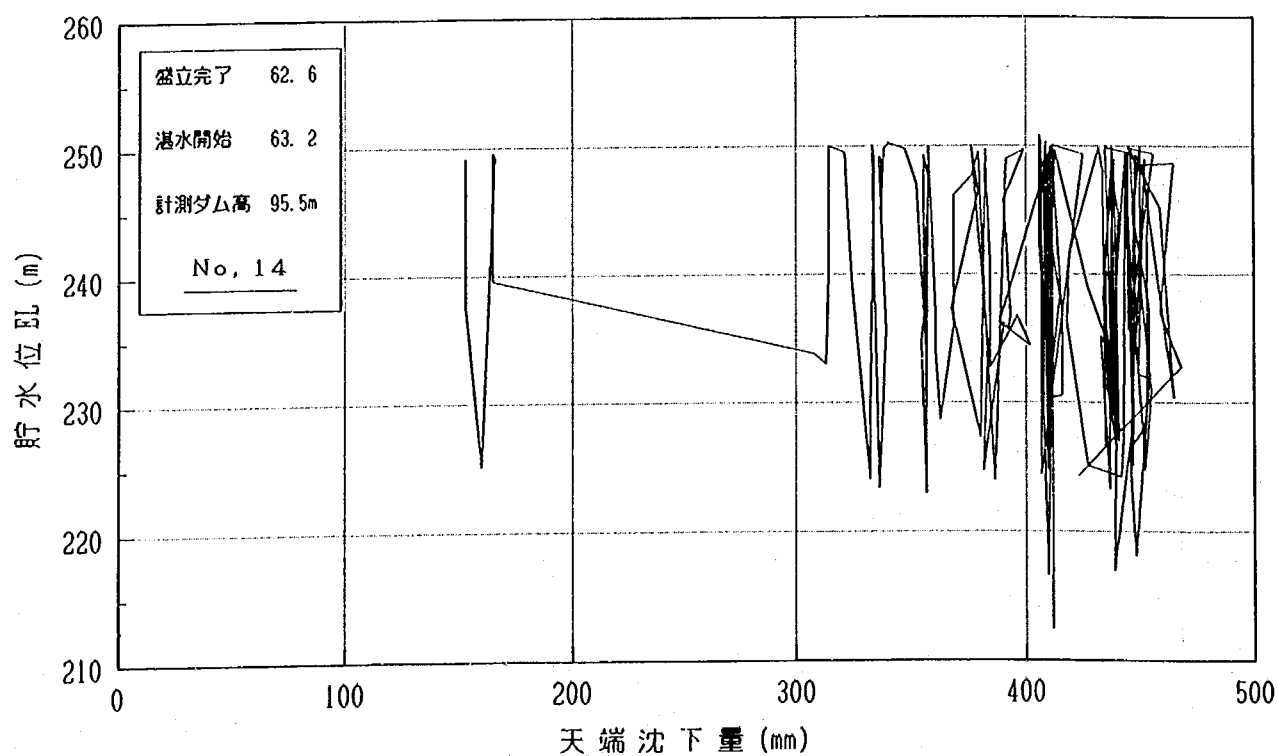


図-44 貯水位と天端沈下量 (Bダム)

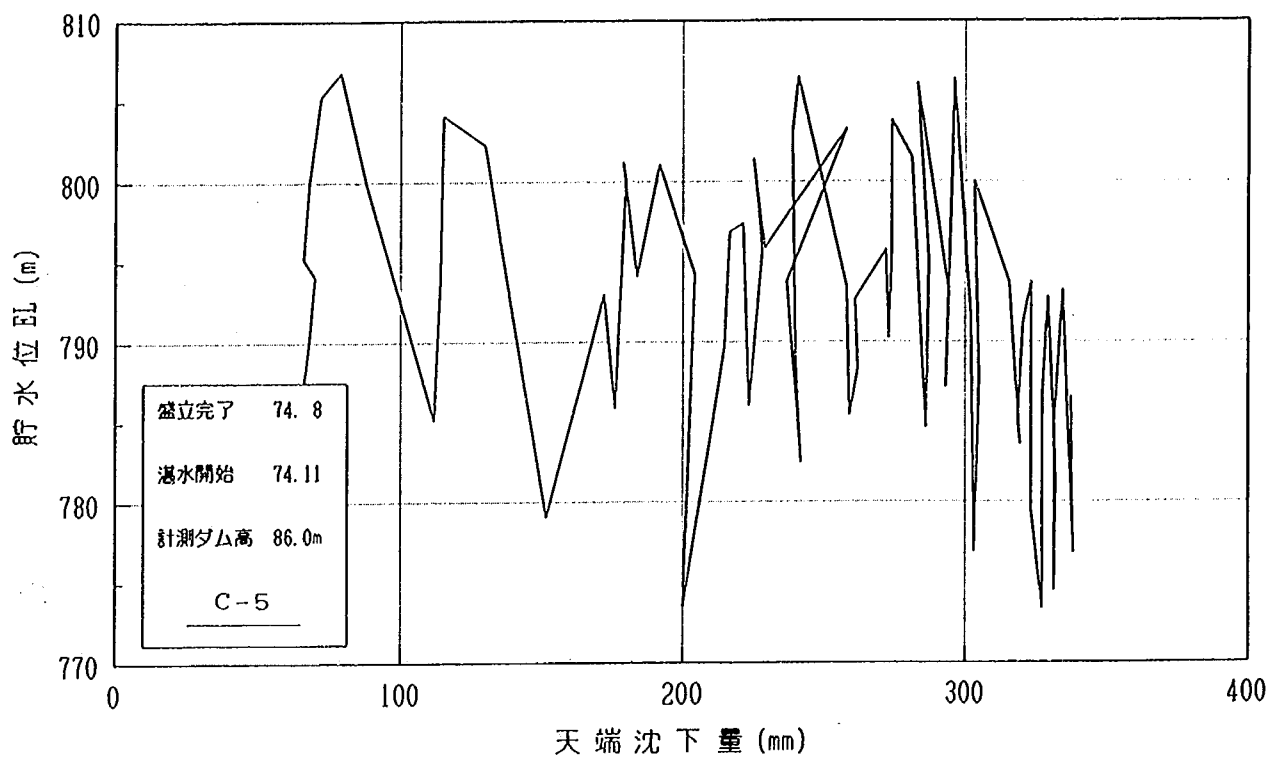


図-45 貯水位と天端沈下量 (Cダム)

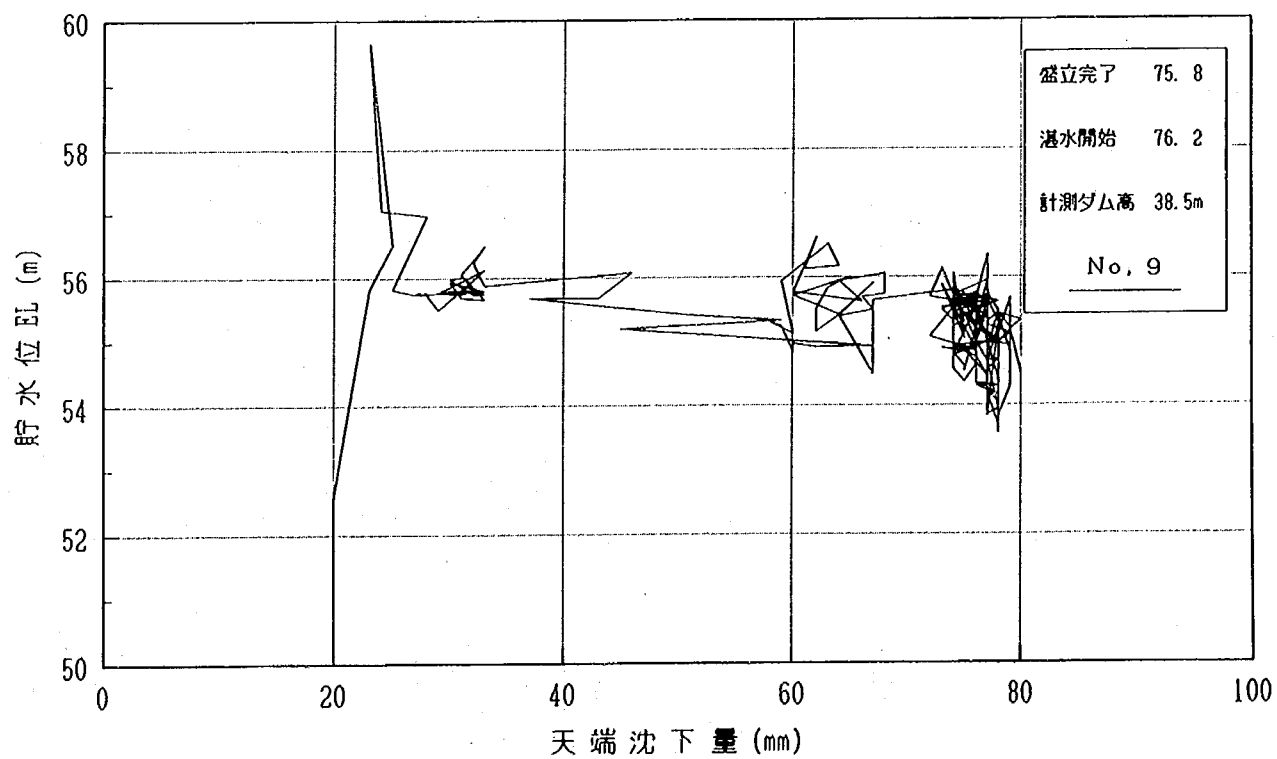


図-46 貯水位と天端沈下量 (Dダム)

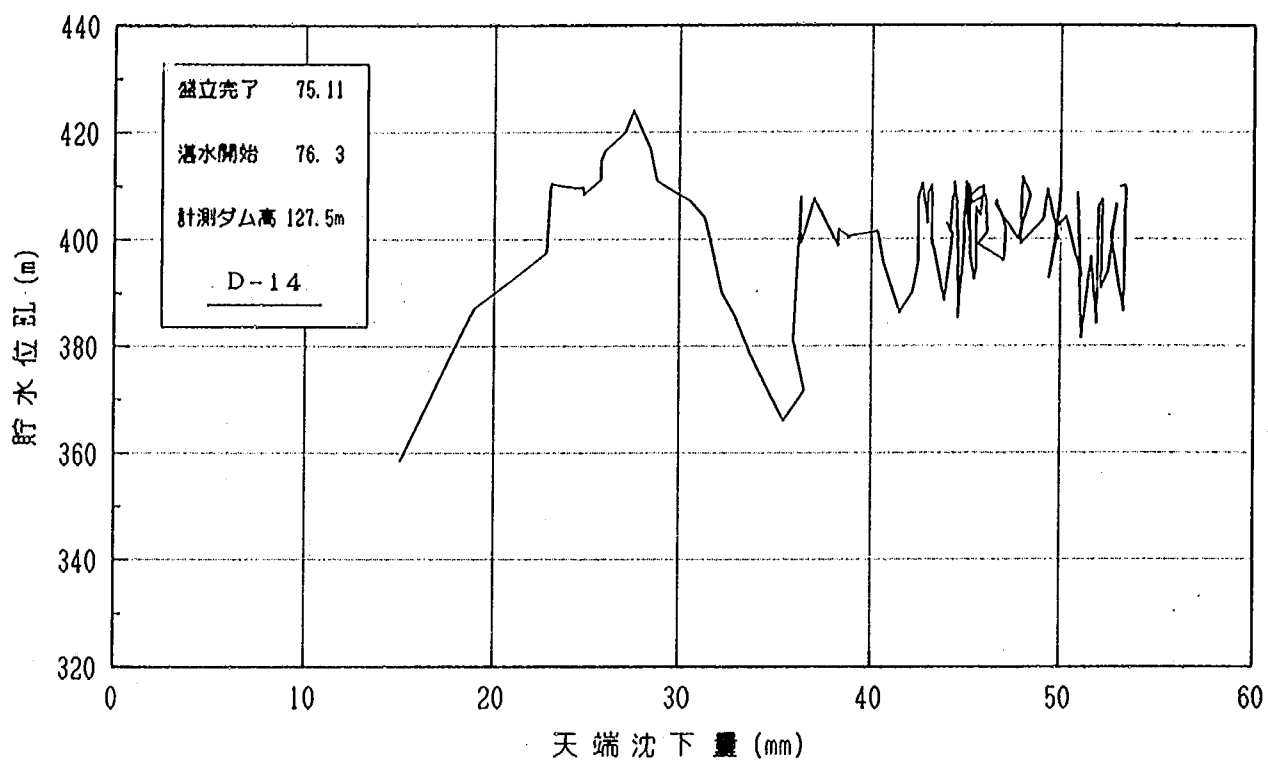


図-47 貯水位と天端沈下量 (Eダム)

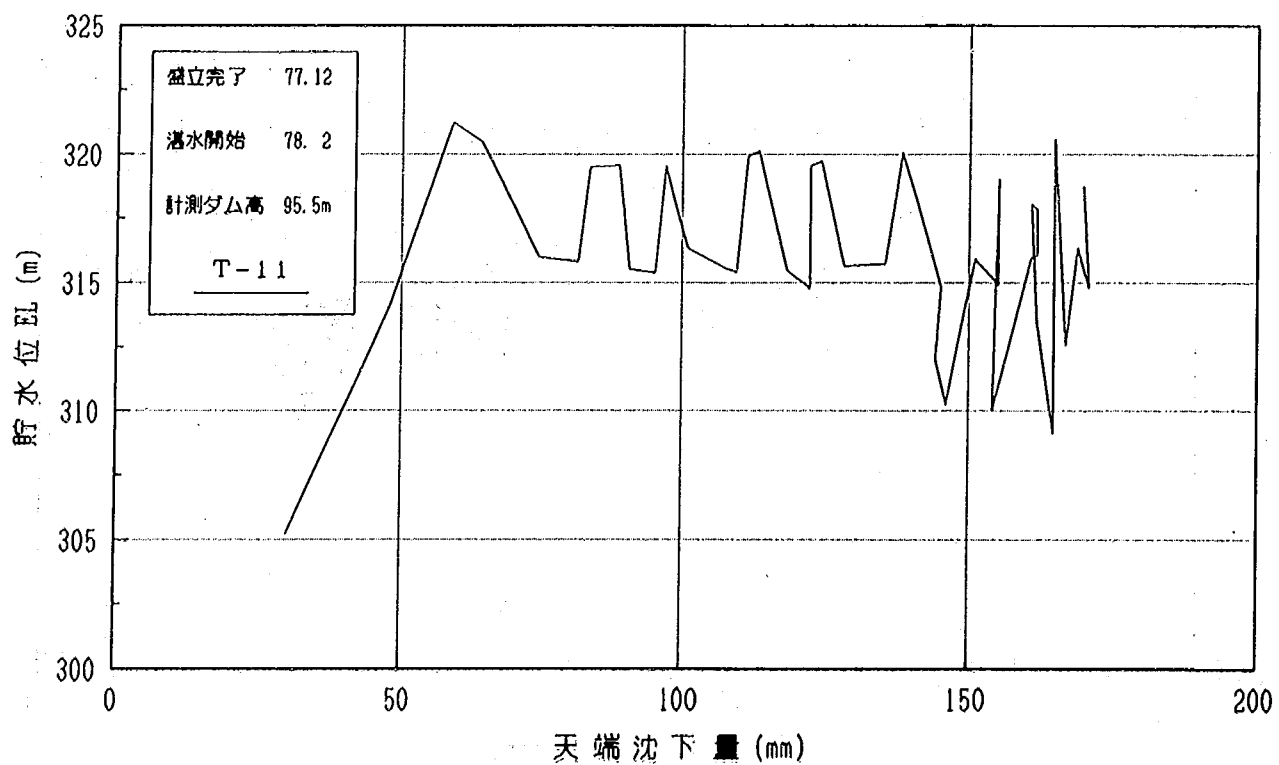


図-48 貯水位と天端沈下量 (Fダム)

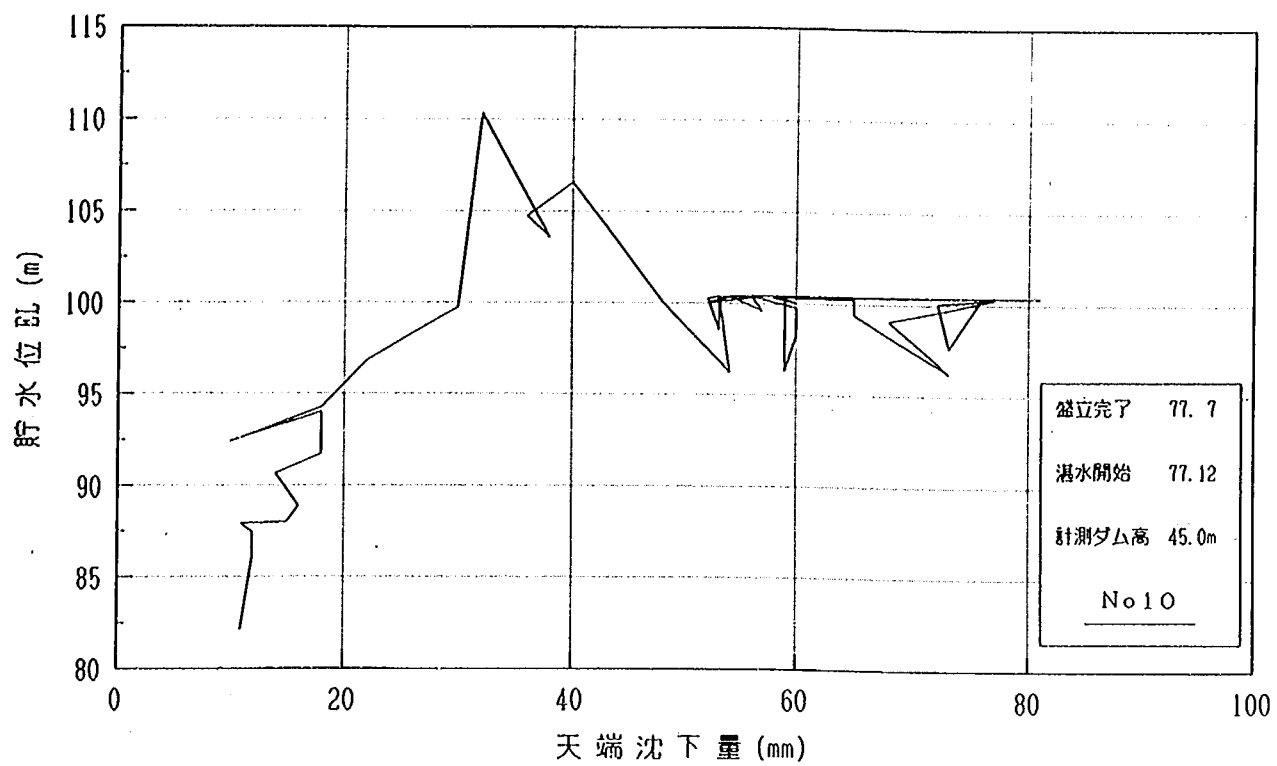


図-49 貯水位と天端沈下量 (Gダム)

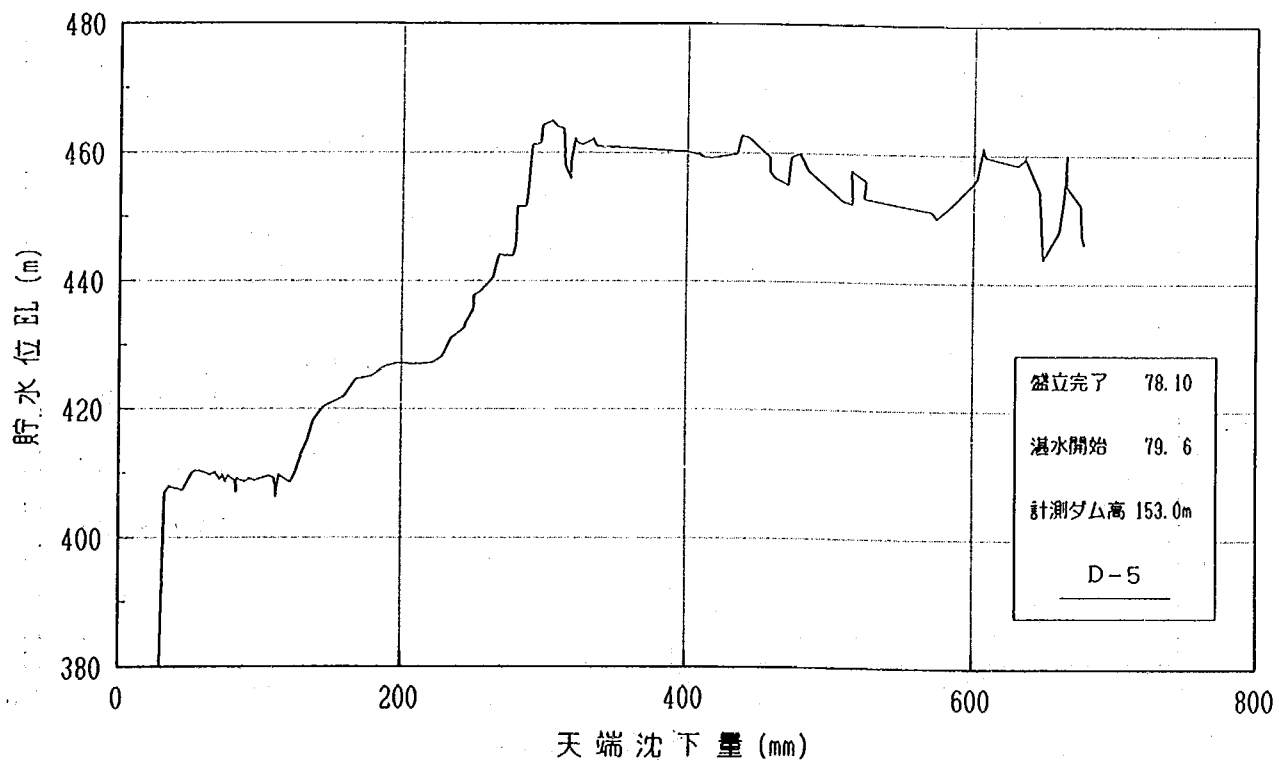


図-50 貯水位と天端沈下量 (Hダム)

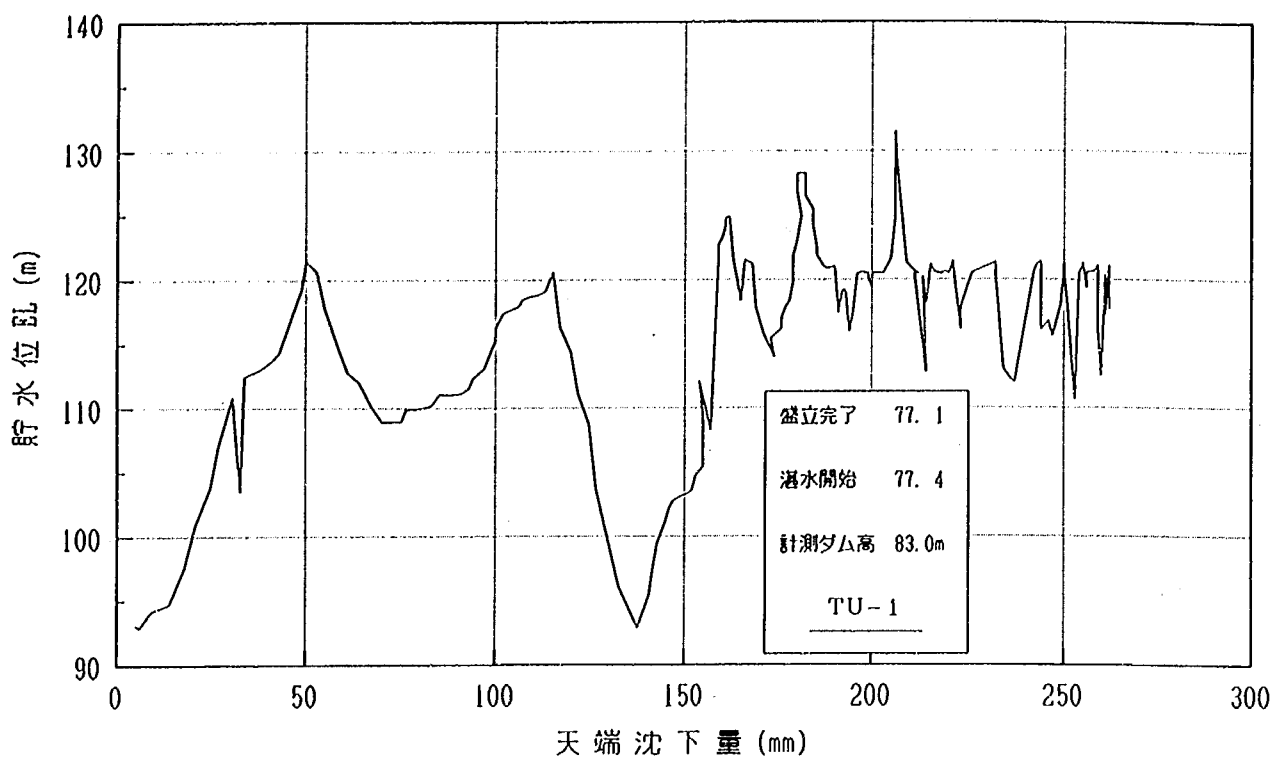


図-51 貯水位と天端沈下量 (Iダム)

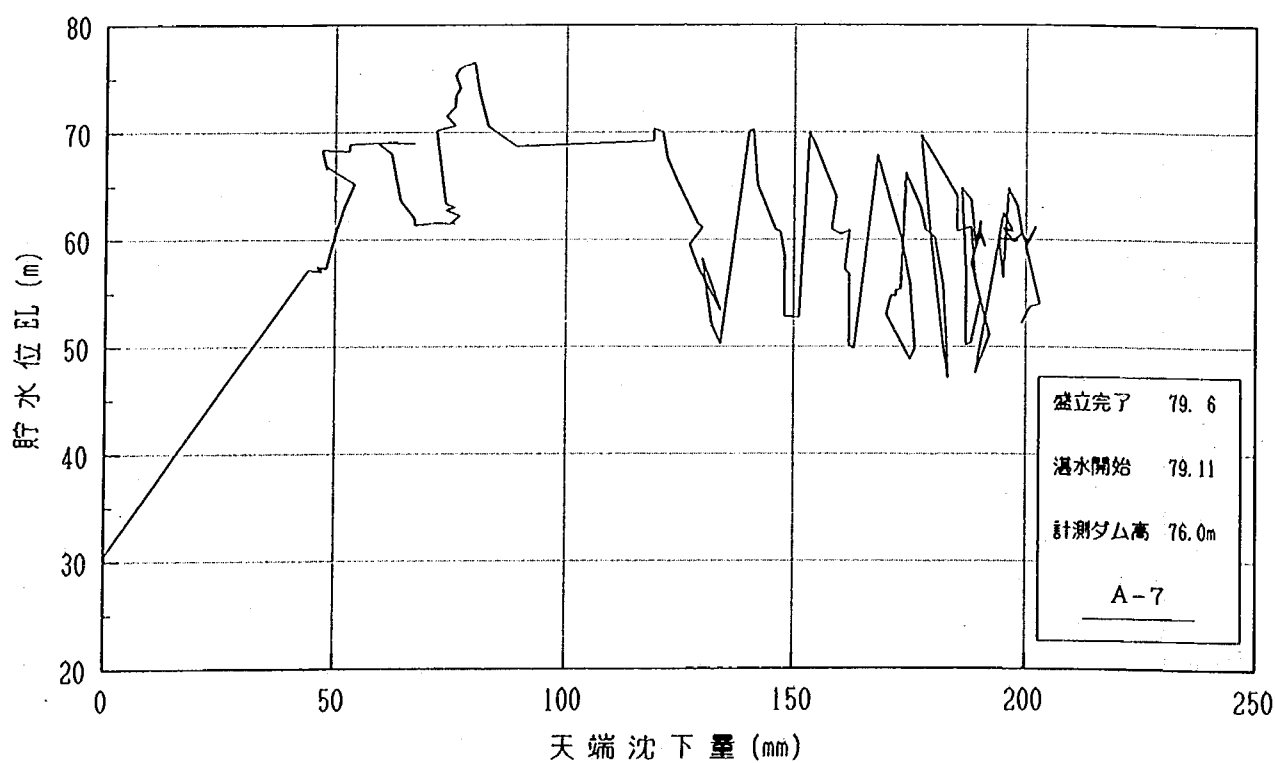


図-52 貯水位と天端沈下量 (Kダム)

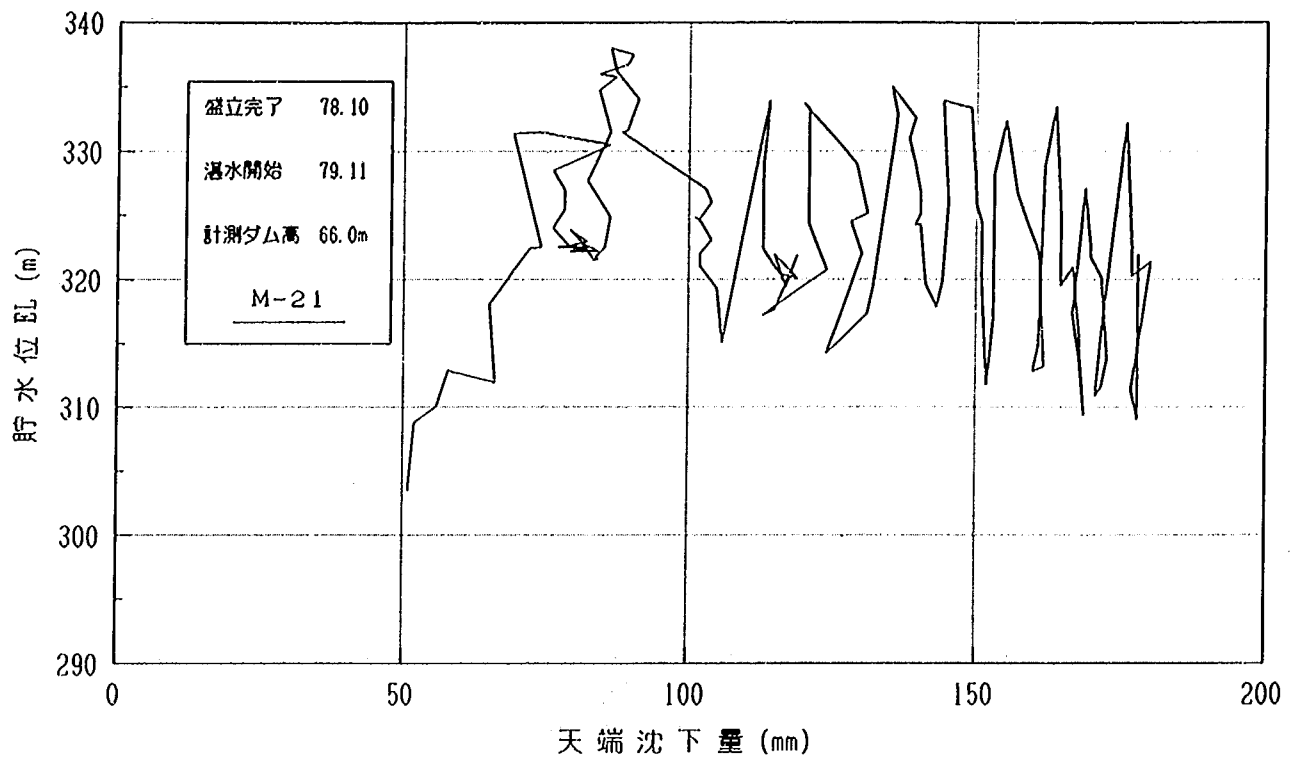


図-53 貯水位と天端沈下量 (Lダム)

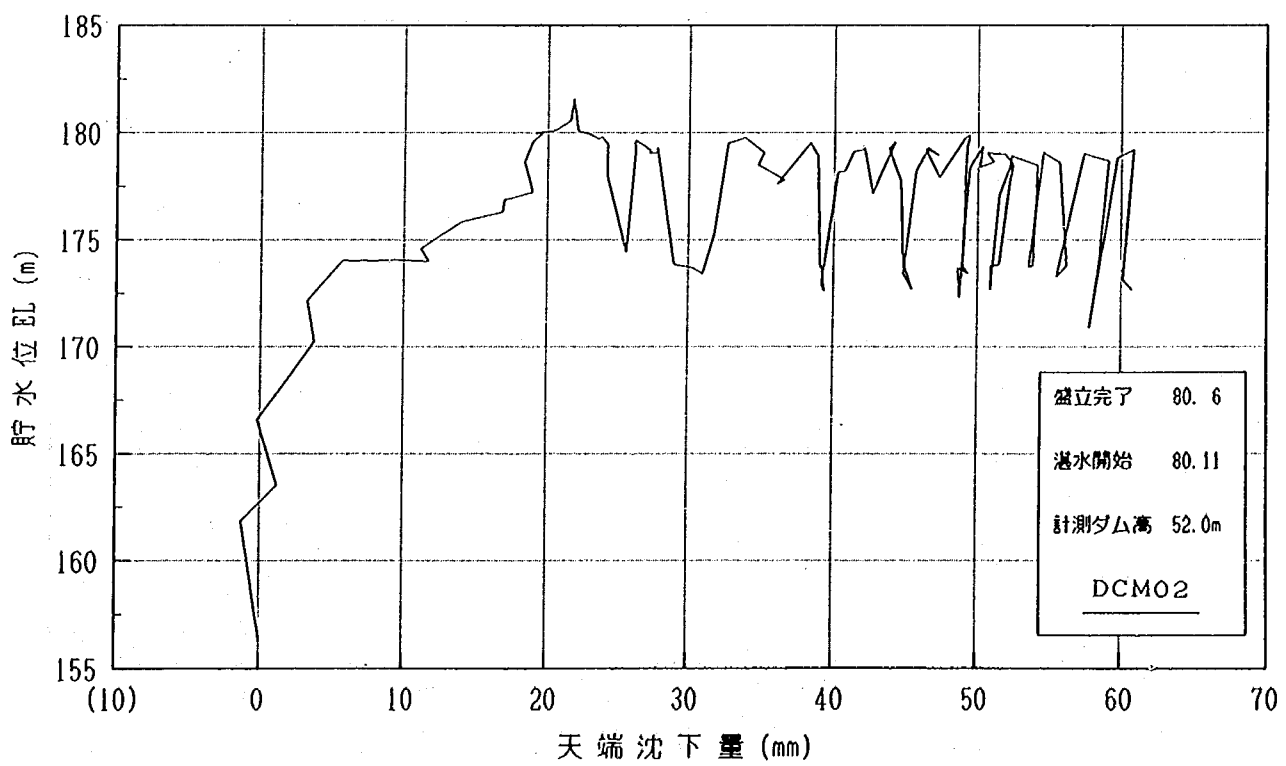


図-54 貯水位と天端沈下量 (Mダム)

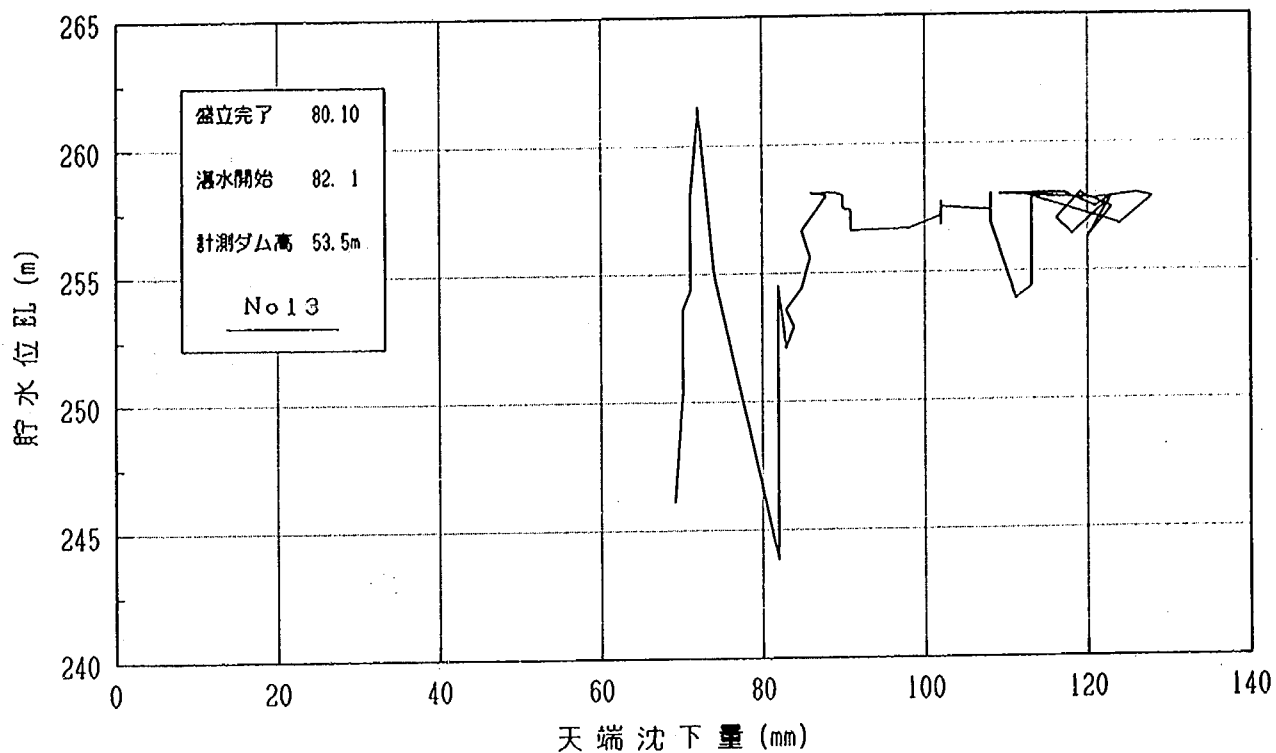


図-55 貯水位と天端沈下量 (Nダム)

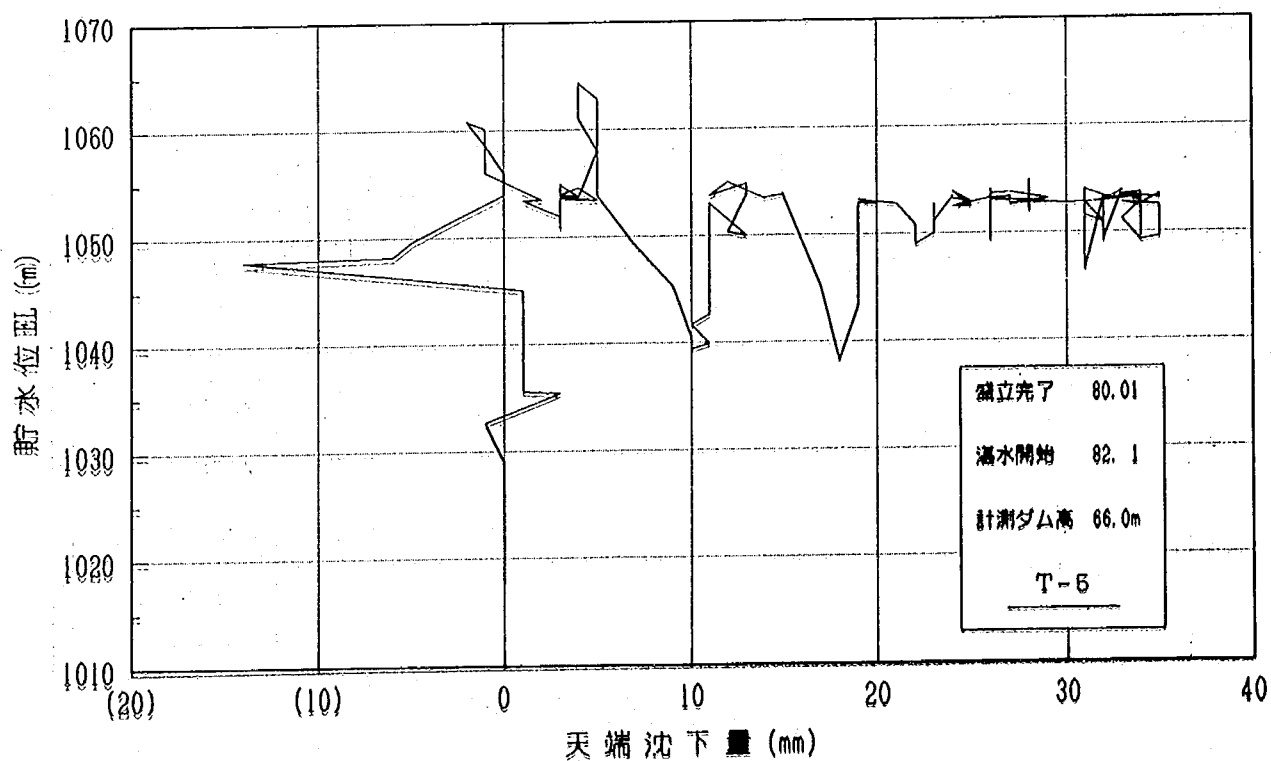


図-56 貯水位と天端沈下量 (Oダム)

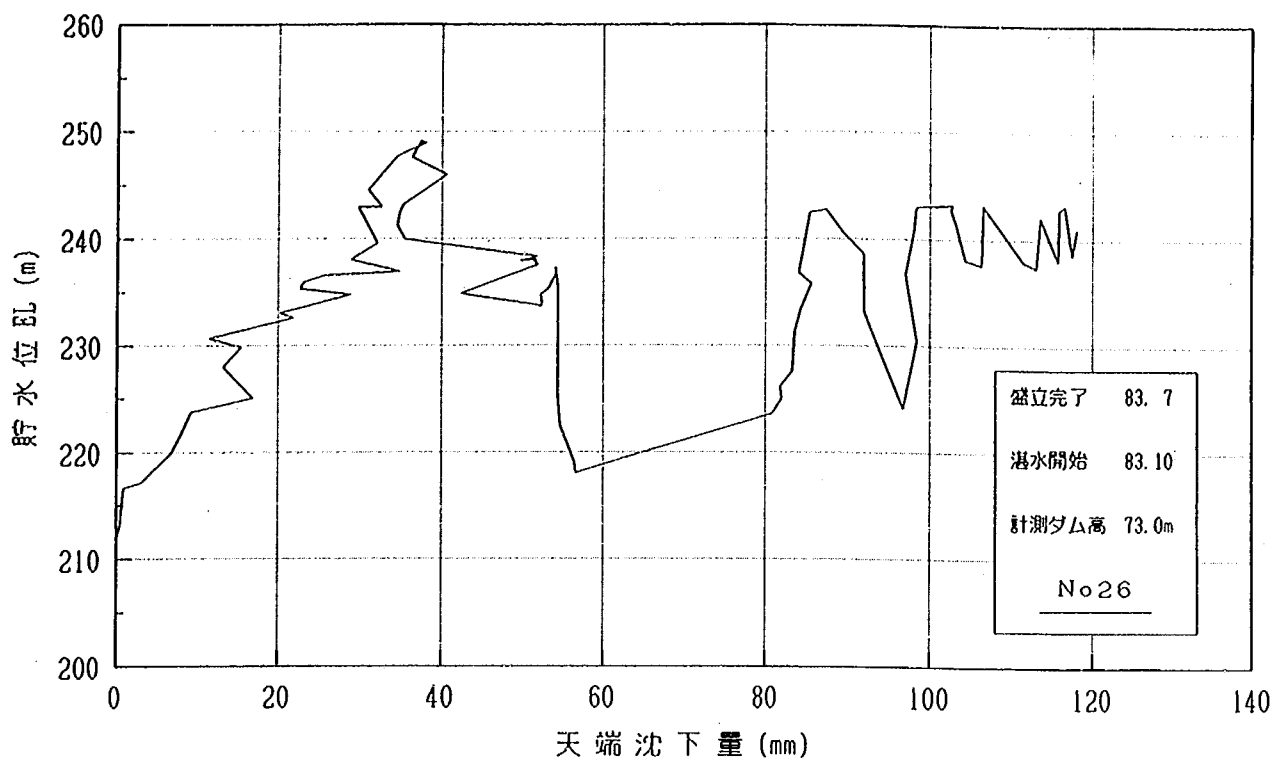


図-57 貯水位と天端沈下量 (Pダム)

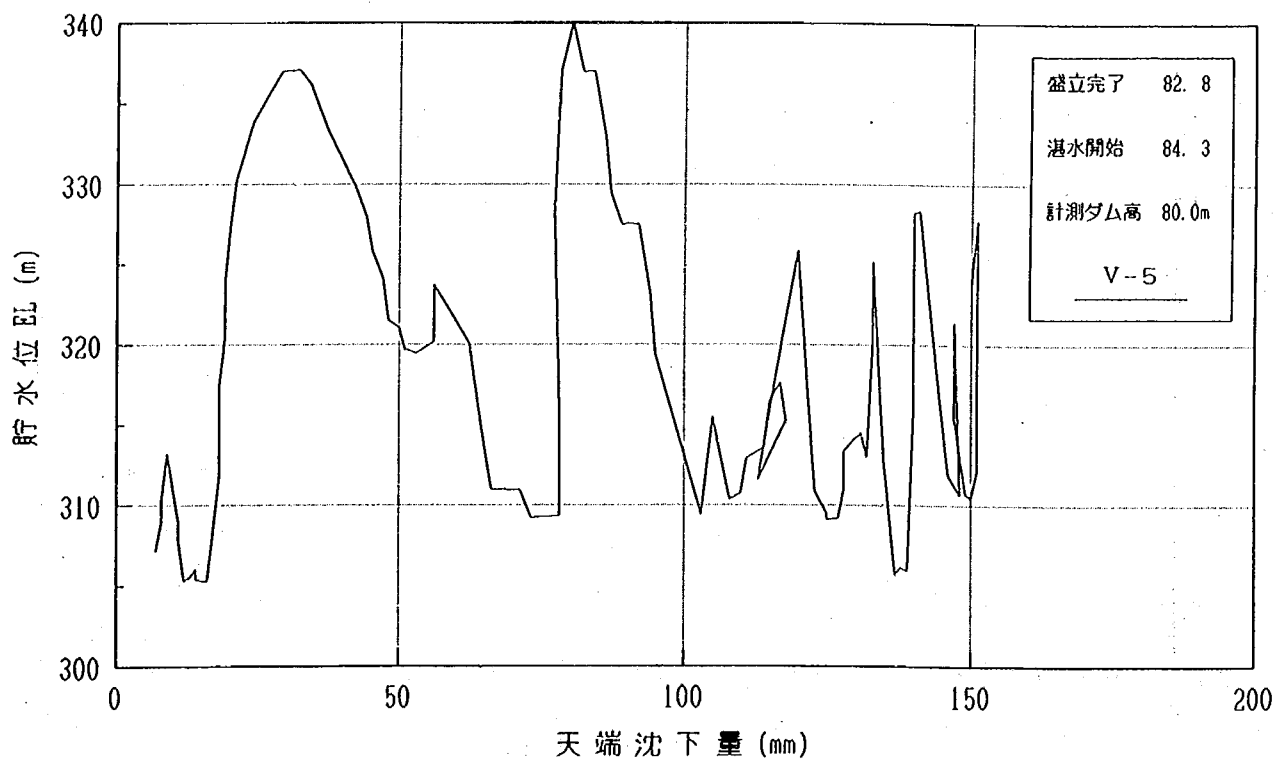


図-58 貯水位と天端沈下量 (Qダム)

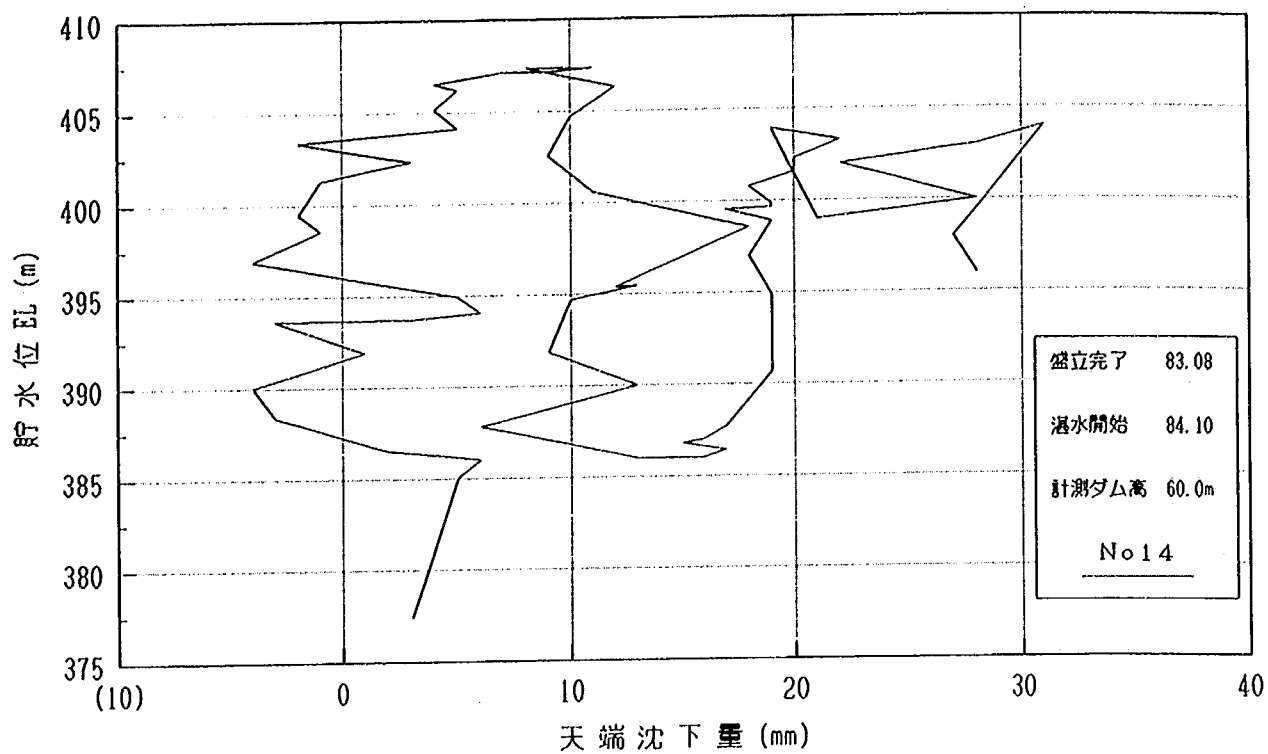


図-59 貯水位と天端沈下量 (Rダム)

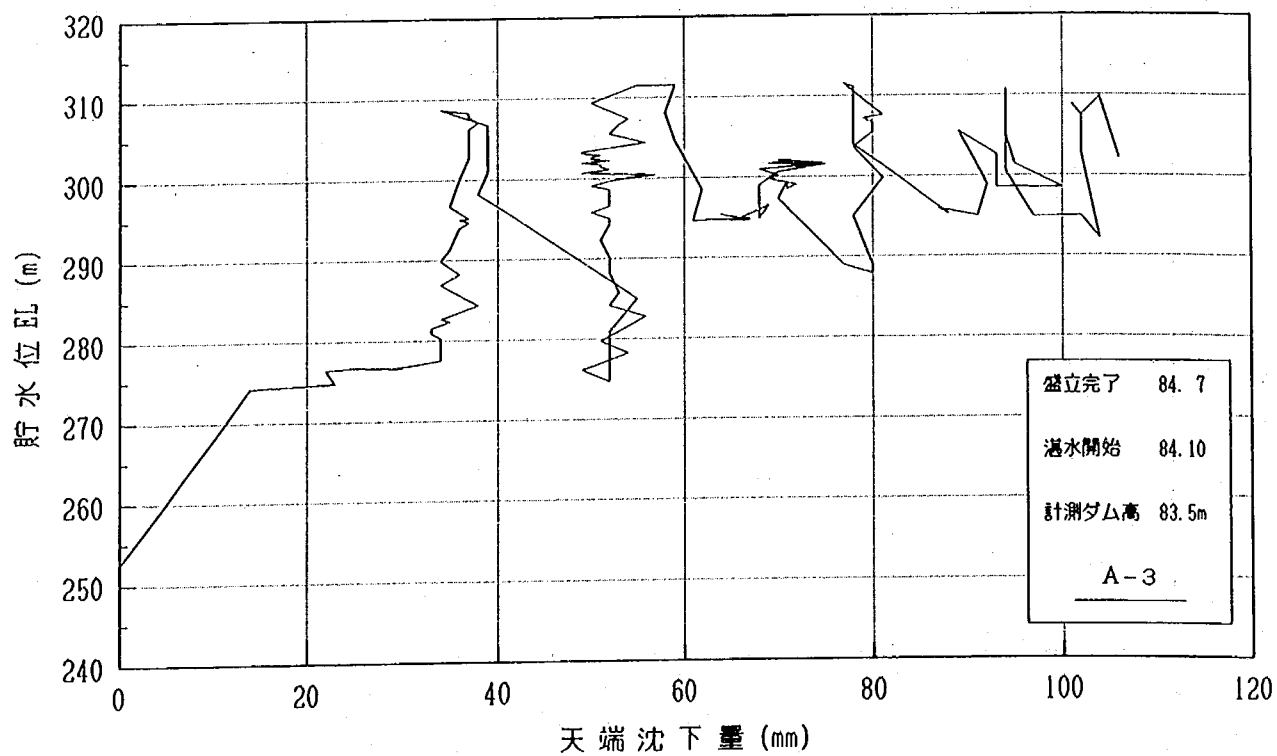


図-60 貯水位と天端沈下量 (Sダム)

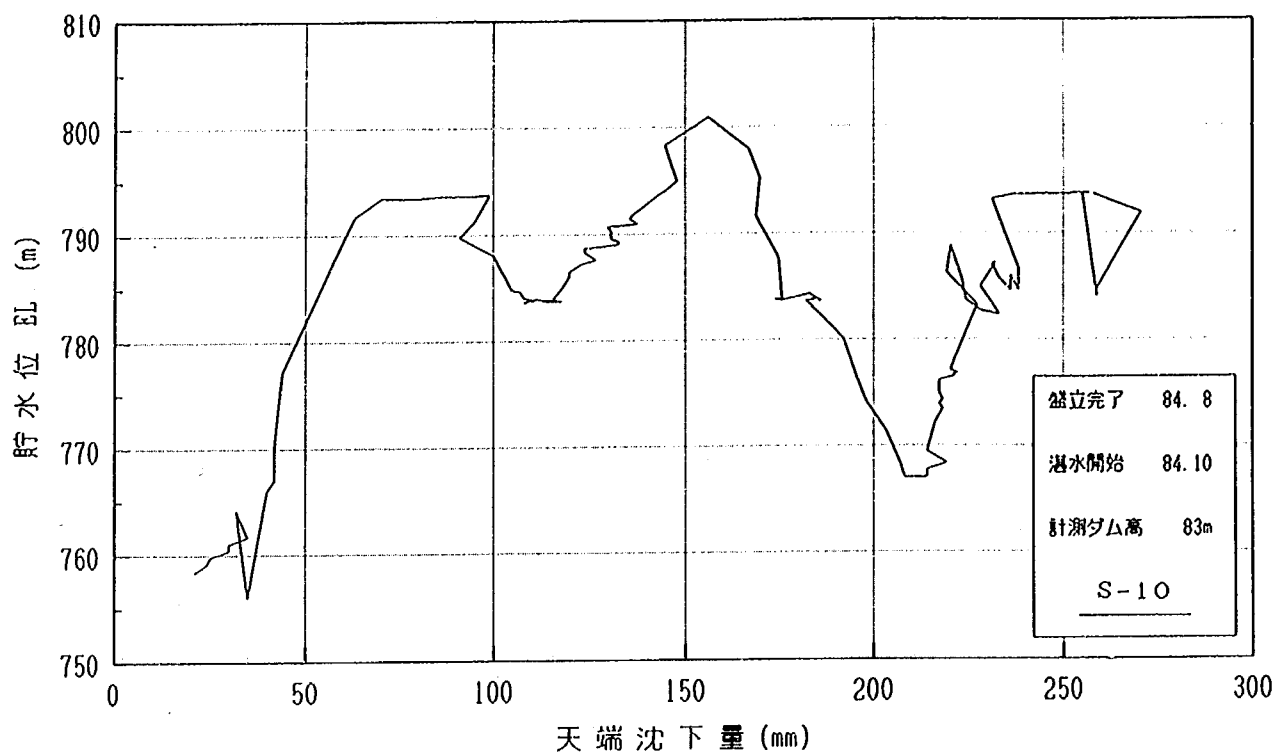


図-61 貯水位と天端沈下量 (Tダム)

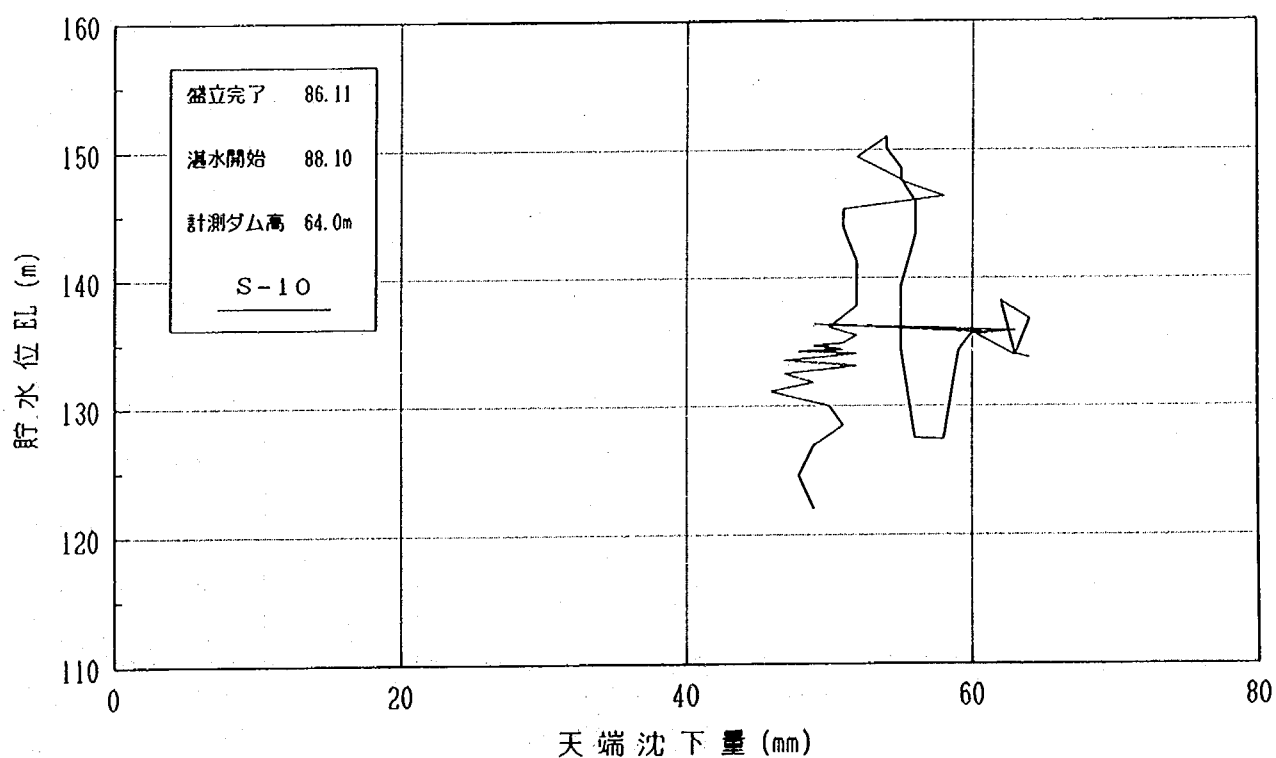


図-62 貯水位と天端沈下量 (Uダム)

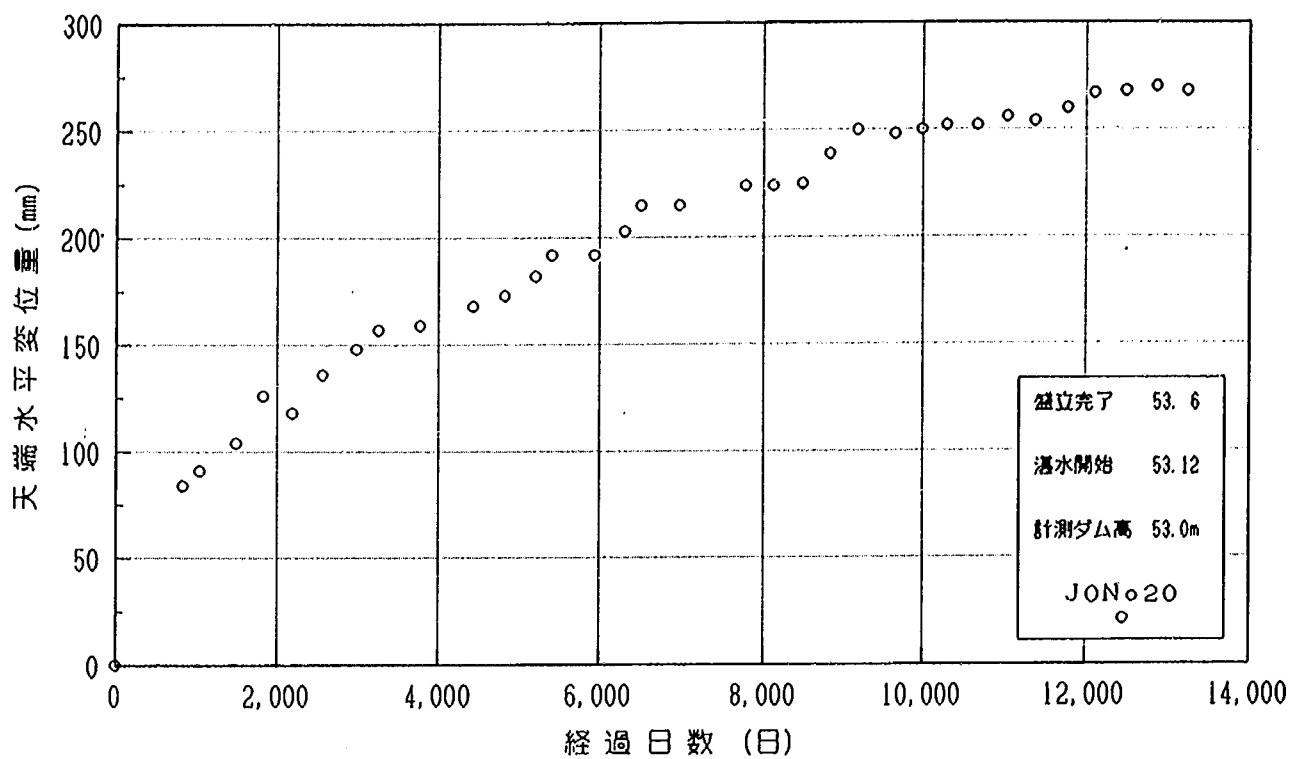


図-63 天端水平変位量の経年変化 (Aダム)

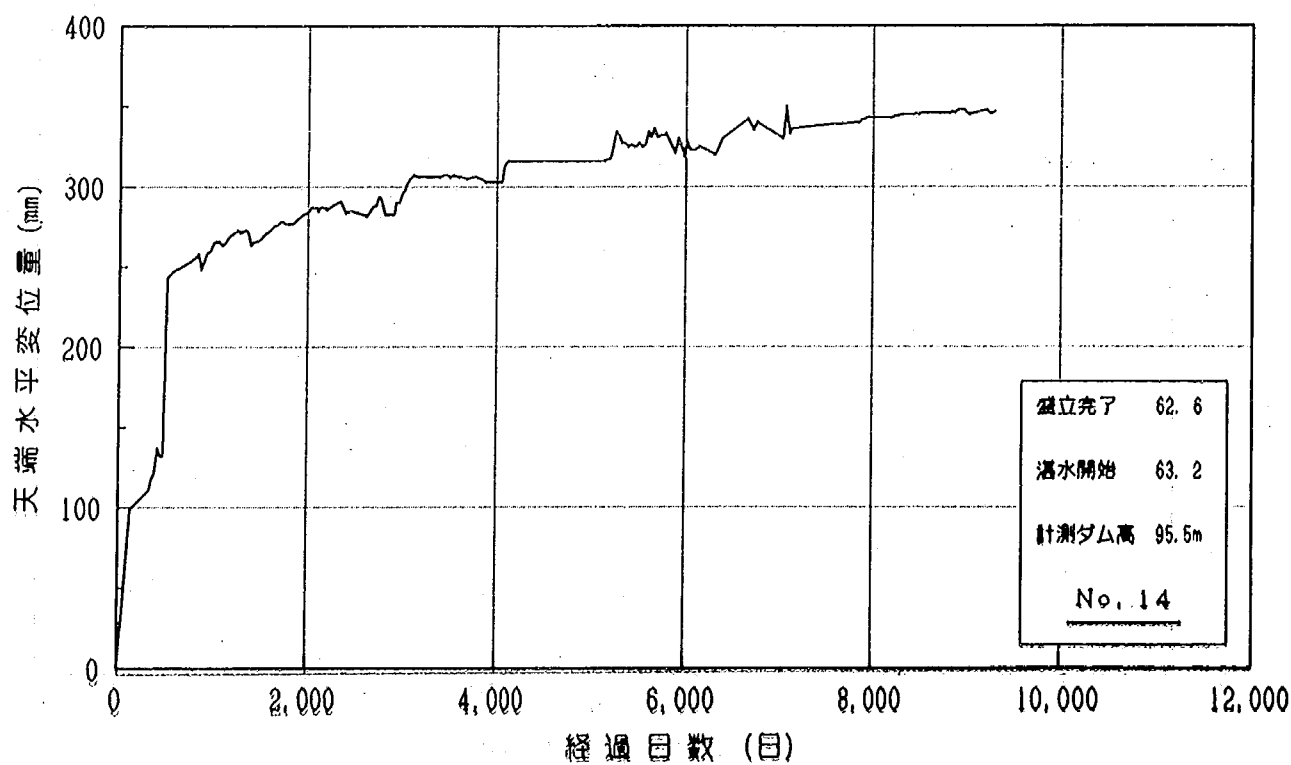


図-64 天端水平変位量の経年変化 (Bダム)

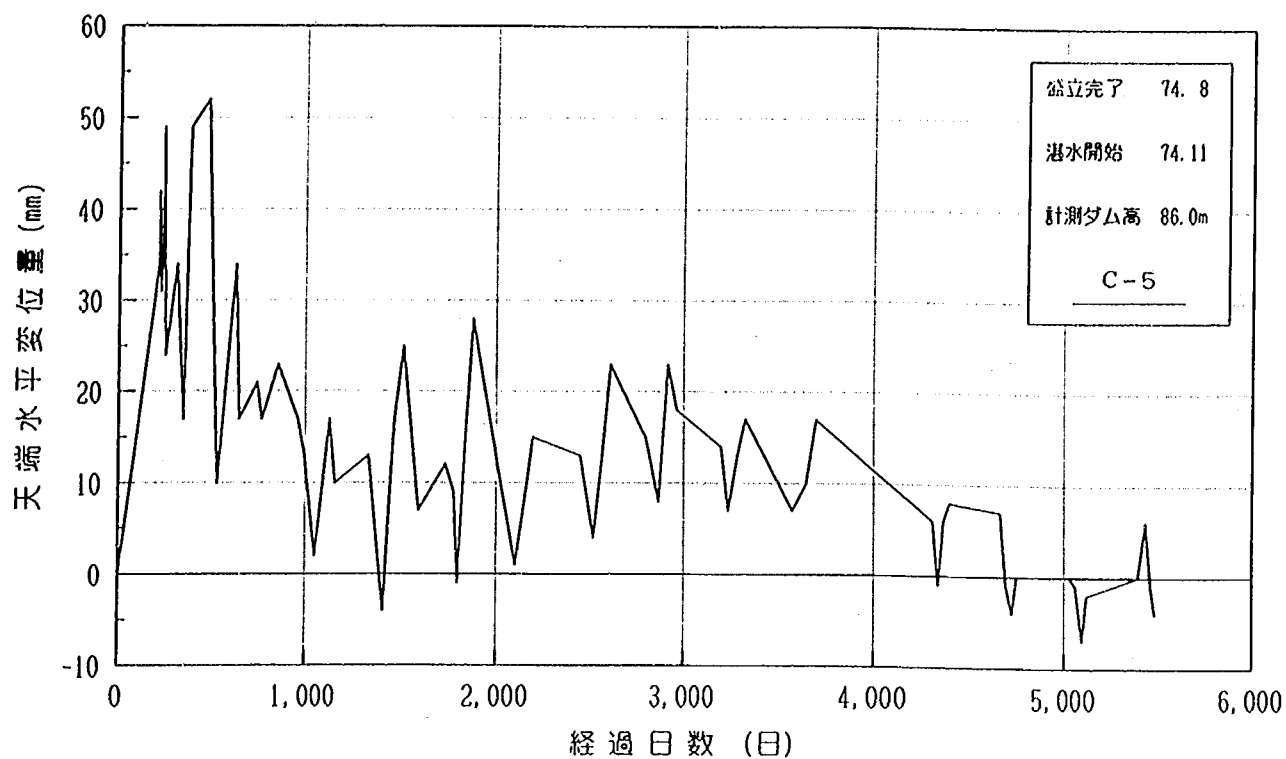


図-65 天端水平変位量の経年変化 (Cダム)

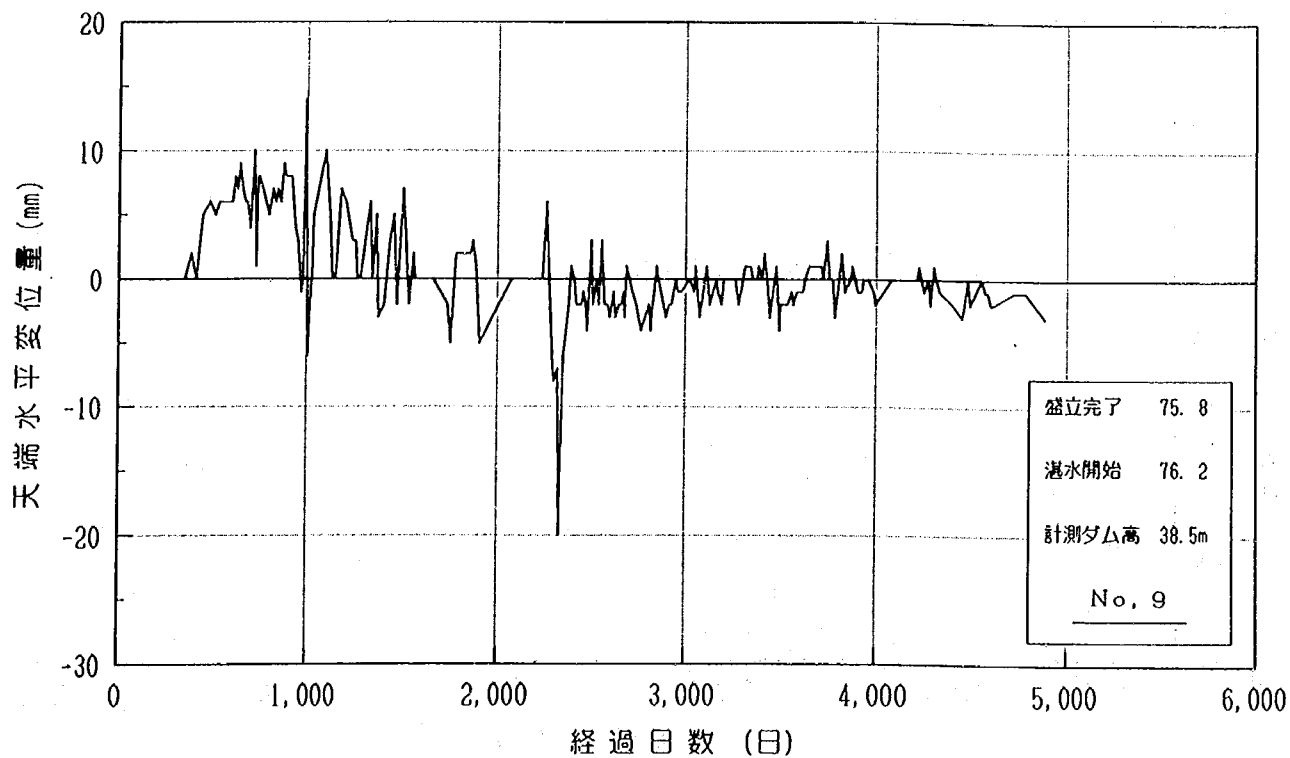


図-66 天端水平変位量の経年変化 (Dダム)

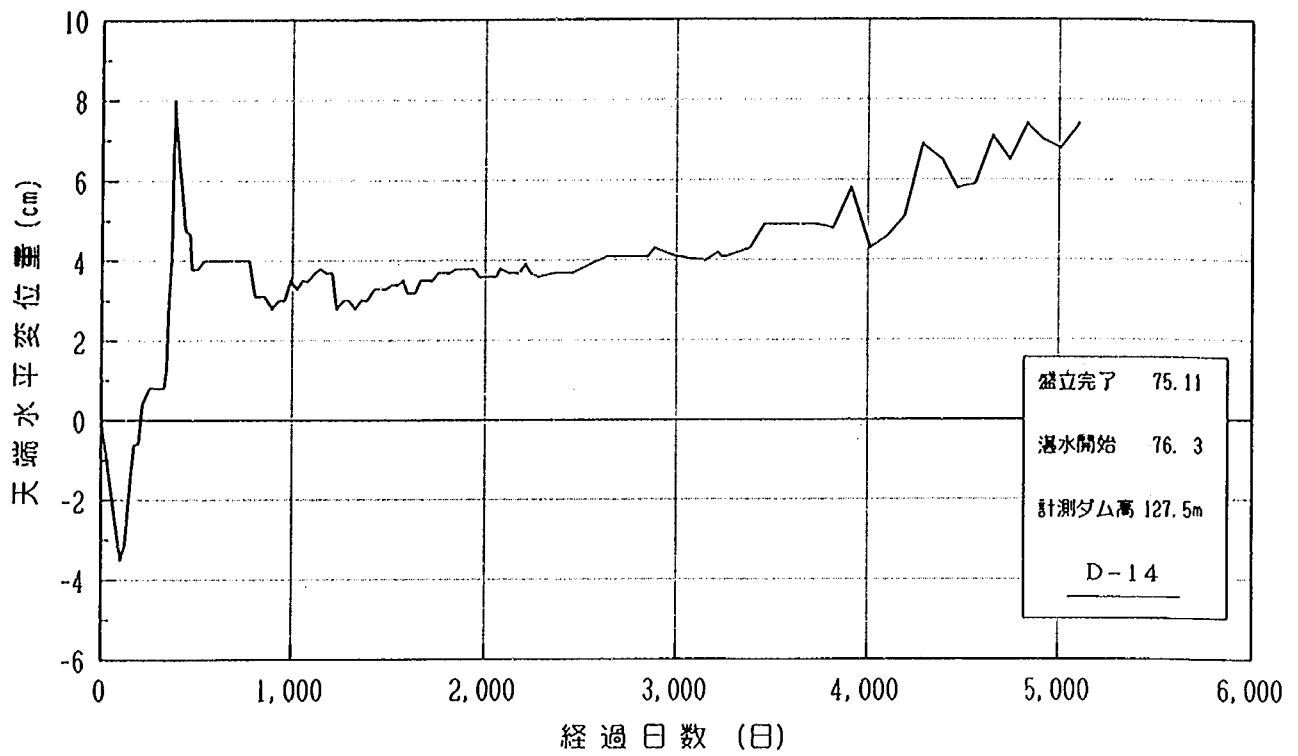


図-67 天端水平変位量の経年変化 (Eダム)

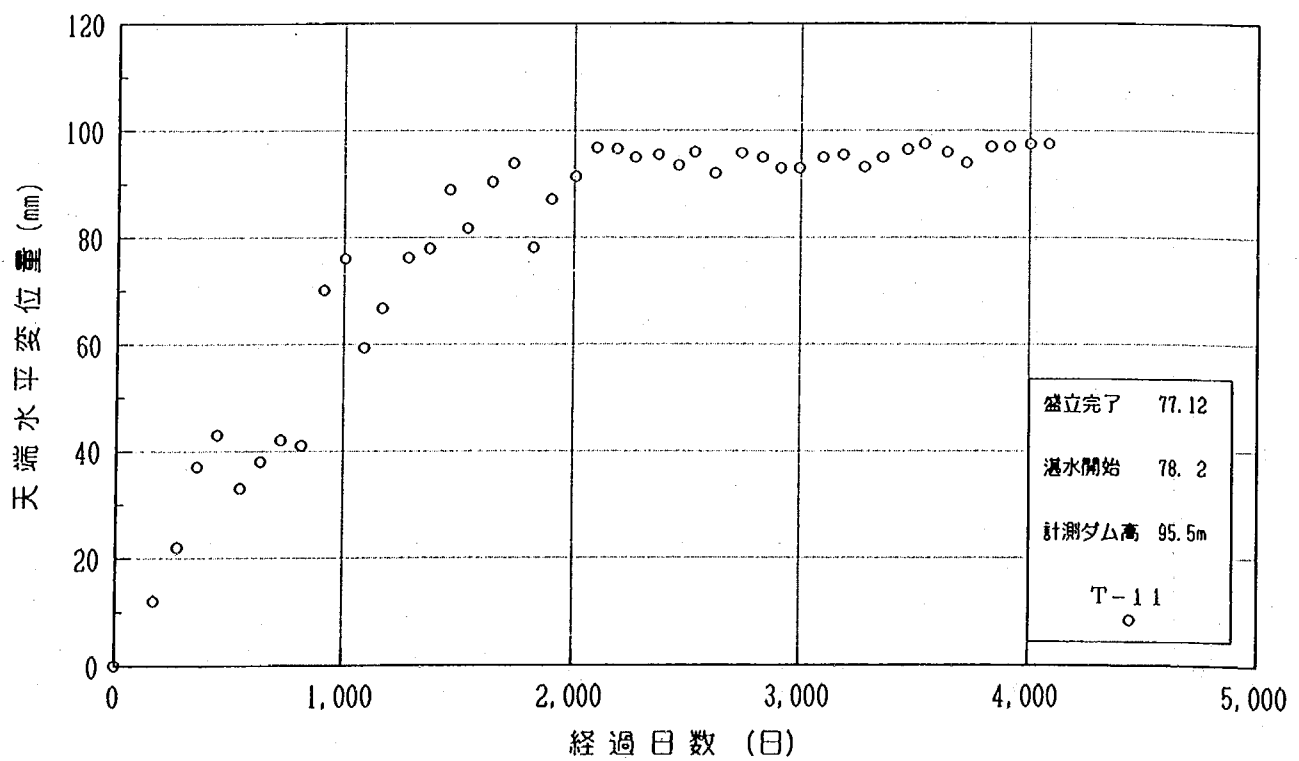


図-68 天端水平変位量の経年変化 (Fダム)

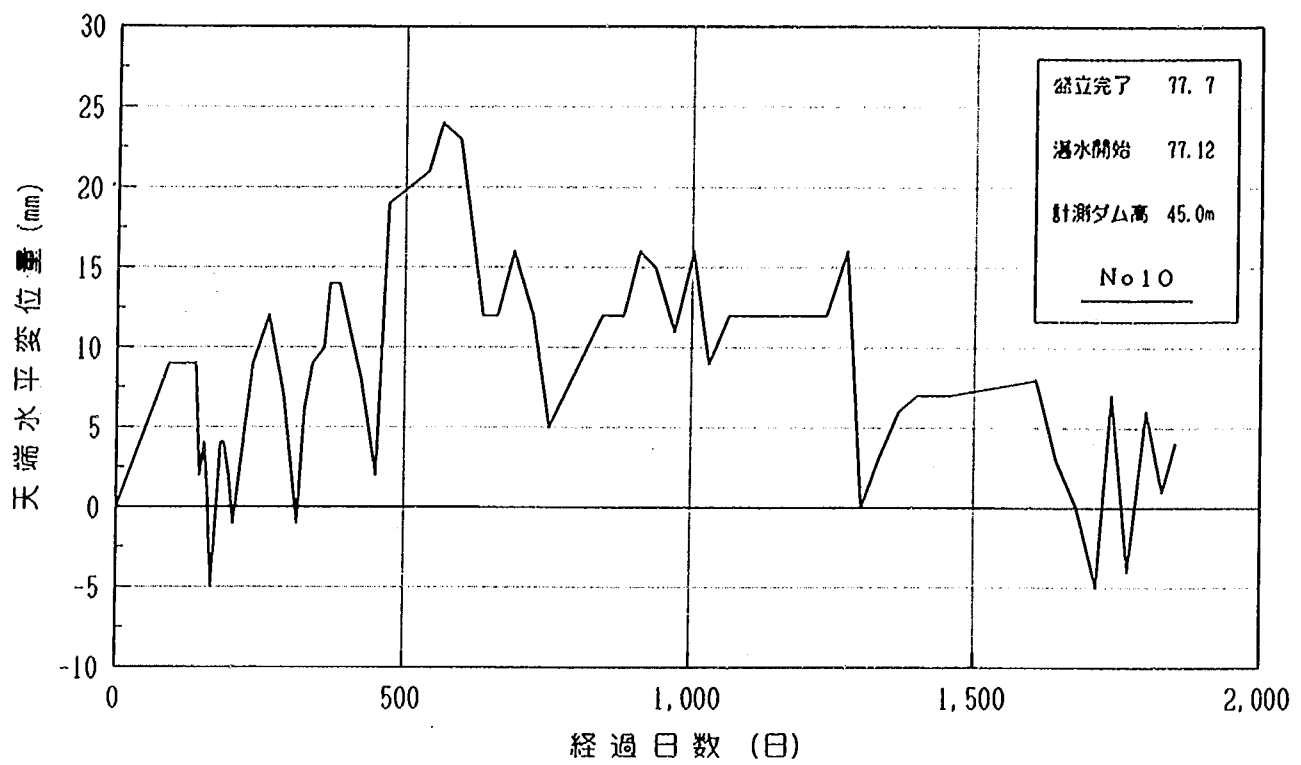


図-69 天端水平変位量の経年変化 (Gダム)

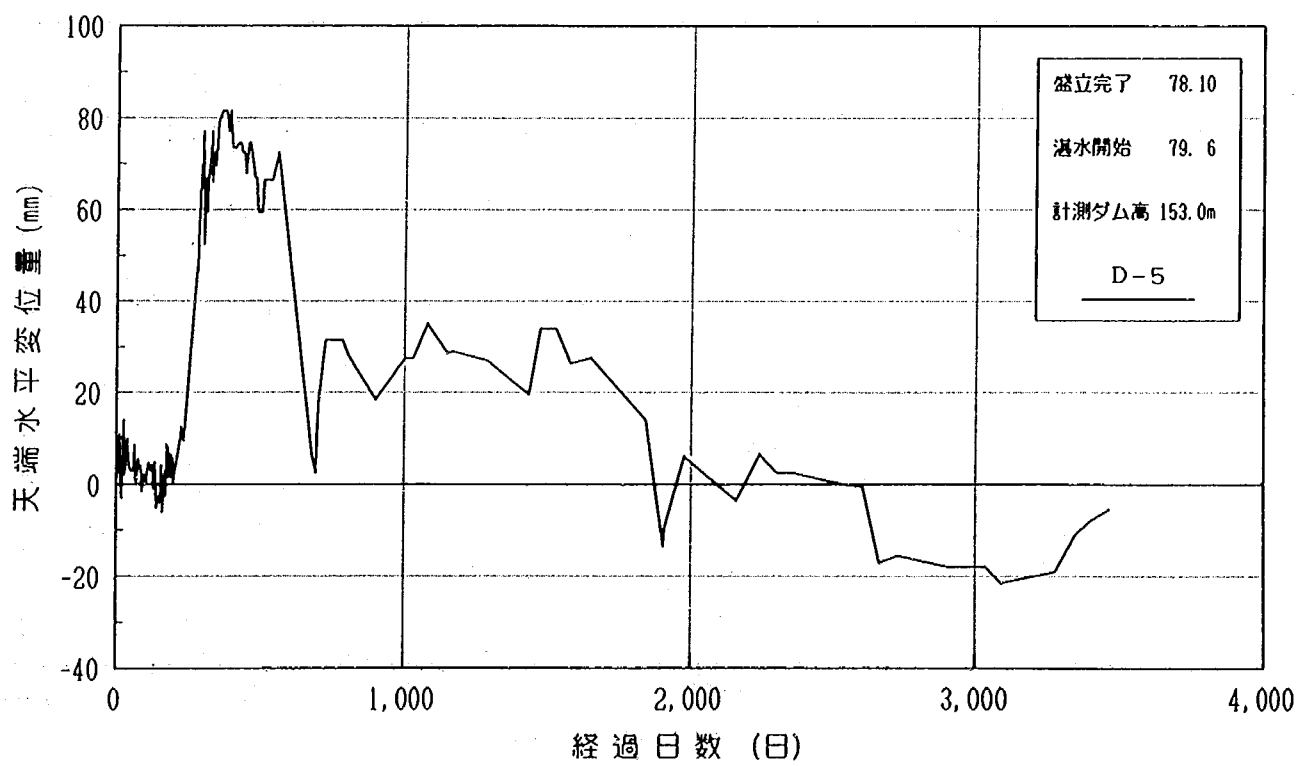


図-70 天端水平変位量の経年変化 (Hダム)

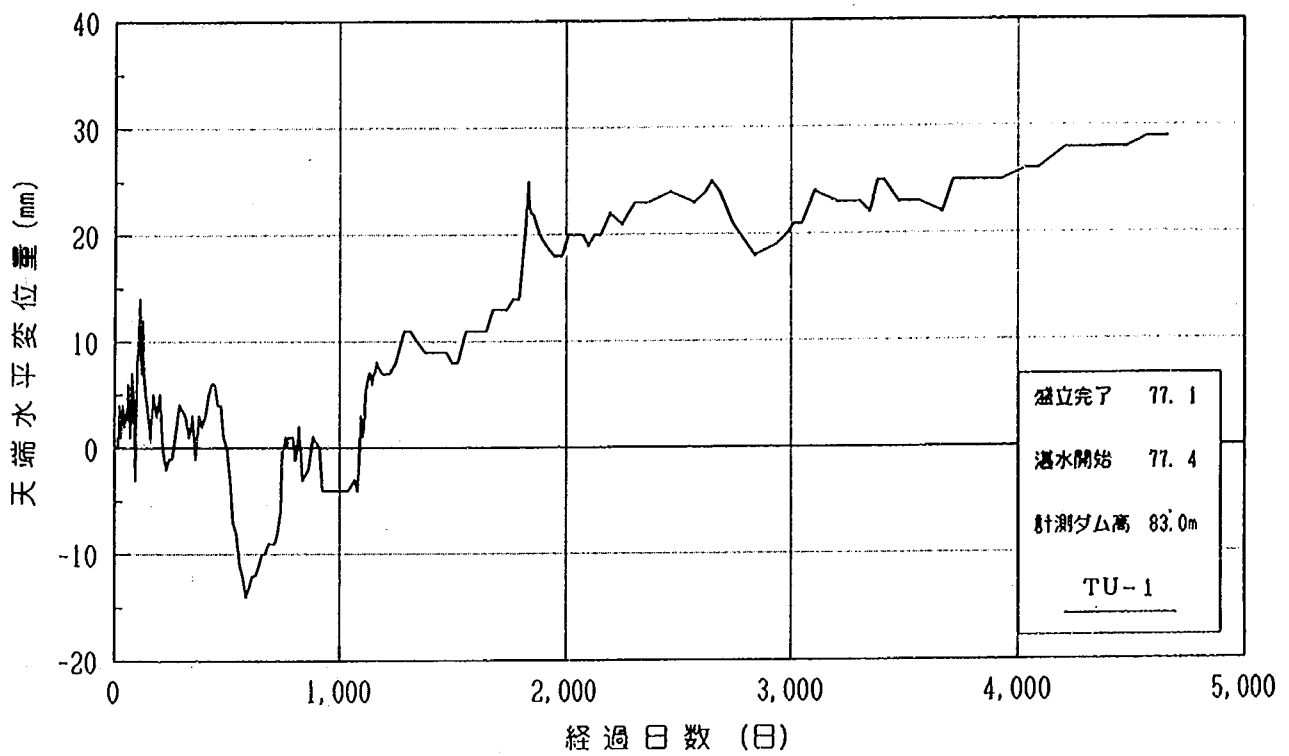


図-71 天端水平変位量の経年変化 (Iダム)

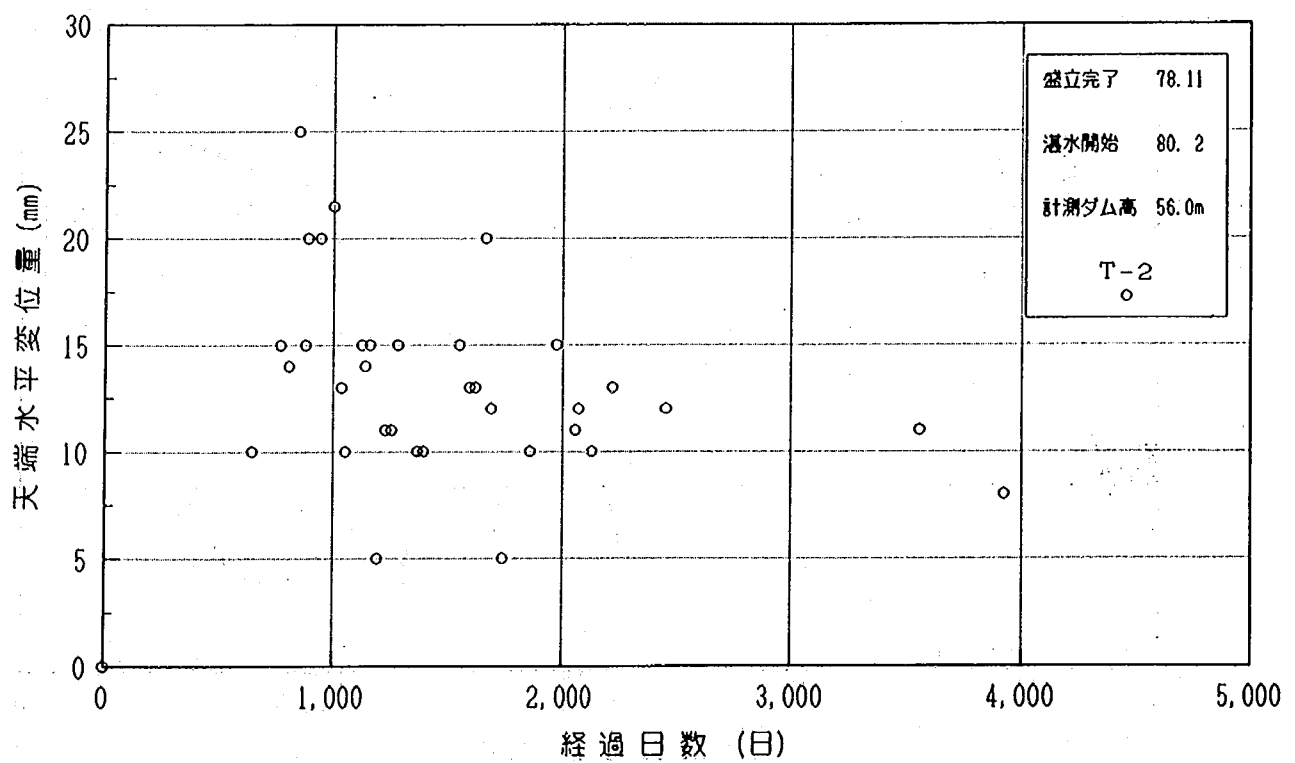


図-72 天端水平変位量の経年変化 (Jダム)

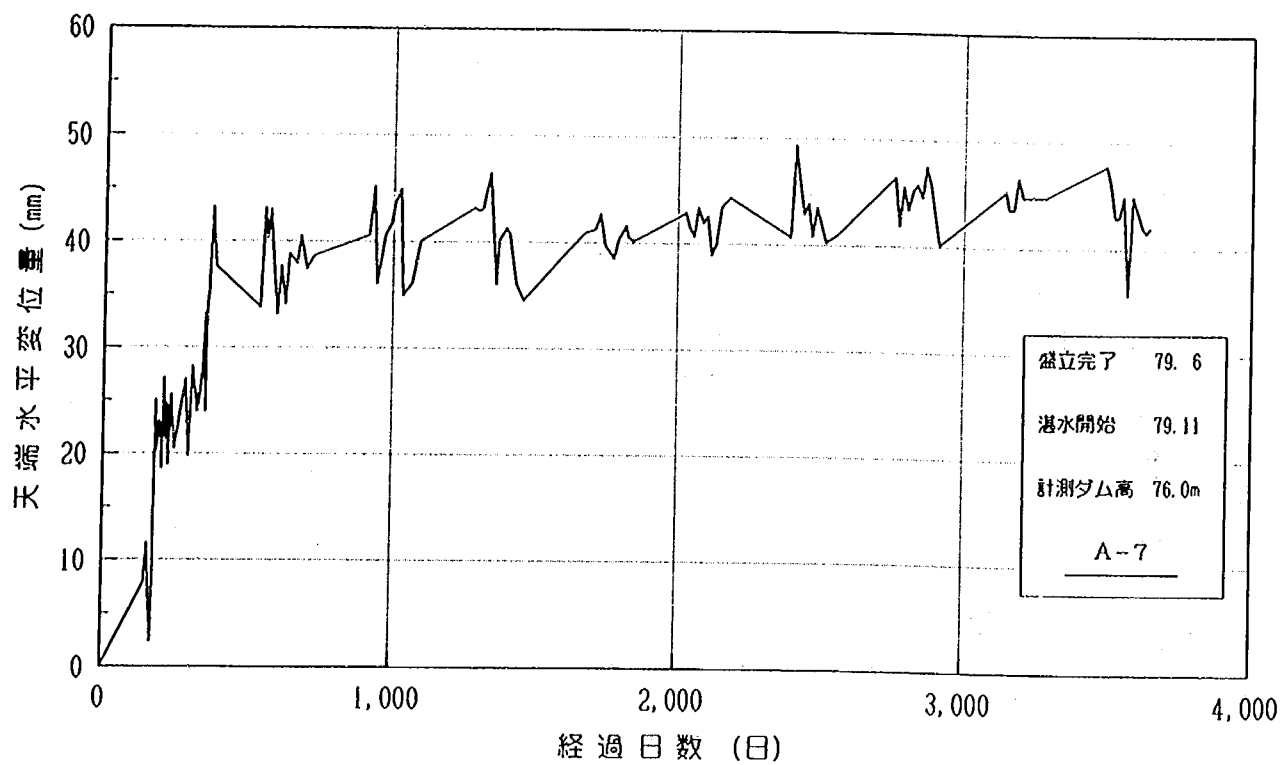


図-73 天端水平変位量の経年変化 (Kダム)

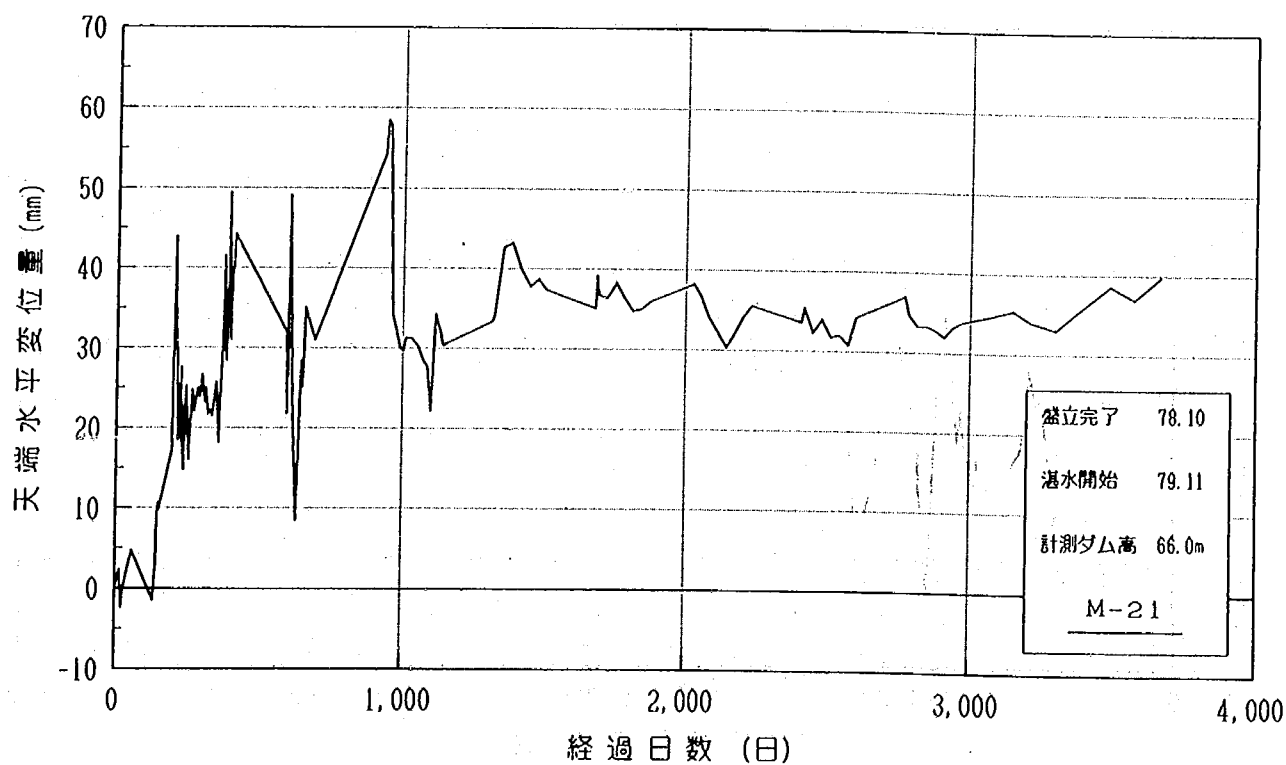


図-74 天端水平変位量の経年変化 (Lダム)

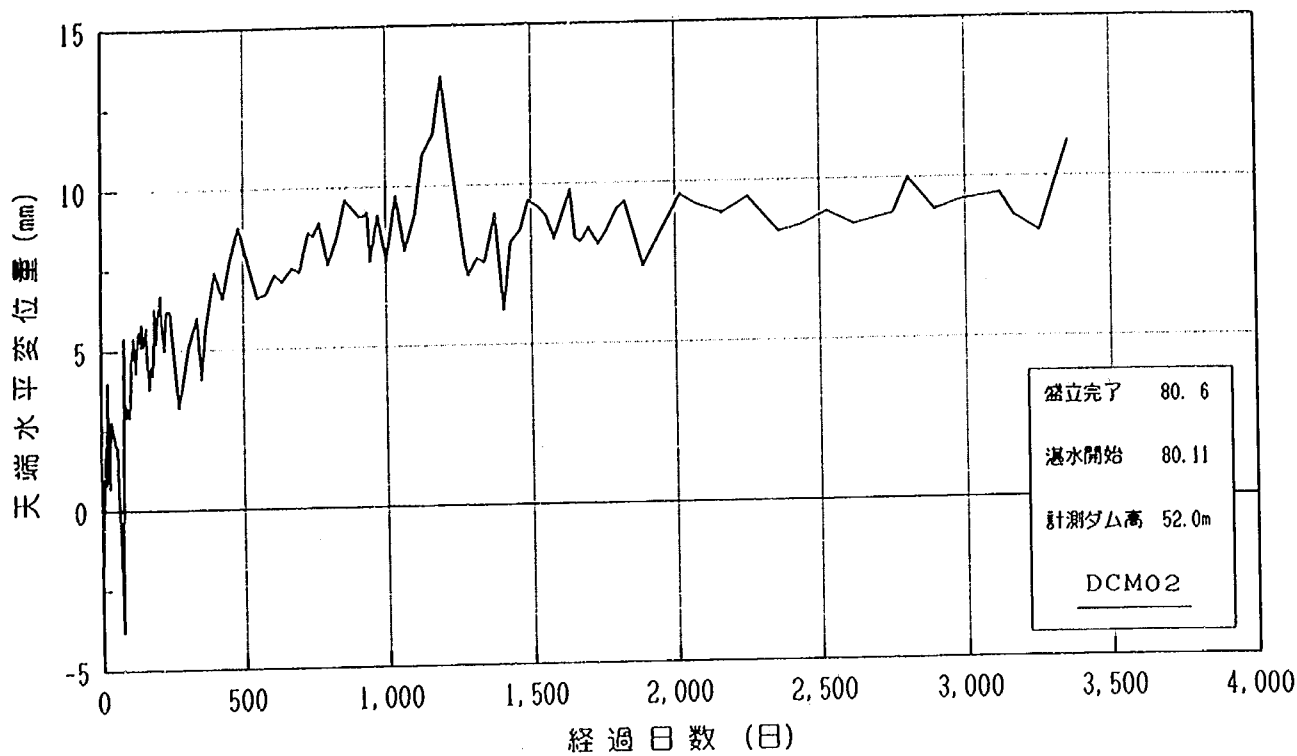


図-75 天端水平変位量の経年変化 (Mダム)

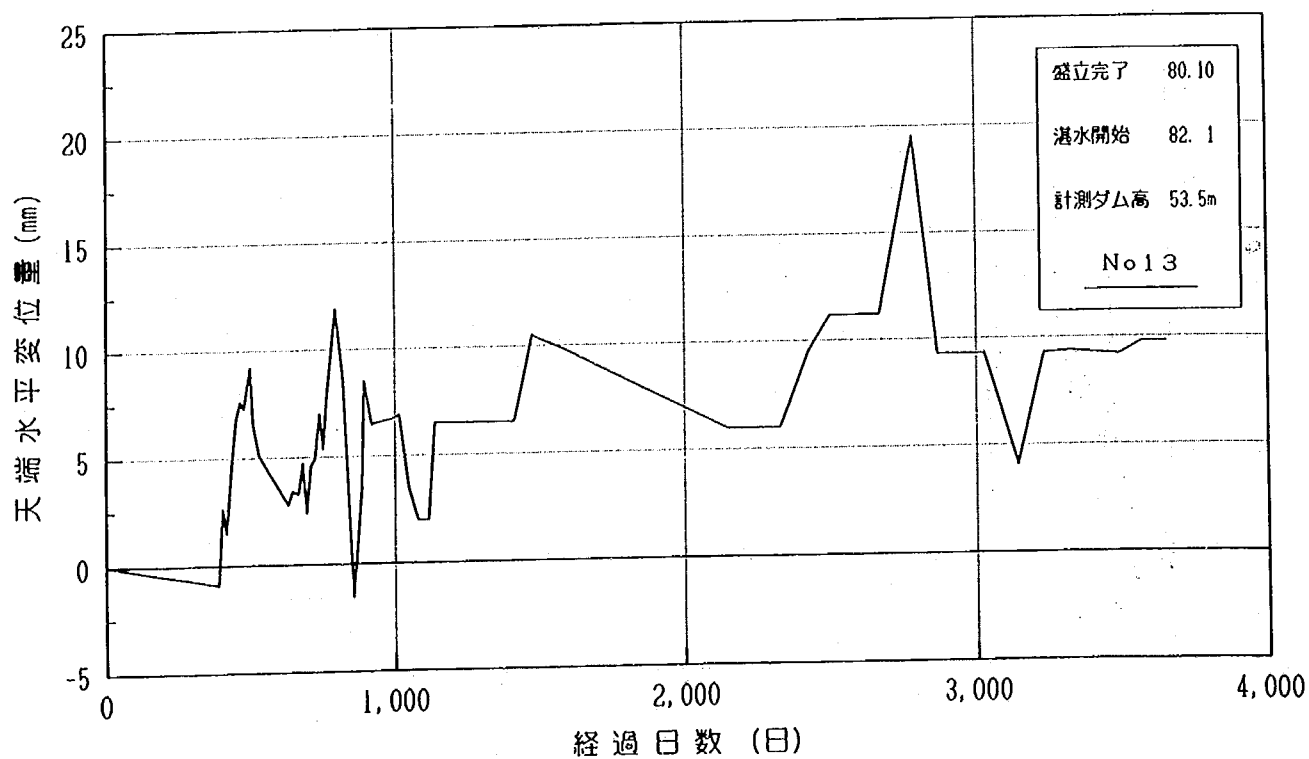


図-76 天端水平変位量の経年変化 (Nダム)

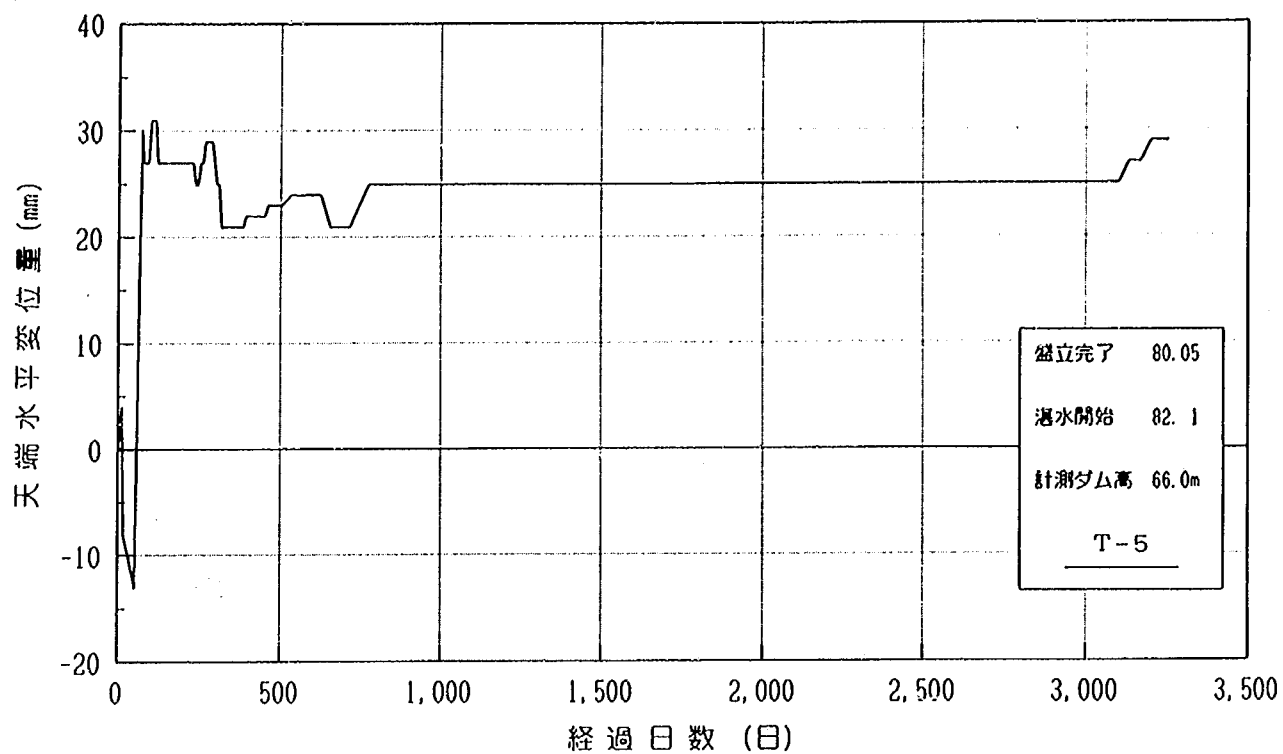


図-77 天端水平変位量の経年変化 (Oダム)

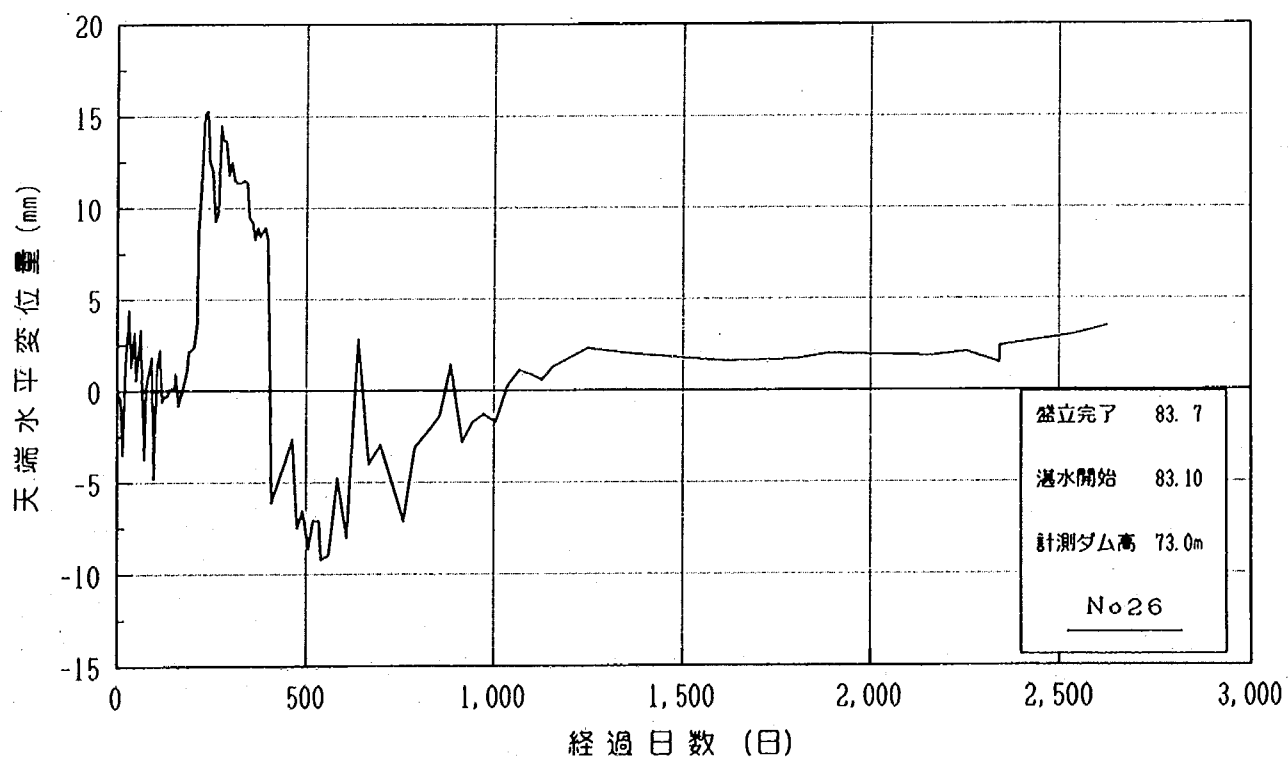


図-78 天端水平変位量の経年変化 (Pダム)

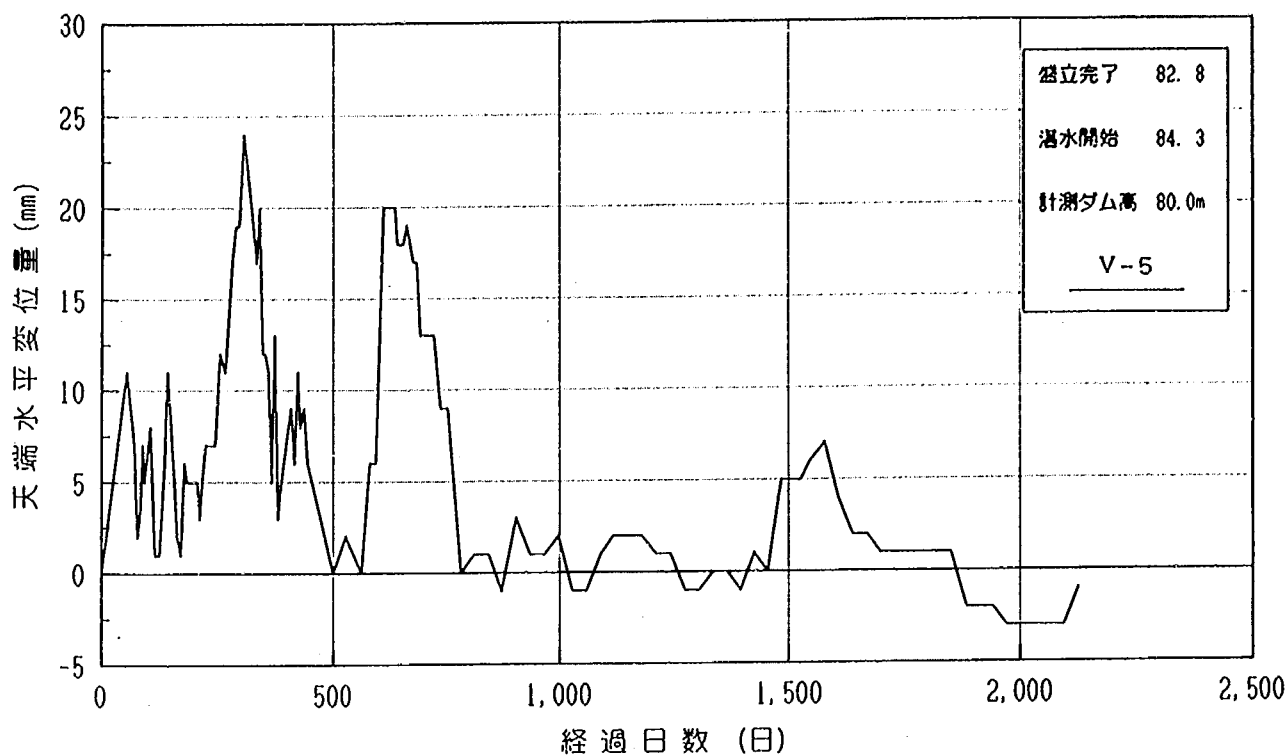


図-79 天端水平変位量の経年変化 (Qダム)

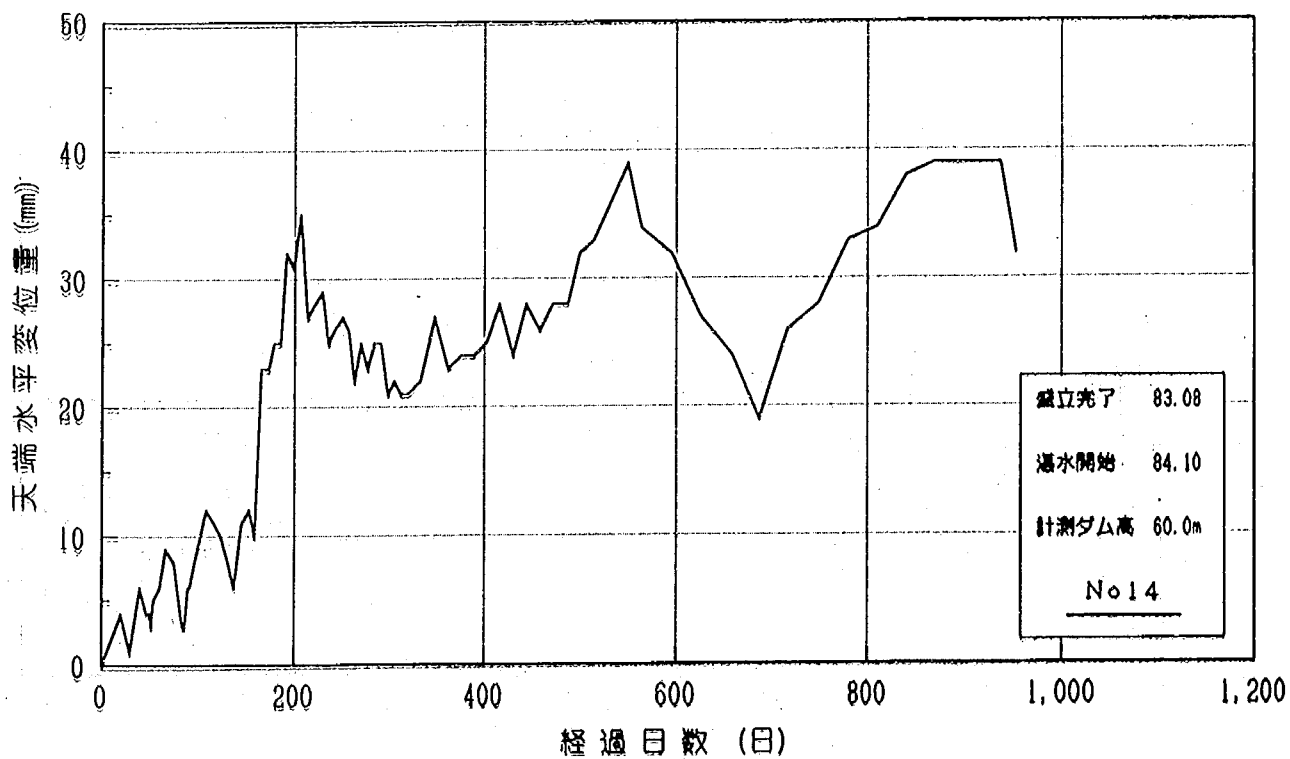


図-80 天端水平変位量の経年変化 (Rダム)

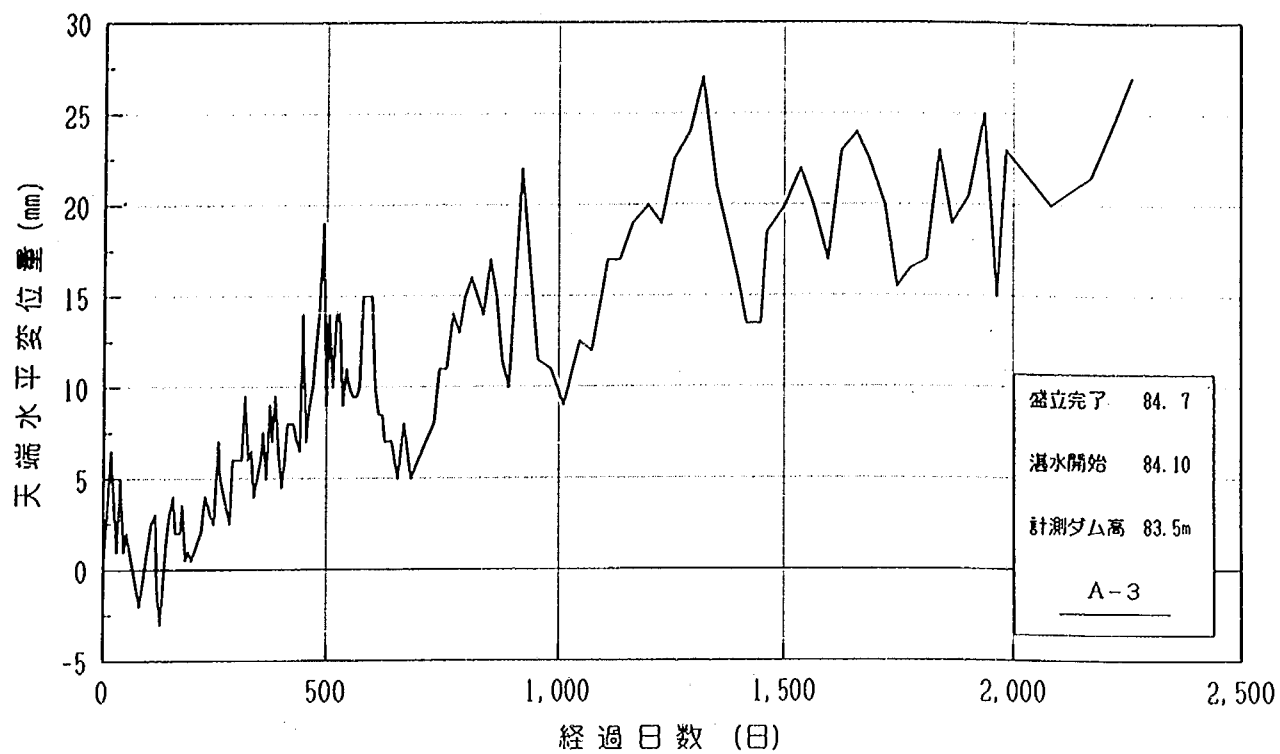


図-81 天端水平変位量の経年変化 (Sダム)

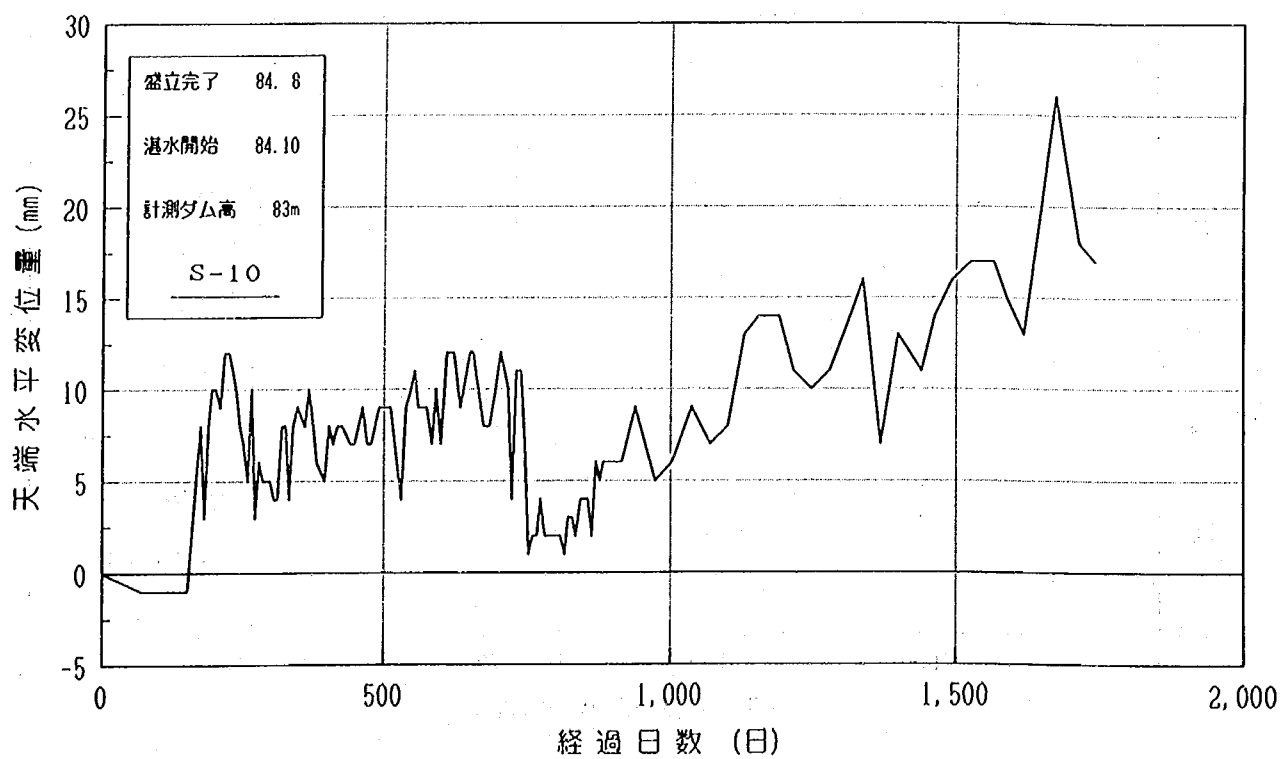


図-82 天端水平変位量の経年変化 (Tダム)

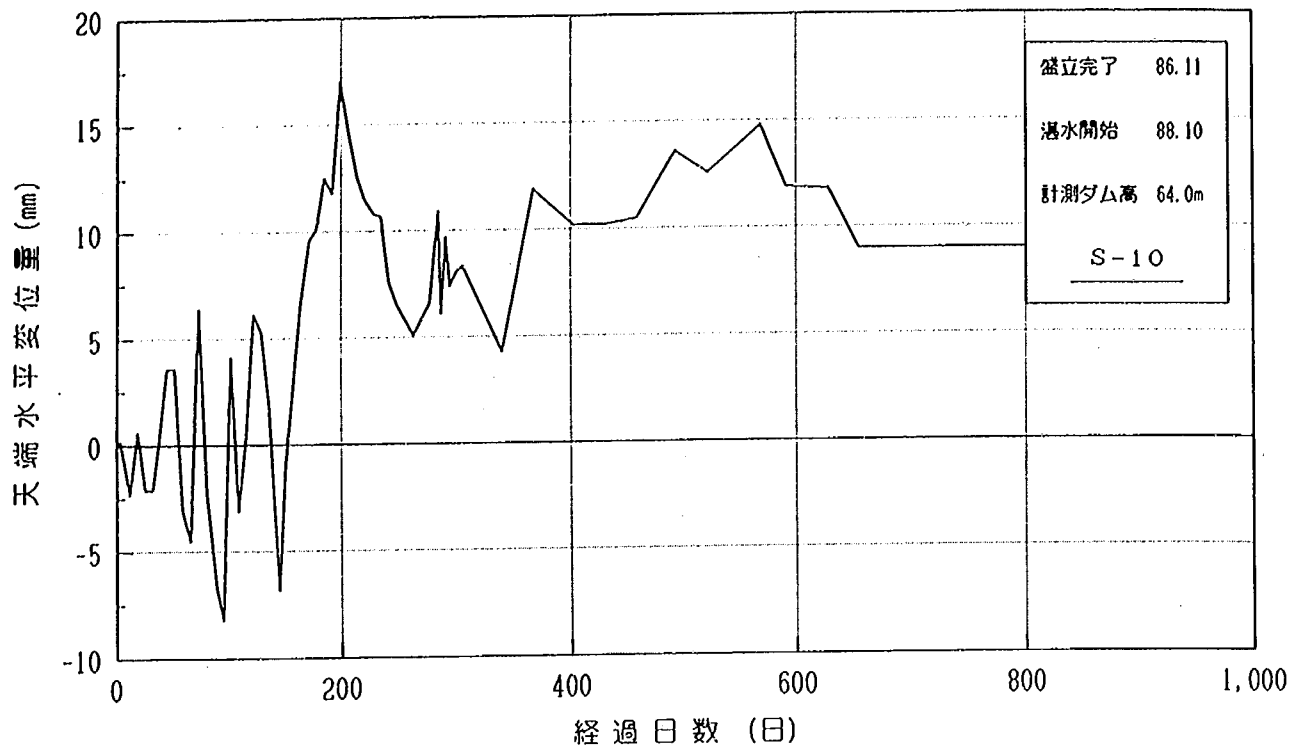


図-83 天端水平変位量の経年変化 (Uダム)

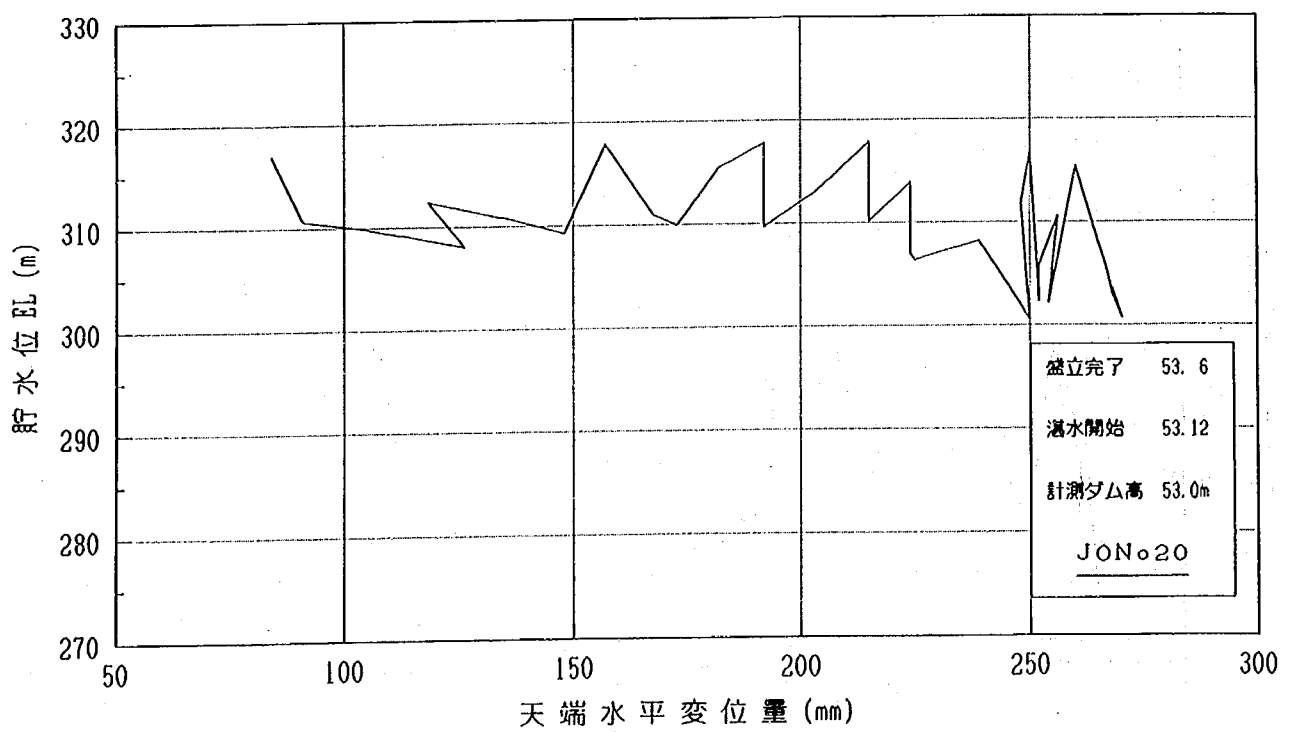


図-84 貯水位と天端水平変位量 (Aダム)

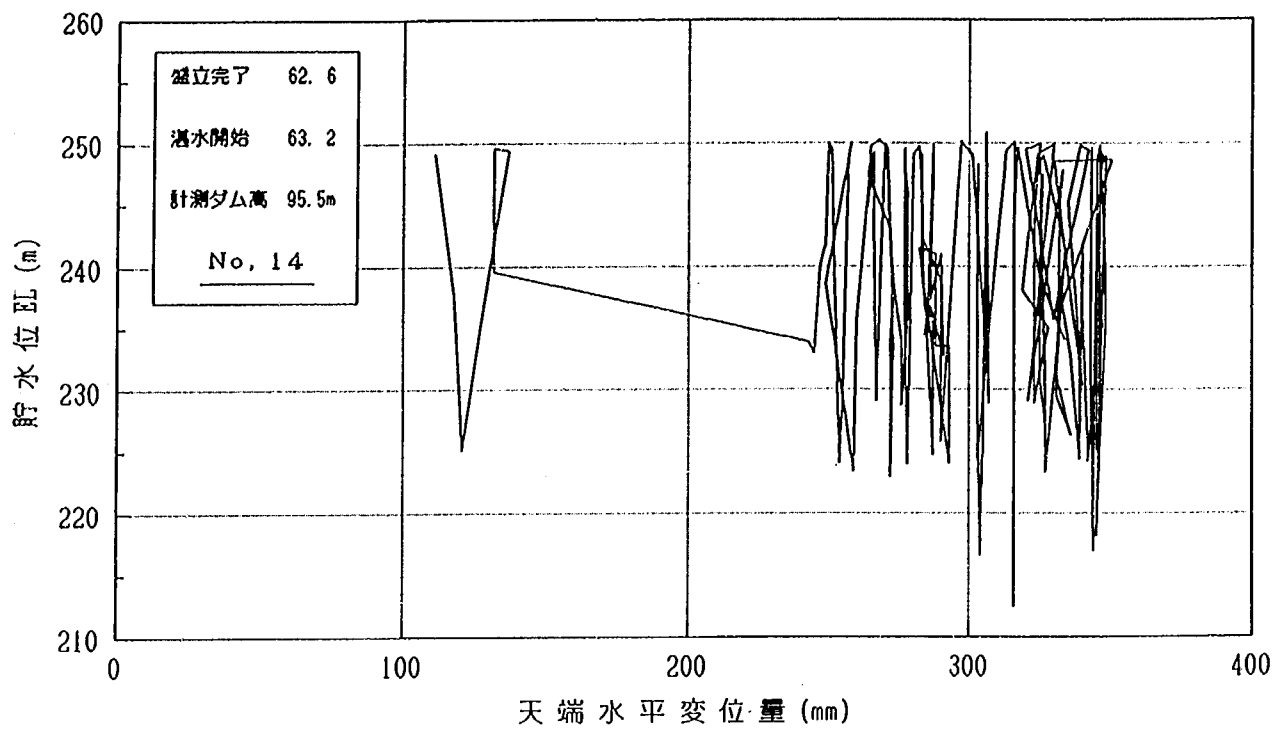


図-85 貯水位と天端水平変位量 (Bダム)

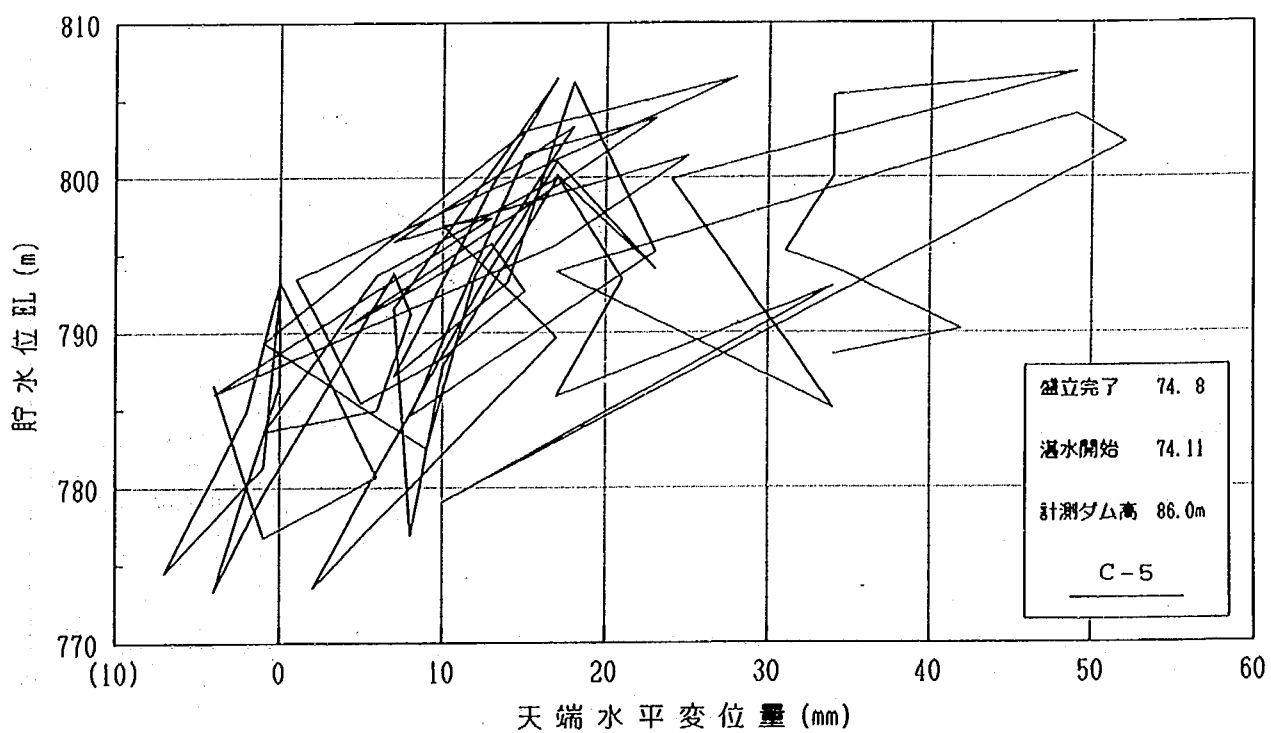


図-86 貯水位と天端水平変位量 (Cダム)

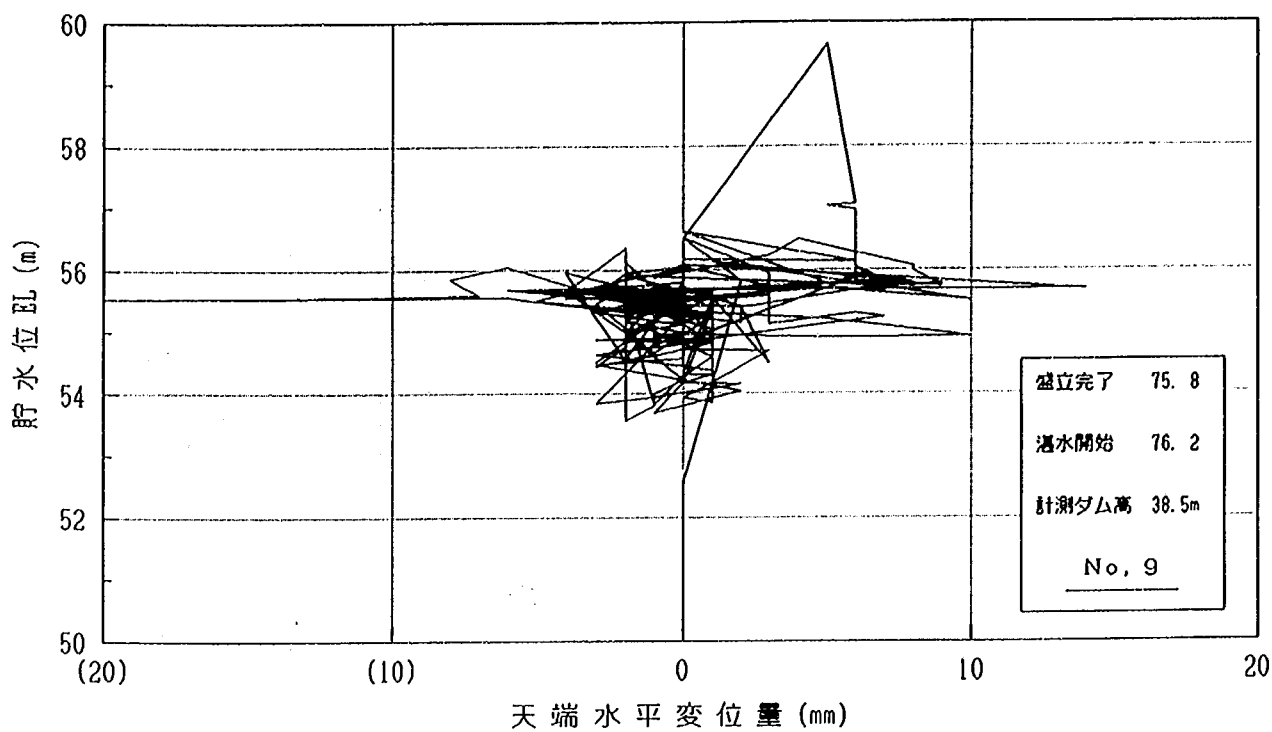


図-87 貯水位と天端水平変位量 (Dダム)

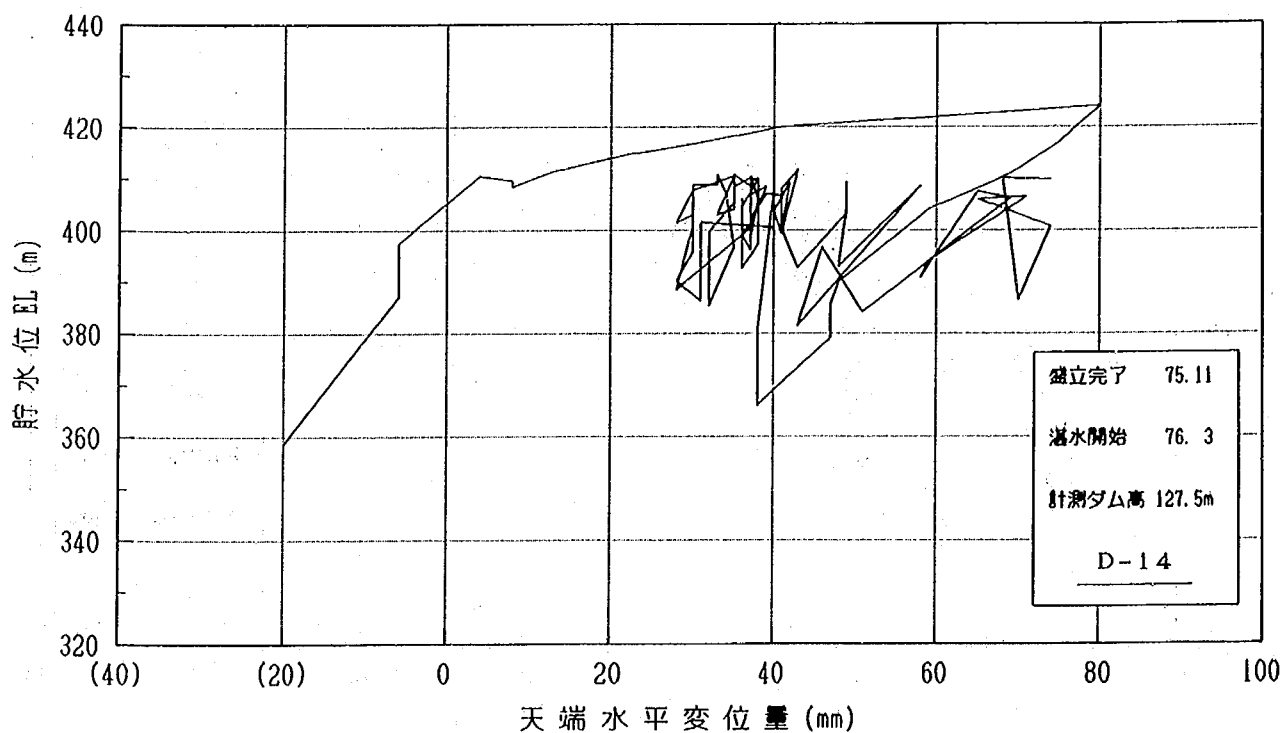


図-88 貯水位と天端水平変位量 (Eダム)

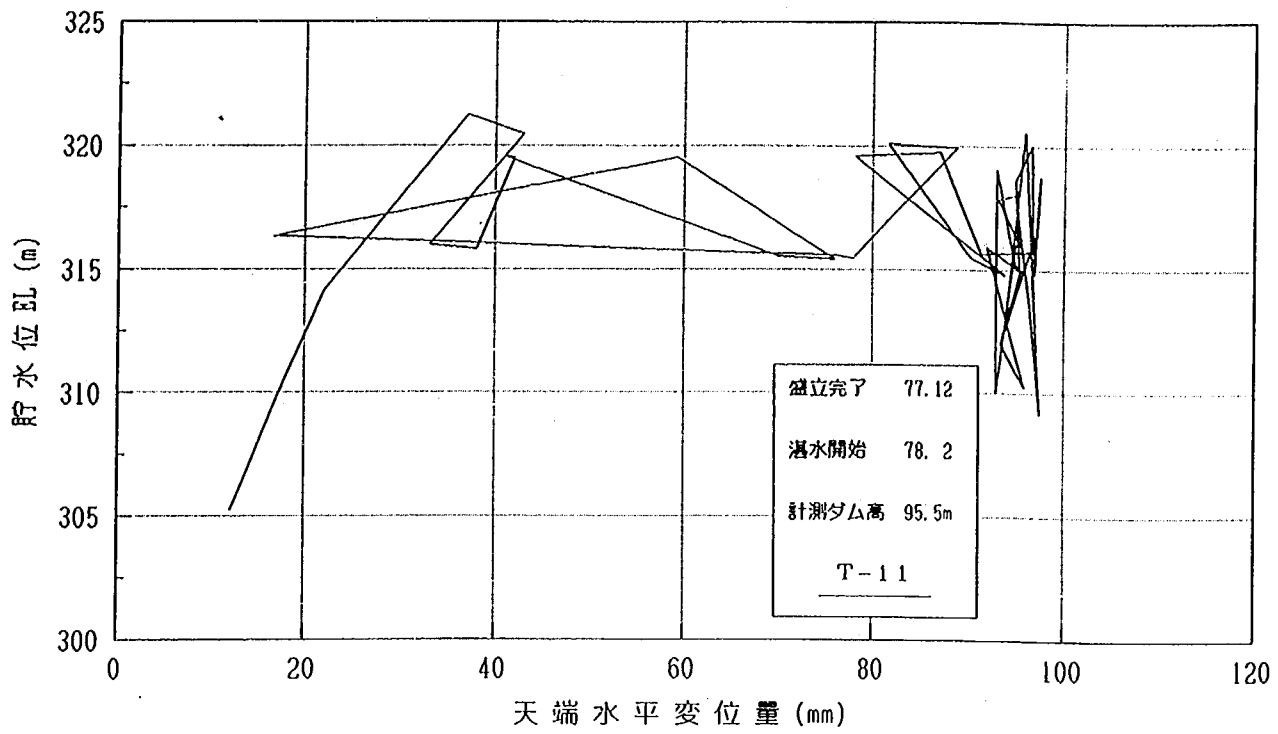


図-89 貯水位と天端水平変位量 (F ダム)

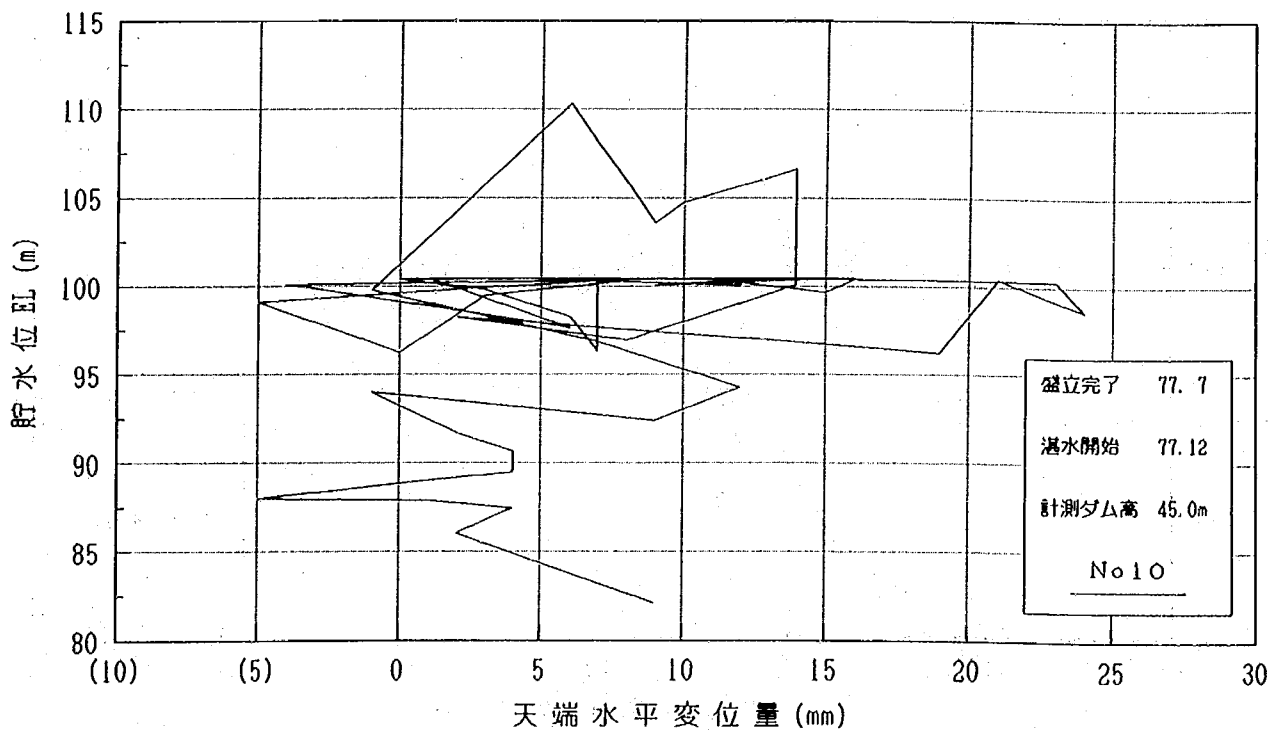


図-90 貯水位と天端水平変位量 (G ダム)

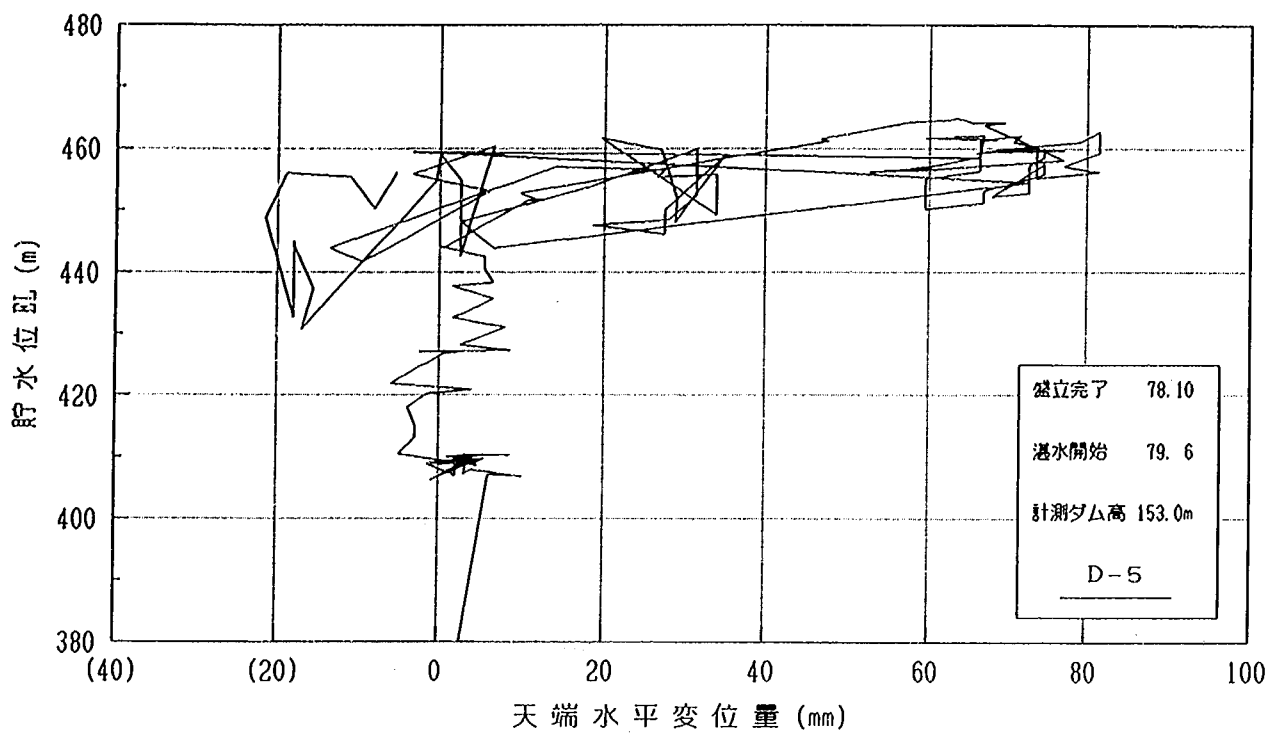


図-91 貯水位と天端水平変位量 (Hダム)

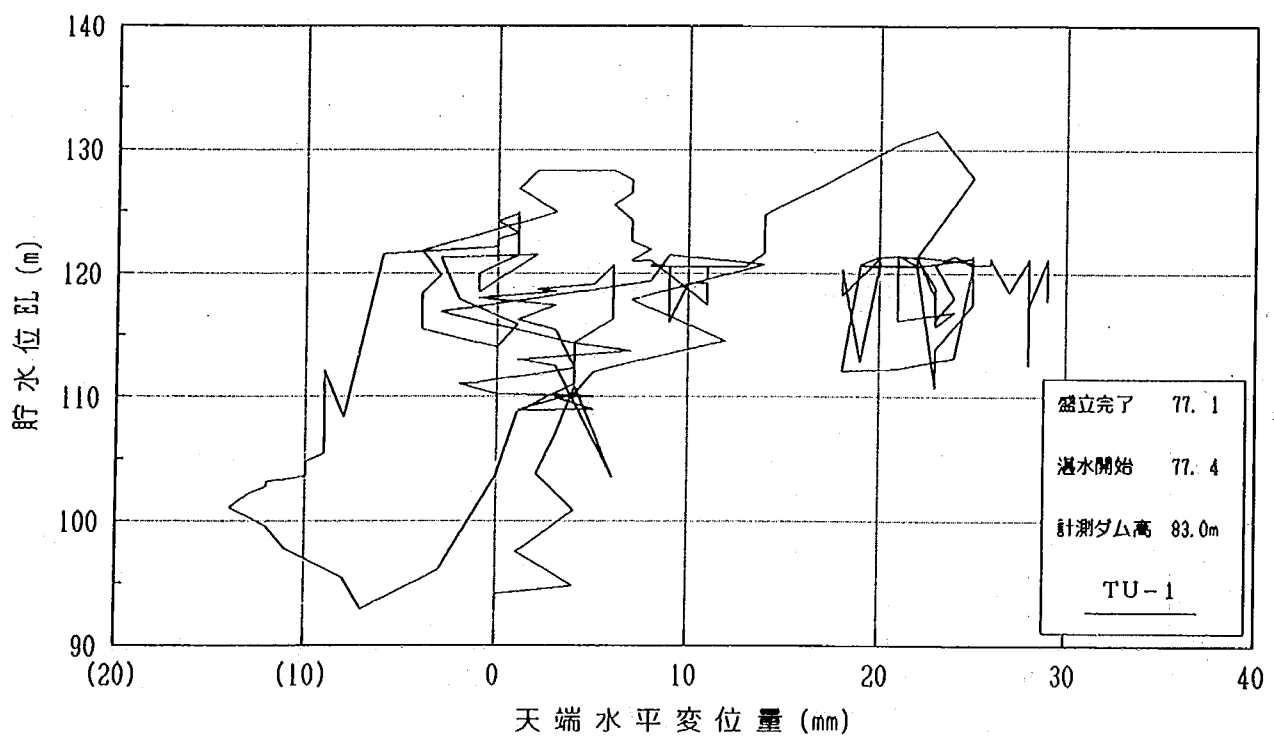


図-92 貯水位と天端水平変位量 (Iダム)

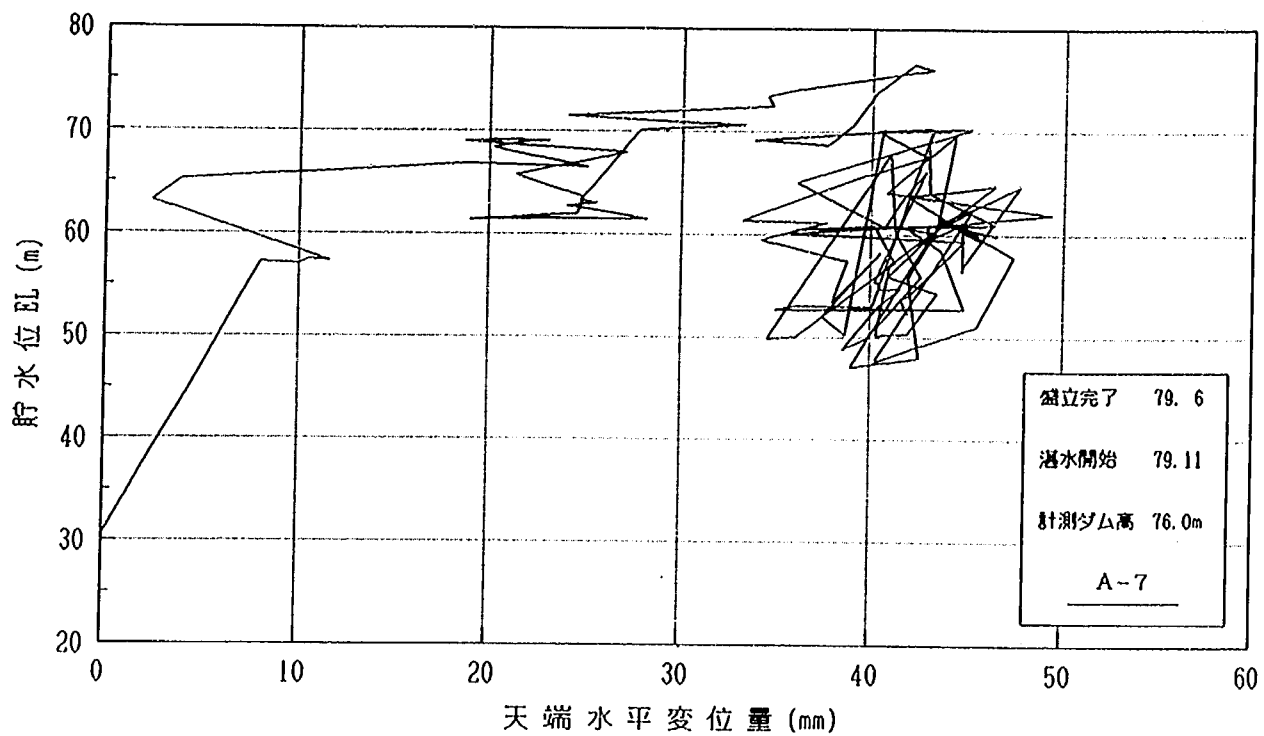


図-93 貯水位と天端水平変位量 (Kダム)

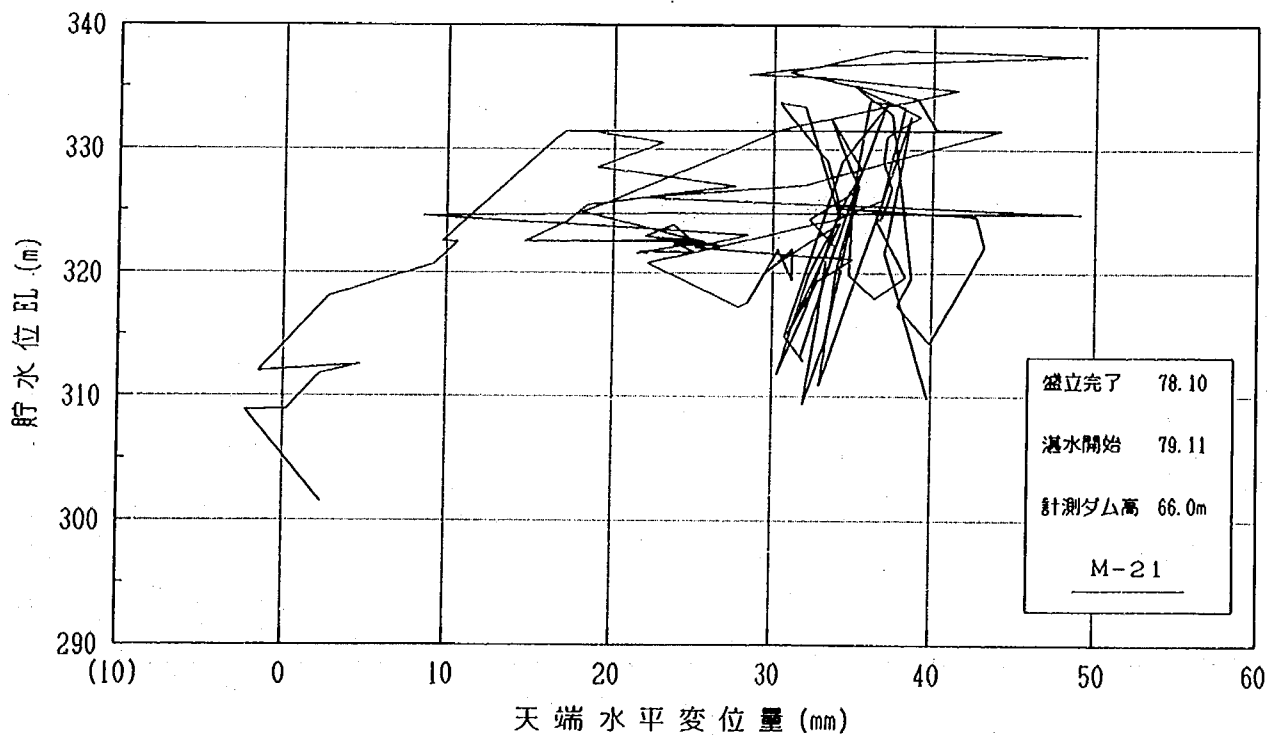


図-94 貯水位と天端水平変位量 (Lダム)

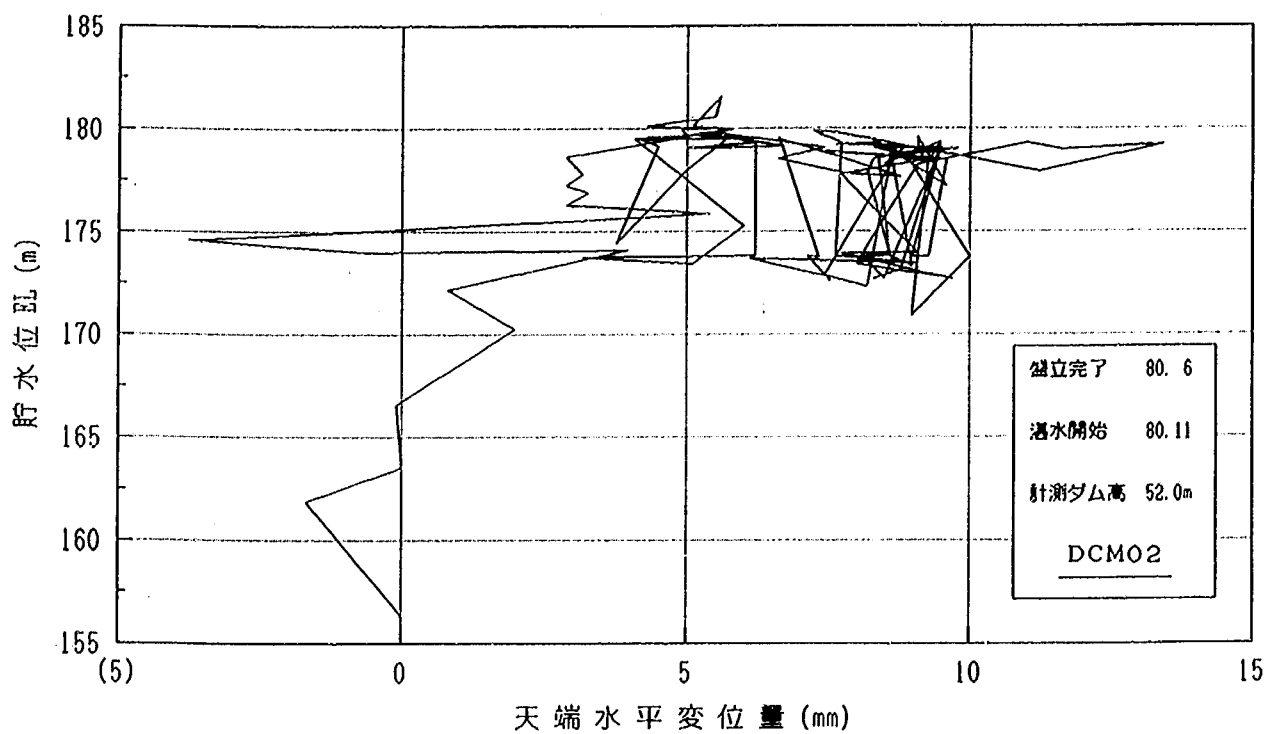


図-95 貯水位と天端水平変位量 (Mダム)

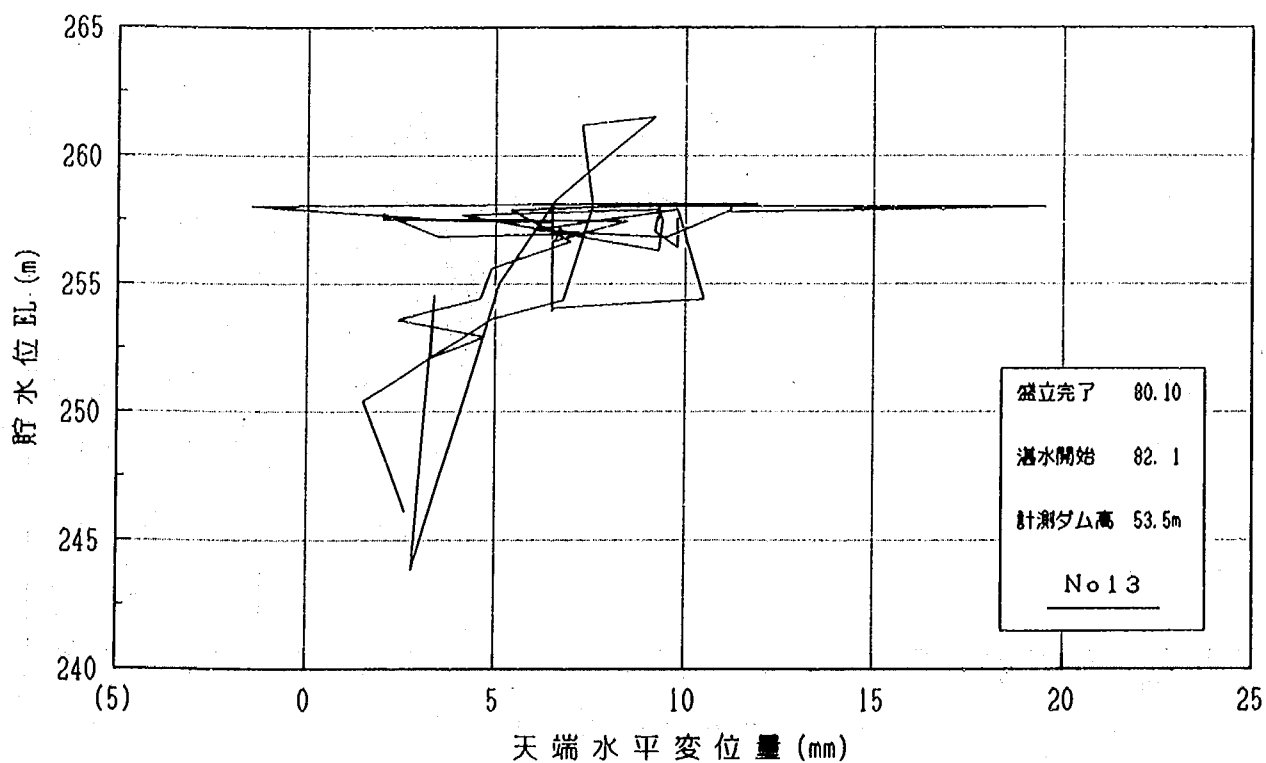


図-96 貯水位と天端水平変位量 (Nダム)

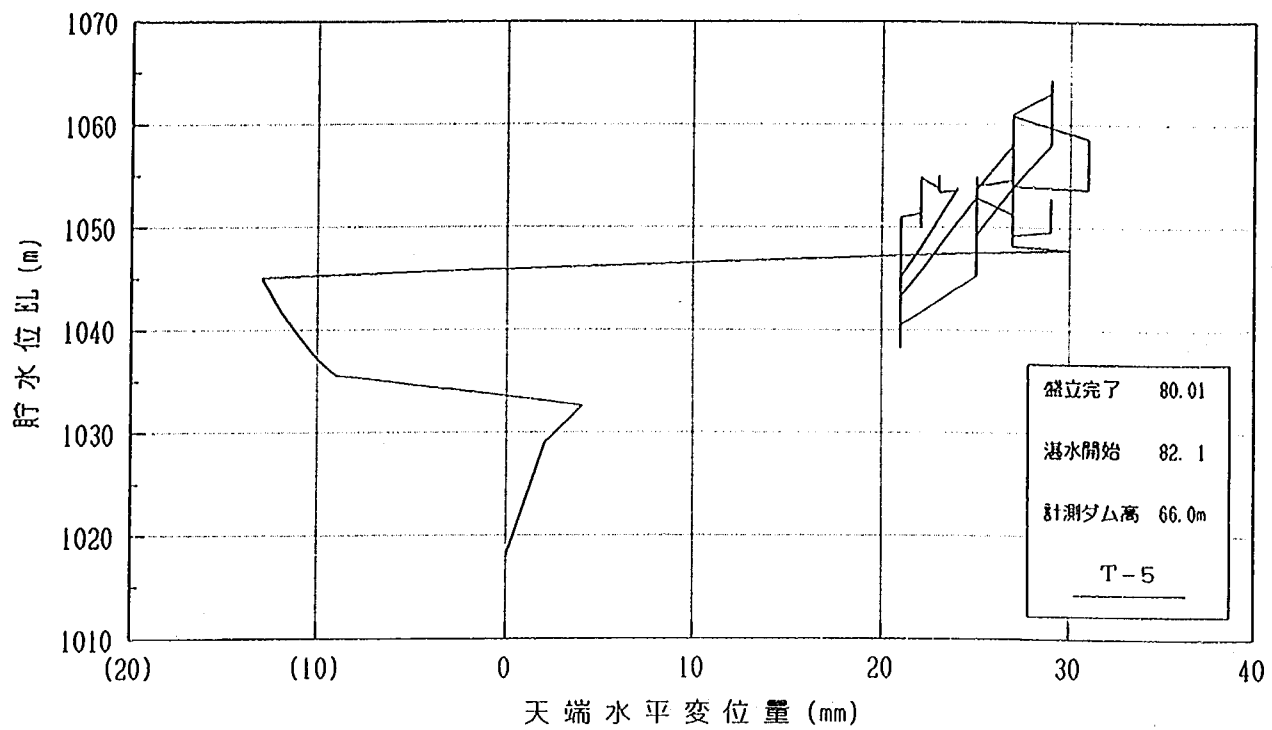


図-97 貯水位と天端水平変位量 (Oダム)

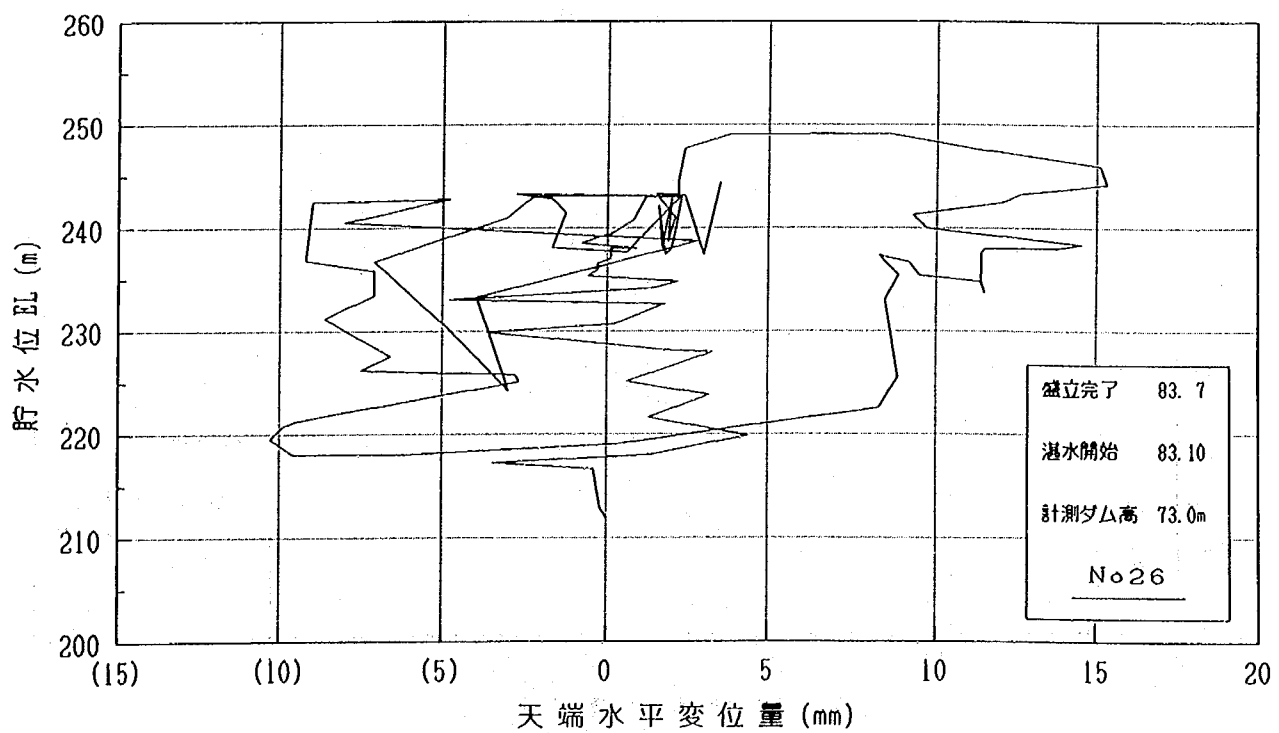


図-98 貯水位と天端水平変位量 (Pダム)

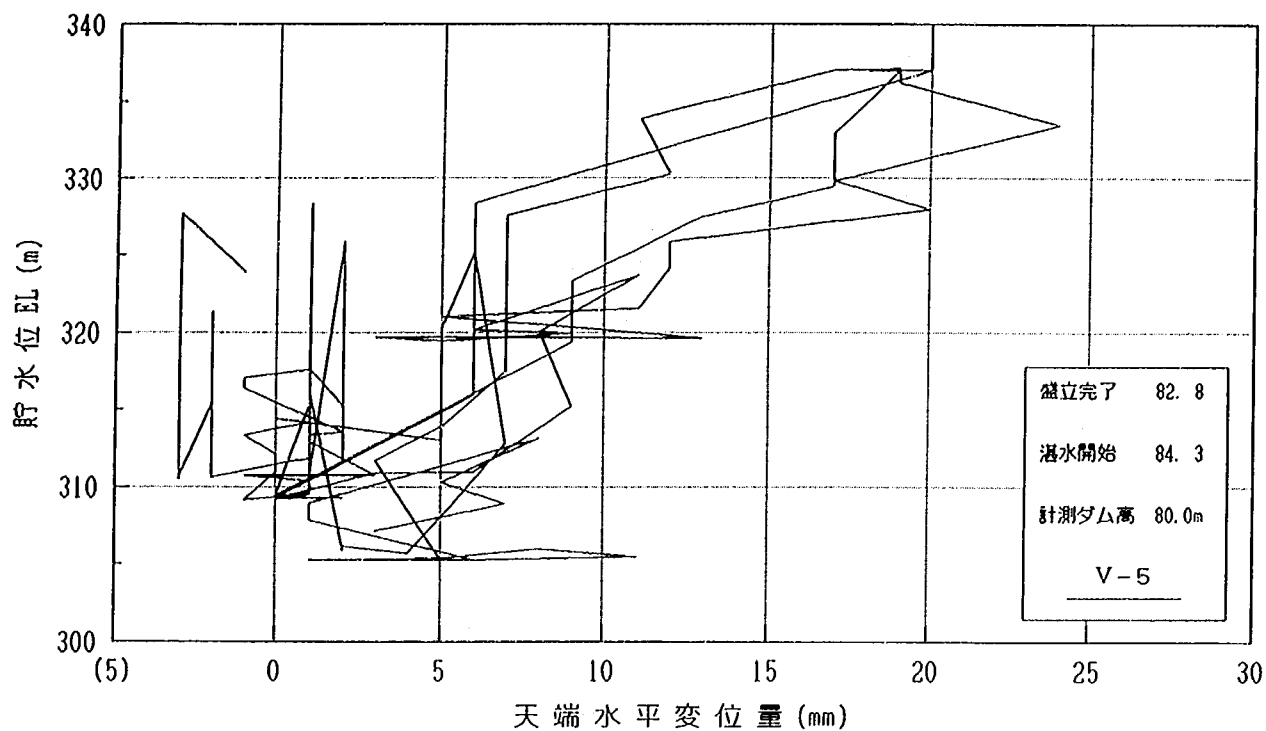


図-99 貯水位と天端水平変位量 (Qダム)

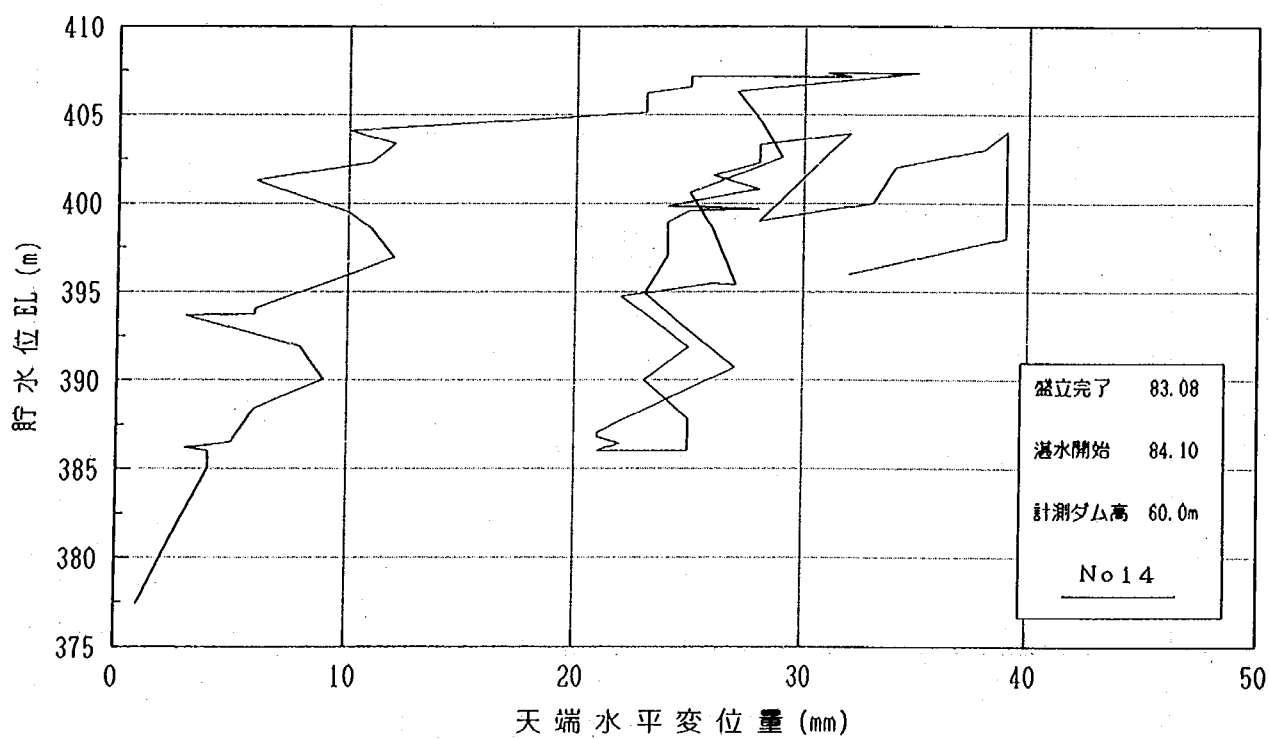


図-100 貯水位と天端水平変位量 (Rダム)

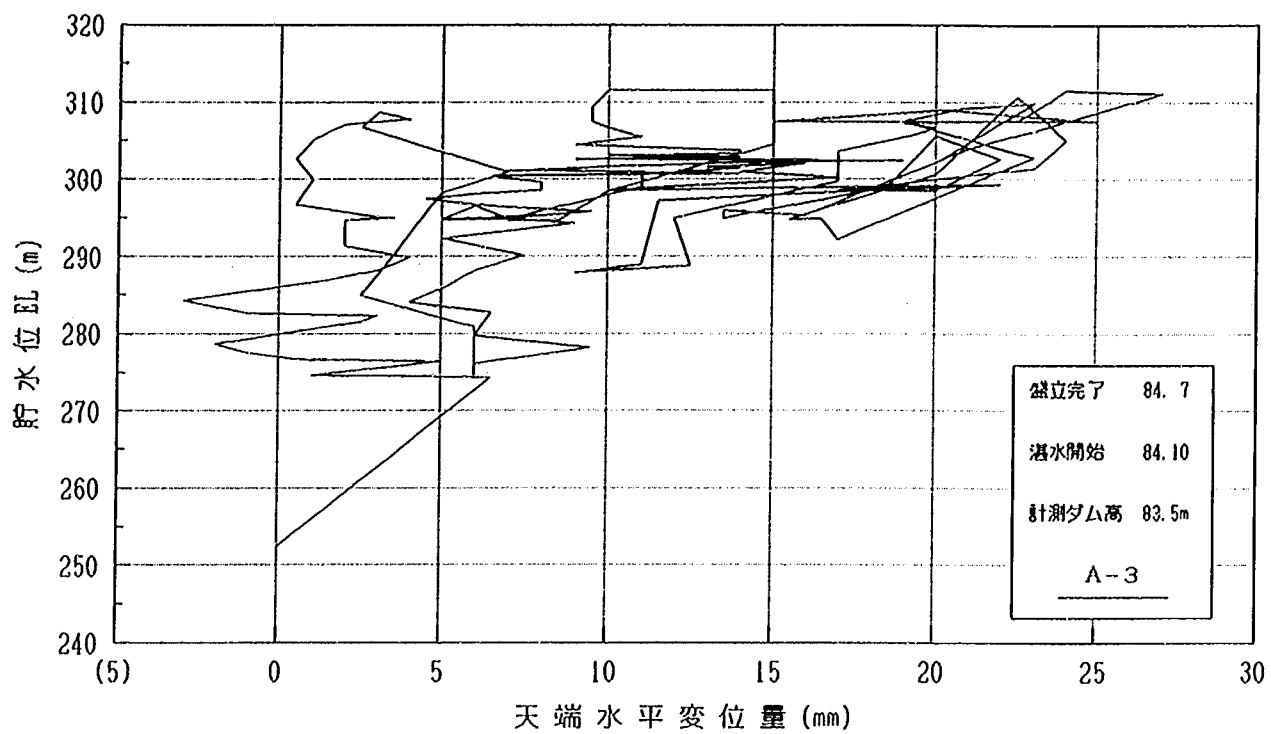


図-101 貯水位と天端水平変位量 (Sダム)

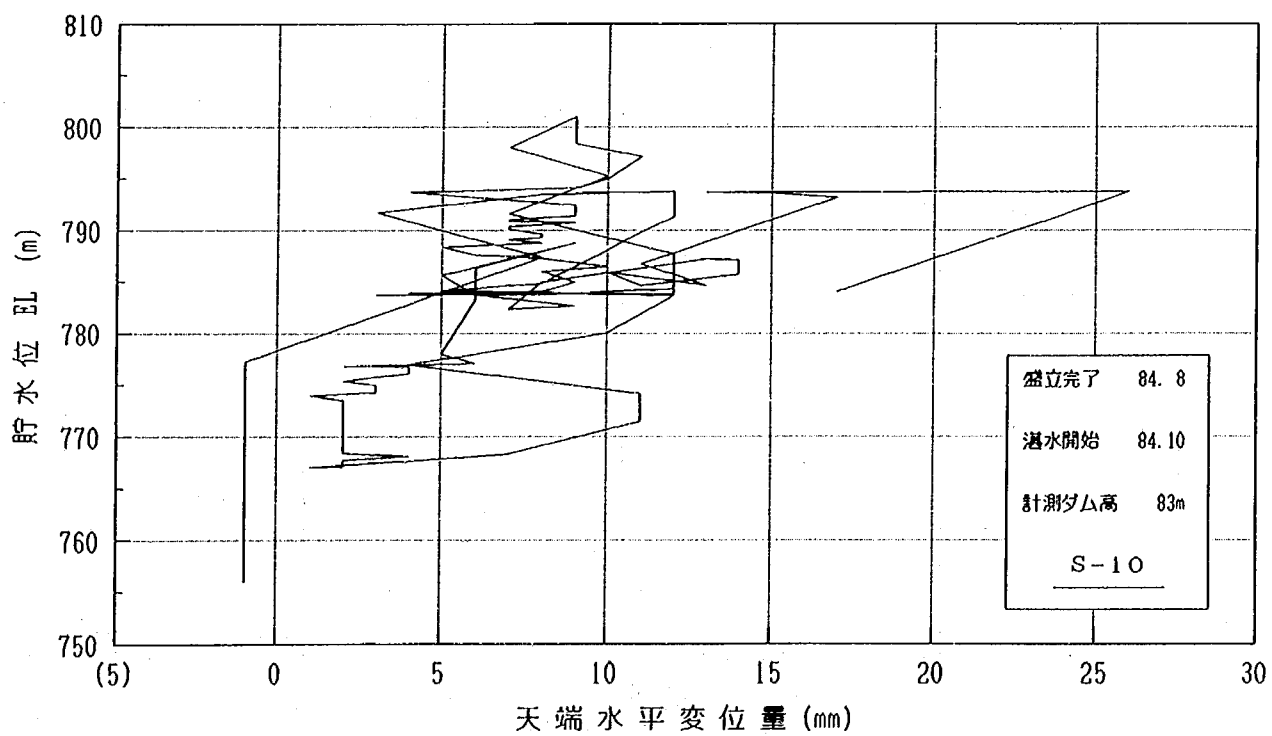


図-102 貯水位と天端水平変位量 (Tダム)

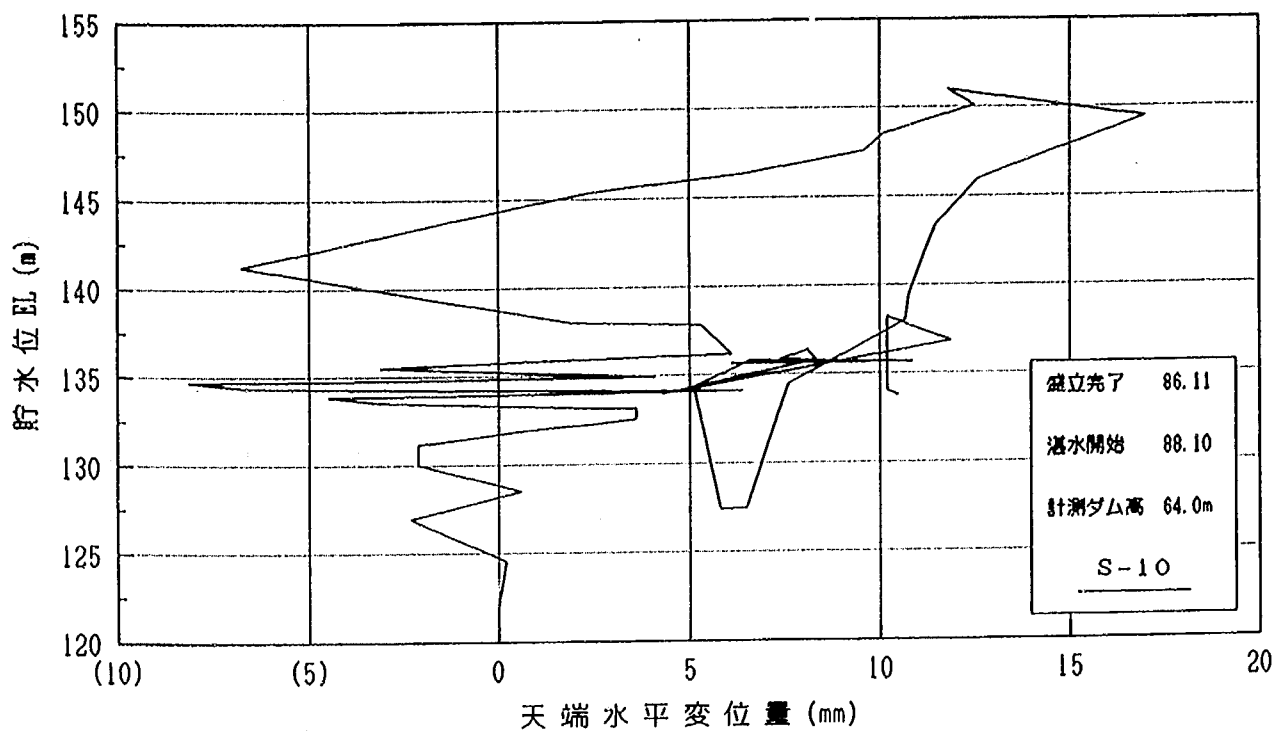


図-103 貯水位と天端水平変位量 (Uダム)

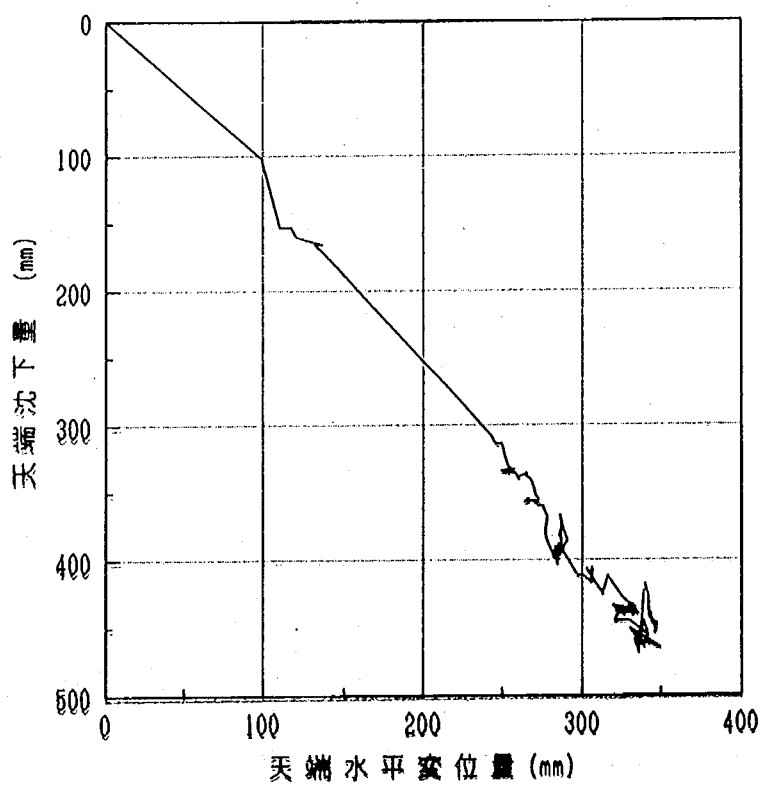


図-104 天端水平変位量と天端沈下量 (Bダム)

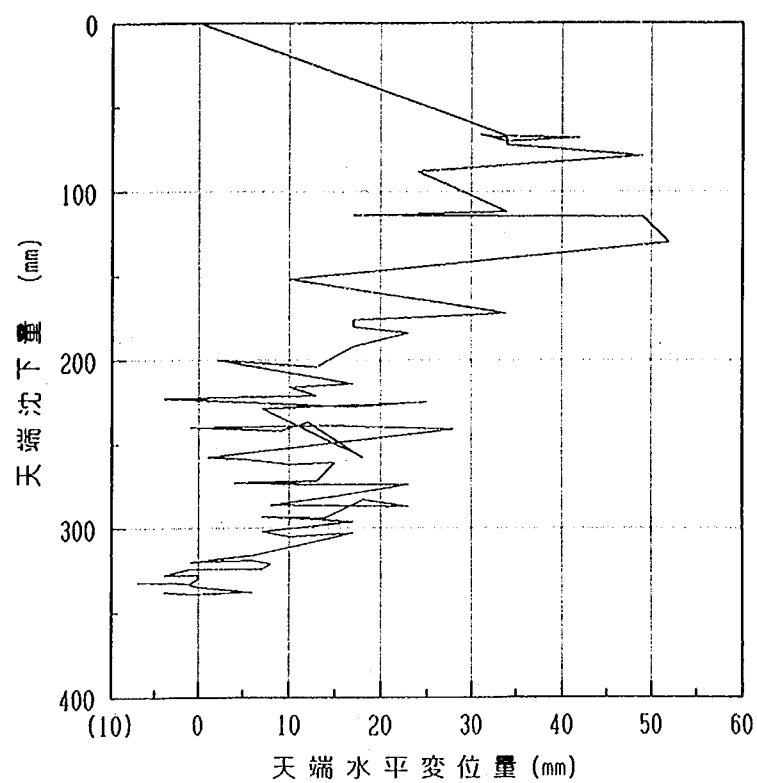


図-105 天端水平変位量と天端沈下量 (Cダム)

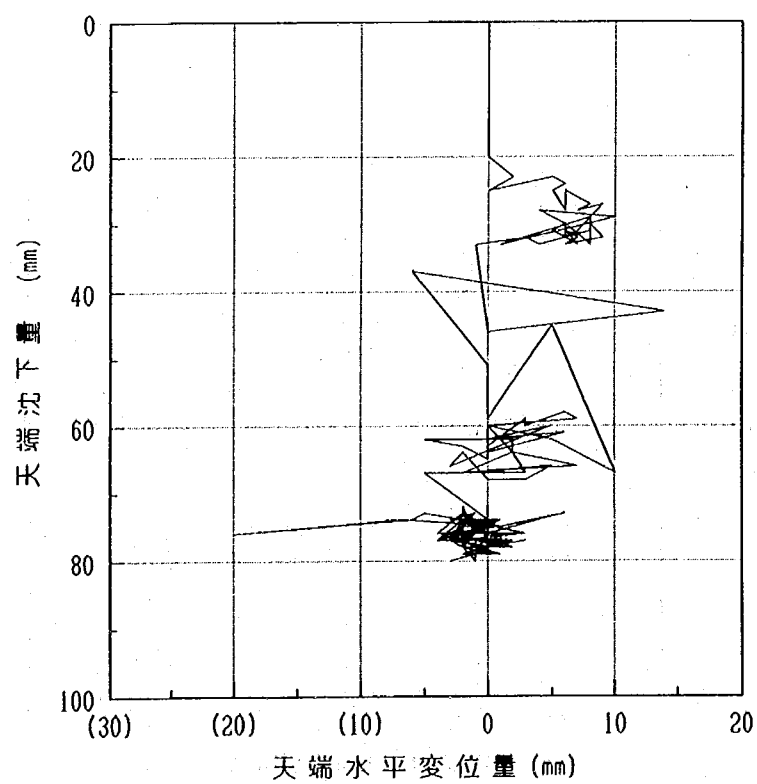


図-106 天端水平変位量と天端沈下量 (Dダム)

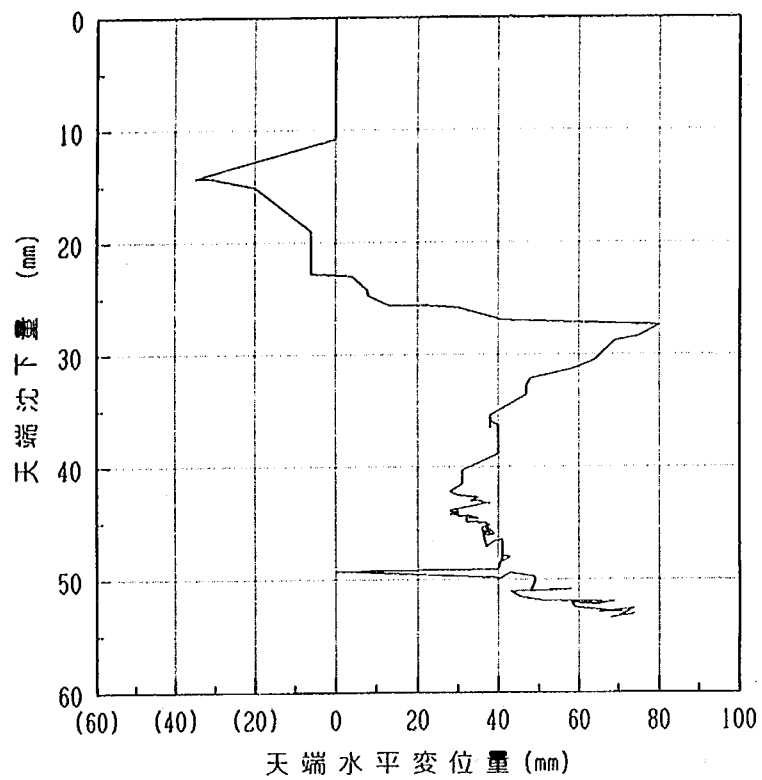


図-107 天端水平変位量と天端沈下量 (Eダム)

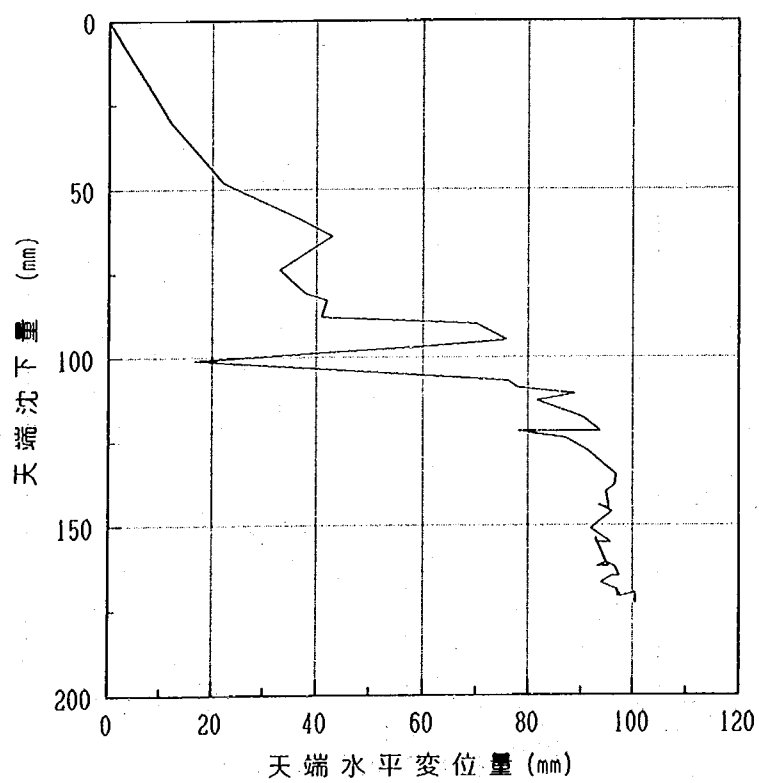


図-108 天端水平変位量と天端沈下量 (Fダム)

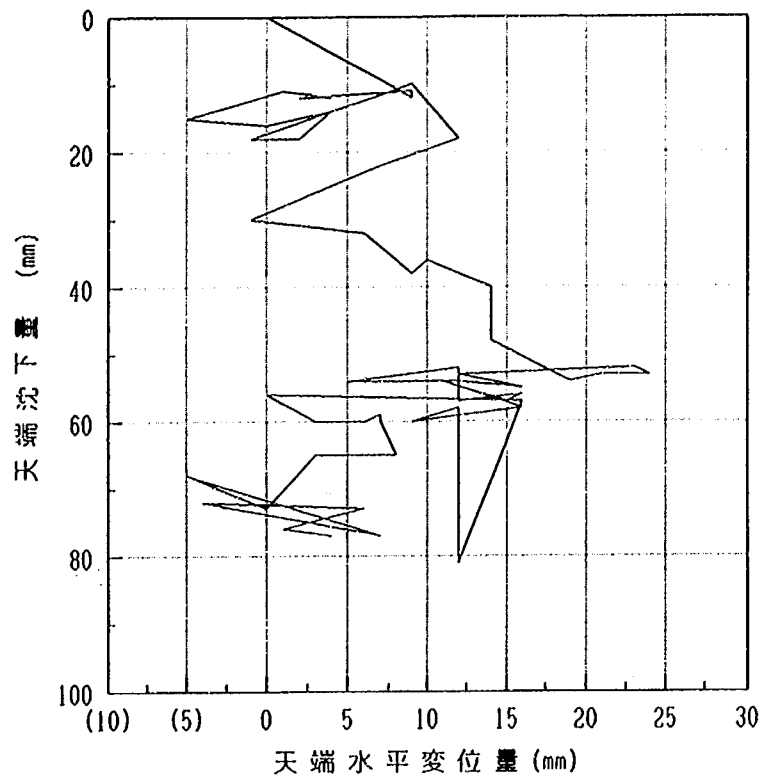


図-109 天端水平変位量と天端沈下量 (Gダム)

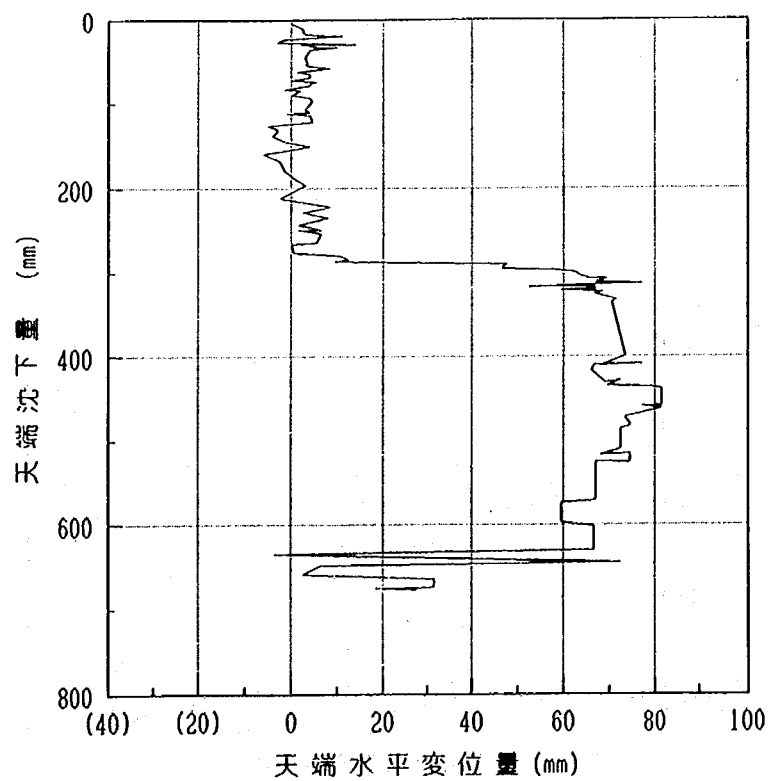


図-110 天端水平変位量と天端沈下量 (Hダム)

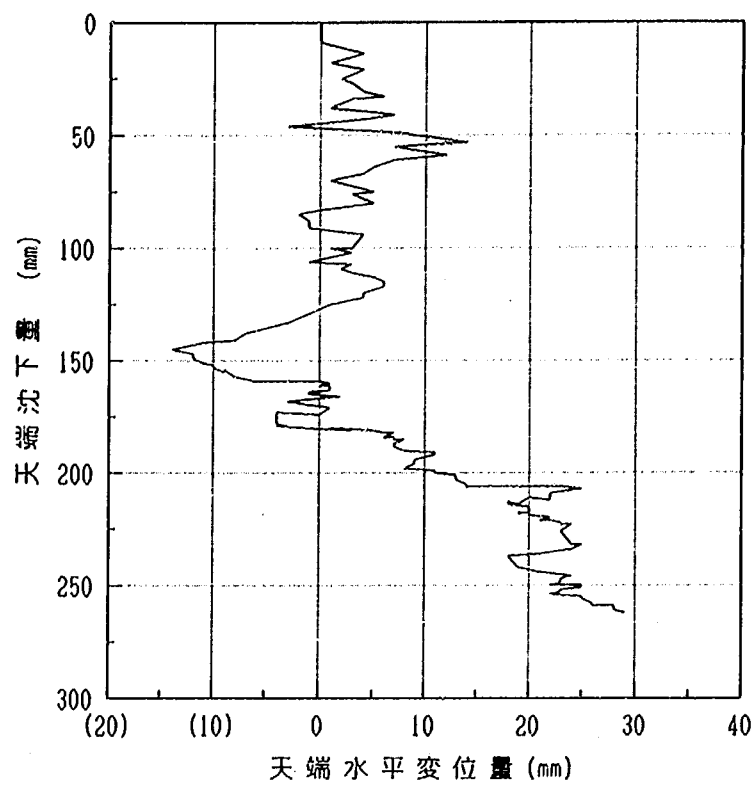


図-111 天端水平変位量と天端沈下量 (I ダム)

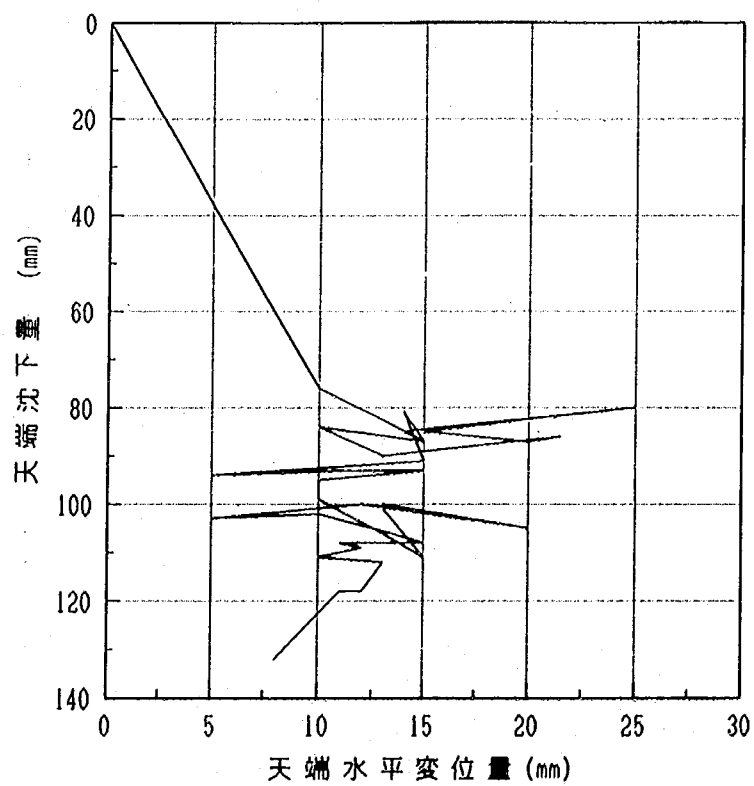


図-112 天端水平変位量と天端沈下量 (J ダム)

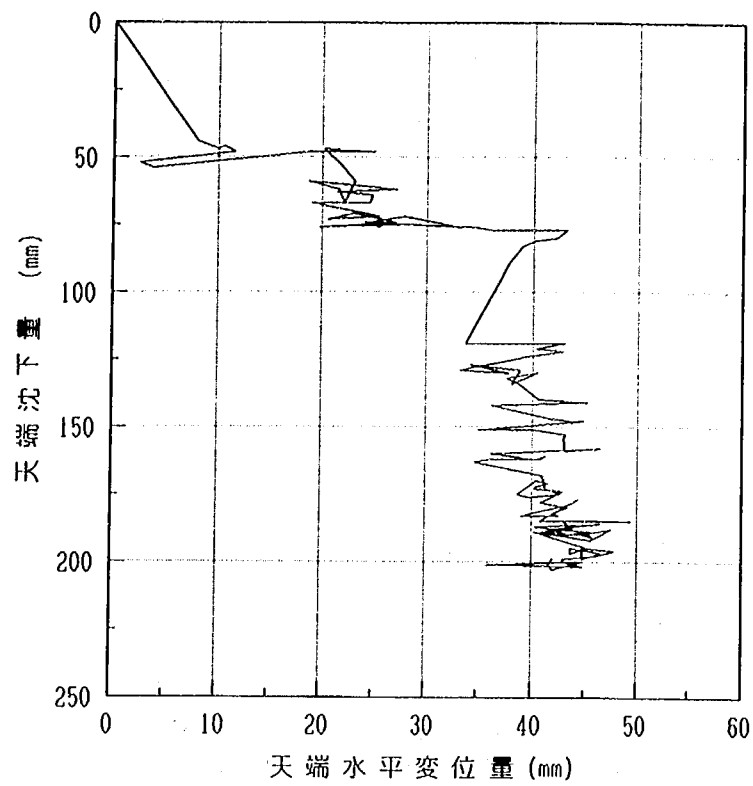


図-113 天端水平変位量と天端沈下量 (Kダム)

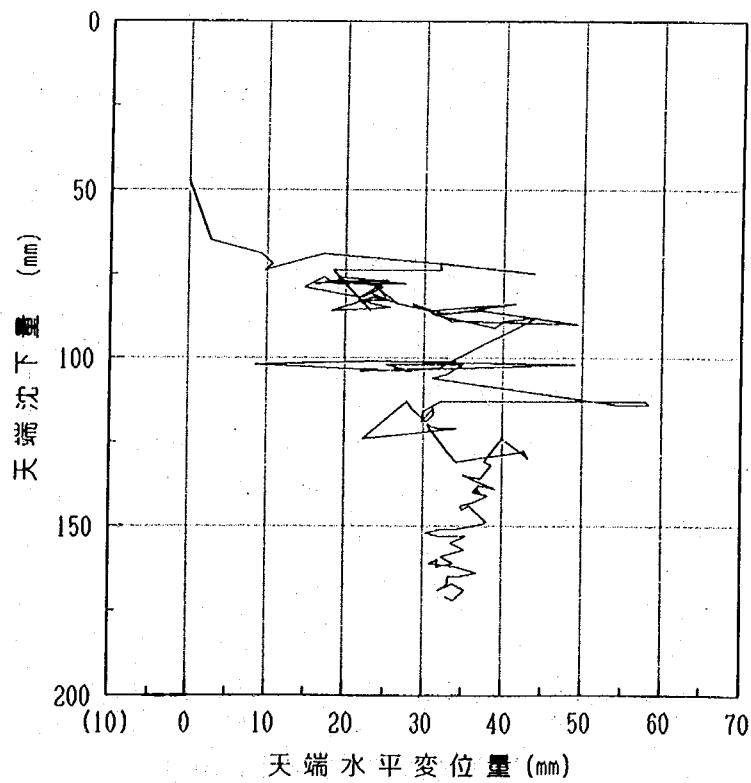


図-114 天端水平変位量と天端沈下量 (Lダム)

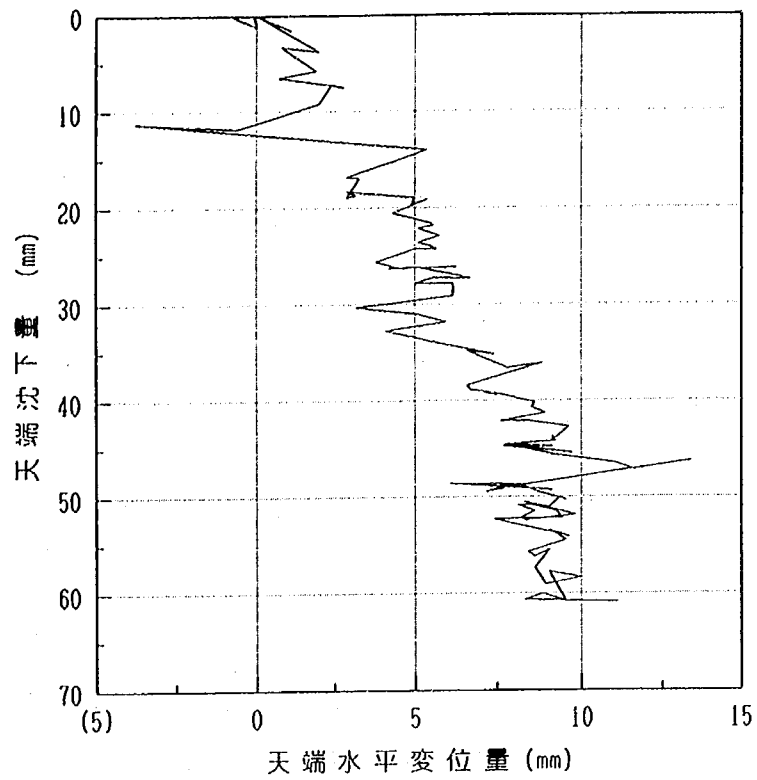


図-115 天端水平変位量と天端沈下量 (Mダム)

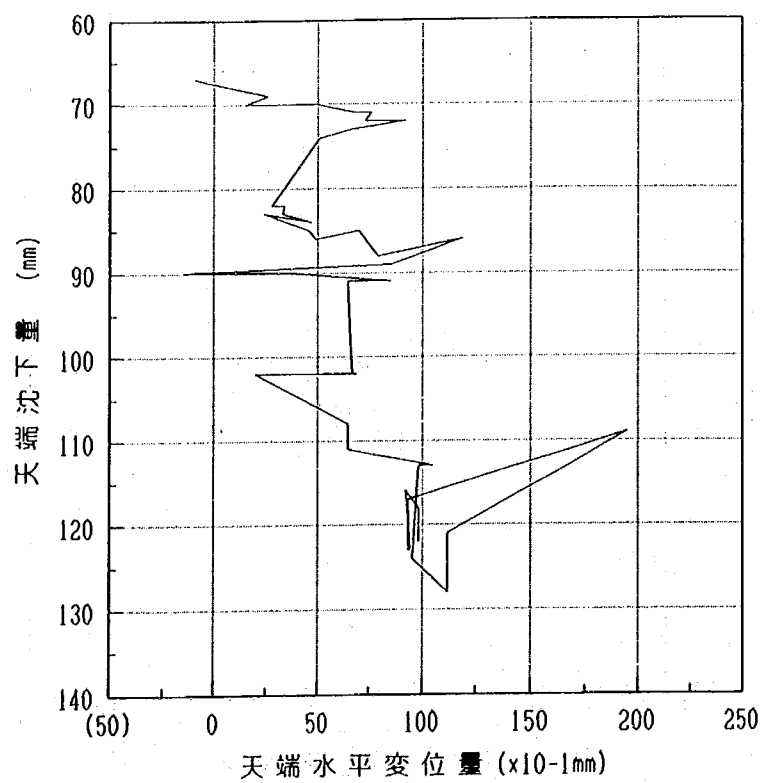


図-116 天端水平変位量と天端沈下量 (Nダム)

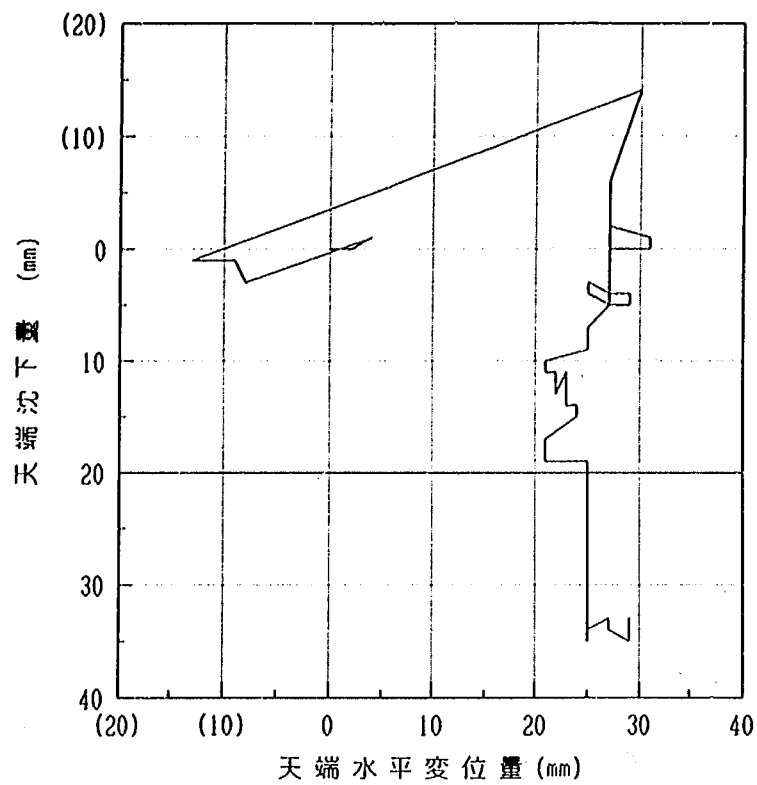


図-117 天端水平変位量と天端沈下量 (Oダム)

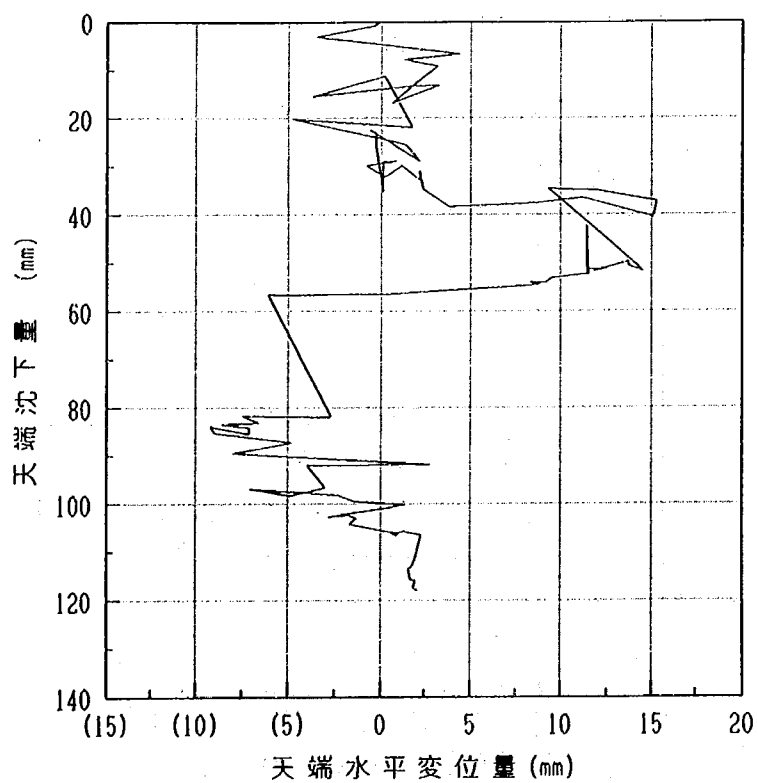


図-118 天端水平変位量と天端沈下量 (Pダム)

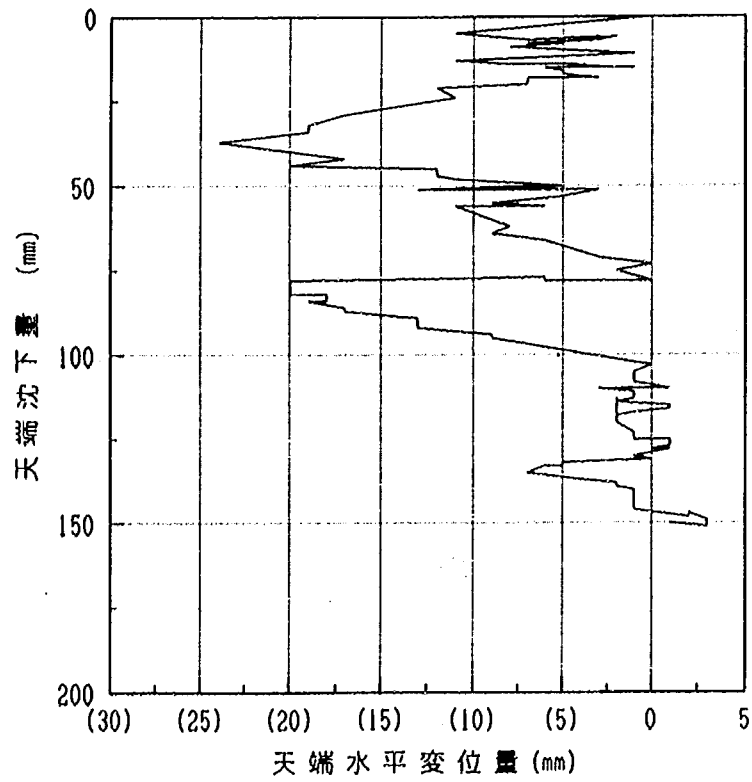


図-119 天端水平変位量と天端沈下量 (Qダム)

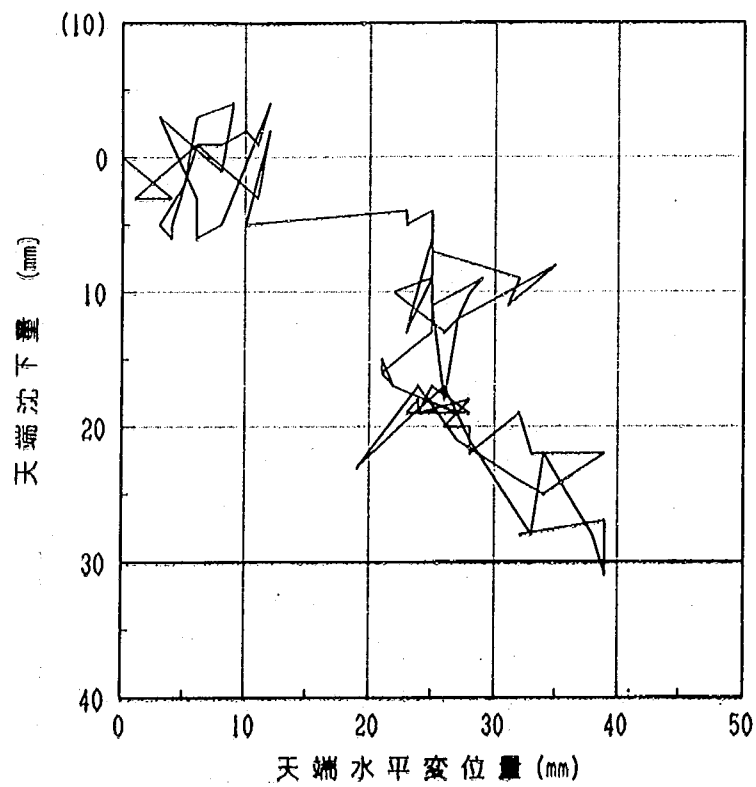


図-120 天端水平変位量と天端沈下量 (Rダム)

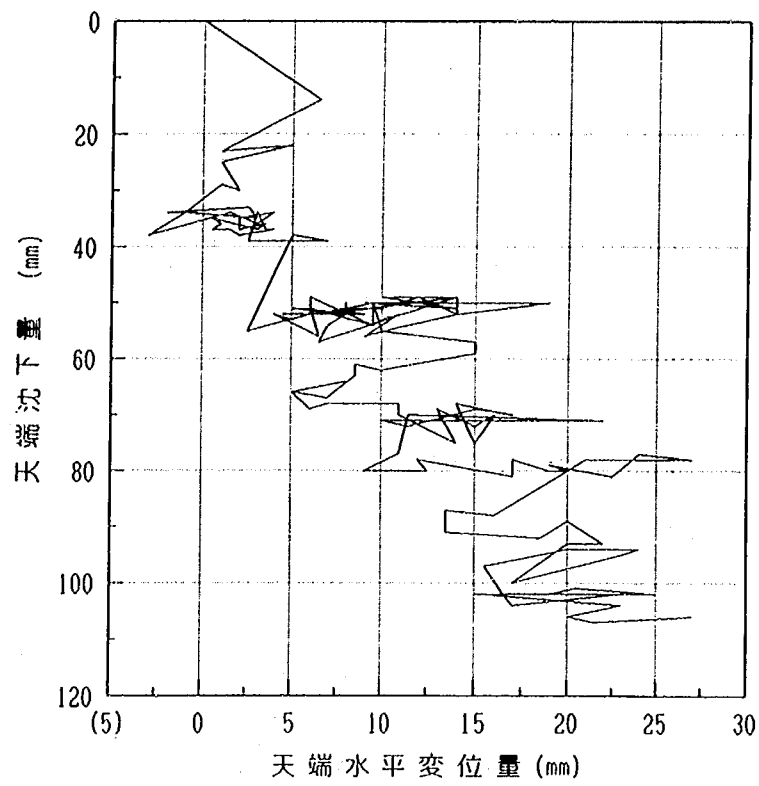


図-121 天端水平変位量と天端沈下量 (Sダム)

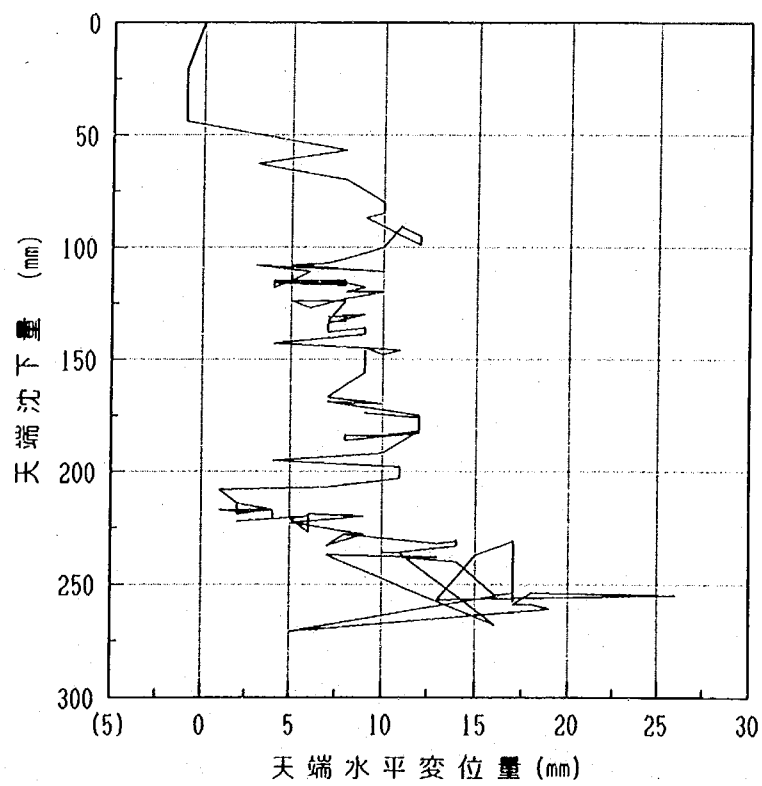


図-122 天端水平変位量と天端沈下量 (Tダム)

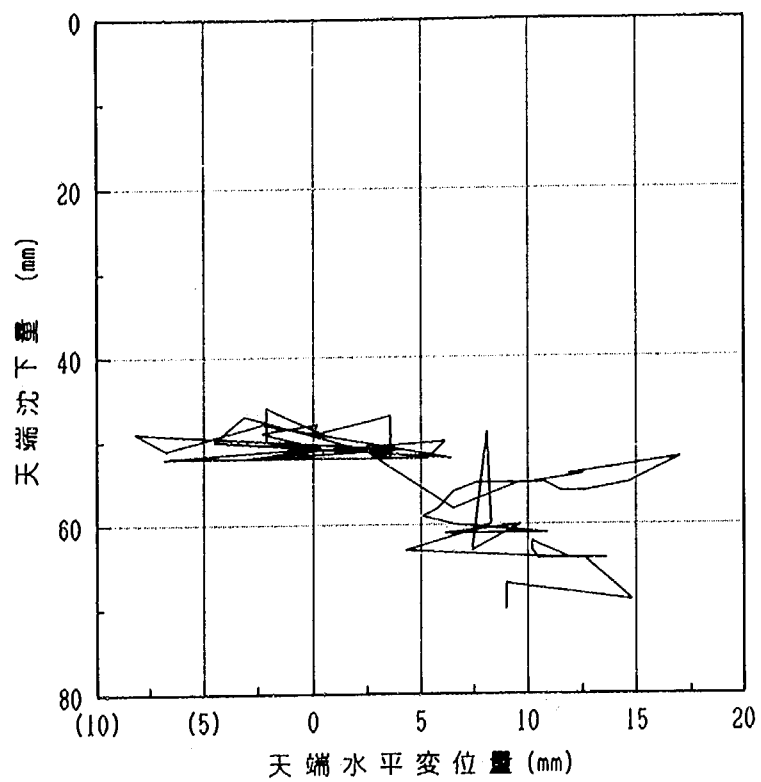


図-123 天端水平変位量と天端沈下量 (Uダム)

要 旨

松本徳久, 安田成夫, 伊藤基博

本報告は、実ダムにおいて測定された外部変位量のうち天端変位量に着目し、次の三つの項目に分けて整理を行った。

①マクロ的なダム天端の変位傾向の把握。つまり、各ダムにおける外部変位量を測定している標的のなかで、最大断面の天端部の標的の変位量に着目して、その沈下量、上下流方向水平変位量の変位傾向についてまとめた。②長期間にわたる変位予測方法の確立。つまり、その実測された沈下量の記録より、沈下傾向をつかむとともに、約100年後(40,000日)沈下量の予測を試み、他の研究例との比較を行った。③堤体内の応力-ひずみ関係の推定。つまり、ダムが貯水位変動を受けたときの天端水平変位量の実測記録と水圧荷重の関係から、逆解析を行い堤体内の応力-ひずみ関係を推定した。

キーワード: ロックフィルダム, 実測挙動, 外部変位, 逆解析

郵便はがき

41円切手
をはいて
下さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
フィルダム研究室
行

No. 3

No. 3

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第 3001 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印