

土木研究所資料

重回帰分析によるアーチダムの実測挙動解析
—真名川ダムを例に—

昭和63年 8 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 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。」

重回帰分析によるアーチダムの実測挙動解析 —真名川ダムを例に—

ダム構造研究室 室長 永山 功
片平 博

要 旨

真名川アーチダムを例にとり、変位と応力の実測挙動に対して重回帰分析を実施し、その分析精度と解析上の問題点について検討を行った。また、これに併せて荷重分割法、有限要素法による応力解析を行い、実測値との比較検討を行ったものである。

キーワード：アーチダム、実測解析、重回帰分析、荷重分割法、有限要素法

目 次

1. 概 説	1
2. 重回帰分析の理論	2
2.1 概 説	2
2.2 アーチダムの挙動に影響を与える因子	2
2.3 温度解析	3
2.4 重回帰分析の理論	5
2.4.1 概 説	5
2.4.2 重回帰式の解法	5
2.5 重回帰分析を行う場合の留意点	6
3. 真名川ダムの概要	8
3.1 ダムの概要と諸元	8
3.2 基礎岩盤とダムの設計	8
3.3 観測計器の配置	12
3.4 試験湛水と貯水池の運用時の水位状態	12
4. 温度解析	15
4.1 概 説	15
4.2 堤体内の温度分布	15
4.3 温度解析結果	22
4.3.1 平均温度の履歴	22
4.3.2 等置温度勾配の履歴	24
4.3.3 残差温度の履歴	25
5. 変位の重回帰分析	27
5.1 概 説	27
5.2 解析に用いる因子とその条件設定	27
5.3 解析結果と考察	29
5.3.1 因子の条件設定と解析結果の比較	29
5.3.2 解析結果から得られたダムの変位	34

6. 応力の重回帰分析	39
6.1 概 説	39
6.2 解析に用いる因子とその条件設定	39
6.3 解析結果と考察	42
6.3.1 因子の条件設定と解析結果の比較	42
6.3.2 解析結果から得られるダムの応力	47
7. 重回帰分析結果と荷重分割法, 有限要素法による解析結果との比較	65
7.1 概 説	65
7.2 貯水圧による変位, 応力の比較	67
7.3 温度荷重による変位, 応力の比較	73
7.4 考 察	77
8. ま と め	79

1. 概 説

実物のダムの挙動は、いかなる構造解析よりも正確なデータを提供してくれる。したがって、ダムの実測挙動を分析することは、ダムの設計の合理化を図る上で最も有効な方法であるといえることができる。ダムの堤体内には一般に数多くの計器が埋設されている。これらの計器は、①施工管理（ダムが設計どおりに施工されているかどうかの管理）、②安全管理（ダムが設計どおりに挙動しているかどうかの管理）を目的として設置されることが多いが、③ダムの設計の合理化を図ることもその大きな目的の一つである。特にアーチ式コンクリートダム（以下、アーチダムと略す）では、その構造特性が複雑なことから、③の目的をもって数多くの計器が埋設されているのが一般である。

しかし、ダムの挙動は、貯水池の状態（貯水位）、気象状態（温度、降雨）、その他多くの外的要因による影響を受けるため、埋設計器によって測定されたデータからダムの挙動を解釈することは必ずしも容易ではない。このため、測定されたデータを適当な方法で加工処理することによって、その解釈が行われている。

これを実測挙動解析といい、一般に重回帰分析の手法を用いた解析が行われている。

当研究室においても、ダムの設計の合理化を目指して過去にいくつかのアーチダムの実測挙動について重回帰分析が行われている。ところが、重回帰分析の解析精度そのものについて検討が加えられた例は、ほとんどないようである。しかし、実測挙動解析によってアーチダムの構造設計の合理化を図っていくには、あらかじめその精度について検討しておくことが不可欠であると考えられる。そこで、本報文では、建設省近畿地方建設局によって建設された真名川ダムを例に、アーチダムの実測挙動についての重回帰分析を行い、その解析上の問題点について検討を加えた。また、これと併せて、荷重分割法、有限要素法による応力解析を実施し、実測値と解析値の比較検討を行った。以下、これらの検討結果について述べる。

2. 重回帰分析の理論

2.1 概 説

アーチダムの挙動（変位、応力など）は、貯水による水圧荷重、堤体温度の変化による温度荷重など、種々の荷重の作用結果として生じる。このように、ある応答 y がいくつかの因子 x_n ($n = 1, 2, \dots, N$) の作用結果として与えられる場合、これらの測定結果から応答 y に対する各因子 x_n の影響を定量的に評価する統計学的手法を重回帰分析という。

以下、アーチダムの実測挙動解析に必要となる重回帰分析の理論についてその概要を述べるものとする。

2.2 アーチダムの挙動に影響を与える因子

重回帰分析を行うにあたっては、まず最初に解析しようとする挙動（変位、応力など）に影響を与える因子を的確に選定する必要がある。アーチダムの挙動（変位、応力など）は、ダムに作用する荷重とダムおよび基礎岩盤の力学特性によって表わすことができる。

ダムに作用する主たる荷重には、①水圧荷重、②温度荷重がある。水圧荷重の大きさは貯水位によって一義的に表わすことができる。温度荷重の大きさは、アーチダムのようにシェル構造で近似できる構造物の場合には、任意の断面ごとに、上下流方向の温度分布から、軸力の大きさを規定する①平均温度、曲げモーメントの大きさを規定する②等値温度勾配、拘束応力の大きさを規定する③残差温度の3つ（図-2.1参照）によって表わすことができる。

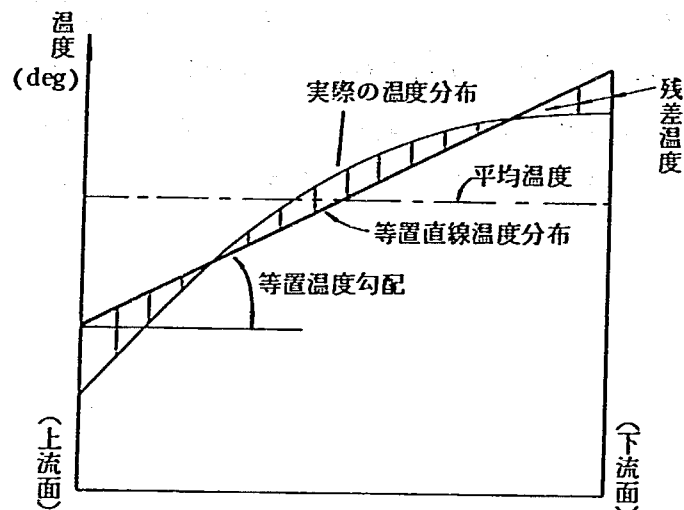


図-2.1 温度荷重の分割

一方、ダムおよび基礎岩盤の力学特性は、①弾塑性体としての特性、②粘弾性体としての特性に大別することができる。弾塑性体としての特性は、重回帰分析における取扱いが困難であることから、その挙動は便宜的に非線形弾性体によって表現している。また、ここで述べる重回帰分析のように荷重経路が既に設定されている場合には、クリープ変形を利用して、弾塑性体とし

ての挙動を便宜的に表わすことも可能である。粘弾塑性体としての特性は、クリープ変形によって表わすことができる。クリープ変形の大きさは①荷重の載荷時刻と②載荷の継続時間によって表わすことができる。

以上をとりまとめると、アーチダムの挙動（変形、応力など）を規定する因子は次のようになる。

- ① 貯水位（ h ）
- ② 平均温度（ T_M ）
- ③ 等置温度勾配（ T_G ）
- ④ 残差温度（ T_R ）
- ⑤ 荷重の載荷時刻（ K ）と載荷継続時間（ $t-K$ ）

2.3 温度解析

重回帰分析を行うに際しては、任意の断面内における堤体温度の測定データから、図-2.1に示す3つの温度、すなわち断面内の平均温度（ T_M ）、等置温度勾配（ T_G ）、残差温度（ T_R ）を求めておかなければならない。これを求める解析を温度解析という。

堤体内に埋設されている温度計の測定値から断面内の温度分布を求めるには、一般にLagrangeの補間式が用いられる。いま、図-2.2に示すように断面の中心軸に座標原点をとり、温度計の埋設位置の座標をそれぞれ x_n （ $n=1, 2, \dots, N$ ）、温度計の測定値をそれぞれ T_n （ $n=1, 2, \dots, N$ ）とすると、任意の点 x での温度 $T'(x)$ はLagrangeの補間式によって次のように表わすことができる。

$$T'(x) = \sum \frac{\pi_n(x)}{\pi_n(x_n)} T_n \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ここに

$$\pi_n(x) = (x-x_1)(x-x_2)\dots\dots(x-x_{n-1})(x-x_{n+1})\dots\dots(x-x_N) \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

である。

断面内の温度分布 $T'(x)$ が求まれば、断面内の平均温度 T_M 、等置温度勾配 T_G 、残差温度 T_R は次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} T_M &= \frac{1}{D} \int T'(x) dx \\ T_G &= \frac{12}{D^2} \int (T'(x) - T_M) x dx \\ T_R &= T'(x) - T_M - T_G x \quad \dots\dots\dots (2.3) \end{aligned}$$

ここに D は断面の厚さである。

Lagrangeの補間式は $N-1$ 次の多項式であり、最大 $N-2$ 個までの極値をもつことが可能で

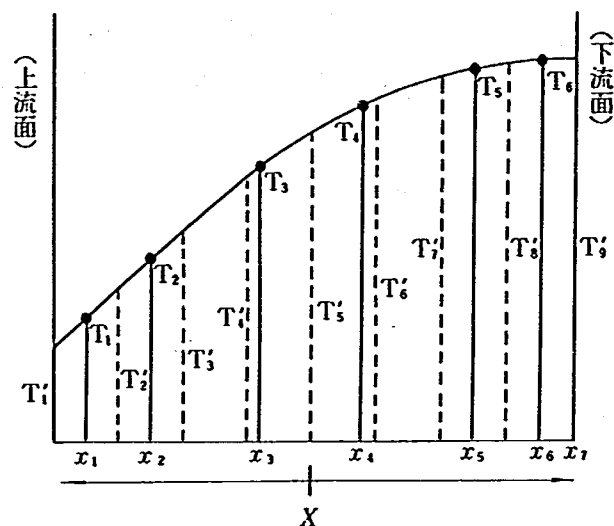


図- 2.2 堤体内の温度分布

ある。このため、温度の測定値によっては図- 2.3 のように明らかに不適切と思われるような補間を行うことがある。したがって、解析にあたっては補間関数の具体的な形状についての確認が不可欠である。図- 2.3 のような補間が行われるような場合には、Lagrange の補間式に代わって最小自乗法などを用い、適当な形状をもつ関数で温度分布を近似する必要がある。

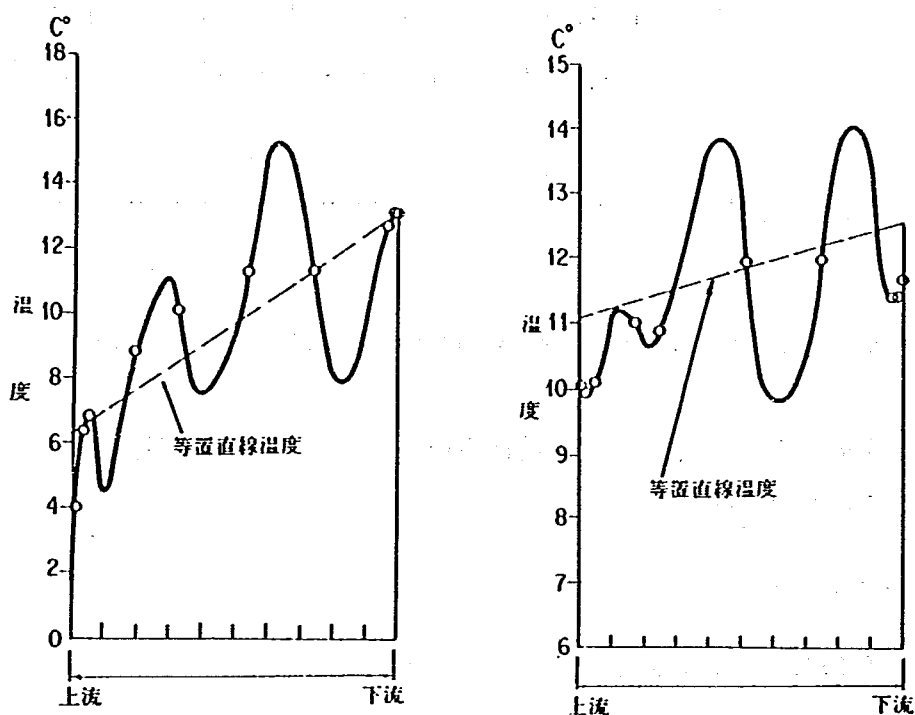


図- 2.3 不適切な温度解析結果の例

2.4 重回帰分析の理論

2.4.1 概 説

既に述べたように、アーチダムの挙動(変位、応力など) y は、次の5つの因子によって表わすことができる。

- ① 貯水位 (h)
- ② 平均温度 (T_M)
- ③ 等置温度勾配 (T_G)
- ④ 残差温度 (T_R)
- ⑤ クリープを考慮する荷重の载荷時刻 (k) と载荷時間 ($t-k$)

なお、ここで t は挙動 y の生じる時刻を表わしている。

いま、貯水位 h に対する変位(または応力)の応答形を $f_1(h)$ 、断面 m ($m = 1, 2, \dots, N$) における平均温度 T_{Mm} 、等置温度勾配 T_{Gm} 、残差温度 T_{Rm} に対する変位(または応力)の応答形をそれぞれ $f_{2m}(T_{Mm})$ 、 $f_{3m}(T_{Gm})$ 、 $f_{4m}(T_{Rm})$ 、時刻 k_n ($n = 1, 2, \dots, N$) に载荷された荷重に対する変位(または応力)の応答形を $f_{5n}(k_n, t)$ とすると、変位(または応力)の応答 y は次式で表現することができる。

$$y = b_1 f_1(h) + \sum_m \{ b_{2m} f_{2m}(T_{Mm}) + b_{3m} f_{3m}(T_{Gm}) + b_{4m} f_{4m}(T_{Rm}) \} + \sum_n b_{5n} f_{5n}(k_n, t) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

ここに、 $b_1, b_{2m}, b_{3m}, b_{4m}, b_{5n}$ ($m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$) は未知の定数である。

重回帰分析とは、作用因子 (h, T_M, T_G, T_R, k, t) とその応答 y に対する多くの測定データから、未知の定数 $b_1, b_{2m}, b_{3m}, b_{4m}, b_{5n}$ ($m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$) の最尤値を統計学的手法によって推定する方法である。なお、(2.4) 式は未知の $b_1, b_{2m}, b_{3m}, b_{4m}, b_{5n}$ に関する線形方程式であり、(2.4) 式を線形重回帰式という。

2.4.2 重回帰式の解法

(2.4) 式における未知の定数 $b_1, b_{2m}, b_{3m}, b_{4m}, b_{5n}$ ($m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$) の数を S 個とすれば、理論的には S 組の測定のデータ ($y, h, T_{Mm}, T_{Gm}, T_{Rm}, k_n, t$) が得られれば、未知の定数 $b_1, b_{2m}, b_{3m}, b_{4m}, b_{5n}$ の値を確定することができる。しかし測定されたデータは一般に誤差を有しているから、 S 組のデータから未知の定数 $b_1, b_{2m}, b_{3m}, b_{4m}, b_{5n}$ の値を確定するのは必ずしも適切であるとはいえない。

また、この場合、解が一義的に定まってしまうことから、仮定した関数形が妥当であるかどうかの判断が行えないことになる。

未知数の数 S より多い R 組 ($R > S$) のデータが得られている場合、一般に (2.4) 式を満足する解は存在しない。誤差を伴う R 組の測定データから S 個 ($S < R$) の未知数を合理的に

推定するには、一般に最小自乗法が用いられる。

いま、測定された r 番目のデータ ($r = 1, 2, \dots, R$) を (2.4) 式の左辺、右辺にそれぞれ代入し、両辺の差 (残差) を

$$\begin{aligned} \epsilon_r = & b_1 f_1(h_r) + \sum_m \{ b_{2m} f_{2m}(T_{Mmr}) + b_{3m} f_{3m}(T_{Gmr}) + b_{4m} f_{4m}(T_{Rmr}) \} \\ & + \sum_n b_{5n} f_{5n}(k_n, t_r) - y_r \quad \dots\dots\dots (2.5) \end{aligned}$$

で表わせば、未知数 $b_1, b_{2m}, b_{3m}, b_{4m}, b_{5n}$ ($m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$) の最尤値は、残差 ϵ_r ($r = 1, 2, \dots, R$) のばらつきを最小にするものであると考えられる。すなわち、最尤値は、

$$e = \sum (\epsilon_r)^2 \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

を最小にするような $b_1, b_{2m}, b_{3m}, b_{4m}, b_{5n}$ で与えられる。 e を $b_1, b_{2m}, b_{3m}, b_{4m}, b_{5n}$ ($m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$) の関数と考えると、 e の値を最小にする $b_1, b_{2m}, b_{3m}, b_{4m}, b_{5n}$ は次式を満足しなければならない。

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial b_1} = \frac{\partial e}{\partial b_{2m}} = \frac{\partial e}{\partial b_{3m}} = \frac{\partial e}{\partial b_{4m}} = \frac{\partial e}{\partial b_{5n}} = 0 \\ (m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N) \quad \dots\dots\dots (2.7) \end{aligned}$$

(2.7) 式はちょうど R 組の連立方程式であるから、未知数 $b_1, b_{2m}, b_{3m}, b_{4m}, b_{5n}$ ($m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$) はその解として一義的に求められる。

なお、回帰係数が小さい因子に対しては、帰無仮説によってその因子が有効であるかを検定し、不必要な因子を棄却することができる。

2.5 重回帰分析を行う場合の留意点

アーチダムの重回帰分析においては、重回帰分析の解析期間を変えたり、また因子の設定を変えて解析をやり直すと、各断面の温度の回帰係数が前の結果と全く異なってしまうことがある。これは、各断面の温度がダムサイトの気候という共通の原因によって規定されるために、その間に非常に高い相関性が成立し、その結果、回帰係数の計算が不安定になるためである。このような場合、個々の回帰係数の値は重要な意味を持たなくなり、これらを全体としてまとめた総合的な影響のみが安定した値として意味をもつことになる。したがって、アーチダムの挙動を精度高く解析しようとする意図して、温度を入力する断面を数多く設定することは必ずしも好ましいものではなく、逆に個々の断面の影響を曖昧なものになってしまうことになる。このため、回帰係数が不安定な断面が存在する場合には、理論的な考察のもとに、どの断面の温度がダムの応答に支配的であるかを検討し、温度を入力する断面の数を最小限に抑えることが望ましい。この点については、「5. 変位の重回帰分析」で具体的に論じる。

類似の問題はクリープについても存在する。本来、クリープは時間依存の挙動を表わすものであるが、実際のダムの重回帰分析では、時間依存性を示すものはクリープのほかにも数多く存在する。たとえば、貯水位の極めて低い状態または高い状態は一般に試験湛水時に限られるから、貯水位の変化は時間依存性があるとみなすことができる。また、堤体の温度は湛水とともに貯水温の影響を受けて除々に低下するから、堤体温度にも時間依存性がある。このような場合、重回帰分析において、その挙動が本来の因子、すなわち貯水位または堤体温度の変化による応答として表わされるか、またはクリープの影響として表わされるかは、クリープの発生時刻の設定によって微妙に変化する。特に、貯水位の変化による応答については、その具体的関数形が明らかでなく、重回帰分析を行う場合には、その関数形をあらかじめ仮定するのが一般である（「5. 変位の重回帰分析」参照）。このような場合、クリープの発生時刻を数多く設定すると、貯水位の変化による応答を表わす関数形の設定が適切でない場合にも、解析誤差がクリープの中で吸収されてしまい、見かけ上、高い解析精度が得られることがある。このようなことを防ぐためには、貯水位の変化による応答を表わす関数形を正しく設定することは当然のことであるが、クリープの設定を種々に変化させ、各因子の影響を検討することが必要である。この場合も、温度の場合と同様に、不安定なクリープは解析の対象から除外し、クリープの設定時刻も必要最小限に抑えることが望ましい。

3. 真名川ダムの概要

3.1 ダムの概要と諸元

真名川ダムは、建設省が九頭竜川水系真名川に建設した高さ 127.5 m、有効貯水容量 95,000,000 m³のアーチ式コンクリートダム（以下、アーチダムと略す）で、洪水調節、発電、流水の正常な機能の維持を目的とした多目的ダムである。ダムの諸元、形状を表－3.1 および図－3.1 に示す。

真名川ダムは 1976 年より試験湛水を開始し、その後 1978 年より貯水池の運用を開始して現在に至っている。

表－3.1 真名川ダムの諸元

河川名 位置 地質	九頭竜川水系 真名川 福井県大野市下若生子 飛騨片麻岩		
形式	放物線アーチダム		
堤頂標高	EL. 387.5 m		
基礎岩盤標高	EL. 260 m		
堤頂長	350 m		
堤体積	450,000 m ³		
ゲート	非常用洪水吐：ラジアルゲート 12 m × 7.2 m 4 門 常用洪水吐：ローラーゲート 4 m × 4 m 2 門		
サーチャージ水位	EL. 385.0 m		
常時満水位	EL. 365.0 m		
第 1 期制限水位	EL. 348.0 m		
第 2 期制限水位	EL. 337.4 m		
最低水位	EL. 331.0 m (堆砂位)		

3.2 基礎岩盤とダムの設計

ダムサイトの地質平面図を図－3.2 に示す。ダムサイトの基礎岩盤は主として飛騨片麻岩類に属する片麻岩、半花崗岩質片麻岩、輝緑岩質片麻岩よりなっており、ひん岩脈の貫入のほか、一部に石灰岩の分布も見られる。基礎岩盤は堅硬で、急峻な地形とあいまってアーチダムのサイトとして極めて適した条件を有している。断層系としては右岸に F－4、F－7 と呼ばれる低角度で川側へ傾斜する 2 つの断層の発達が見られる。これらの断層はアーチダムの構造的安定性に関しては直接問題とはならないが、地山の安定性を向上させるためにこれらの断層に対して岩盤 P S 工およびコンクリート張り工が施工されている。

ダム本体の形状は、その構造的安定性を十分に確保するため、従来より建設省が設計するアーチダムに広く採用されている放物線アーチを用い、その最大中心角は 75°としている。

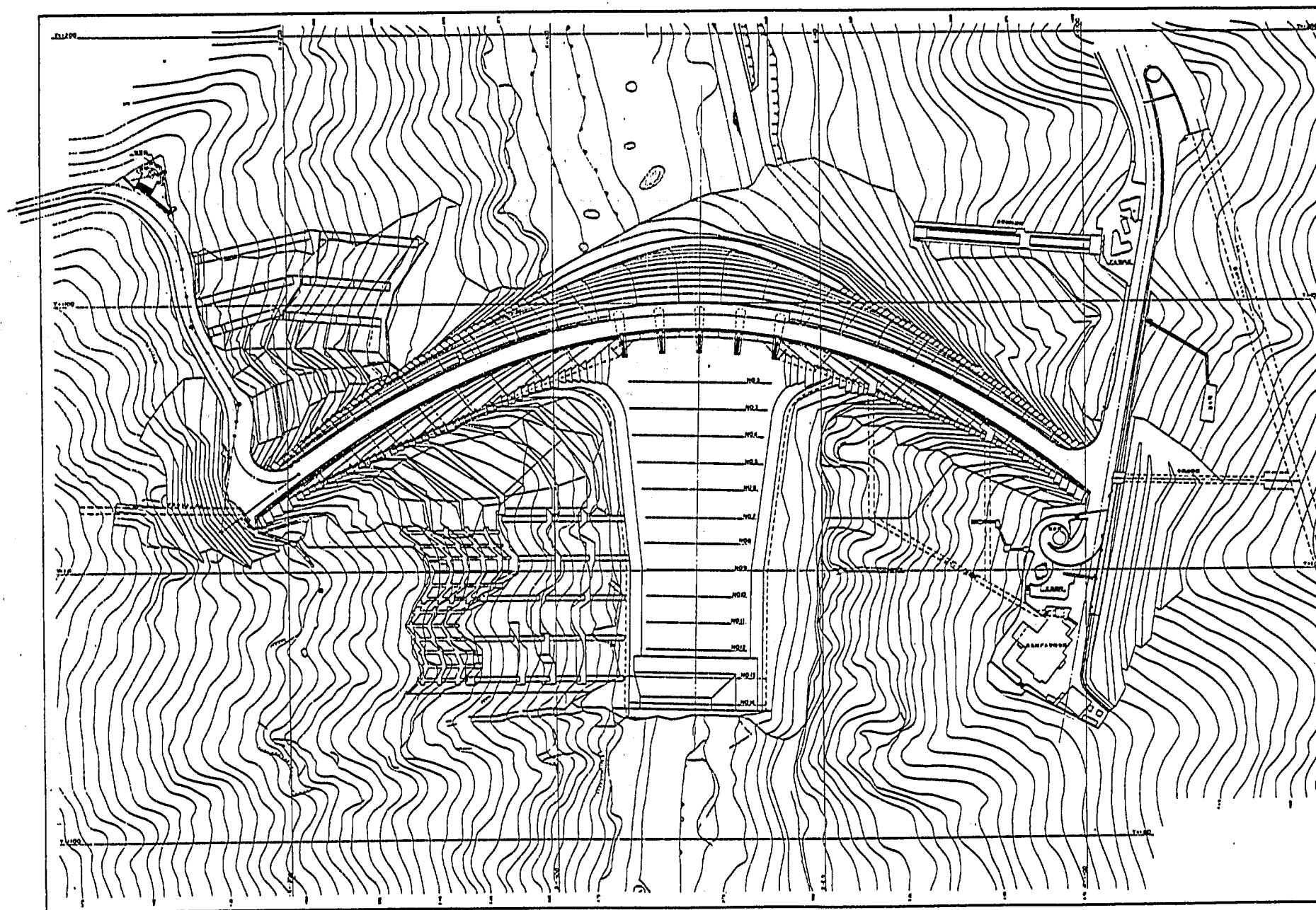


図-3.1(1) ダム形状図(平面図)

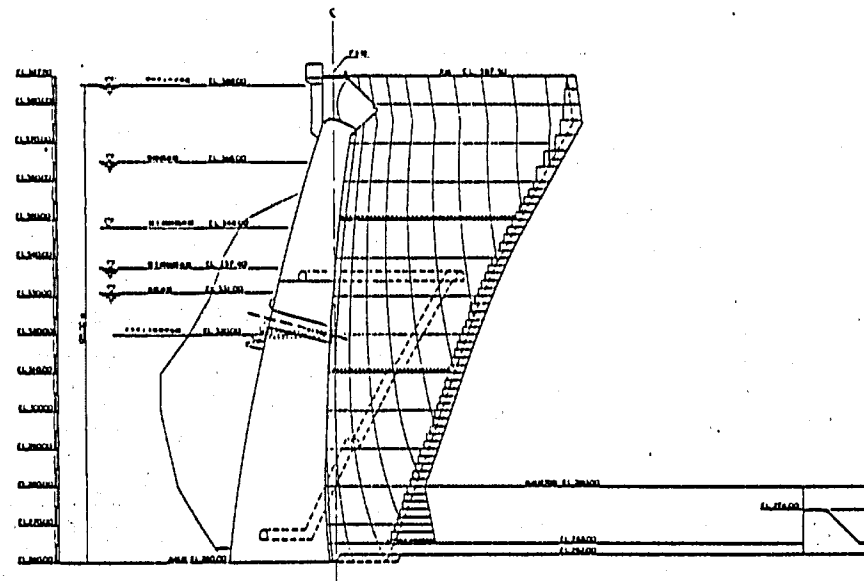


図 - 3.1 (2) ダム形状図 (側面図)

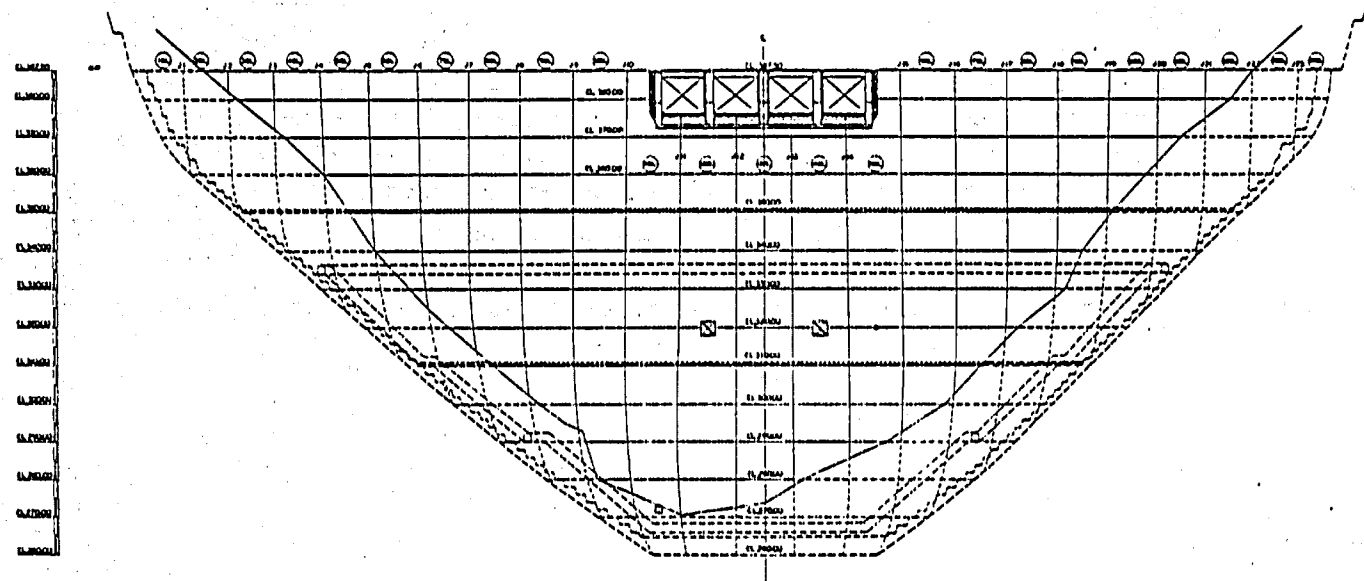
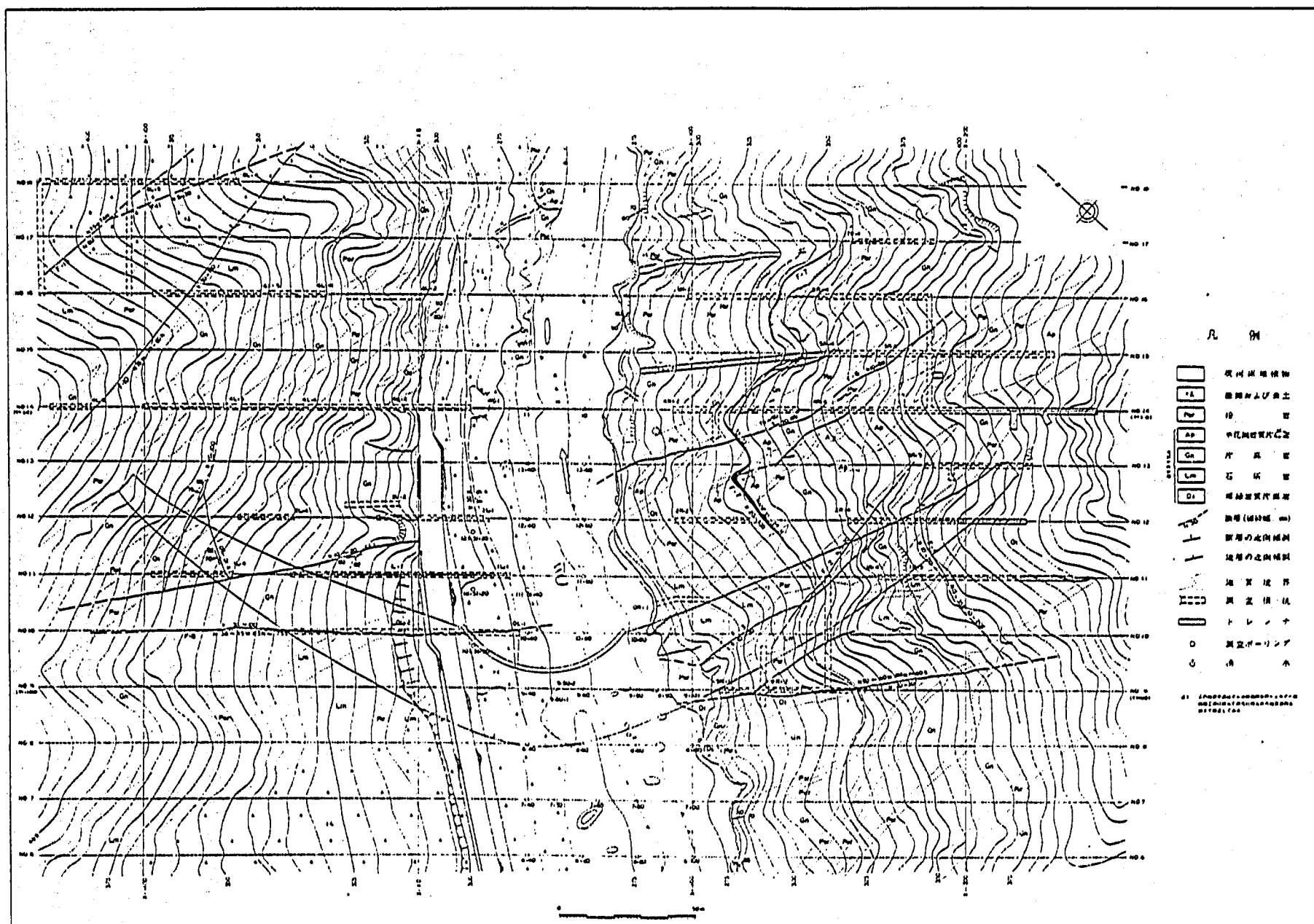
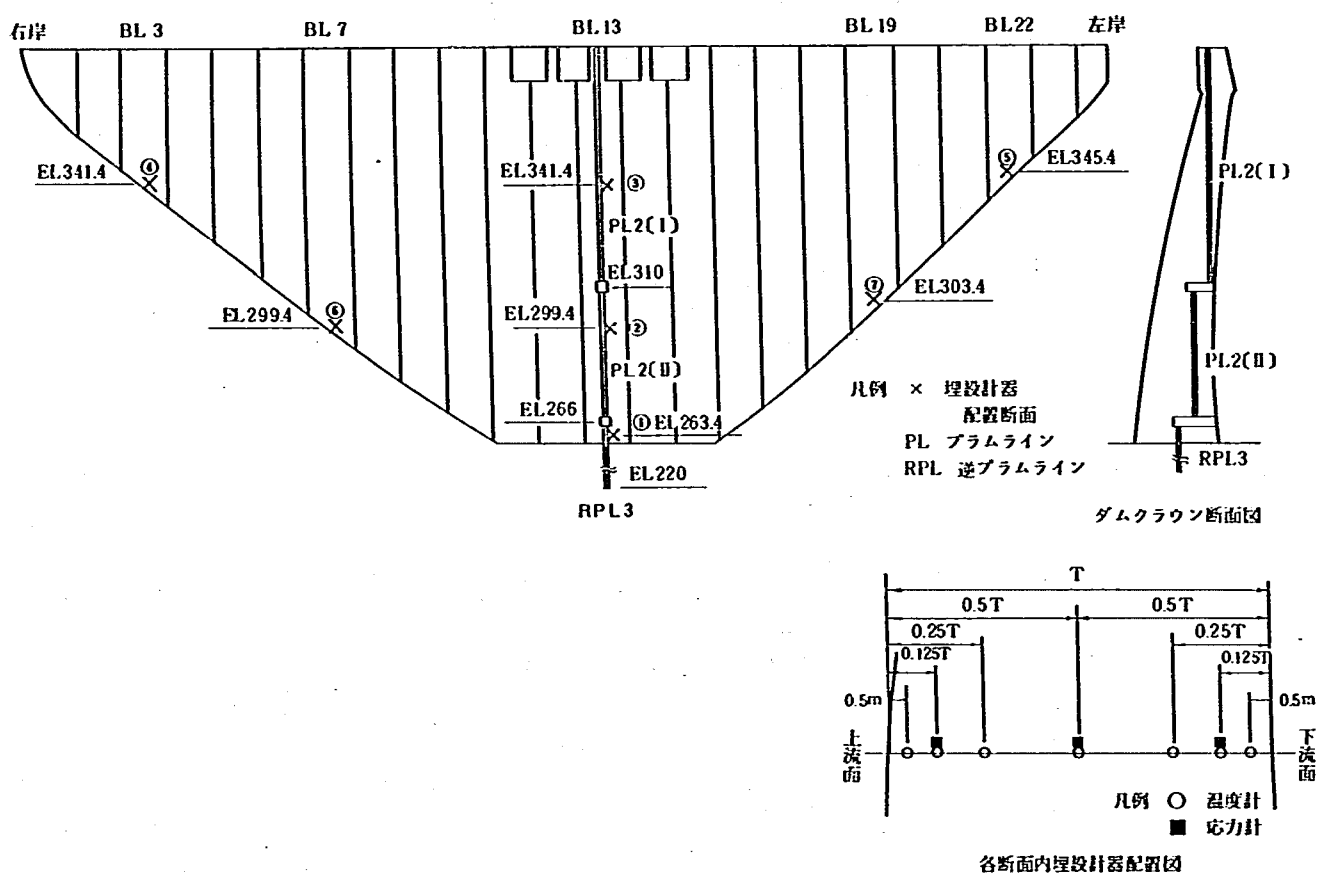


図 - 3.1 (3) ダム形状図 (下流面投影図)



3.3 観測計器の配置

真名川ダムの堤体内には、ダムの安全性を確保するため、また将来の構造解析技術の高度化を計るために、数多くの観測計器が埋設されている。このうち、今回実施した重回帰分析に利用した変位計（ブラムライン、逆ブラムライン）、応力計、温度計の埋設位置を示すと図－3.3のとおりである。図中、PL2(I)、PL2(II)はブラムライン、RPL3は逆ブラムラインであり、①～⑦は温度計ならびに応力計の埋設位置で、各断面内埋設計器配置図に示すように断面内に温度計が7個所、応力計が3個所に埋設されている。なお応力計の各埋設位置には水平方向（アーチ接線方向）および鉛直方向の2成分の応力計が設置されている。



図－3.3 変位計、応力計、温度計の配置位置

3.4 試験湛水と貯水池の運用時の水位状態

真名川ダムの試験湛水は、図－3.4に示すとおり、昭和51年12月から開始し、昭和52年3月に制限水位 EL. 337.4 mに達し、ここで水位を維持してダムの各施設の安全性を確認するための総合点検を行っている。その後昭和52年9月から再び水位を上昇させ、昭和53年1月に常時満水位 EL. 365.0 m、同4月にサーチャージ水位 EL. 385.0 mに達している。以後、水位を徐々に低下させ、同年8月に制限水位 EL. 337.4 mに水位を戻し、無事試験湛水を終え、正規の運用体制に入って

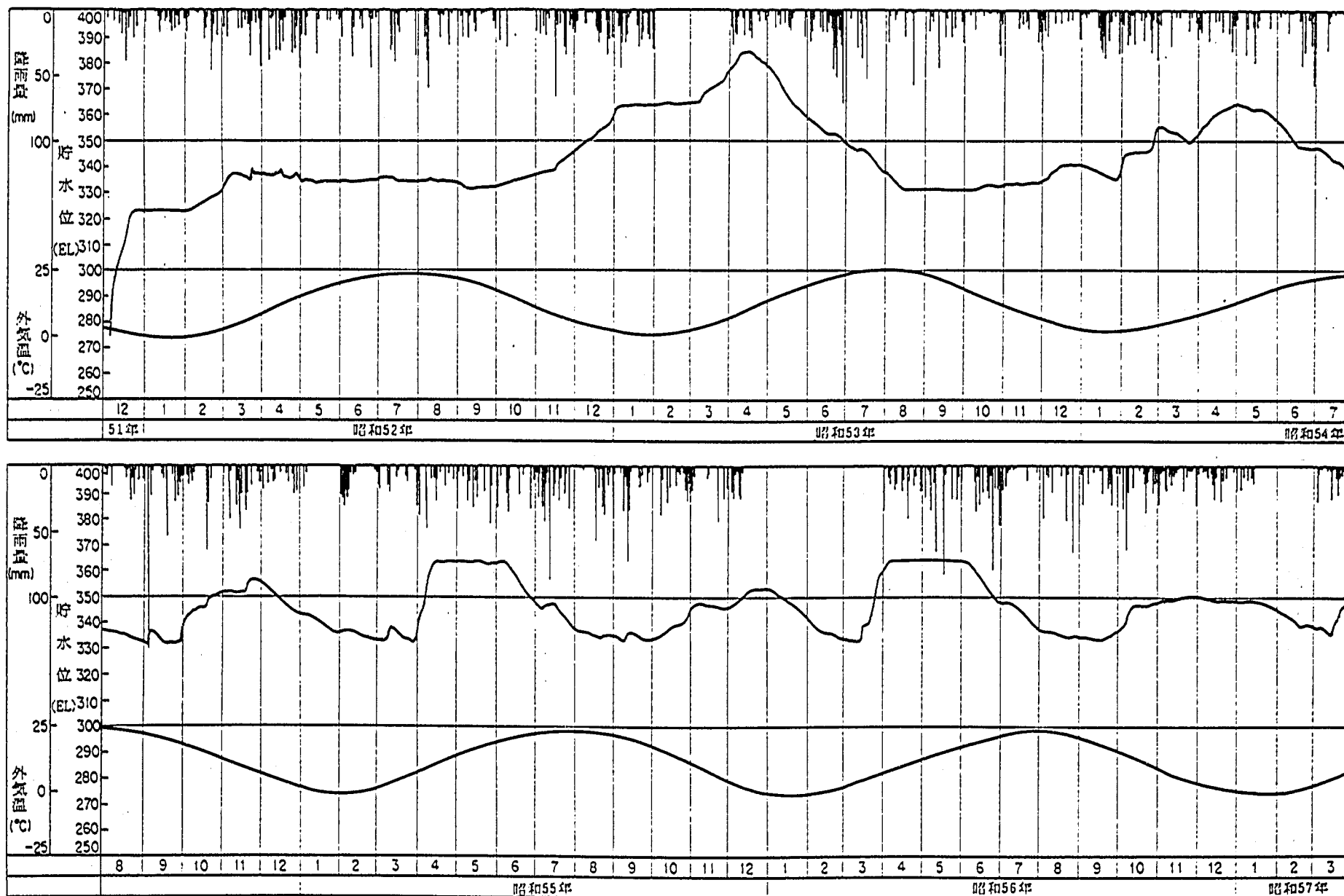


図 - 3.4 貯水位と外気温の履歴

いる。

正規の運用に入ってから、貯水位の操作規則に基づき、4～5月には常時満水位、8～9月には制限水位に水位を維持している。

重回帰分析を行った期間は試験湛水を開始した昭和51年12月から昭和57年3月までの5年4カ月であり、この間の水位変動は EL. 275 m から EL. 385 m までの約 110 m であり、また大部分のデータは最低水位 EL. 331.0 m から常時満水位 EL. 365 m の間の約 34 m となっている。

4. 温度解析

4.1 概 説

既に述べたように、ダムの挙動は主として貯水位（水圧荷重）と堤体の温度（温度荷重）によって規定される。本章ではこのうち温度荷重について述べる。

アーチダムのように堤体の大きさに比べて堤体の厚さが薄い構造物では、実用上、温度荷重は図-4.1に示すように各断面（堤体の厚さ方向）内の①平均温度、②等置温度勾配、③残差温度の3つに分けて取り扱うことができる。このうち、堤体の変形に対しては、①平均温度と②等置温度勾配が主要な影響を与え、堤体内の応力分布に対しては①平均温度、②等置温度勾配、③残差温度の3つが影響を与えと考えられる。

ダム堤体の実測温度をもとに、堤体内の平均温度、等置温度勾配、残差温度を求める作業を温度解析と呼んでいる。以下、真名川ダムにおける実測温度の特徴とその温度解析結果について述べる。

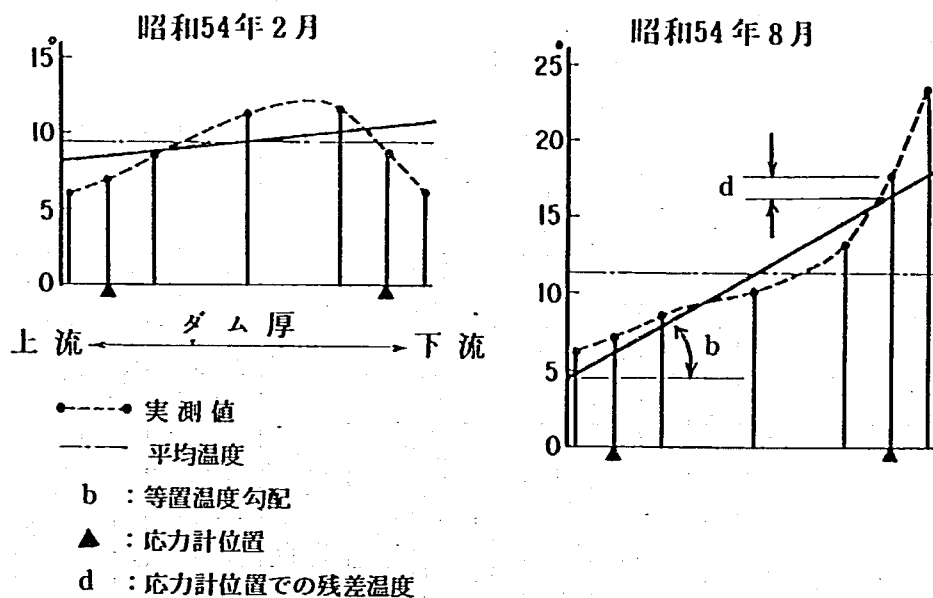


図-4.1 断面内温度分布と温度因子（②断面の例）

4.2 堤体内の温度分布

図-3.3に示す①～⑥の断面内に埋設された各温度計によって計測された温度履歴を図-4.2に示す。なお⑦断面については温度計の故障が多く、解析の対象から外した。

各断面内の温度分布の特徴について以下に述べる。

(1) ①断面（BL.13 EL.263.4 m）

①断面は、ダムの河床部であることから、外気温の影響は小さく、年間を通じて断面内の温度分布はほぼ一定である。ただし湛水に伴い、上流面側では貯水の影響による温度低下が

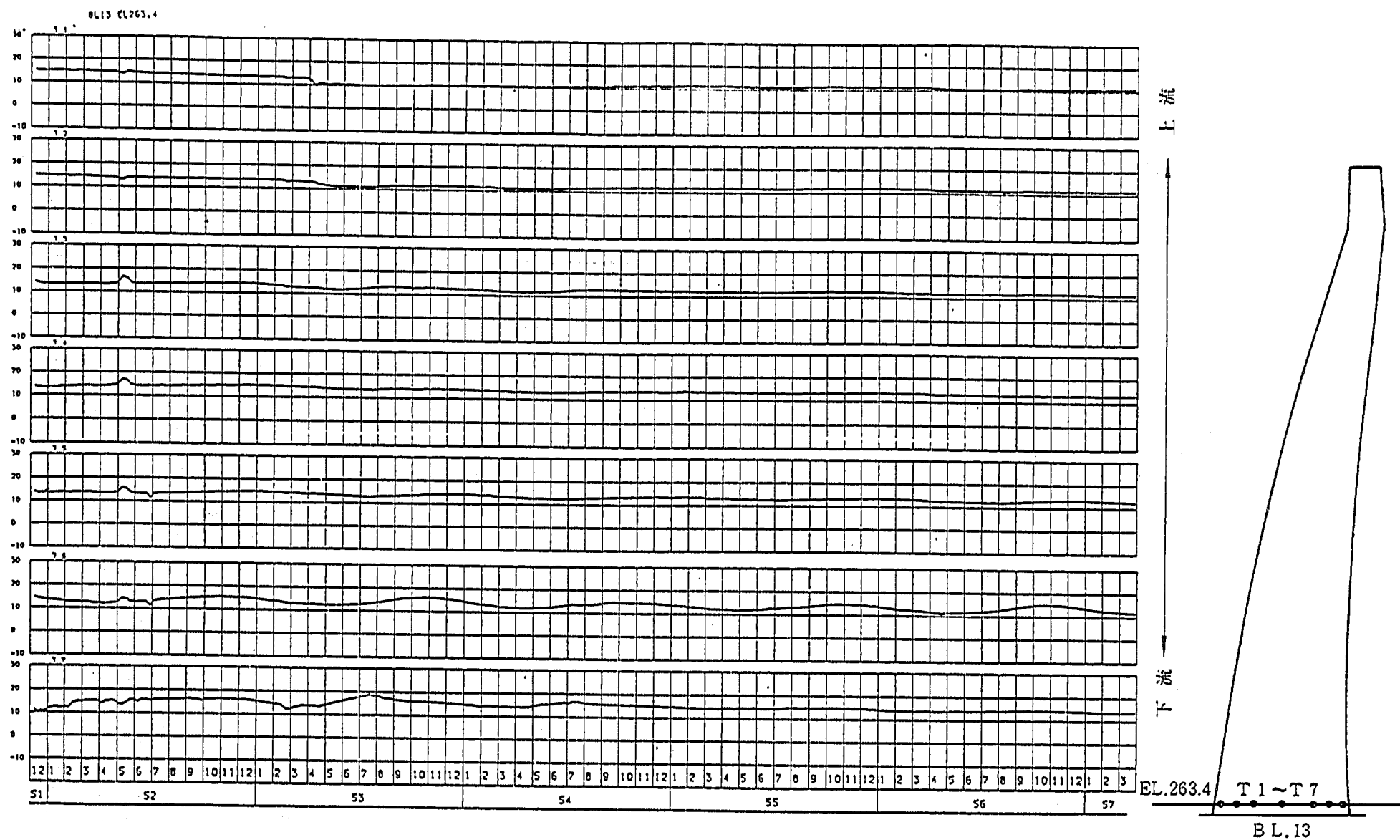


图-4.2(1) 堤体内温度分布 ①断面 (BL.13 EL.263.4 m)

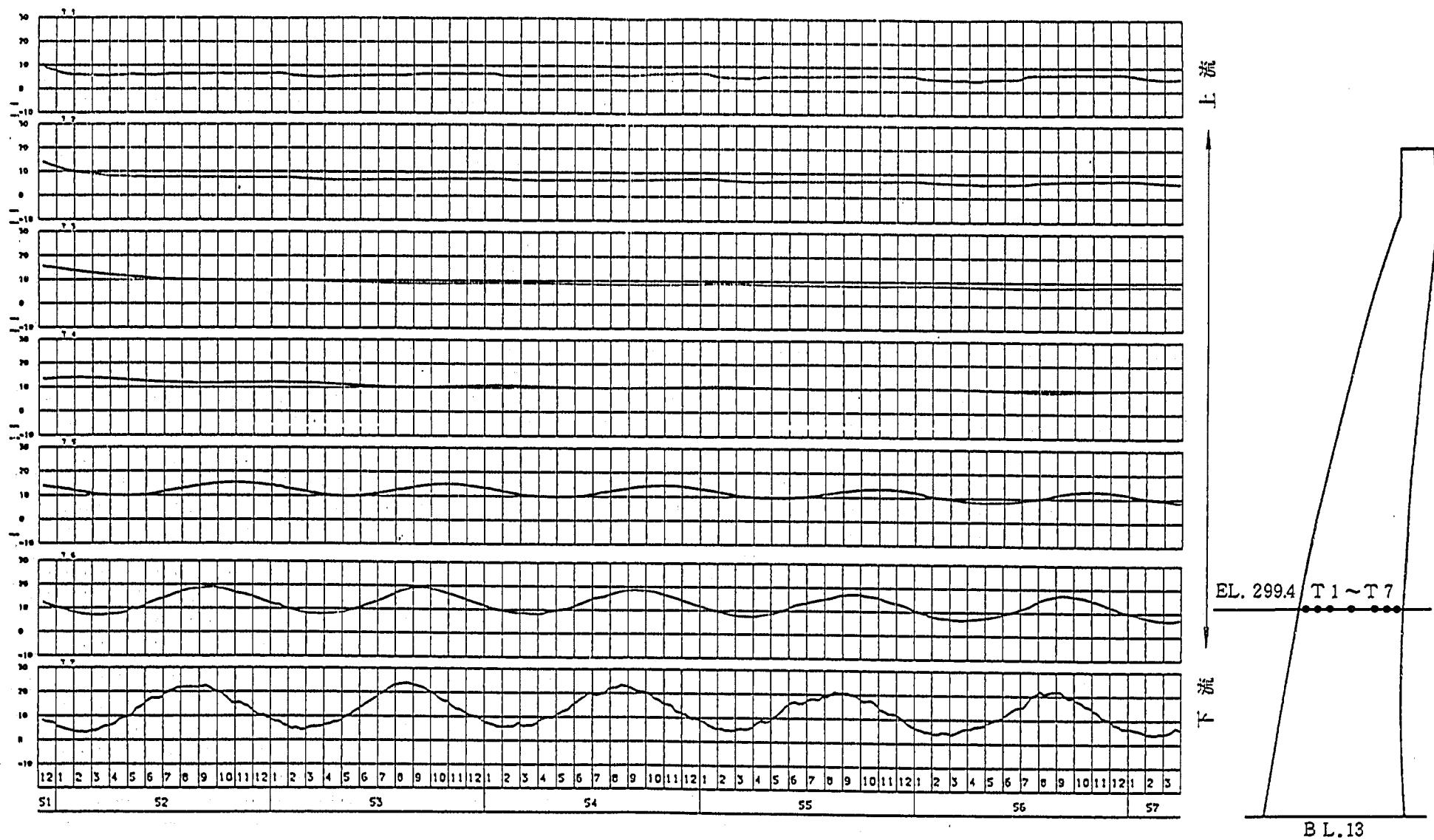


图-4.2(2) 堤体内温度分布 ②断面 (BL.13 EL.299.4 m)

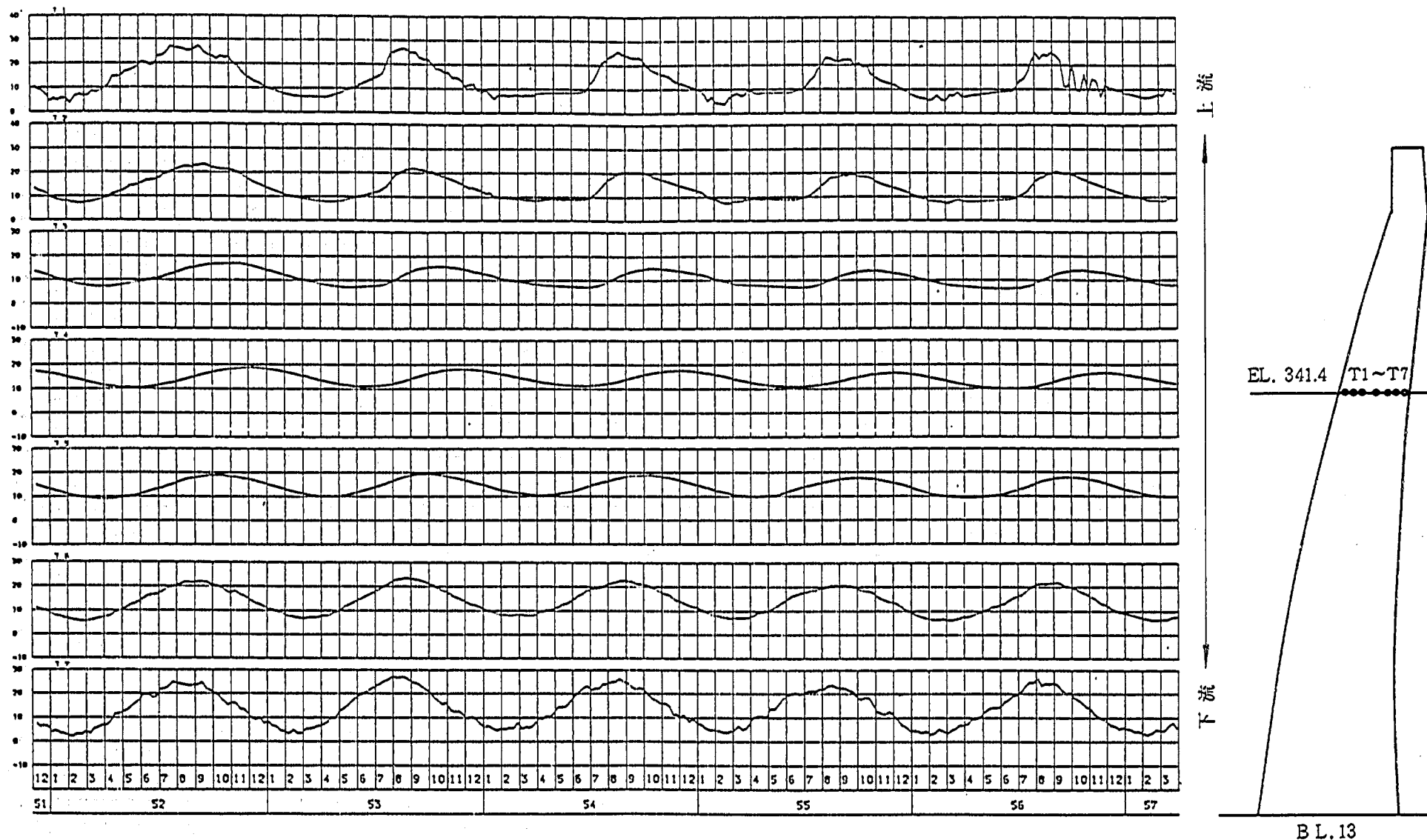


图-4.2(3) 堤体内温度分布 ③断面 (BL.13 EL.341.4 m)

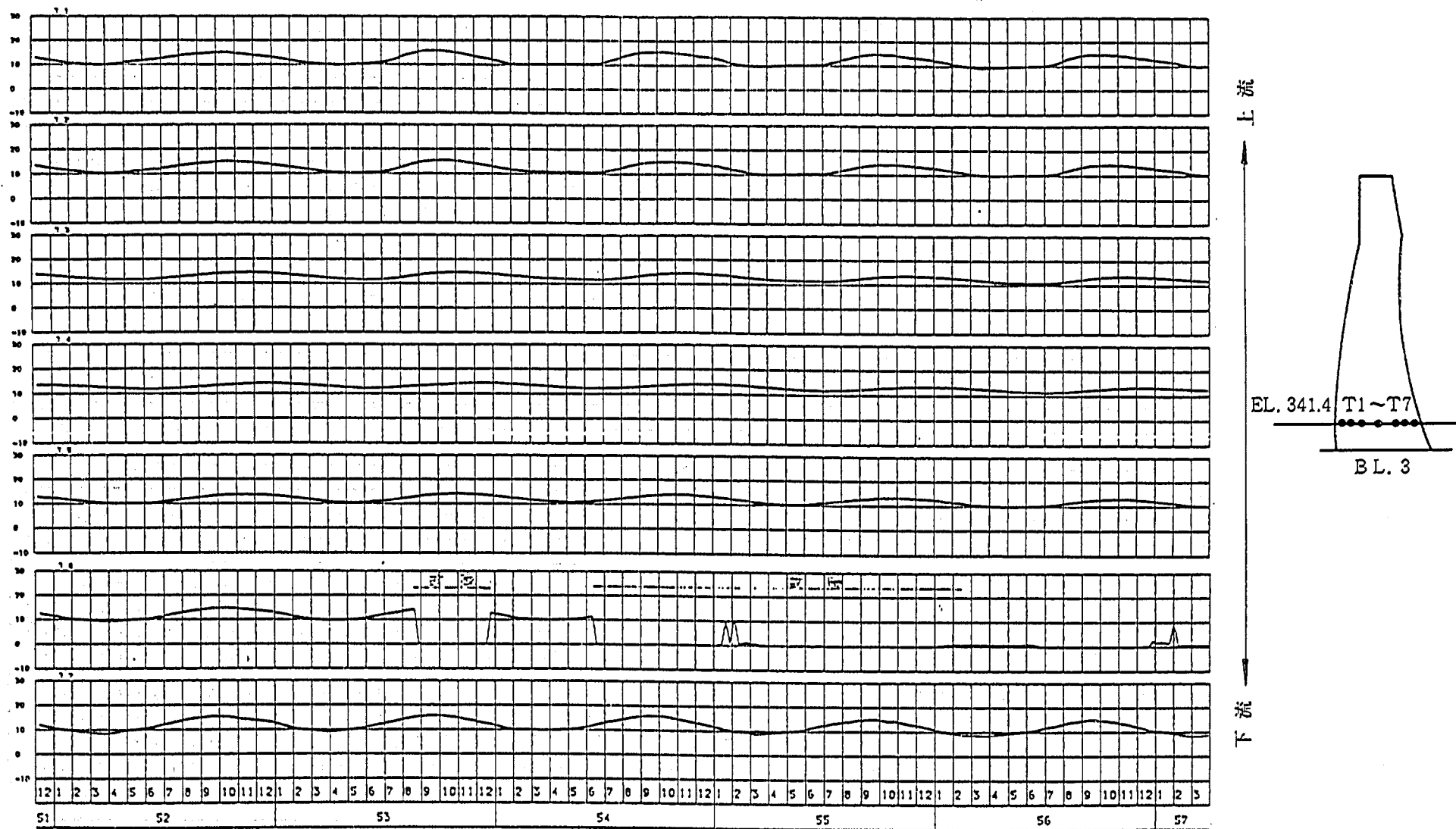


图-4.2(4) 堤体内温度分布 ④断面 (BL.3 EL. 341.4 m)

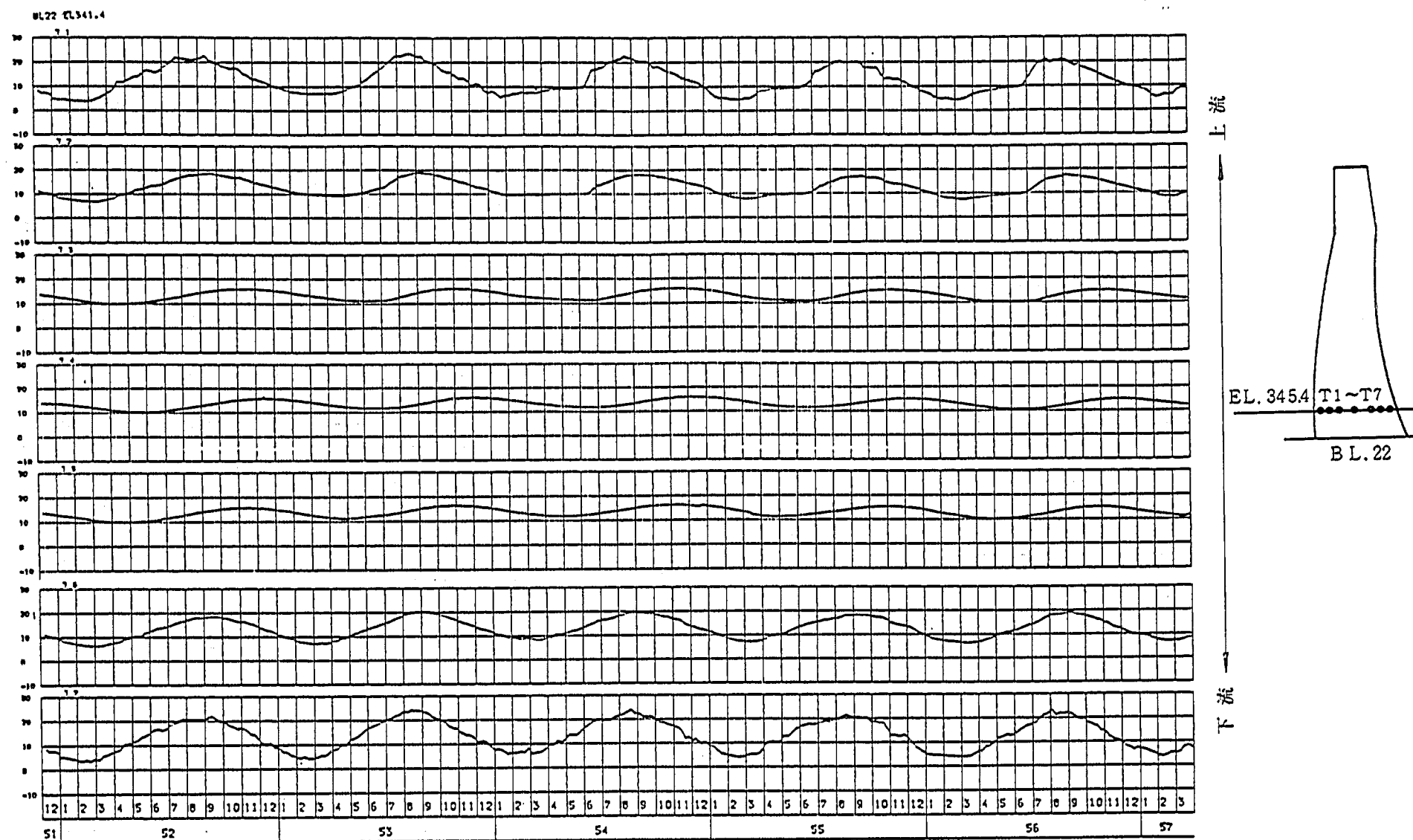


图-4.2(5) 堤体内温度分布 ⑤断面 (BL.22 EL. 345.4 m)

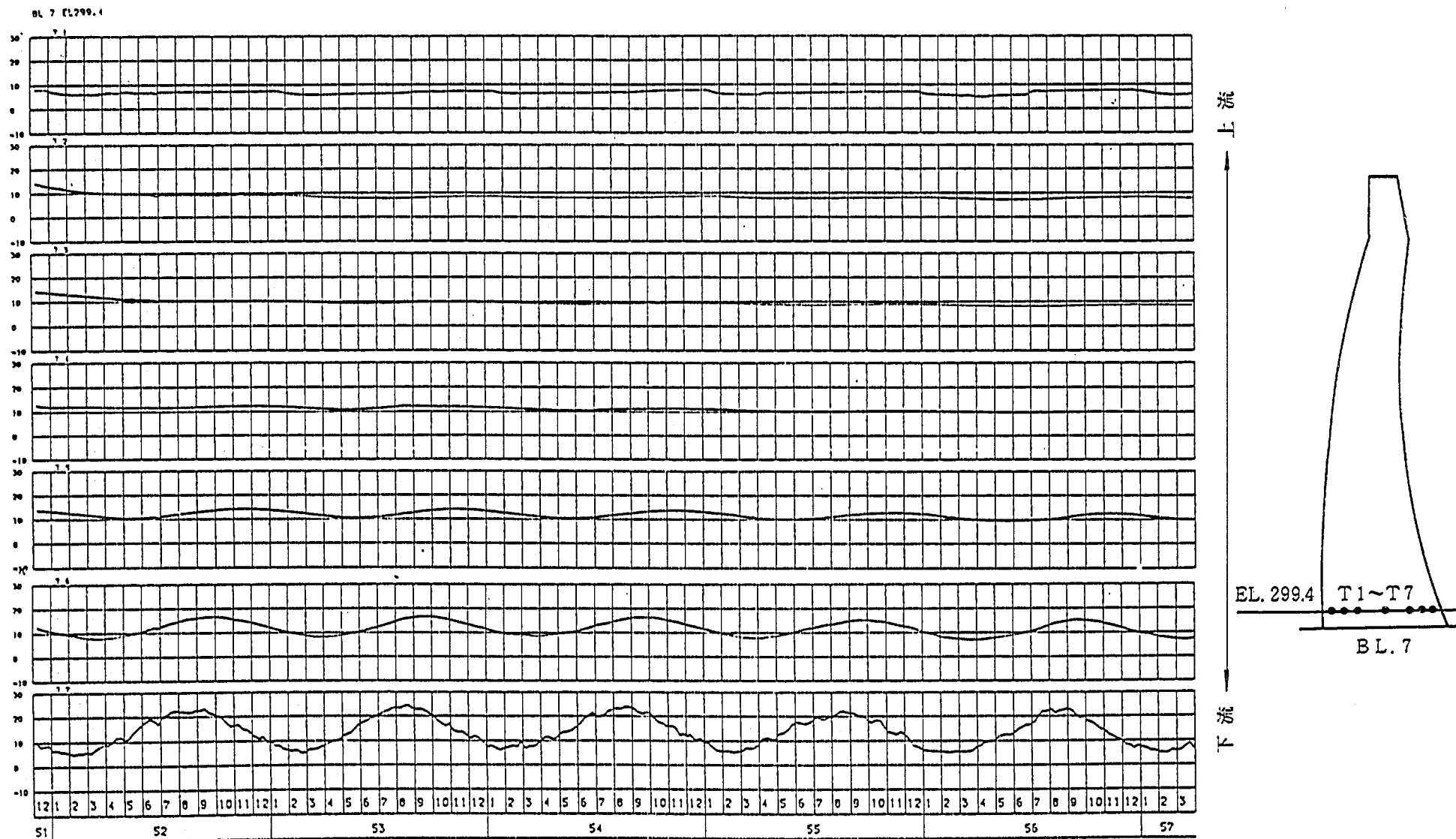


图-4.2(6) 堤体内温度分布 ⑥断面 (BL.7 EL.299.4 m)

5℃程度認められる。

(2) ②断面 (BL.13 EL. 299.4 m)

下流面側の温度は外気温に対応してきれいな正弦曲線を描いている。その振幅は下流面から遠ざかるにしたがって小さくなり、また位相差が生じている。上流面側については、湛水に伴う温度低下が5℃程度認められ、それ以降はほぼ一定した値を保っている。

(3) ③断面 (BL.13 EL. 341.4 m)

下流面側の温度は②断面と同様に外気温に対応した正弦曲線を描いている。上流面側の温度については、この標高がちょうど貯水位の変動によって水面が上下する位置にあたるために、貯水位が上昇している4～6月では水温にほぼ等しい一定の温度となり、貯水位が低下する7月～翌3月の間は外気温に支配された温度履歴を示している。

(4) ④断面 (BL.3 EL. 341.4 m)

④断面は③断面と同一標高であるが、年間の温度の振幅はかなり小さい。この理由は、④断面が右岸のアバットメント付近に位置しており、比較的安定な岩盤の温度の影響を受けていること、またこのアバットメント沿いの岩盤には張コンクリート工が施されており、これによって外気温の影響が小さくなることによるものと思われる。

(5) ⑤断面 (BL.22 EL. 345.4 m)

⑤断面は③、④断面とほぼ同一標高であり、温度履歴は③断面によく似たものとなっている。③断面に比較して年間の温度の振幅がやや小さいのは、ダム堤体がやや厚いこと、またアバットメントの近くであることから、比較的安定した岩盤の温度の影響を受けているものと思われる。

(6) ⑥断面 (BL.7 EL. 299.4 m)

⑥断面は②断面と同一標高であり、温度履歴は②断面とよく似たものとなっている。

以上のように、ダム堤体内の温度特性は、貯水面の上部か下部かによって異なり、さらに同じ標高であっても、アーチクラウン部とアバットメント付近とではそれぞれ異なっていることがわかる。

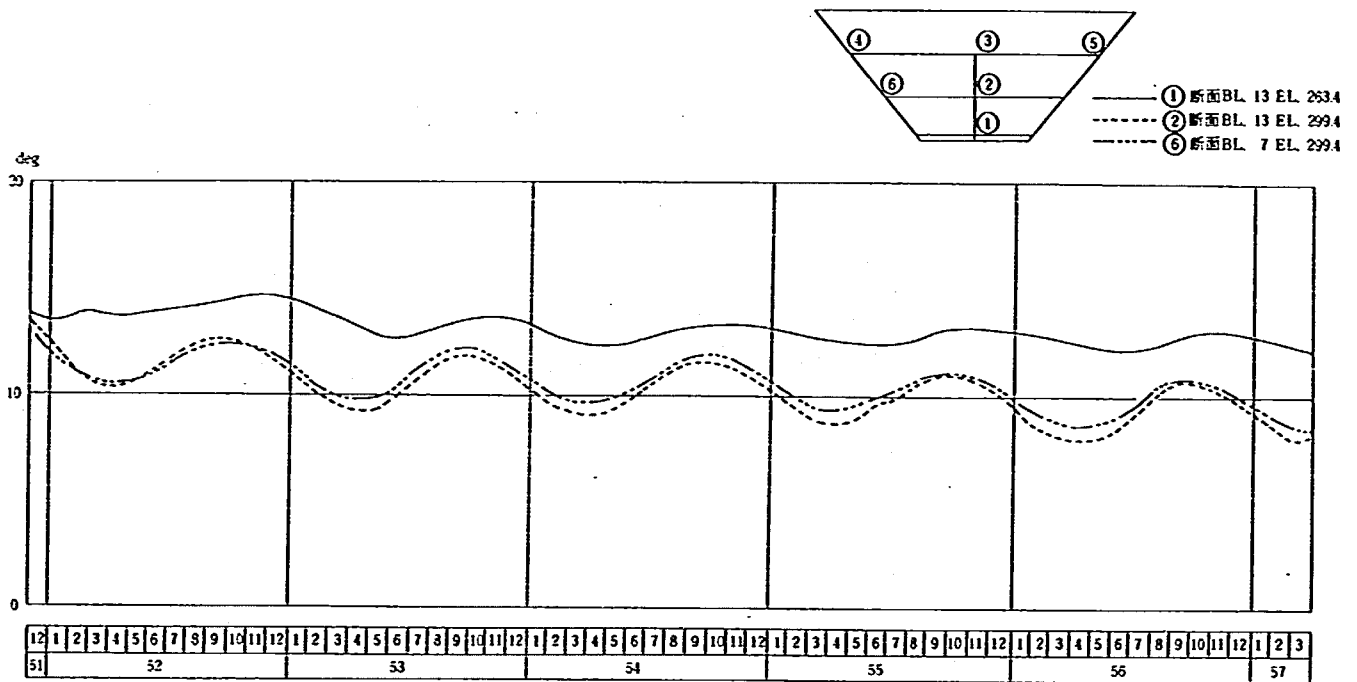
4.3 温度解析結果

次に①～⑥の各断面内に埋設された温度計の計測値をもとに、各断面の平均温度、等置温度勾配および、残差温度を求めた結果について以下に述べる。

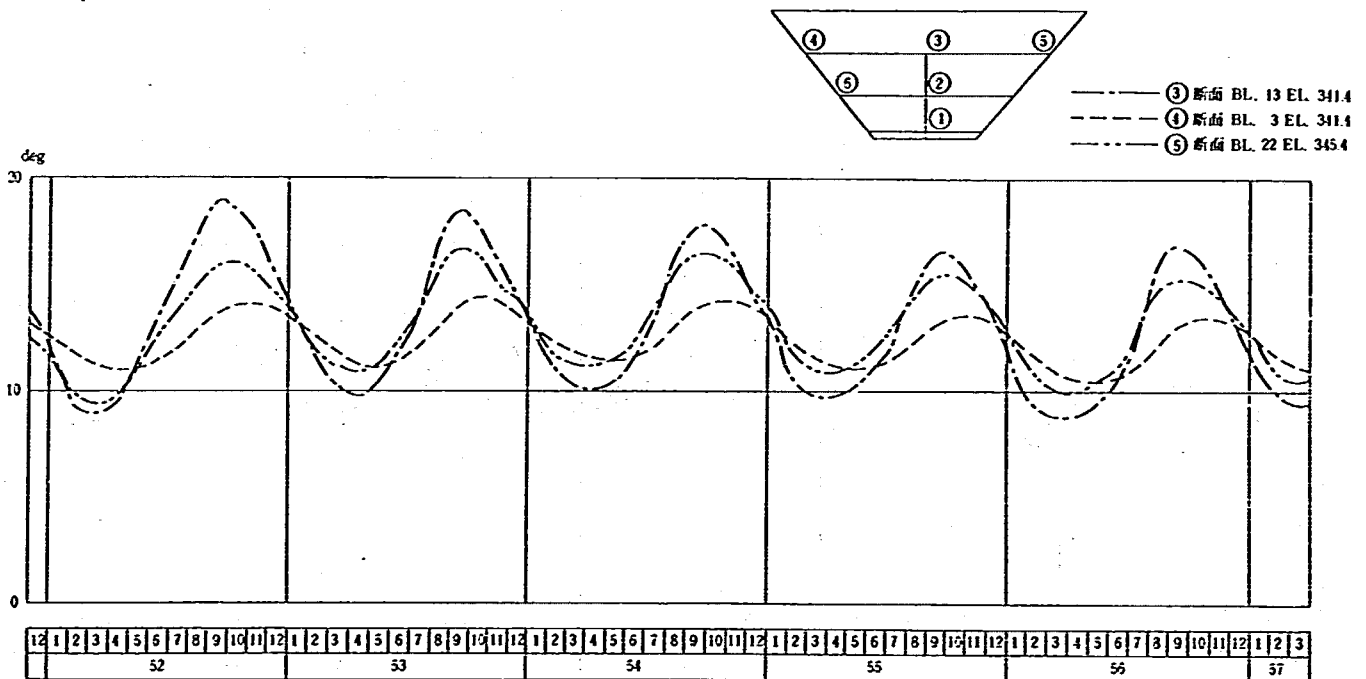
4.3.1 平均温度の履歴

貯水面よりも下側に位置する①、②、⑥断面の平均温度の履歴を図-4.3.(1)に、また、貯水面が上下する標高に位置する③、④、⑤断面の履歴を図-4.3.(2)に示す。平均温度の履歴はいずれの断面も正弦曲線に近く、振幅は堤体の厚さが薄い上部標高で大きく、堤体の厚さが厚い

下部標高で小さい。また、同じ標高でも堤体の厚さが薄いクラウン部で振幅が大きくなっている。貯水面よりも下側の断面の温度履歴は、季節的な温度変化を繰り返しながら次第に低下していく傾向を示している。値としては②、⑥断面で5年間に3℃程度、①断面で2℃程度である。これは、貯水によって堤体が徐々に冷却されるためと考えられ、いずれは安定するものと思われる。



図－4.3(1) 平均温度の履歴（①，②，⑥断面）



図－4.3(2) 平均温度の履歴（③，④，⑤断面）

4.3.2 等置温度勾配の履歴

貯水面よりも下部に位置する①, ②, ⑥断面の等置温度勾配の履歴を図-4.4 (1)に, 貯水面が昇降する標高の③, ④, ⑤断面の等置温度勾配の履歴を図-4.4 (2)に示す。なお等置温度勾配の値は下流側の温度が高い場合を正としている。この等置温度勾配の履歴については, 断面

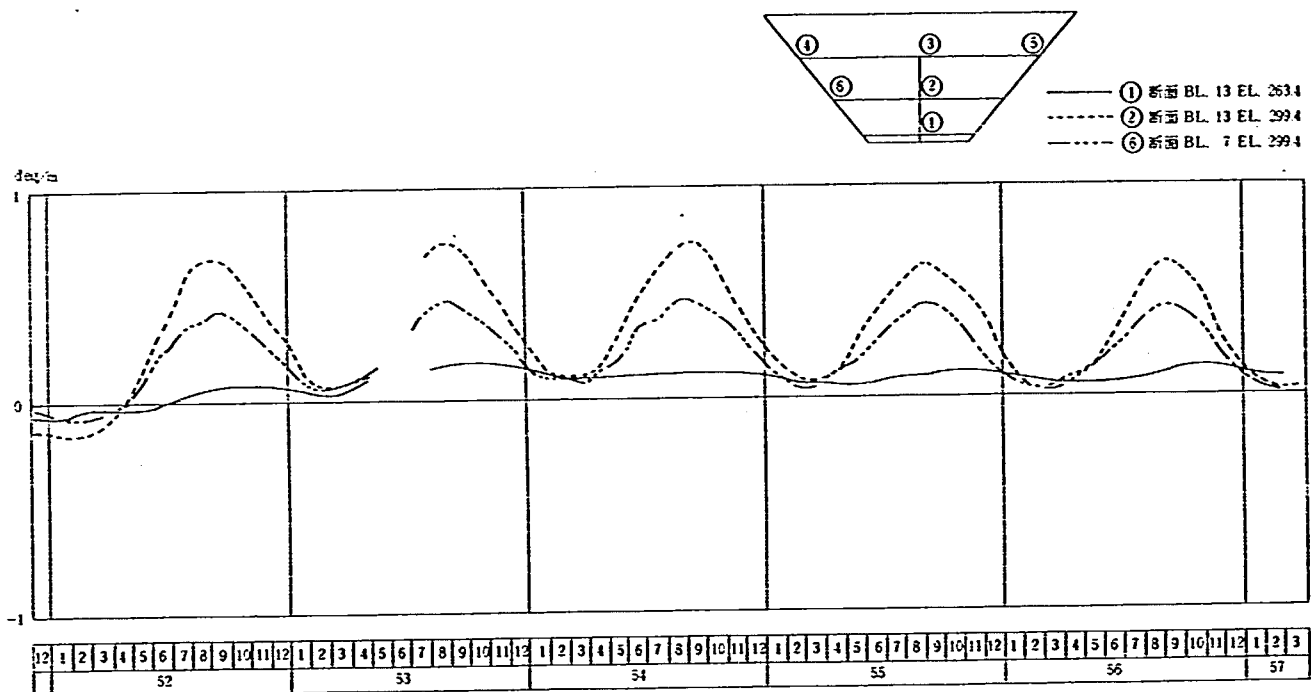


図-4.4 (1) 等置温度勾配の履歴 (①, ②, ⑥断面)

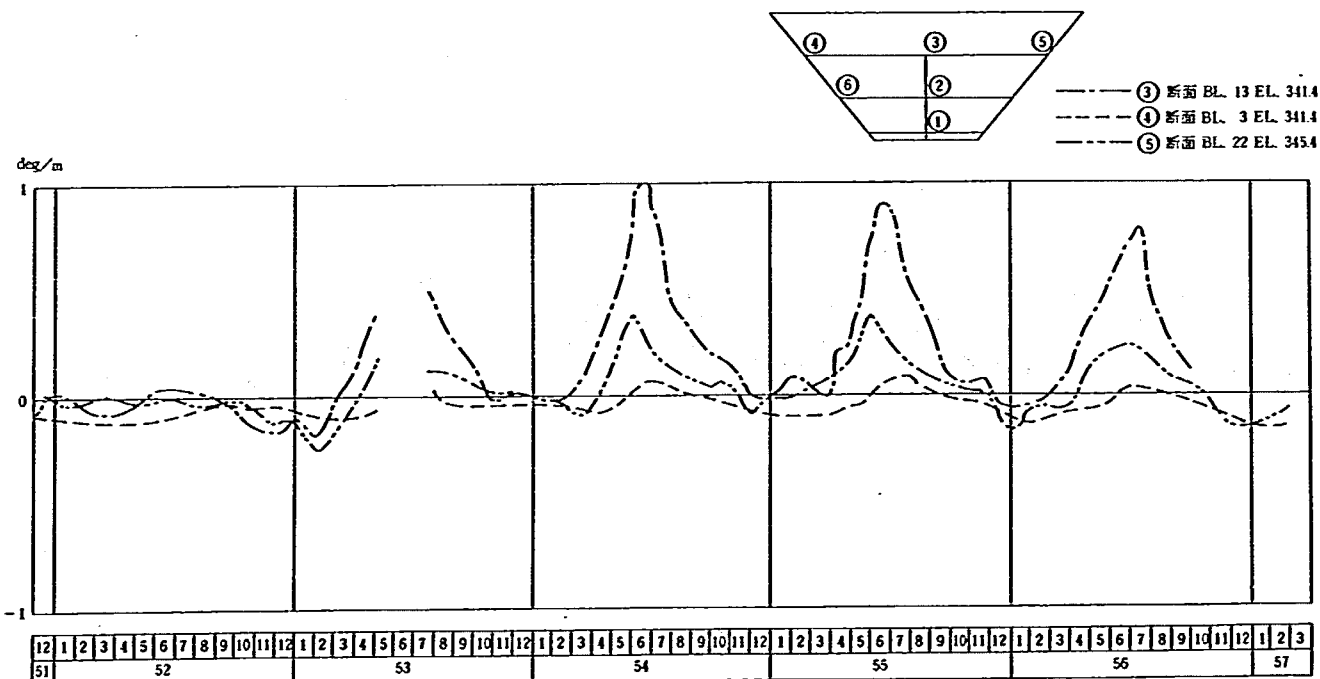


図-4.4 (2) 等置温度勾配の履歴 (③, ④, ⑤断面)

の位置が貯水面より上側か下側かによりそれぞれ異なった傾向を示している。まず貯水面より下側に位置する①、②、⑥断面の等置温度勾配は、正弦曲線に近い曲線を示しており、最初の約2年間はその平均値が若干プラス側に移行するが、その後は、ほぼ安定した状態となっている。これは、湛水によってダムの上流面が冷却される結果、最初はプラス側の等置温度勾配が生じるが、その後、冷却が徐々に下流側へ進行するに従い、等置温度勾配が安定した状態になるためと考えられる。次に、貯水面より上側に位置する③、④、⑤断面の等置温度勾配は、4～7月に急激に発生し、その後、11月頃に0に戻るといった動きを示している。これは、貯水位の変動に連動した動きであると考えられる。すなわち、4～7月には貯水位が③、④、⑤断面の標高を超え、貯水温の影響が上流面に現れるために等置温度勾配が生じ、貯水位が低下すると、上下流面がともに外気に接して、その温度がほぼ等しくなるために等置温度勾配が0となるものと考えられる。なお、昭和52年に等置温度勾配が生じていないのは水位が上昇していないためである。

4.3.3 残差温度の履歴

応力の重回帰解析を実施する①～⑥断面の上流面側に配置した応力計の位置での残差温度の履歴を図-4.5(1)に、下流面側の応力計の位置での残差温度の履歴を図-4.5(2)に示す。応力計埋設位置における残差温度の履歴は正弦曲線に近い形を示しているが、平均温度や等置温度勾配の履歴に比較して、滑らかな曲線になっていない。これは、計測位置がダム表面に近く、外気温の変動の影響を受けやすいためと考えられる（応力計の埋設位置は上、下流面から、それぞ

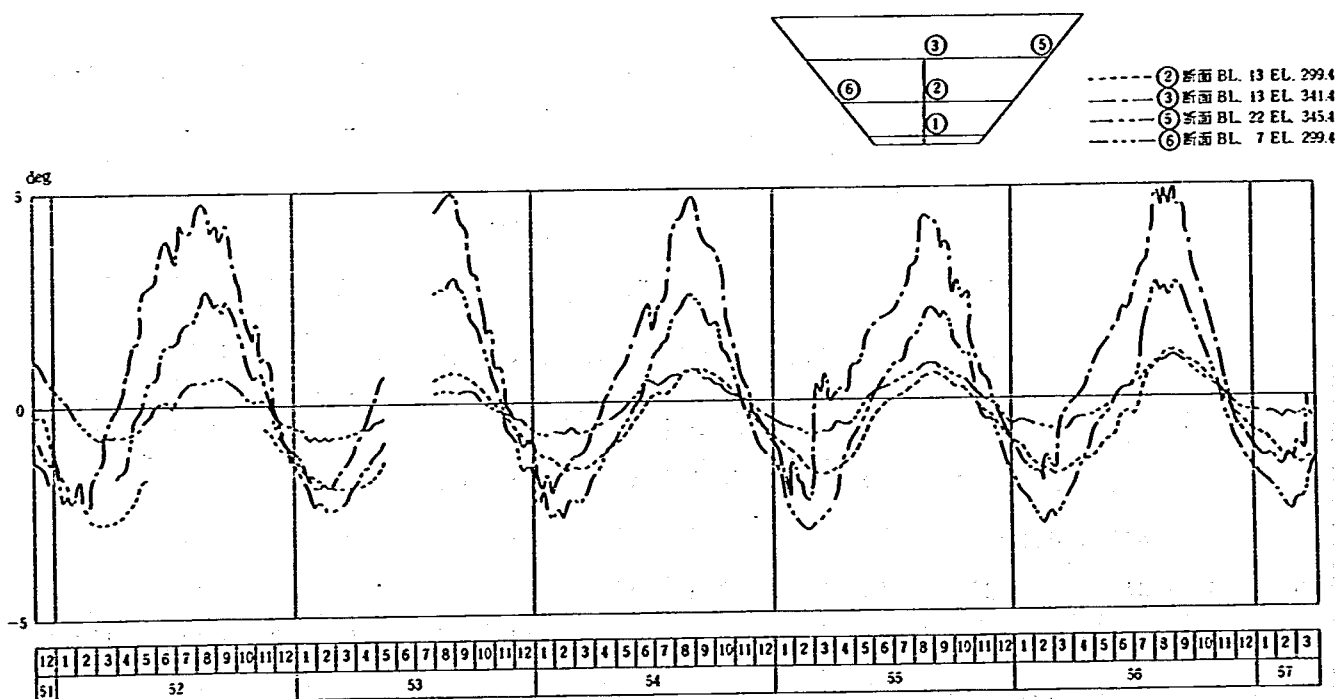
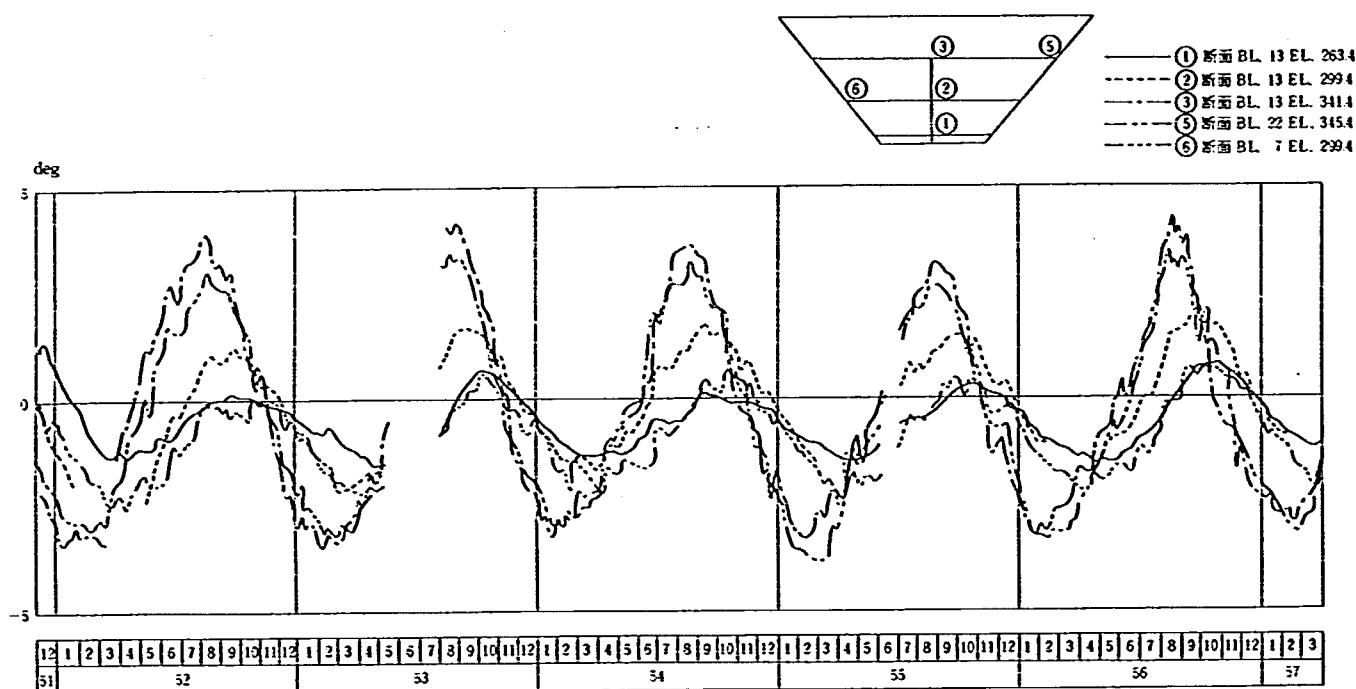


図-4.5(1) 残差温度の履歴（ダム上流面側）



図－ 4. 5 (2) 残差温度の履歴（ダム下流面側）

れ $0.125 T$ (T は堤体の厚さ) の位置である)。したがって堤体の厚さが薄い断面ほど応力計の埋設位置がダム表面に近くなり、残差温度の変動も大きなものとなっている。最大値は③断面の上流面で 5°C 程度である。また、上流面側と下流面側とでは、比較的良好似た履歴を示す結果となっている。

最後に、各断面における平均温度、等置温度勾配および応力埋設位置における残差温度のそれぞれについて、年間の振幅量を表－ 4. 1 に整理する。

表－ 4. 1 温度因子の年間の振幅量

断面位置		平均温度		等置温度勾配		上流面側の残差温度		下流面側の残差温度	
		最大-最小月	振 幅 (deg)	最大-最小月	振 幅 (deg/m)	最大-最小月	振 幅 (deg)	最大-最小月	振 幅 (deg)
①	BL.13 EL.263.4	5月-10月	0.8	5月-11月	0.05			4月-10月	1.8
②	BL.13 EL.299.4	3月-9月	2.7	3月-9月	0.60	3月-9月	2.5	3月-9月	3.0
③	BL.13 EL.341.4	3月-9月	7.8	1月-7月	0.89	2月-8月	6.5	2月-8月	7.0
④	BL. 3 EL.341.4	5月-11月	3.0	1月-7月	0.18				
⑤	BL.22 EL.345.4	3月-9月	5.9	1月-6月	0.45	2月-8月	5.2	2月-8月	6.5
⑥	BL. 7 EL.299.4	3月-9月	2.5	3月-9月	0.41	3月-9月	1.6	3月-9月	2.6

5. 変位の重回帰分析

5.1 概 説

変位の重回帰分析はダム天端クラウンにおける上下流方向変位に対して行った。これは、逆プラムライン RPL3 の固定点 (EL. 220 m) を基準とすると、プラムライン PL(I), PL2(II), 逆プラムライン RPL3 の変位量の総和として求められる。各プラムライン, 逆プラムラインの変位量およびその総和の変位量を図-5.1 に示す。

アーチダムの変位量は、①貯水位、②堤体各断面の平均温度、等置温度勾配 (残差温度は変位量にほとんど影響を及ぼさないと考えてよい)、③クリープによって規定され则认为られる。そこで、これらの因子をパラメーターとして7ケースの解析を行った。以下その過程と最終的な解析結果に対して考察を加える。

5.2 解析に用いる因子とその条件設定

アーチダムの変位量は、①貯水位、②堤体内の各断面の平均温度、等置温度勾配、③クリープによって表わされ则认为られる。そこで、これらの各因子に対して、以下のような条件を設定し解析を行った。

(1) 貯水位

今回使用した解析プログラムでは、貯水圧による変位量は貯水位の n 乗 (n は任意の正整数) で表現できるようになっている。従来の重回帰分析では、貯水位のべき乗の値として $n = 2 \sim 4$ を採用する事例が多かったが、荷重分割法によって貯水位とダム天端クラウンの下流向き変位の関係についてあらかじめ検討を加えた結果、概ね

$$d = 1.26 \times 10^{-10} h^{5.7} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここに d : 天端での変位 (mm)

h : ダムの基礎標高 EL. 260 m を原点とした場合の貯水位 (m)

の関係が得られたので、 $n = 6$ についても解析を行った。

(2) 平均温度、等置温度勾配を入力する断面

平均温度、等置温度勾配を入力する断面は、アーチダムの堤体温度を代表する断面であることが望ましいが、重回帰分析の精度を論じる上では必ずしも断面数が多いければよいというものではない (「2.5 重解析分析を行う場合の留意点」参照)。本解析では図-3.3 に示す①~⑤の断面における値を用いることにした。なお、今回使用した解析プログラムは、回帰係数の低い因子 (断面) については自動的に棄却する機能を有しているので、各解析結果の

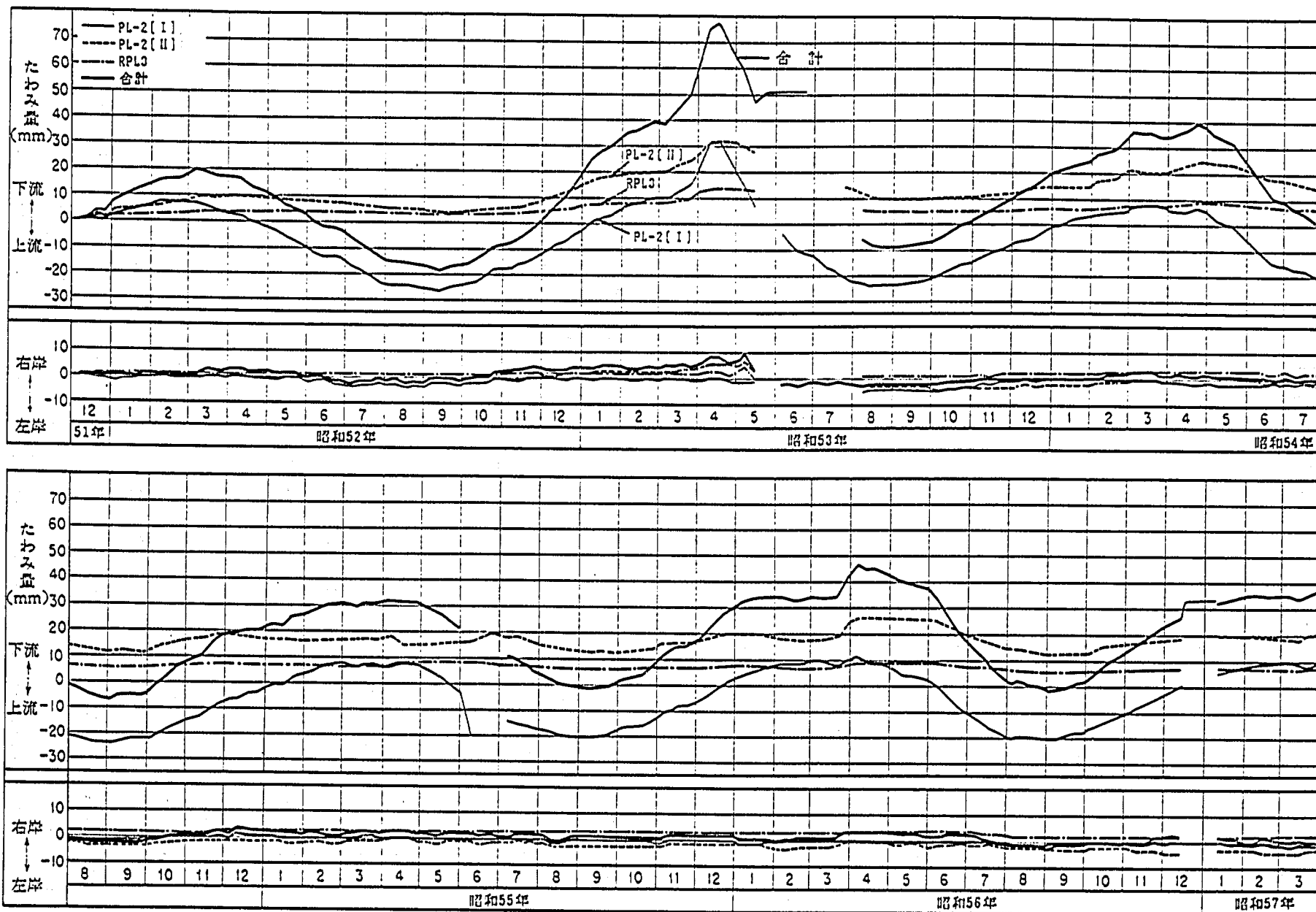


図-5.1 変位量の履歴

中では、これらのうち除去される断面も含まれる。

(3) クリープ

クリープ変形量はアメリカ内務省開拓局の式に基づいて算出するものとし、次式によって表現した。

$$d = \sum \Delta p F(k) \ln(t - k + 1) \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

ここに、 d : クリープ変形量

Δp : 荷重増分

$F(k)$: クリープの効果を表わす関数

k : 荷重増分 Δp が作用する時刻

t : クリープ変形を求める時刻

したがって、荷重の変化が存在すれば常に新しいクリープ変形が生じることになるが、解析上はすべてのクリープ変形を考慮するわけにはいかない。そこで、貯水位の変動を考慮しながら荷重変化が大きいと思われる部分について試行的にクリープの発生する時刻 k を設定するものとした。

5.3 解析結果と考察

5.3.1 因子の条件設定と解析結果の比較

上記の条件に基づいて、合計で7ケースの解析を実施した。各ケースにおける因子の条件設定と解析結果（各因子の回帰係数、実測値と解析値との相関係数）を表-5.1に整理するが、解析に用いる因子の条件設定のちがいによって、解析結果がかなり異なっていることがわかる。

以下、それぞれの因子の条件設定と解析精度との関係について考察する。

(1) 貯水圧による変位

図-5.2は、ケース1～7の解析結果より、貯水位と貯水圧によって生じる変位量との関係を比較したものである。なお、図中の貯水位はダムの基礎岩盤標高 E.L. 260 m を原点として表わしている。この中で、ケース1～4は貯水位以外の因子の条件を固定し、貯水位によって表わされる変位の関数形 h^n のべき乗数のみを $n=2, 3, 4, 6$ と変化させて重回帰分析を行ったものである。ケース1～4の結果を比較すると、解析上の最高水位であるサーチャージ水位では40～55mm前後の変位量でいずれのケースも似たような値を示しているが、途中の水位での変位量は大きく異なっていることがわかる。しかし、重回帰分析の精度を表す相関係数の値は表-5.1に示すようにいずれも9.8以上の高い値を示している。

この原因は、試験湛水時を除くと大部分のデータが最低水位から常時満水位までの約45m

表- 5.1 回帰係数と相関係数 (変位重回帰)

因子 ケースNo	貯 水 位			定数項 C	平 均 温 度 a_i					等 置 温 度 勾 配 b_i				
	原 点	乗数 n	係 数		クラウン①	クラウン②	クラウン③	アバット④	アバット⑤	クラウン①	クラウン②	クラウン③	アバット④	アバット⑤
1	260 m	2	2.661×10^{-3}	71.60	-3.933	0	-1.672	0	0	74.77	-37.65	0	0	-12.50
2	"	3	2.070×10^{-5}	81.54	-4.227	-2.314	-1.912	2.327	0	63.81	-32.02	0	0	- 8.895
3	"	4	1.809×10^{-7}	91.35	-3.757	-4.629	-1.832	3.399	0	57.38	-24.99	0	0	- 9.609
4	"	6	1.354×10^{-11}	78.36	-2.264	-6.459	-1.437	4.324	0	39.99	-25.88	3.477	0	-11.11
5	"	"	1.210×10^{-11}	69.57	-1.754	-5.407	-0.944	4.420	-1.544	38.10	-23.82	2.711	0	- 9.923
6	"	"	1.469×10^{-11}	69.06	-1.770	-3.752	-2.497	2.894	0	34.99	-16.83	-7.921	0	0
7	"	"	1.458×10^{-11}	48.32	-1.435	-1.264	-1.156	/	/	54.62	-36.28	-7.692	/	/

因子 ケースNo	経 年 変 化 (ク リ ー プ)														相関係数
	1 日	92	100	190	358	386	465	485	550	611	813	830	1218	1568	
1	/	/	0	13.62	/	/	-27.29	/	/	/	/	15.40	/	/	0.9858
2	/	/	4.842	0	/	/	-16.44	/	/	/	/	12.19	/	/	0.9888
3	/	/	0	0	/	/	- 8.191	/	/	/	/	7.079	/	/	0.9913
4	/	/	0	0	/	/	0	/	/	/	/	0	/	/	0.9955
5	0	0	/	/	/	33.16	-59.6	/	/	25.12	/	/	/	/	0.9962
6	0	/	/	/	9.53	/	0	/	-15.65	/	12.52	/	-14.93	10.35	0.9988
7	0.205	/	/	/	18.68	/	-21.84	/	0	/	8.78	/	-12.29	0	0.9984

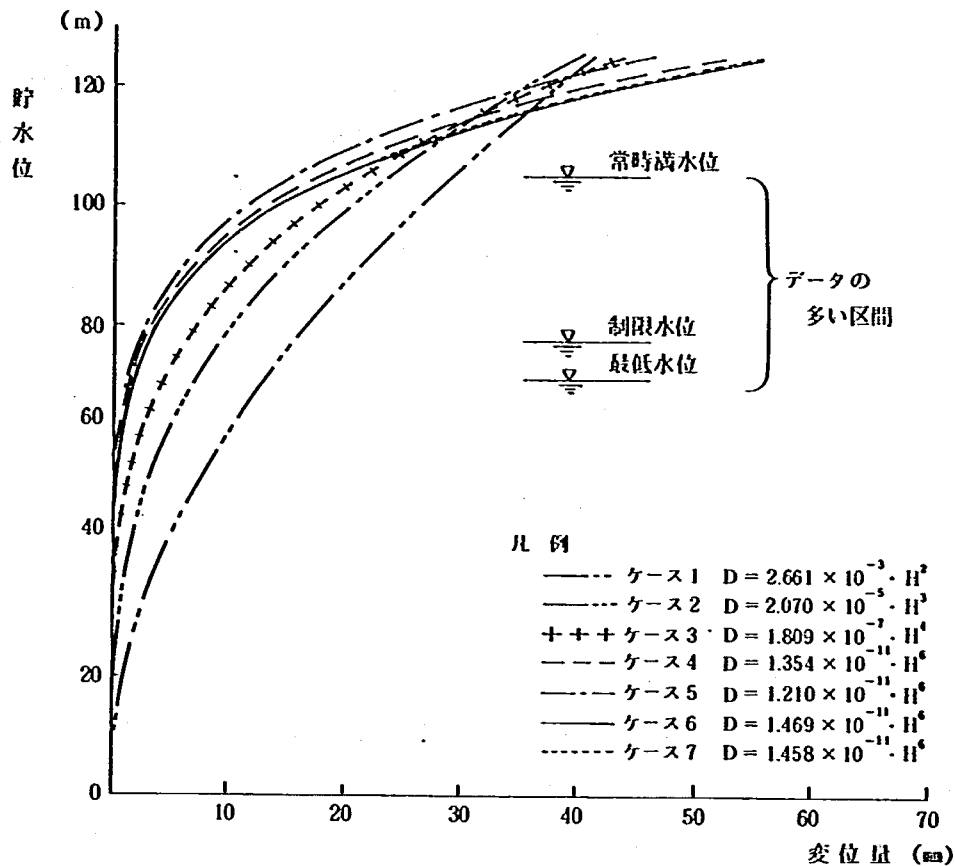


図-5.2 貯水位-変位曲線の比較
(貯水位は EL.260 m を原点とした値)

の範囲に限られていることによるためと考えられる。今回の重回帰分析では、貯水位の影響は空虚時において0であることを当然のことと考え、このような条件を暗黙のうちに仮定している。したがって、図-5.2の回帰曲線は全て原点を通る曲線として描かれている。しかし、データ数の多い最低水位から常時満水位までの区間に対してのみ回帰曲線を精度よく推定するのであれば、その曲線は必ずしも原点を通る必要はないわけである。重回帰分析では、変位量に影響を及ぼす因子として、貯水位のほか、温度、クリープなどいくつかの因子を考慮している。この場合、求められた回帰式の定数項を貯水位、温度、クリープのそれぞれの項に区別することはできないから、空虚時において貯水位の影響を0と仮定しているつもりでいても、実際の計算ではそのように解析されているとは限らない。むしろ、データ数の多い最低水位から常時満水位までの区間の近似度を高めるように原点を移動させているはずである。したがって、図-5.2の結果は、データの多い最低水位から常時満水位までの区間の変位を概ね一致させるように各曲線を移動して評価すべきである。事実、最低水位から常時満水位までの区間の水位変動によって生じる変位量の変動は、14.7~17.8 mmとなっており、いずれのケースの解析結果も似たような値を示している。

以上のことから、重回帰分析で求められた貯水圧による変位の絶対値は必ずしも意味を持

たないことがわかる。変位の絶対量が意味を持つのは、貯水位によって表わされる変位の関数形が実際の挙動を正しく示している場合に限られる。したがって、変位の絶対値を議論する場合には、あらかじめ貯水位によって表わされる変位の関数形の妥当性を十分検討しておく必要があるといえる。今回の解析では、(5.1)式で示した荷重分割法の解析結果を考慮し貯水圧による変位は貯水位の6乗で表されるものとした。

(2) 温度による変位

一般にアーチダムの変位に関する重回帰分析を行う場合、単一の断面の温度だけではその挙動を正しく判断できないと考え、複数の断面の温度をその解析に用いている。これは、個々の断面の温度変化がアーチダムの変位に影響を与えることを考えれば当然なことであるが、温度を入力する断面が多いからといって、必ずしも精度の高い重回帰分析が行われるとは限らない。

今回の解析では、5つの断面の平均温度と等置温度勾配を用いて解析を行った。解析結果から得られる各因子の回帰係数を表-5.1に整理したが、表より明らかなようにケースによって各断面の温度の影響度が大きく異なっていることがわかる。たとえば、平均温度についてみると、ケース1では②断面の回帰係数は0であるのに、ケース3~6では最も大きな回帰係数を示しており、また、等置温度勾配についても、③断面の回帰係数はケース4、5ではプラスの値であるのに、ケース6、7ではマイナスの値を示している。

このように、各解析ケースでそれぞれの温度因子に対する回帰係数が全く異なる結果を導くのは、それぞれの温度因子がそれぞれ異なった挙動を示しているとはいいいながら、一年を周期とする正弦曲線で近似できるという点では大なり小なり同様な挙動を示しているためである。例えば、2つの断面における温度因子の履歴が全く同一であるとすれば、それぞれの因子の回帰係数はその和が一定であれば、いかなる組合せであってもよいわけである。したがって、温度を入力する断面の数を増やせば、当然ながらそれに応じて実測値との相関係数は高くなるが、個々の断面の温度に対する解析精度は、かえって低くなる可能性があると考えられる。

以上のことから、温度荷重の影響を正しく把握するのであれば、それぞれの重回帰分析の結果より得られる各断面の温度の回帰係数の妥当性を理論的な考察をもとに詳しく検討し、温度を入力する断面の数を必要最小限におさえるのが適切であるといえる。

表-5.1の中のケース7は、以上の点を考慮して温度を入力する断面を①、②、③断面にしぼって計算を行ったものである。ケース6に比べて④、⑤断面の温度の入力を省略しているが、その他の因子の条件は全く同一となっている。相関係数の低下はわずかに0.0004であることから、今回の解析ではケース7の結果を最も信頼性のある解と判断した。

(3) クリープによる変位

クリープによる変位は、作用荷重に対する時間依存性の変位を表しているが、アーチダムの重回帰分析を行う場合、クリープのほかにも種々の時間依存項が存在する。すなわち、貯水位が極めて低い状態、または高い状態は試験湛水時のみの現象であり、ダムの運用時には貯水位は最低水位から常時満水位の間を変動している。したがって貯水位は時間依存性があるということができる。また、堤体温度も貯水に伴って徐々に冷却されていく傾向があり、また気象状態によっては年々特定方向へ変化することもありうるわけで、同様に時間依存性を持つということができる。このような場合、貯水圧または温度荷重に対する変位の回帰式が精度よく求められないと、その結果はクリープによる変位の精度にも大きく影響することになる。また、逆にクリープによる変位を表わす項が適切に設定されていないと貯水圧または温度荷重による変位が正しく求められないことになる。

図-5.3は各ケースの計算結果から得られるクリープ曲線を描いたものである。この中でケース1～4はクリープの発生時期を一定として貯水圧による変位の関数形を変化させたものであるが、これによってクリープによる変位が大きく変化していることがわかる。すなわち、これは、貯水圧による変位の解析精度がクリープによる変位に大きく影響を与えているものと考えられる。また、ケース5,6はクリープ以外の因子の条件はケース4と同一である

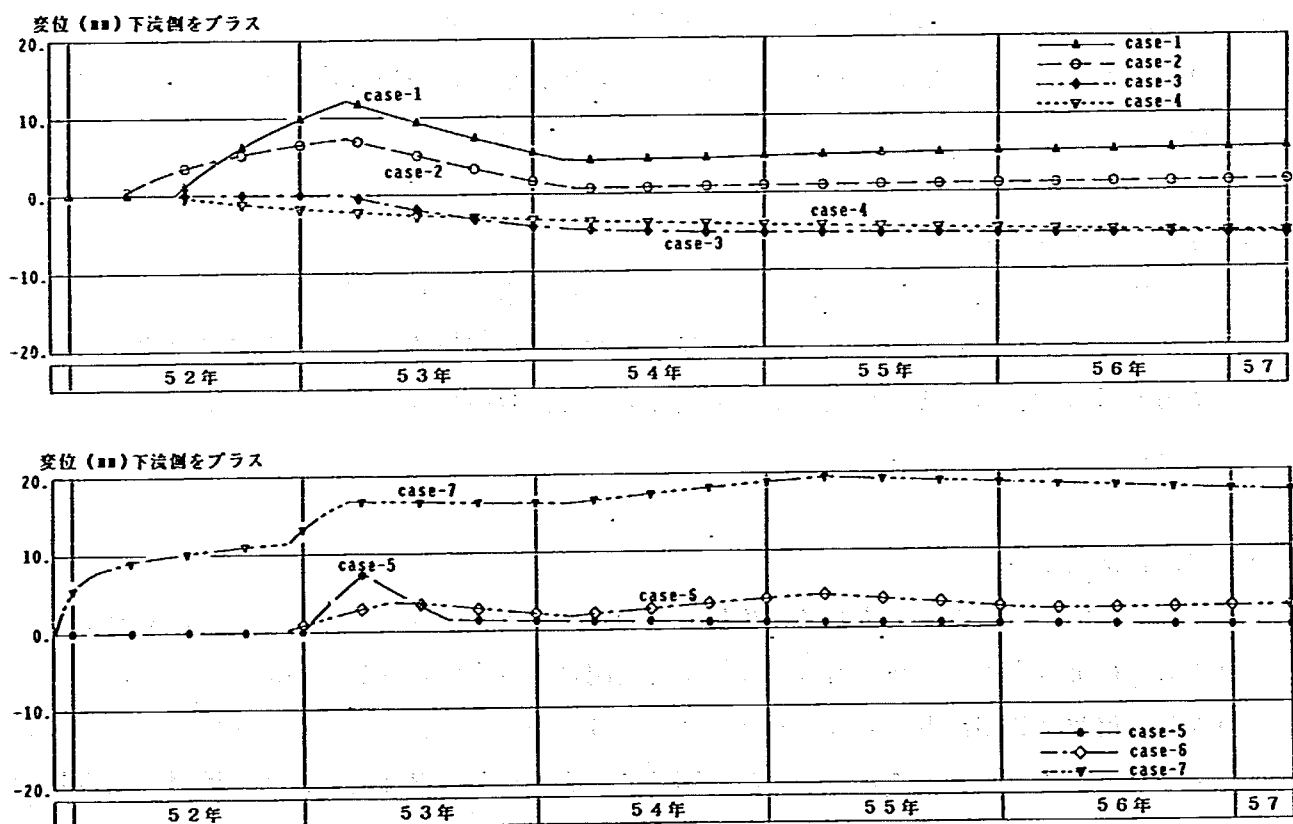


図-5.3 クリープ曲線の比較

が、クリープの発生時期を貯水位が急激に変化した時点としたことにより相関係数が改善されており、重回帰分析ではクリープの発生時期の設定が重要な要素であることがわかる。

5.3.2 解析結果から得られたダムの変位

表－5.1に示す回帰係数をもとに、各因子が変動することによって生じる変位の変化量を各ケースごとに求めたものを表－5.2に示す。この表は、貯水位の欄については、貯水位が0 (EL. 260 m) からサーチャージ水位 (EL. 385 m) まで変化したときに生じる変位量と、通常の貯水池の運用で生じる最低水位から常時満水位までの水位変化によって生じる変位量を示しており、温度については、①～⑤断面の欄では各回帰係数に表－4.1に示した各因子の年間の変動幅を乗じた値を示し、合計の欄では昭和53～56年の年間の温度変化によって生じる変位量の平均値を示している。また、クリープの欄ではクリープによって生じる変位量の最大値を示している。

また、解析ケースの中で最も高い相関係数を示したケース6と温度因子の項を整理したケース7について、貯水位、平均温度、等置温度勾配、クリープによって表わされる変位の履歴を図－5.4及び図－5.5に示す。なお図中の平均温度の履歴が湛水開始時に0から出発していないのは、平均温度の入力値として実測の平均温度をそのまま入力しているためであり、湛水時を基準値として考えるとすれば、初期値の分だけグラフを平行移動してみればよい（図中のグラフは平均温度が0の時の変位を0として表わしたものである）。

これらの重回帰分析結果をもとに、真名川ダムの変位挙動についてとりまとめると次のようになる。

(1) 貯水圧による変位

貯水圧によって生じる変位量は最大（サーチャージ水位時）で下流側へ50mm程度（ケース4～7では46.2～56mm）である。また、通常の貯水池の運用時、すなわち最低水位と常時満水位の間の水位変動によって生じる変位量の変動は、17mm程度（ケース4～7では14.7～17.8mm）である。

(2) 温度による変位

年間の温度変化によって生じる変位量を平均温度と等置温度勾配とに分けてみると、平均温度による変位量は16～24mm、等置温度勾配による変位量は13～23mmとなっている。このうち、相関係数が最も高くなったケース6では平均温度によるものが24mmで等置温度勾配によるものが13mmであるのに対し、温度因子の項を整理して温度を入力する断面を減らし、個々の断面の回帰係数に対する解析精度が最も高いと考えられるケース7では、平均温度によるものが16mmで等置温度勾配によるものが23mmと、その割合が逆転している。この原因は

表-5.2 各因子の変化によって生じる変位量

単位: mm, 下流側をプラス

因子 ケース名	貯 水 位		年 間 の 温 度 変 化													クリープ (最大値)
	EL. 260 ~385 m	EL. 331 ~365 m	平 均 温 度						等 置 温 度 勾 配						合 計	
			クラウン①	クラウン②	クラウン③	アバット④	アバット⑥	合 計	クラウン①	クラウン②	クラウン③	アバット④	アバット⑥	合 計		
1	41.6	15.9	-3.1	0	-13.0	0	0	-16	3.7	-22.6	0	0	-5.6	-22	-35	12.1
2	40.4	16.6	-3.4	- 6.2	-14.9	7.0	0	-18	3.2	-19.2	0	0	-4.0	-18	-35	7.4
3	44.2	17.4	-3.0	-12.5	-14.3	10.2	0	-20	2.9	-15.0	0	0	-4.3	-14	-33	- 5.7
4	51.7	16.4	-1.8	-17.4	-11.2	13.0	0	-20	2.0	-15.5	3.1	0	-5.0	-15	-33	- 5.5
5	46.2	14.7	-1.4	-14.6	- 7.4	13.3	-9.1	-21	1.9	-14.3	2.4	0	-4.5	-13	-33	7.6
6	56.0	17.8	-1.4	-10.1	-19.5	8.7	0	-24	1.7	-10.1	-7.0	0	0	-13	-35	4.0
7	55.6	17.7	-1.1	- 3.4	- 9.0			-16	2.7	-21.8	-6.8			-23	-35	19.4

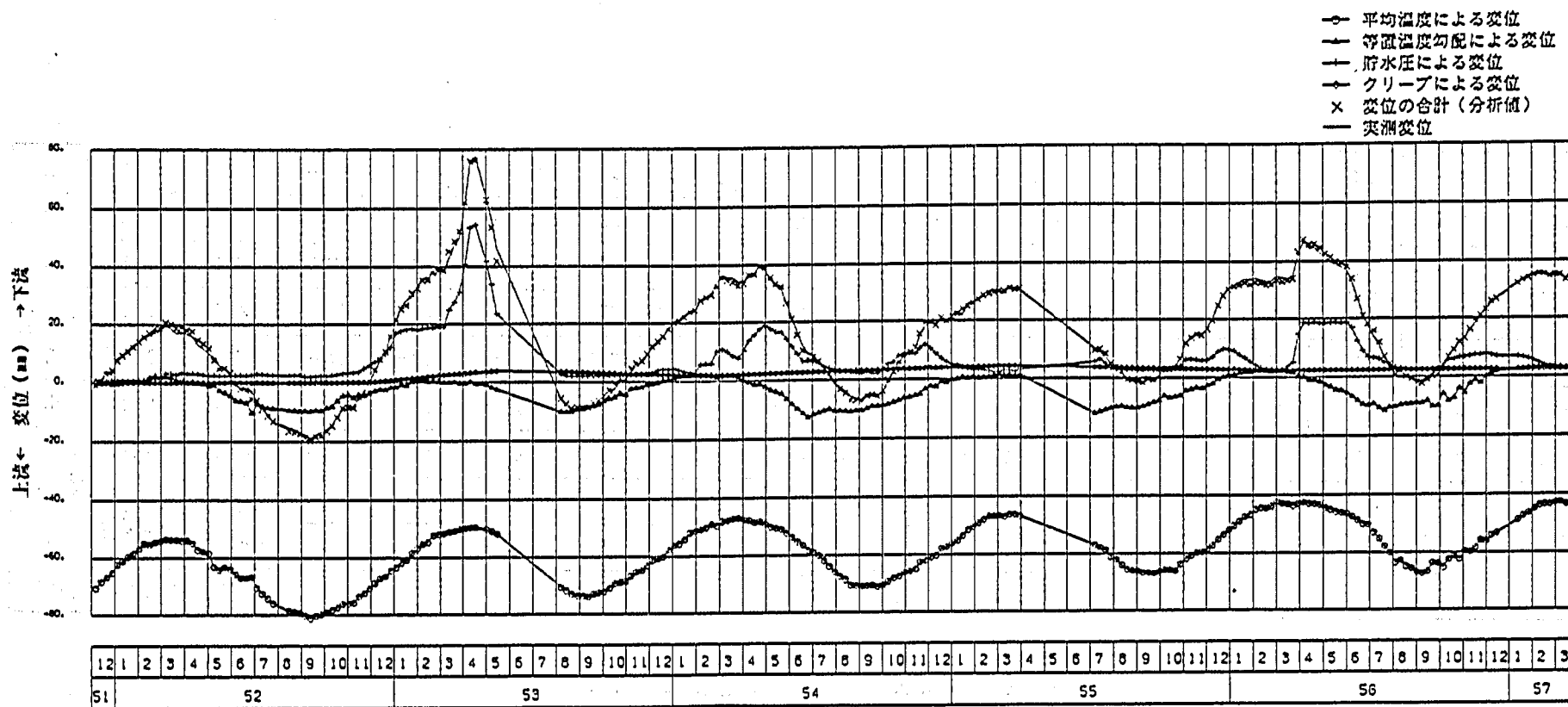


图-5.4 重回帰分析図 (CASE-6)

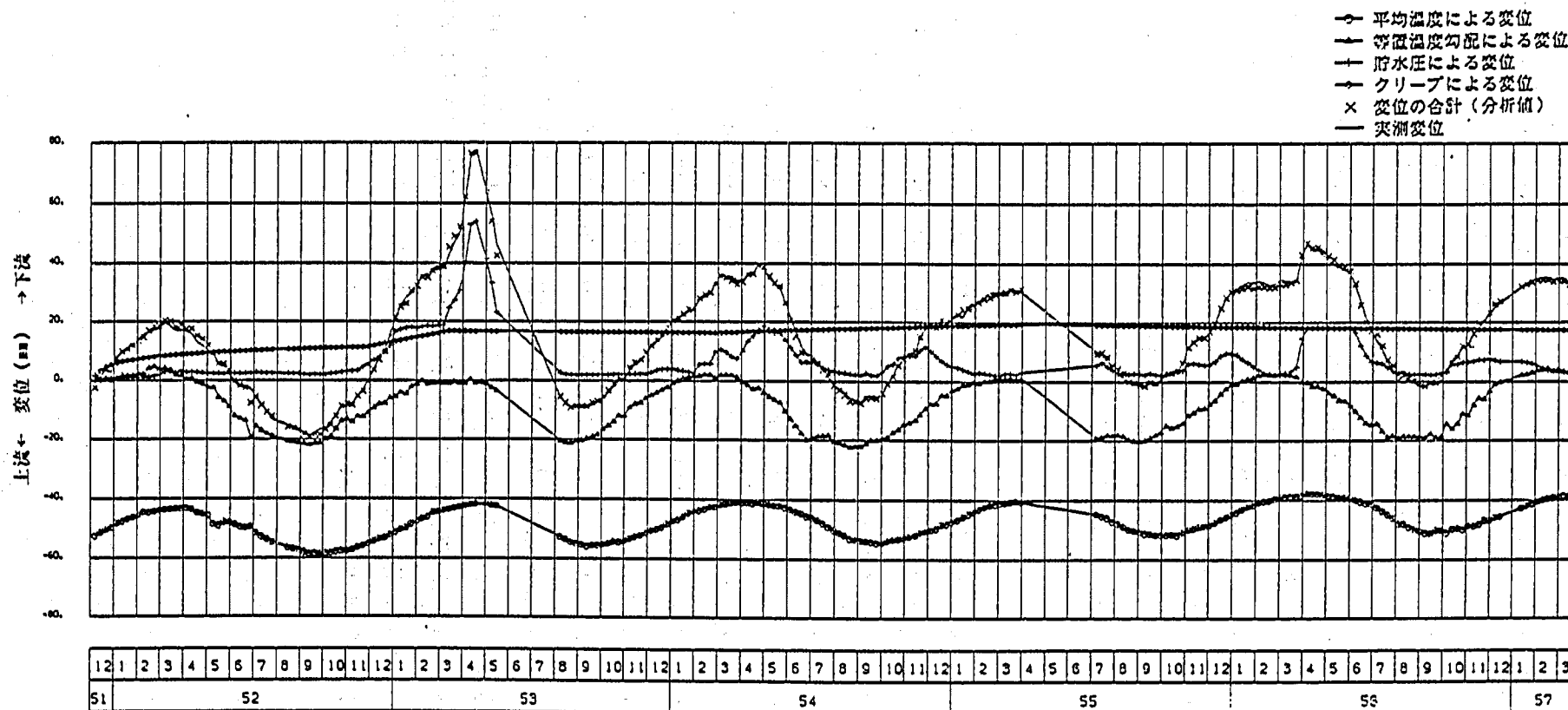


図 - 5.5 重回帰分析図 (CASE-7)

前述したように、平均温度と等置温度勾配との履歴が断面によっては、よく類似しているために、平均温度と等置温度勾配の項がうまく分離できていないためと考えられる。ただし、この平均温度と等置温度勾配との値を合計して年間の温度変化によって生じる変位量を求めると、いずれの計算結果も33~35mmとなり、この値は実際のダム挙動を正しく表現しているものと考えてよい。

また、平均温度の変化によって生じる変位をみると、年単位の振動を繰り返しながら徐々に下流側にシフトしていく傾向が認められる。これは、湛水によってダム堤体の温度が徐々に低下しているためであり、解析の対象とした5年間でこれによって生じる変位量はケース6では下流側へ約12mm、ケース7では6mm程度であった。この差については、平均温度の経年変化の影響とクリープによる変位の分離が十分に行えなかったためと考えられるが、この点については次のクリープによる変位の項で詳しく述べる。

(3) クリープによる水位

クリープによる変位量は各計算ケースによってかなり異なった結果を示している。このうち、ケース1~3は貯水圧による変位を表わす関数形が妥当でなかったことによるものと考えられるが、ケース4~7でもその値は大きく異なっている。これは、主に(2)項で述べた温度変化の経年変化による変位とクリープによる変位とが、うまく分離できないために生じているものと考えられる。たとえば、全体的に見て重回帰分析結果の精度が最も高いと考えられるケース6、7を比較しても、クリープの最大変位量はそれぞれ4.0mm、19.7mmとなっておりその差は大きい。しかし、(2)の項で述べたように温度の経年変化による変位量はそれぞれ12mm、6mmとなっており、これをクリープによる変位量に加えると、経年変化による変位量はそれぞれ16mm、25.7mmとなり、その差は小さくなる傾向にある。したがって、上述のように、これはクリープによる変位と温度の経年変化による変位が十分に分離されていないことによるものと考えられる。ただし、クリープの発生時期としては湛水の初期と、試験湛水で貯水位を増加させた昭和52年12月~53年5月の間でその大部分が発生しており、それ以降のクリープによる変化量は比較的安定した挙動を示していることから、この結果は全体的な解析精度にはあまり影響を及ぼさないものと考えられる。

6. 応力の重回帰分析

6.1 概 説

応力計は図-3.3に示す①～⑥断面の上流面付近、断面中央、下流面付近のそれぞれの位置に、水平方向（アーチ接線方向）、鉛直方向に埋設されている。このうち、応力の重回帰分析を実施したのは表-6.1に示した12成分である。

アーチダムの応力は、①貯水位、②堤体各断面の平均温度、等置温度勾配、残差温度、③クリープ変形によって規定されると考えられる。これらの作用因子に対する解析条件の設定と解析結果について以下に述べる。

表-6.1 応力の重回帰分析実施位置

断 面 位 置		上 流 面 側		下 流 面 側	
		水 平	鉛 直	水 平	鉛 直
③	BL.13 EL.341.4 m	○	○	○	○
②	BL.13 EL.299.4 m	○	○	○	—
①	BL.13 EL.263.4 m	—	—	—	○
⑤	BL.22 EL.345.4 m	○	—	○	—
⑥	BL.7 EL.299.4 m	○	—	○	—

6.2 解析に用いる因子とその条件設定

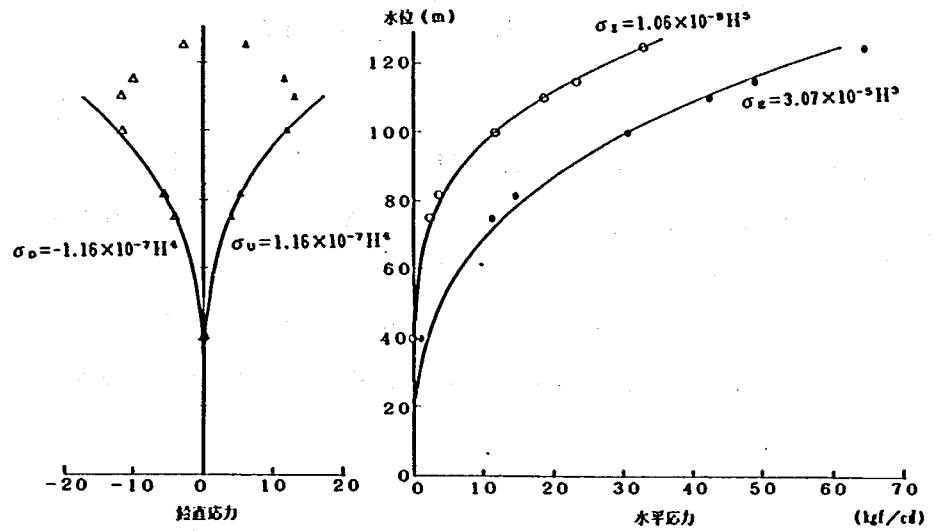
アーチダムの堤体内の応力は、①貯水位、②堤体内の各断面の平均温度、等置温度勾配、残差温度、③クリープ変形によって表わされると考えられる。そこでこれらの因子に、次のような条件を設定して解析を行った。

(1) 貯水位

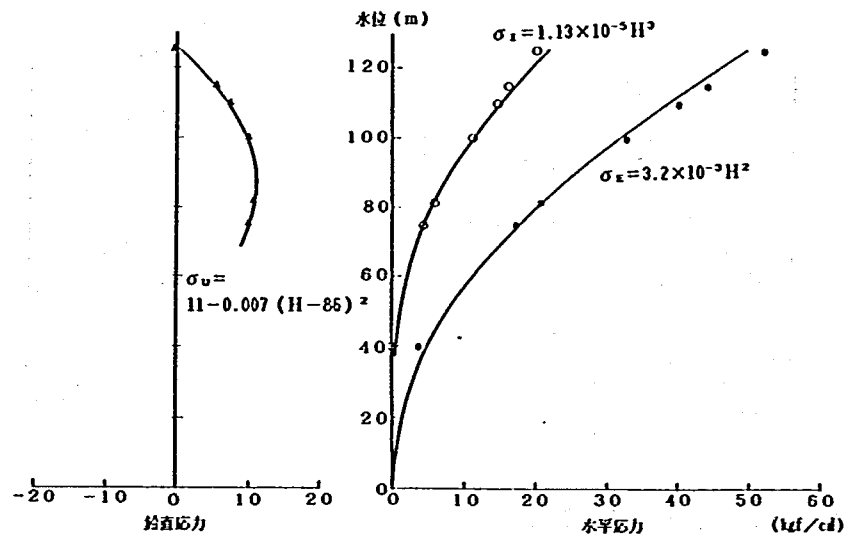
今回使用した解析プログラムでは、貯水圧による応力は貯水位の n 乗（ n は任意の正整数）で表現できるようになっている。そこであらかじめ荷重分割法による応力解析を実施して貯水位と各断面の応力の関係を求め、これによって貯水圧による応力の関数形を与えるものとした。荷重分割法による解析結果を図-6.1に示す。

(2) 平均温度、等置温度勾配、残差温度を入力する断面

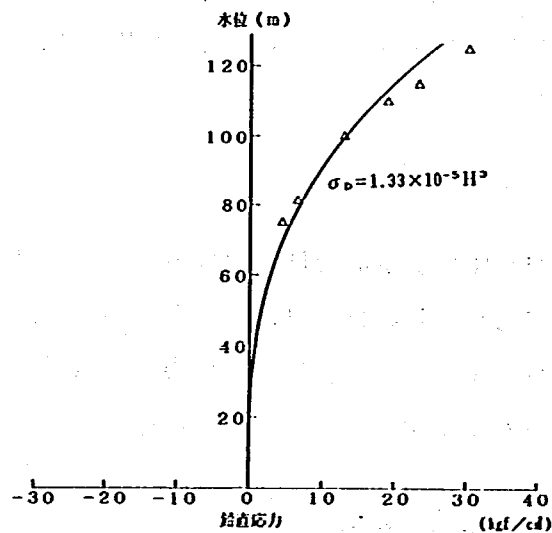
平均温度、等置温度勾配、残差温度を入力する断面はアーチダムの堤体温度を代表する断面であることが望ましいが、「5. 変位の重回帰分析」で述べたように重回帰分析の精度を論



〔③断面BL. 13 EL. 341.4m〕

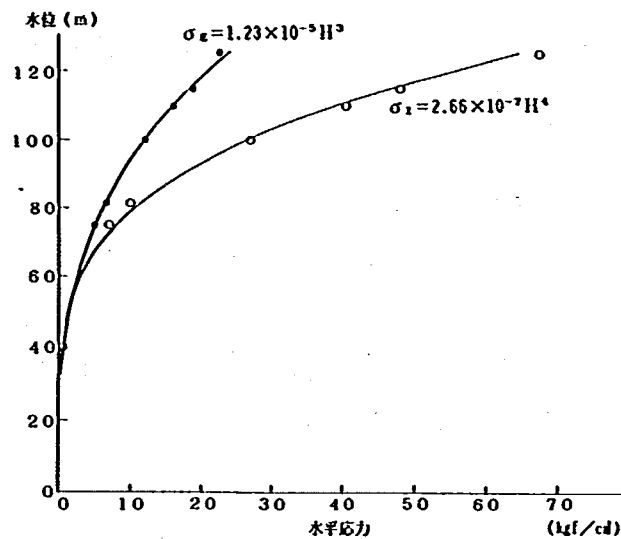


〔②断面BL. 13 EL. 299.4m〕

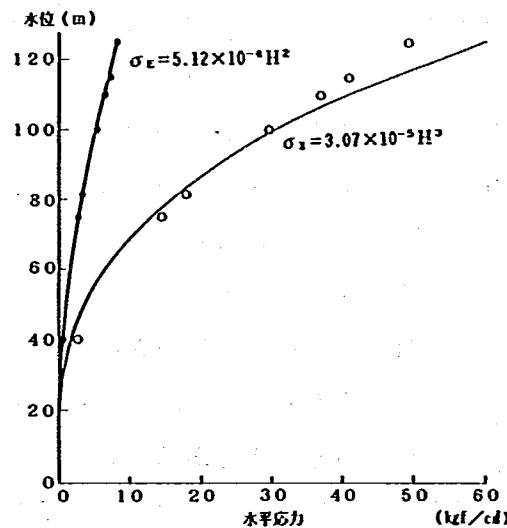


〔①断面BL. 13 EL. 263.4m〕

図-6.1 荷重分割法から得られる貯水位一応力曲線
(貯水位は EL. 260 m を原点とした値)



(㊦断面BL. 22 EL. 345.4m)



(㊦断面BL. 7 EL. 299.4m)

図-6.1 荷重分割法から得られる貯水位一応力曲線
(貯水位は EL. 260 mを原点とした値)

じる上では必ずしも断面数が多ければよいというものではない。そこで、まず平均温度と等置温度勾配については変位の重回帰分析のケース7と同様に3断面のデータを入力することとした。ただし、①～③断面の解析では、①～③断面の温度データを入力とするが、⑤断面の解析では①、②、⑤断面、⑥断面の解析では①、③、⑥断面の温度データを入力することとした。なお、残差温度については、解析位置（応力計埋設位置）以外の位置での値については、その影響が小さいと考え、各解析位置の残差温度のみを入力することとした。

(3) クリープ

クリープの発生時期は、基本的には変位に対する重回帰分析で最も高い相関数を得たケー

ス 6 と同じ時期を与えることとし、個々の断面において多少の修正を施した。

6.3 解析結果と考察

6.3.1 因子の条件設定と解析結果の比較

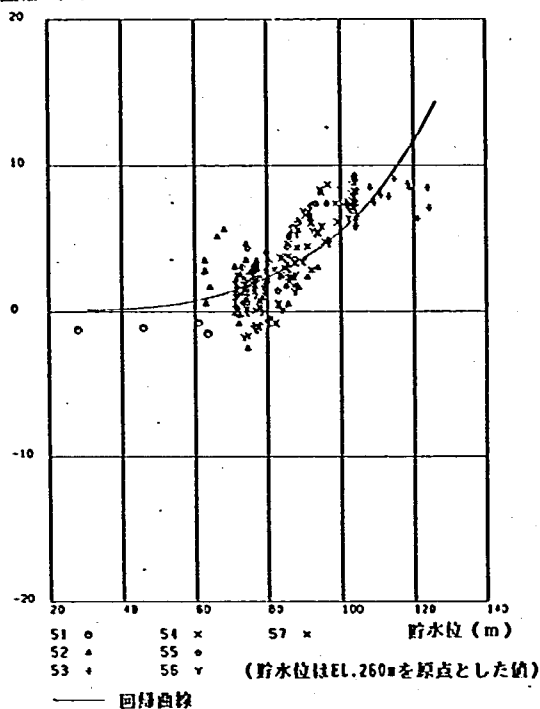
応力に対する重回帰分析は、「5. 変位の重回帰分析」に述べた方法と同様な方法で実施した。したがって、基本的には変位の重回帰分析の場合と同様な結論が得られるわけであるが、応力の重回帰分析においては、変位の重回帰分析に比べて、さらに条件が複雑な場合がいくつか生じる結果となった。ここでは、これらについて考察を加えるものとする。

(1) 貯水圧による応力が貯水位のべき乗とならない場合の解析（③断面 BL.13 EL.341.4 m の上・下流面側の鉛直応力）

今回使用した重回帰分析のプログラムでは、貯水圧による変化量を表わす関数として、貯水位のべき乗の形を採用している。したがって、重回帰分析を実施するにあたっては、事前に荷重分割法などの計算によって貯水位と発生応力の関係を検討し、貯水圧による応力を表わす関数が貯水位のべき乗の形で表現できるかどうかを検討しておく必要があるといえる。このため、今回の解析では事前に荷重分割法による検討を行い、貯水圧による応力の関数形の推定を行った。この結果、たとえば図-6.1の中で、③断面（BL.13 EL.341.4 m）の上流および下流面の鉛直応力の分布は、貯水位が EL.360 m（図中の 100 m）を超えると貯水位のべき乗の曲線では近似できないことがわかった。したがって、重回帰分析を行う場合には、この部分のデータは除いて解析を行うべきであるといえる。

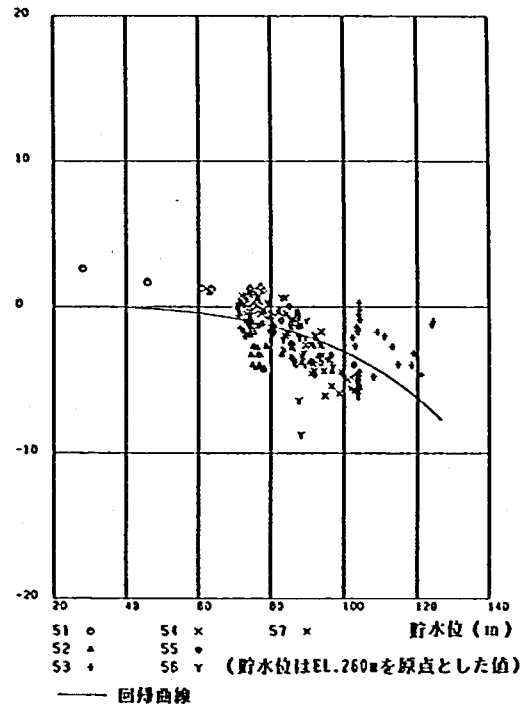
ちなみに、この③断面の鉛直応力について、貯水位が EL.360 m 以上のデータを含めて重回帰分析を行った場合と、貯水位が EL.360 m 以上のデータを除いて計算を行った場合とを比較してみると、各因子の回帰係数および解析値と実測値との相関係数は表-6.2 に示すようになる。なお、この計算は重回帰分析の入力因子の中でクリープ項を除いて計算を行ったものである。これは、クリープ項が入ると、たとえ入力条件が適切でない場合であっても、実測値との誤差をクリープ項でカバーしてしまうために、計算結果の比較が容易でなくなるためである。表-6.2 からわかるように、全てのデータを用いて計算を行った場合と貯水位が EL.360 m 以上のデータを除いた場合とでは、相関係数の差は 0.007 程度であるが、各因子に対する回帰係数の値は大きく異なっていることがわかる。特に、貯水位に対する回帰係数については 2～3 倍の差を有している。この点をさらに詳細に検討するために、貯水位と応力との関係を示したものが図-6.2 である。図は、横軸に EL.260 m を原点とした貯水位、縦軸には応力値を示したものであり、図中の実線は重回帰分析より得られた回帰曲線、プロットした各点は、実測データから重回帰分析の結果から得られた温度応力を差し引いた後の応力値、すなわち（貯水位による応力）+（実測応力との誤差）の値である。したがって、解

応力 (kgf/cm²)
圧縮がプラス



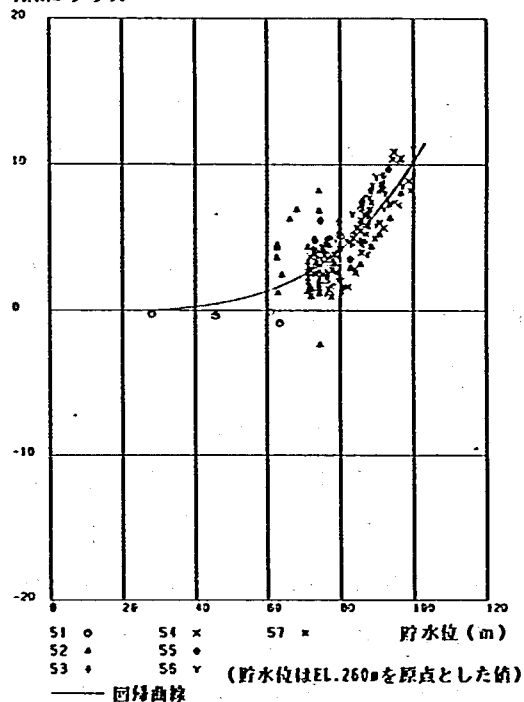
(1) BL.13 EL.341.4m 上流面側 鉛直応力
全データによる解析

応力 (kgf/cm²)
圧縮がプラス



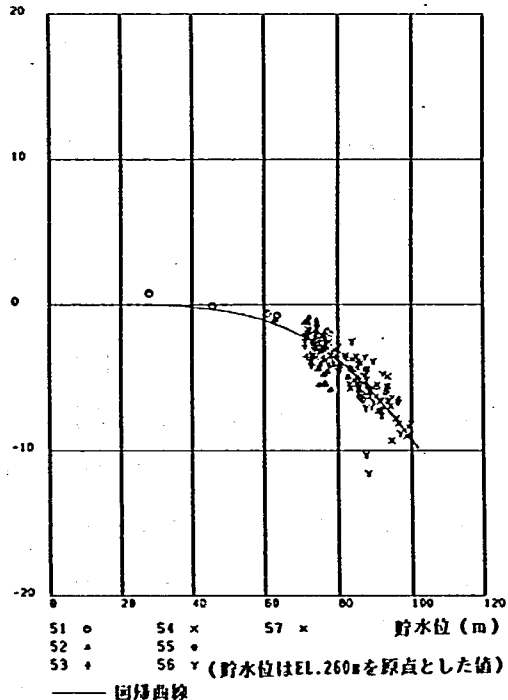
(2) BL.13 EL.341.4m 下流面側 鉛直応力
全データによる解析

応力 (kgf/cm²)
圧縮がプラス



(3) BL.13 EL.341.4m 上流面側 鉛直応力
貯水位EL.360m以上のデータを削除

応力 (kgf/cm²)
圧縮がプラス



(4) BL.13 EL.341.4m 下流面側 鉛直応力
貯水位EL.360m以上のデータを削除

図-6.2 貯水位-応力曲線 (③断面 BL.13 EL.341.4 m 鉛直成分)

析精度が高ければ、各データは貯水位の n 乗で設定した回帰曲線上にきれいに並ぶことになるが、入力因子の設定が不適切で解析精度が低い場合には、回帰式からのずれが大きくなることになる。まず、全てのデータを用いた計算結果である図-6.2(1), (2)についてみると、プロットされた点は、貯水位が80mまでは回帰曲線の上下に分散しているが、貯水位が100m前後では回帰曲線よりも絶対値が大きくなり、また貯水位が110m以上のところでは、逆に絶対値が小さくなる傾向にある。したがって、プロットされた点の分布は求められた回帰曲線よりも、むしろ、図-6.1に示した荷重分割法の結果と似た傾向となっている。一方、貯水位がEL.360m以上のデータを除いて重回帰解析を行った場合、図-6.2(3), (4)のように、データは回帰曲線上に比較的きれいに並ぶ結果となっている。このように、貯水圧による応力の関数形が貯水位のべき乗の形で表わせない場合には重回帰を行う貯水位の対象区間を限定することによってその解析精度を上げることが可能となる。

(2) クリープの影響が大きい場合の解析 (①断面 BL.13 EL.263.4m の下流面側の鉛直応力)

①断面 (BL.13 EL.263.4m) の下流面側の鉛直応力の履歴を図-6.3に示すが、昭和53年4月を境にその値が 10kgf/cm^2 程度シフトしているのが明らかである。この時期は、試験湛水で貯水位を常時満水位から設計洪水位に上昇させた時期である。①断面の位置は着岩面付近であることから、この時期に比較的大きなクリープが発生したものと考えられるが、このような場合には特にクリープ項の設定を入念に行う必要があると考えられる。

図-6.4は、重回帰分析から得られるクリープ曲線を示したものである。この中でcase-1は変位の重回帰分析と同様にクリープ項の設定を行ったものであるが、上記で述べたように昭和53年4月を境に応力値がシフトするような結果とはなっていない。そこで、クリープの発生時期を再検討し、昭和53年4月前後にクリープの発生時期を新たに設定し、case-2の計算を行った。この結果、昭和53年4月前後を境に応力値が 10kgf/cm^2 程度シフトした結果を得た。また、解析結果から得られる各因子の回帰係数、相関係数を表-6.3に示すが、case-2の相関係数は、case-1に対して向上している。

ところで、case-2における貯水位-応力曲線におけるデータの分布をみると図-6.5に示すようになる。重回帰分析の精度が高ければ、プロットされる各点は貯水位の n 乗（ここでは3乗）の曲線上にきれいに並ぶはずであるが、この図では、貯水位が60~120mの範囲ではほぼ直線的（貯水位の1乗）なデータの分布を示しており、荷重分割法から得られた貯水位のべき乗数（3乗）が適切でなかった可能性を示している。このため、貯水位のべき乗数を2乗、1乗としたケース3、4を実施した。表-6.3にはこれらの結果も合わせて示しているが、最も高い相関係数を示したのは、貯水位のべき乗数を1乗に設定したケース4であった。

このことから、解析位置が着岩面に近く、岩盤内のクリープの影響が比較的大きくでてく

表-6.2 入力条件のちがいと回帰係数, 相関係数との関係 (BL.13 EL.341.4 m 鉛直成分)

※重回帰分析はクリープ項を含まない計算とした

解析成分	因子 入力データ	貯 水 位		定 数 項	平 均 温 度			等 置 温 度 勾 配			残差温度	相関係数
		べき乗数	係 数		①	②	③	①	②	③		
BL.13 EL.341.4 m 上流面側鉛直応力	全 デ ー タ	4	5.683×10^{-8}	29.99	-0.832	-3.114	1.927	-26.80	-7.892	4.958	3.430	0.9782
	水位 360 m 以上を除く	4	1.025×10^{-7}	38.27	-2.217	-1.248	0.906	-22.84	0	0	3.511	0.9855
BL.13 EL.341.4 m 下流面側鉛直応力	全 デ ー タ	4	-2.968×10^{-8}	24.20	-0.463	0	-0.565	0	15.26	0	3.361	0.9862
	水位 360 m 以上を除く	4	-9.137×10^{-8}	29.36	-0.484	-0.844	0	0	10.49	3.942	3.251	0.9949

表-6.3 入力条件のちがいと回帰係数, 相関係数との関係 (BL.13 EL.263.4 m 下流面側 鉛直応力)

ケース名	因子 入力データ	貯 水 位		定 数 項	平 均 温 度			等 置 温 度 勾 配			残差温度
		べき乗数	係 数		①	②	③	①	②	③	
case-1	従来のクリープ項, 水位の3乗	3	4.483×10^{-6}	-43.51	3.531	0.915	0	-15.16	0	0	1.922
case-2	クリープ項を変更, "	3	5.309×10^{-6}	0	0.888	0.741	0	24.32	0	-0.516	1.603
case-3	" , 水位の2乗	2	7.384×10^{-4}	6.88	1.061	0	0	21.06	2.595	-0.835	1.983
case-4	" , 水位の1乗	1	1.314×10^{-1}	0	1.271	0	0	20.20	2.894	-0.870	1.901

ケース名	因子 入力データ	ク リ ー プ									相関係数
		1	358	464	485	500	550	813	1218	1568	
case-1	従来のクリープ項, 水位の3乗	2.173	-15.61	-23.17	-	-	52.80	-20.35	13.47	0	0.9790
case-2	クリープ項を変更, "	1.124	-17.47	-109.6	-207.5	40.46	-67.69	0	-	-	0.9897
case-3	" , 水位の2乗	0.414	-17.41	-96.39	-204.8	38.41	-63.25	0	-	-	0.9903
case-4	" , 水位の1乗	0	-15.16	-87.82	-202.1	36.19	-54.01	0	-	-	0.9909

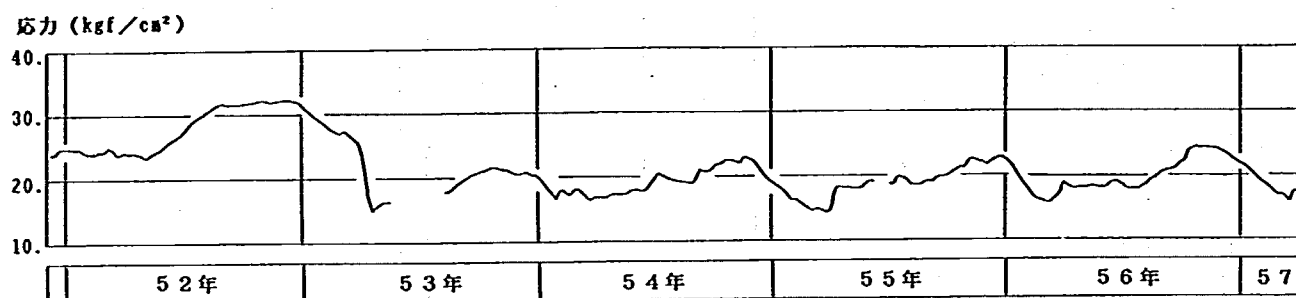


図-6.3 ①断面 BL.13 EL.263.4 m 下流面側鉛直応力の履歴

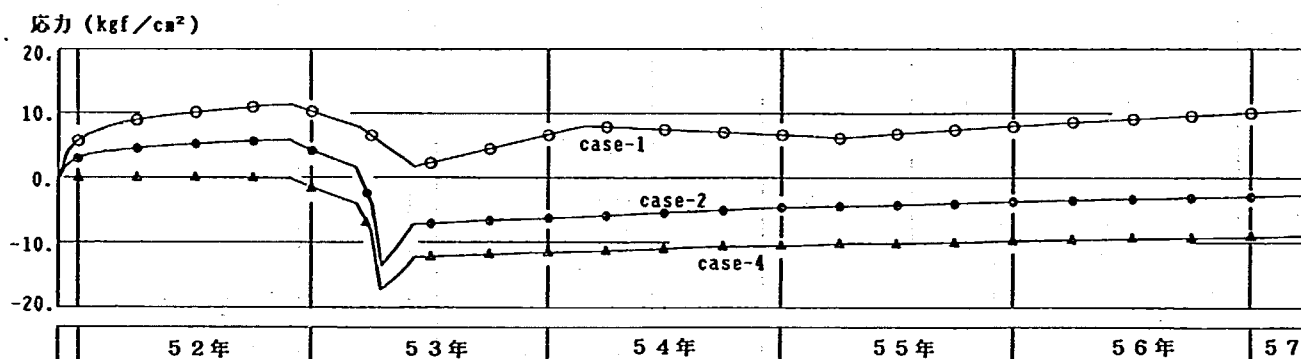


図-6.4 クリープ曲線の比較 (①断面 BL.13 EL.263.4 m 下流面側鉛直応力)

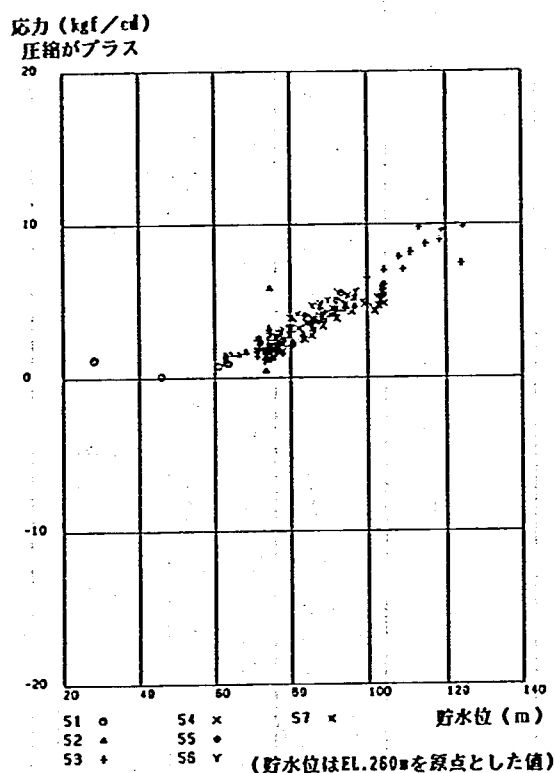


図-6.5 貯水位一応力曲線
(BL.13 EL.263.4 m 下流面側鉛直成分 case-2)

るような場合には、これによってダム堤体内の応力の伝達機構に変化が生じ、荷重分割法による計算とは若干異なった応力の分布傾向を示すことが考えられる。ただし、このような場合でも、解析結果から得られる貯水位—応力曲線のデータの分布の傾向から、貯水位のべき乗数を推定しなおすことにより、より精度の高い解析が可能であると考えられる。

6.3.2 解析結果から得られるダムの応力

解析結果から得られる各ケースの重回帰分析図を図-6.6に示す。また、解析結果から得られる各ケースの回帰係数を表-6.4に示す。この結果をもとに、各因子が変動することによって生じる応力の変化量を求めると表-6.5のようになる。この表は、貯水位の欄については、貯水位が0 (EL.260 m) からサーチャージ水位 (EL.385 m) まで変化したときに生じる応力の変化と、通常の貯水池の運用で生じる最低水位から常時満水位までの水位変化によって生じる応力の変化を示しており、温度については、①～⑤断面の欄では各回帰係数に表-4.1に示した各因子の年間の変動幅を乗じた値を示し、合計の欄では昭和53年～56年の年間の温度変化によって生じる応力の変化量の平均値を示している。また、クリープの欄ではクリープによって生じる応力の変化の最大値を示している。

これらの結果から、真名川ダムの応力の挙動特性を整理すると以下のようになる。

(1) 貯水圧による応力

貯水位に対するべき乗数の値は2～4乗の箇所が多い。今回の解析の対象とした箇所の中で、貯水圧によって生じる応力の最大値は、約60kgf/cm²である。

(2) 年間の温度変化による応力

温度変化によって生じる応力は平均温度、等置温度勾配、残差温度による応力に分けられるが、それぞれの因子によって生じる年間の応力変化の特性を述べると以下のようになる。

まず、平均温度によって生じる応力については、解析を行う断面の位置と平均温度を入力している各断面の回帰係数との間には、明確な関係は認められないが、これは、「5. 変位の重回帰分析」のところで述べたように、各断面の平近温度の履歴が、それぞれよく似た曲線を示しているためと考えられる。平均温度の年変化によって生じる応力の変動は、概ね10kgf/cm²以下であった。

次に、等置温度勾配による応力については、その解析断面での温度勾配の影響が支配的である。応力値としては、当然ながら上流面と下流面とで符号が逆転しており、大きなところでは10～20kgf/cm²の値を示している。

最後に、残差温度は、温度因子の中で最も大きな影響を示しており、特に下流面や貯水位よりも上部の上流面のように外気に接している部分での応力値は大きく、20～30kgf/cm²程度

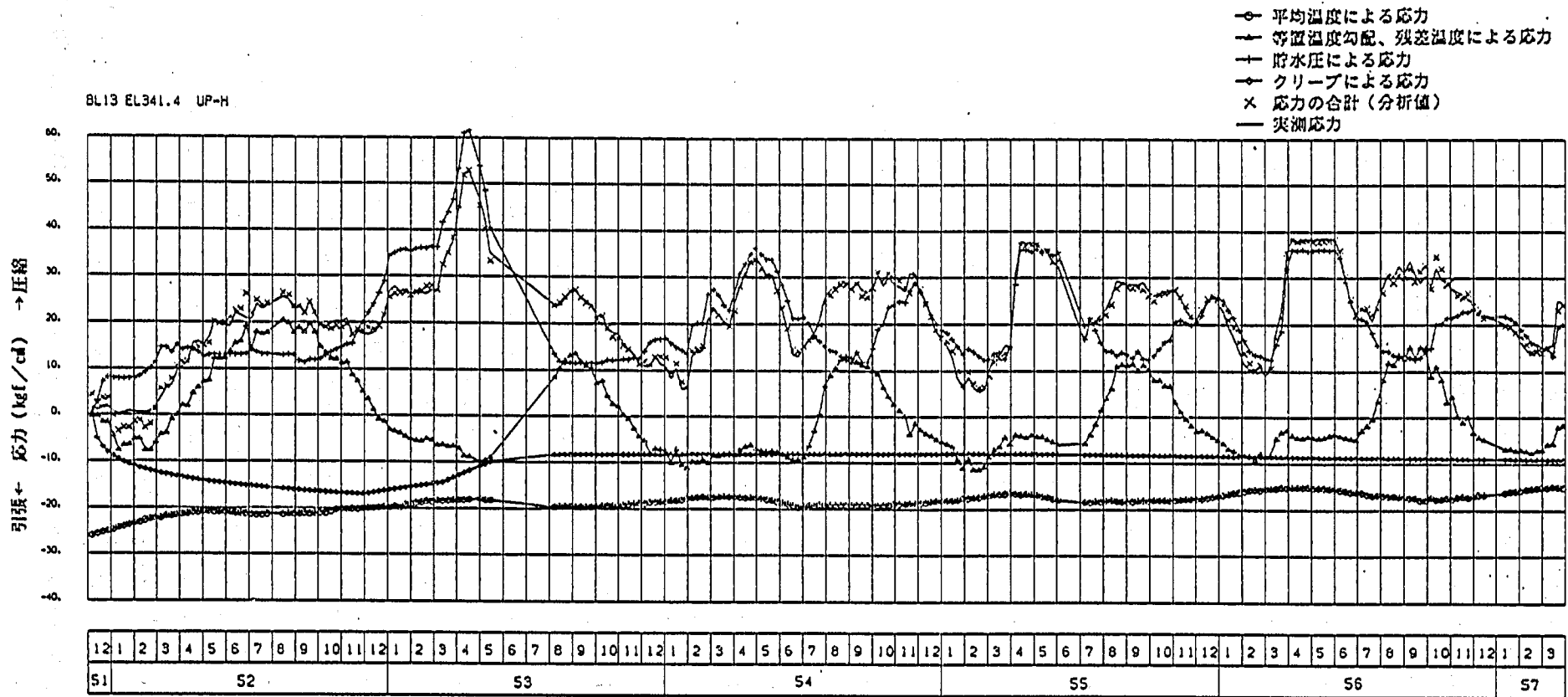


图-6.6(1) 重回帰分析図 (③断面 BL.13 EL.341.4 m 上流面側水平応力)

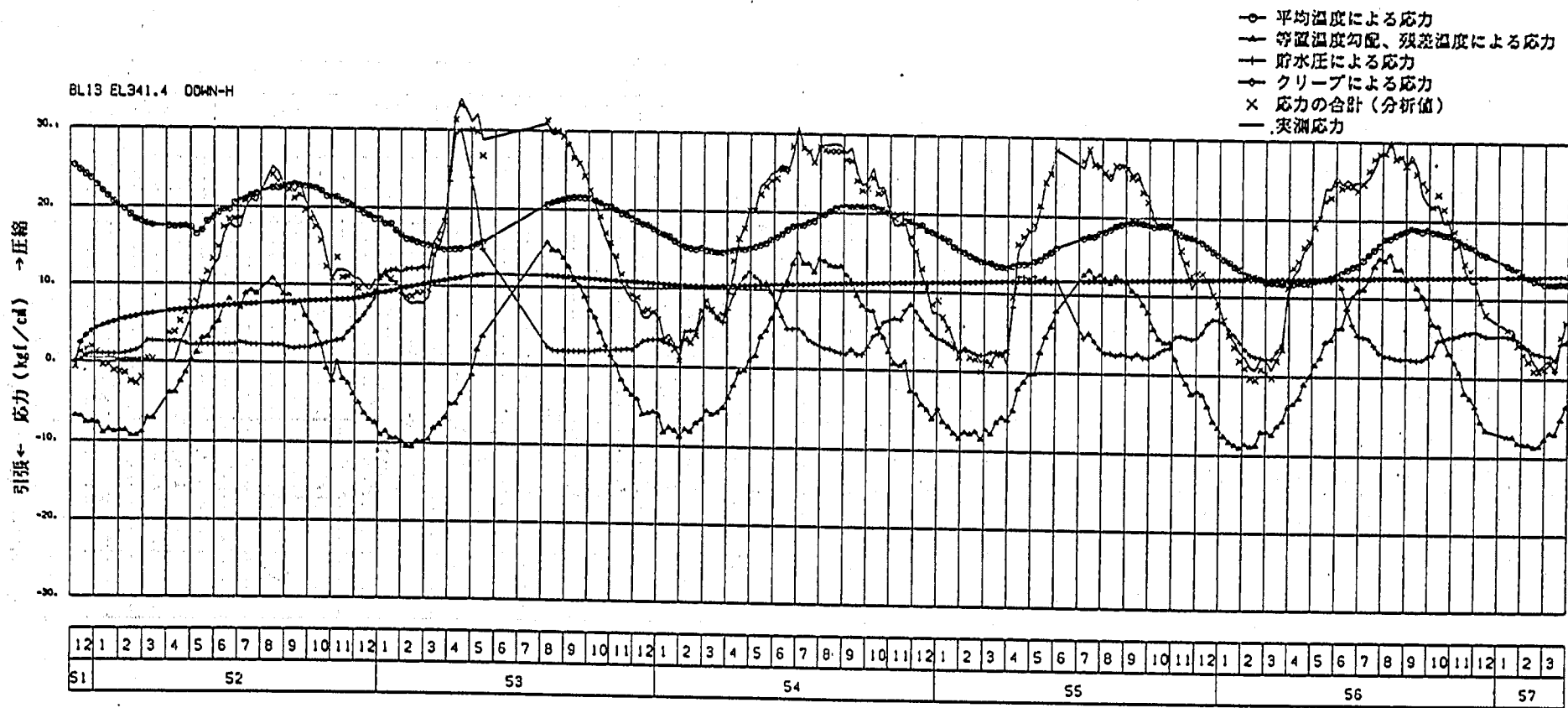
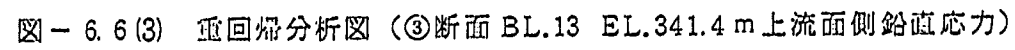


圖-6.6(2) 重回帰分析図(③断面 BL.13 EL.341.4 m下流面側水平応力)



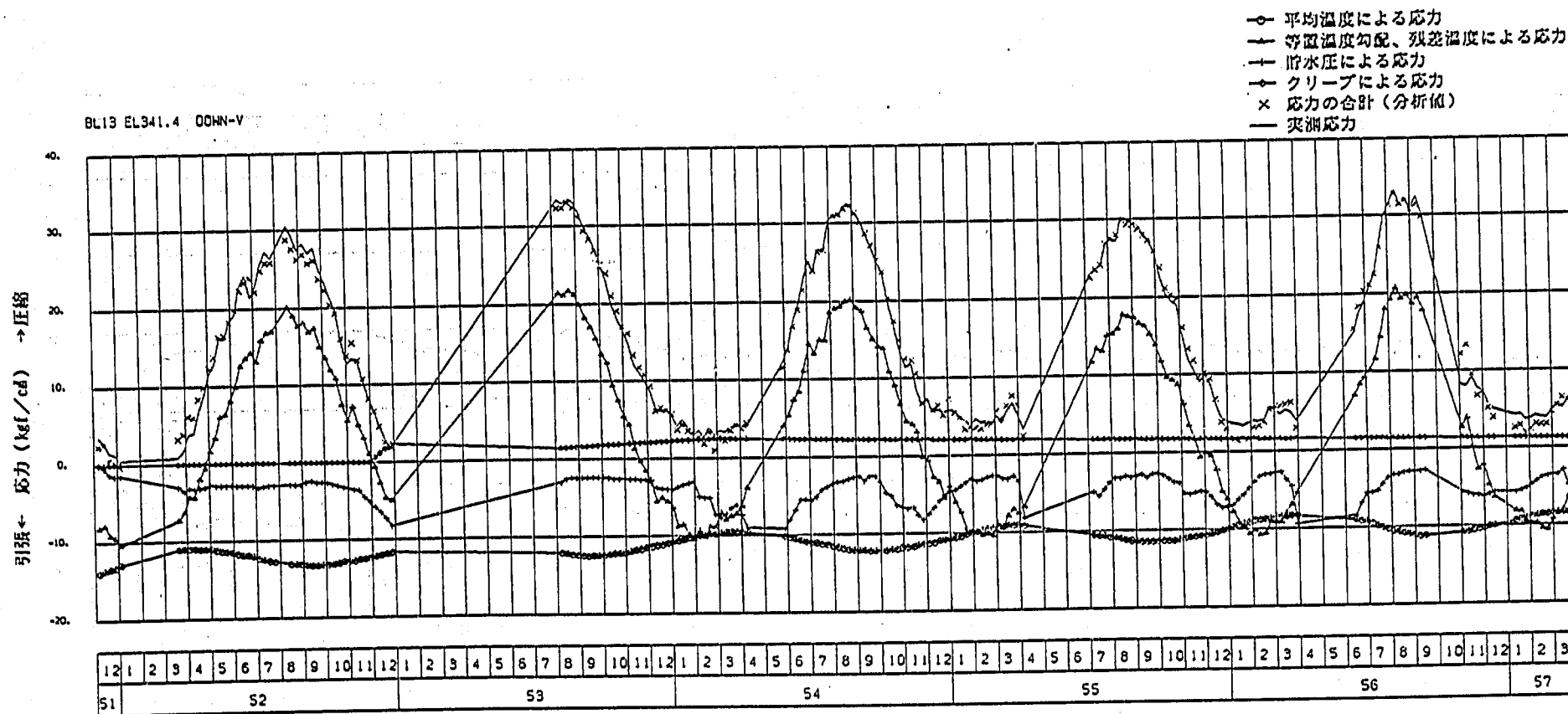
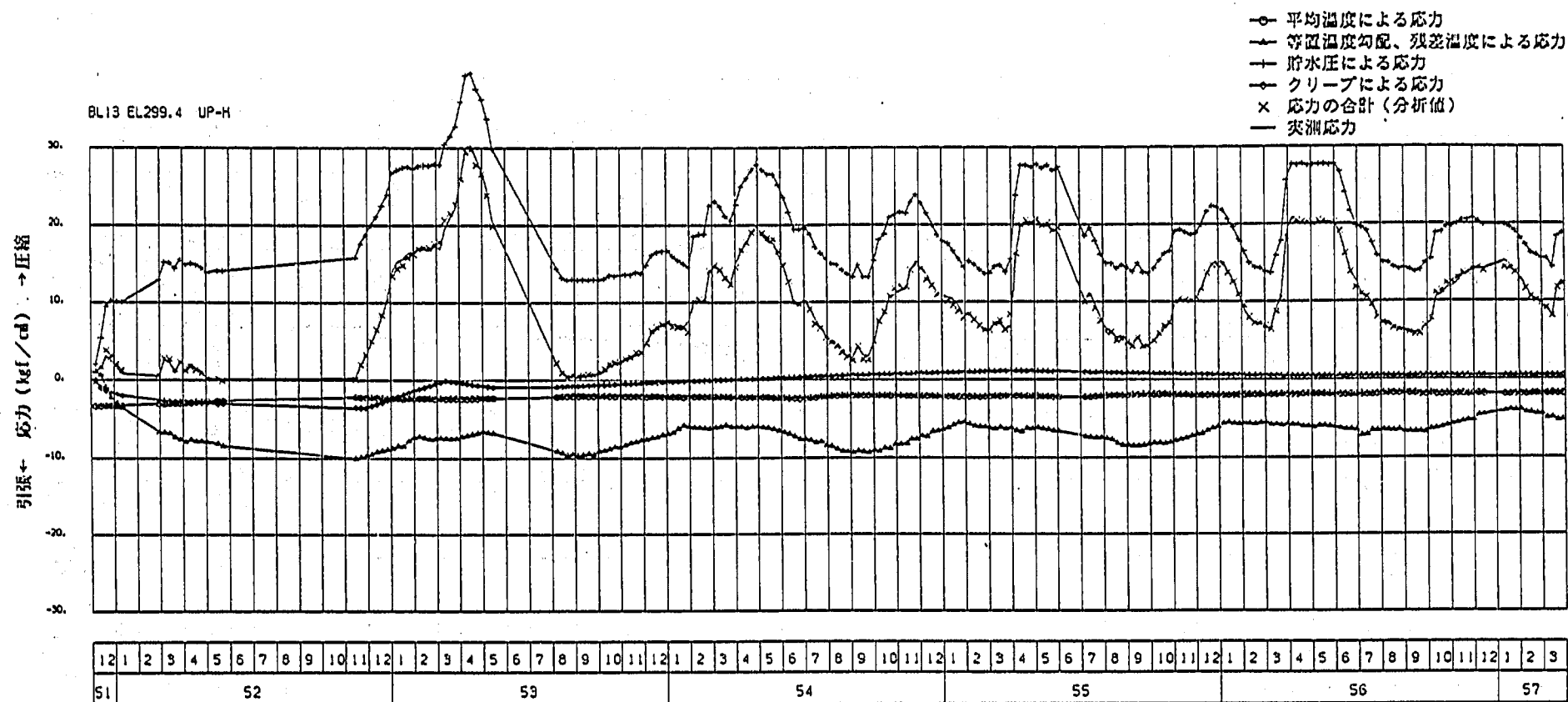
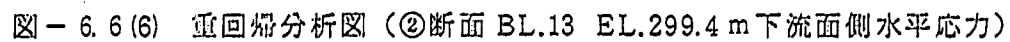
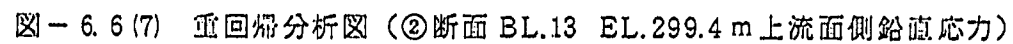


図 - 6.6 (4) 重回帰分析図 (③断面 BL.13 EL.341.4 m 下流面側鉛直応力)



图一 6.6 (5) 重回帰分析図 (②断面 BL.13 EL.229.4 m 上流面側水平応力)





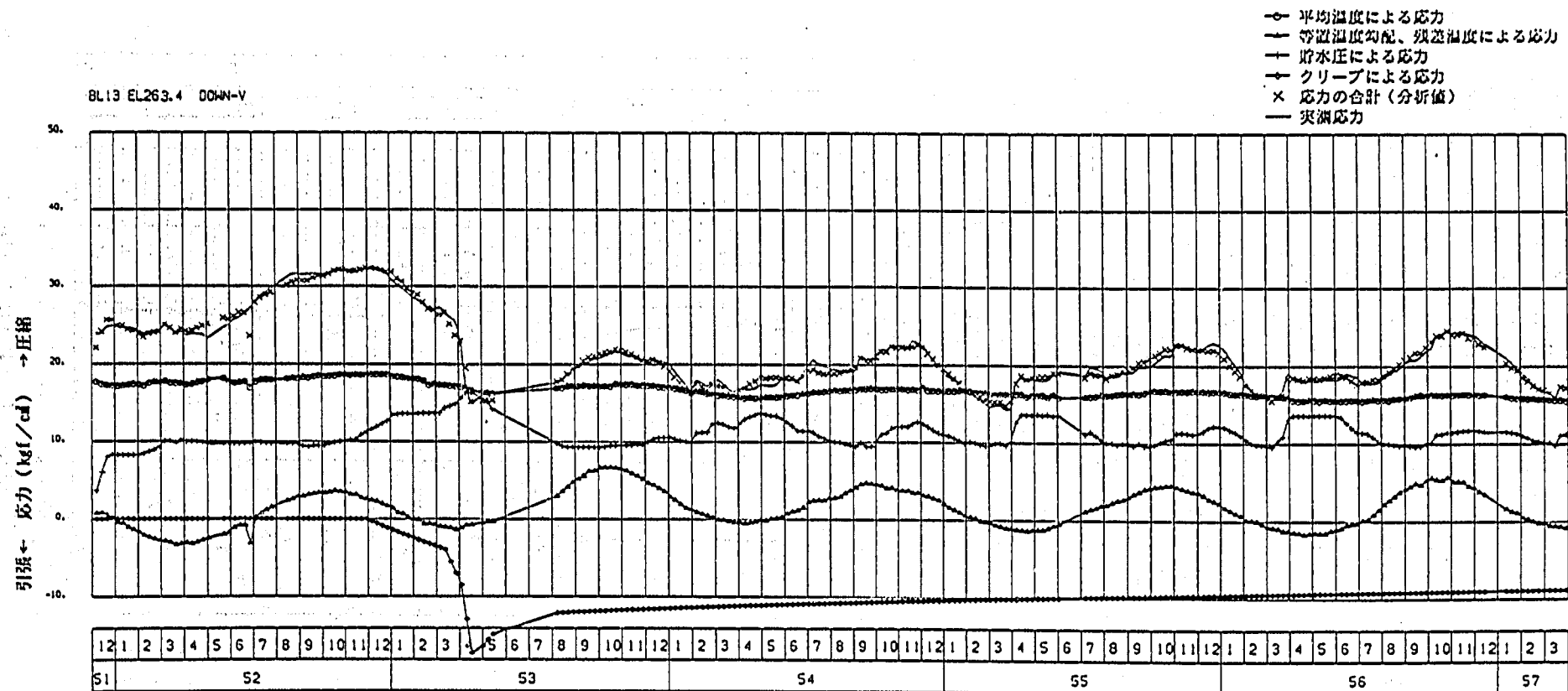
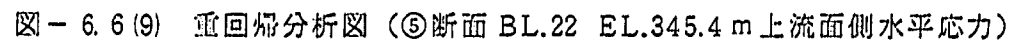


圖-6.6(8) 重回帰分析図(①断面 BL.13 EL.263.4 m下流面側鉛直応力)



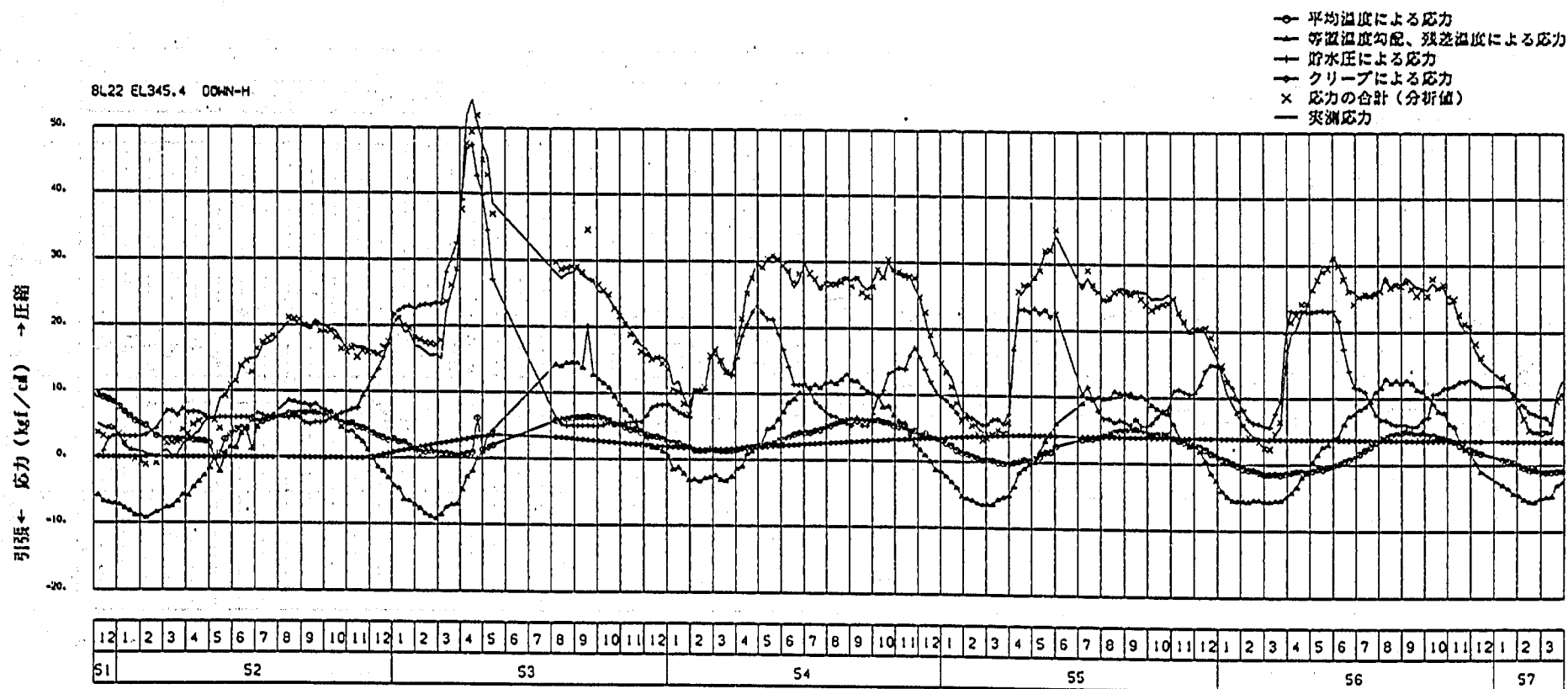


図-6.6(10) 重回帰分析図 (⑤断面 BL.22 EL.345.4 m 下流面側水平応力)

- 平均温度による応力
- 等置温度勾配、残差温度による応力
- ⊕ 貯水圧による応力
- ◇ クリープによる応力
- × 応力の合計（分析値）
- 実測応力

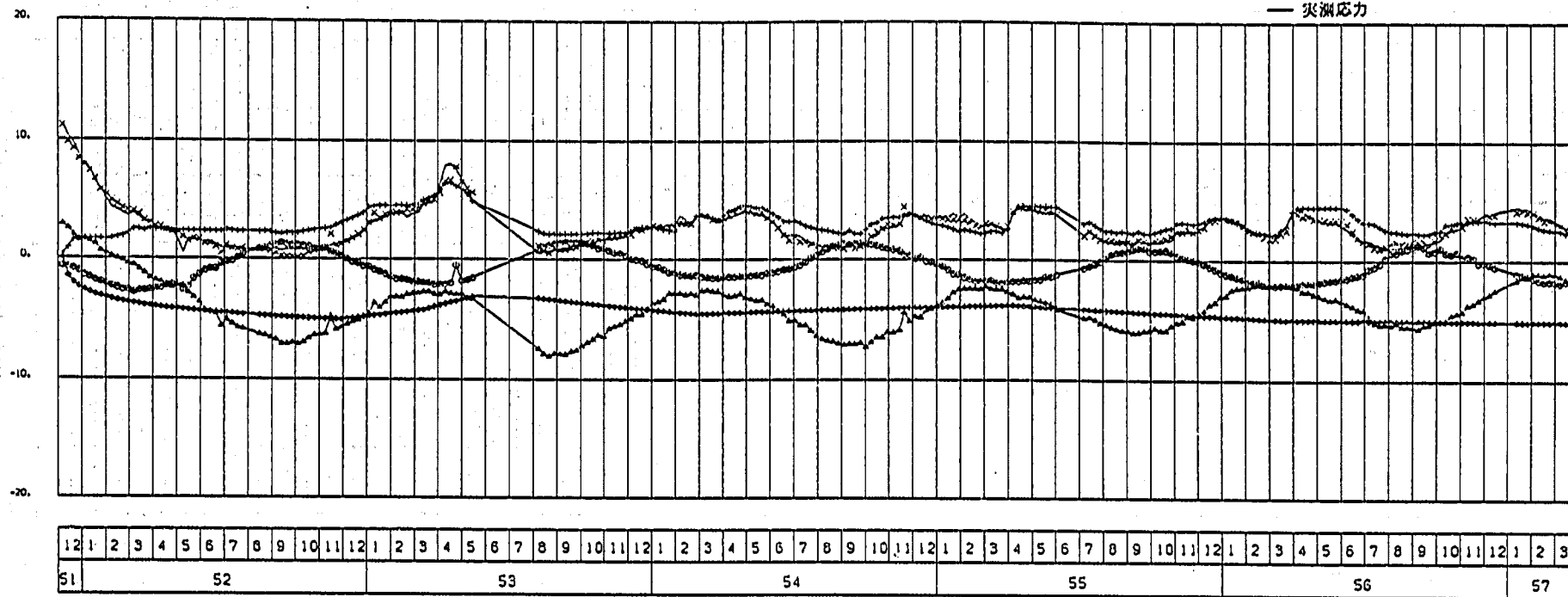


图-6.6 (11) 重回帰分析図 (⑥断面 BL.7 EL.299.4 m 上流面側水平応力)

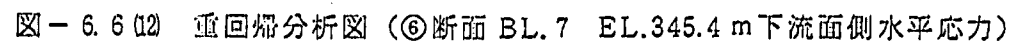


表-6.4 回帰係数と相関係数(応力の重回帰分析)

ケース名	因子			定数項	平均温度					等置温度勾配					残差温度
	原点	べき乗数	係数		①	②	③	④	⑤	①	②	③	④	⑤	
③BL.13 EL.341.4m 上流面側 水平応力	260m	3	3.202×10^{-5}	29.95	0	-2.579	0.605			-43.83	9.384	-15.93			3.561
上流面側 鉛直応力	"	4	1.067×10^{-7}	-6.682	0	0.936	0			-14.37	0	0			3.721
下流面側 水平応力	"	5	1.004×10^{-9}	-19.08	-0.792	2.716	0			0	0	10.34			2.649
下流面側 鉛直応力	"	4	-9.466×10^{-8}	24.45	0	-1.047	0			-13.486	12.24	3.385			3.250
②BL.13 EL.299.4m 上流面側 水平応力	"	2	2.562×10^{-3}	0	0	-0.423	0.163			9.011	-17.83	0			3.204
上流面側 鉛直応力	346	2	-8.103×10^{-4}	-17.53	-0.273	1.653	0.546			3.288	-6.858	1.748			1.223
下流面側 水平応力	260	3	3.269×10^{-6}	-24.08	0	4.286	-1.889			-11.80	31.09	-4.778			4.058
①BL.13 EL.263.4m 下流面側 鉛直応力	"	1	1.314×10^{-1}	0	-1.271	0	0			20.20	2.894	-0.870			1.901
⑤BL.22 EL.345.4m 上流面側 水平応力	"	3	2.013×10^{-6}	-22.52	0	0		2.612		0	0		-16.13		3.698
下流面側 水平応力	"	4	1.978×10^{-7}	0	-1.669	2.441		0		35.72	0		9.747		2.395
⑥BL.7 EL.299.4m 上流面側 水平応力	"	2	4.177×10^{-4}	8.570	-0.465		0.422		0	7.995		0		-20.95	2.421
下流面側 水平応力	"	3	1.366×10^{-5}	0	0.326		-1.855		2.073	-12.87		-3.399		52.91	3.947

ケース名	因子									相関係数	備考
	1日	358	464	485	500	550	813	1218	1568		
③BL.13 EL.341.4m 上流面側 水平応力	-3.273	13.23	25.72			-35.14	0	-3.114	0	0.9931	
上流面側 鉛直応力	0	4.565	0			0	0	0	0	0.9895	水位がEL.360m以上のデータを削除
下流面側 水平応力	1.588	7.120	0			-13.02	7.454	0	0	0.9950	
下流面側 鉛直応力	0	30.55	-71.08			44.20	-5.075	0	0	0.9954	水位がEL.360m以上のデータを削除
②BL.13 EL.299.4m 上流面側 水平応力	-0.688	14.16	-20.14			9.633	0	-5.611	2.699	0.9984	
上流面側 鉛直応力	0.467	17.60	-14.96			0	0	5.026	-3.377	0.9943	
下流面側 水平応力	1.159	11.64	-15.48			0	0	0	6.876	0.9969	
①BL.13 EL.263.4m 下流面側 鉛直応力	0	-15.16	-87.82	-202.1	361.9	-54.01	0			0.9909	
⑤BL.22 EL.345.4m 上流面側 水平応力	0.282	0	22.70			-31.30	13.21	-5.072	0	0.9961	
下流面側 水平応力	0	9.261	0			-15.63	12.86	-7.769	0	0.9936	
⑥BL.7 EL.299.4m 上流面側 水平応力	-0.964	4.124	5.485			-13.26	6.483	-6.316	3.622	0.9843	
下流面側 水平応力	-0.820	0	11.32			-14.41	4.862		2.511	0.9975	

表-6.5 各因子の変化によって生じる応力量

単位: kgf/cm², 圧縮をプラス

成分 \ 因子	貯 水 位		年 間 の 温 度 変 化													クリープ (最大値)	
	EL. 260 ~ 385 m	EL. 331 ~ 365 m	平 均 温 度						等 置 温 度 勾 配						残差温度		合 計
			①	②	③	④	⑤	全体	①	②	③	④	⑤	全体			
③ BL.13 EL.341.4 m 上流面側水平応力	62.5	25.6	0	-7.0	4.7	/	/	-3	-2.2	5.6	-14.2	/	/	-8	23.1	20	-16
上流面側鉛直応力	-	10.3	0	2.5	0	/	/	3	-0.7	0	0	/	/	-1	24.2	25	7
下流面側水平応力	30.6	11.0	-0.6	7.3	0	/	/	7	0	0	9.2	/	/	9	18.5	28	13
下流面側鉛直応力	-	-9.1	0	-2.8	0	/	/	-3	-0.7	7.3	3.0	/	/	8	22.8	27	3
② BL.13 EL.299.4 m 上流面側水平応力	40.0	15.3	0	-1.1	1.3	/	/	0	-0.5	-10.7	0	/	/	-11	8.0	-3	-3
上流面側鉛直応力	-1.2	0.5	-0.1	4.5	4.3	/	/	8	-0.2	-4.1	1.6	/	/	-3	3.1	8	13
下流面側水平応力	6.4	2.6	0	11.6	-14.7	/	/	-6	-0.6	18.7	-4.3	/	/	8	12.2	28	8
① BL.13 EL.263.4 m 下流面側鉛直応力	16.4	4.5	1.0	0	0	/	/	1	1.0	1.7	-0.8	/	/	3	3.4	8	-18
⑤ BL.22 EL.345.4 m 上流面側水平応力	3.9	1.6	0	0	/	15.4	/	13	0	0	/	-7.3	/	-7	19.2	28	5
下流面側水平応力	48.3	19.0	-1.3	6.6	/	0	/	5	1.8	0	/	4.4	/	5	15.6	24	4
⑥ BL. 7 EL.299.4 m 上流面側水平応力	6.5	2.5	-0.4	/	3.3	/	0	4	0.4	/	0	/	-8.6	-8	3.9	-1	-5
下流面側水平応力	26.7	10.9	0.3	/	-14.5	/	5.2	-8	0.6	/	-3.0	/	21.7	20	10.3	18	-4

の応力が発生している。なお、残差温度に対する回帰係数は一部を除いて3.0前後となっており、これはコンクリートの熱膨張率を $1.0 \times 10^{-5} 1/\text{deg}$ とし、残差温度に対する変形の拘束度を1と仮定すると、コンクリートの弾性係数が $3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 程度であることを示している。

以上、各温度因子によって生じる応力の特性を述べたが、これらの年間の温度変化によって生じる応力の変化量を合計すると、表-6.5に示すように、外気に接している部分では20～30 kgf/cm^2 程度、貯水に接している部分では10 kgf/cm^2 以下という結果となった。

(3) 経年的な温度変化による応力

温度変化によって生じる応力には、季節的な温度変化によるものの他に、貯水によってダム堤体が徐々に冷却されるために生じる経年的な温度変化による応力がある。経年的な温度変化による応力は、平均温度の低下によるものと等置温度勾配の発生によるものとに分けて考えることができ、その模式図を示すと図-6.7のようになる。すなわち、湛水を行うとダムの上流側が冷却され等置温度勾配が発生する。しかし、温度低下が徐々に下流側へ進むと等置温度勾配は次第に小さくなって安定する。これに対して平均温度の低下はこの間にゆっくりと生じる。このため、湛水による温度低下によって生じる応力は、湛水後1～3年程度で最大となり、その後は徐々に減少していく傾向を示すと考えられる。ただし、図-6.6では、このような傾向が比較的良好に表われているものと、そうでないものがあり、経年的な温度変化による応力の変化を精度よく把握するには至らなかった。これは、経年的な温度変

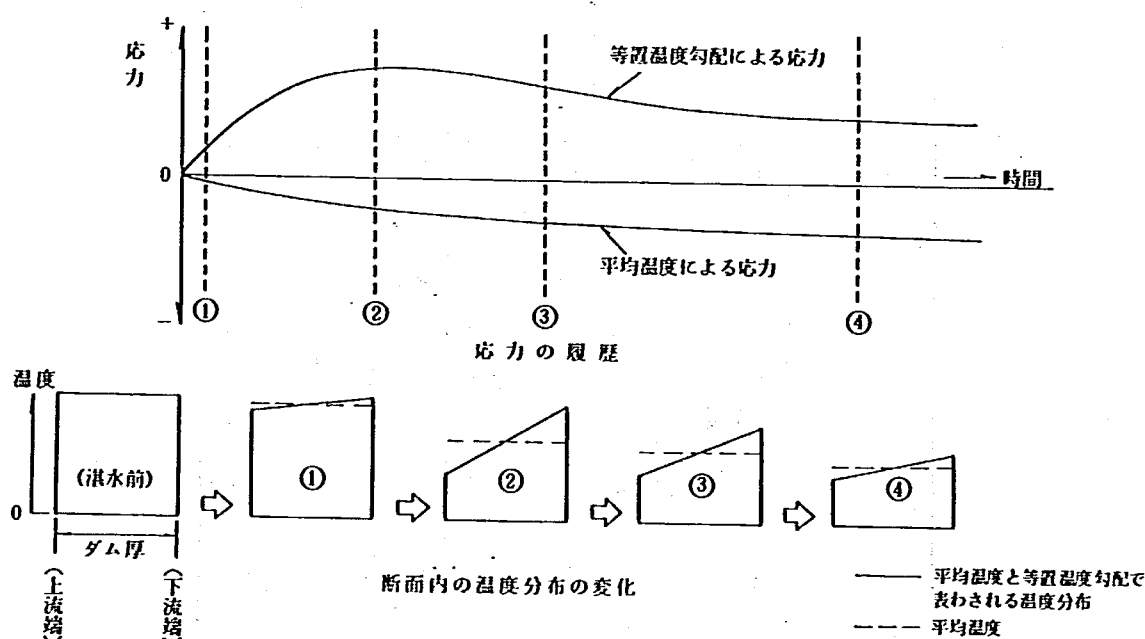


図-6.7 湛水による温度低下とそれによって生じる応力の変化 (略図)

化の影響とクリープの影響が、うまく分離しきれなかったためと考えられる。なお、上記の傾向が比較的良好に表われていると考えられるものについてみると、最大で5~10kgf/cm²程度の応力が生じている。

(4) クリープによる応力

各解析結果から得られるクリープ曲線を図-6.8に整理する。このクリープ曲線は、「5.変位の重回帰分析」で述べたように経年的な温度変化によって生じる応力との分離が難しく、今回の解析でもその値を正確に評価することはできなかった。ただし、温度の経年変化による応力は比較的滑らかな変化を持つため、急激に発生するクリープの影響は、比較的精度よく求めることができると考えられる。この観点から図-6.8をみると、クリープの主な発生

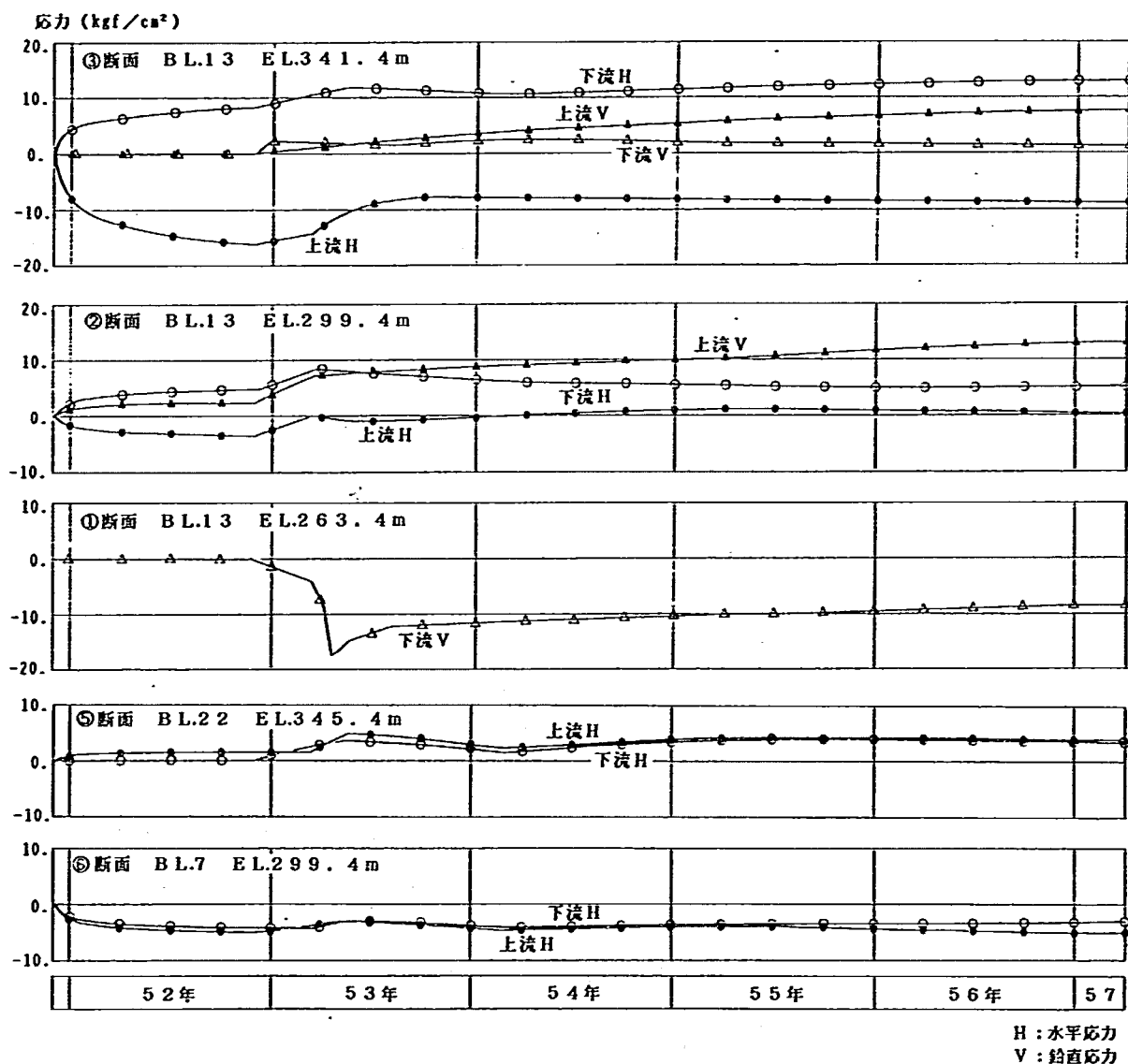


図-6.8 クリープ曲線

箇所は湛水の初期の段階と、試験湛水で貯水位を常時満水位からサーチャージ水位に上昇させた昭和52年12月～53年4月の間であると考えられ、それ以降は安定した挙動を示しているものと思われる。なお、試験湛水で貯水位をサーチャージ水位に上昇させたときのクリープ変形によって生じる応力の変化量は、ダムの河床部に位置する①断面で引張側に 15kgf/cm^2 程度移行しているのが最大で、その他の部分では主に圧縮側に 5kgf/cm^2 程度の移行量であった。

7. 重回帰分析結果と荷重分割法、有限要素法による解析結果との比較

7.1 概 説

本章では、重回帰分析により得られた貯水圧による変化および応力、平均温度および等置温度勾配による変位および応力について、荷重分割法、三次元有限要素法による解析結果との比較検討を行い、重回帰分析結果の妥当性ないしは荷重分割法、三次元有限要素法を用いた設計手法の妥当性について考察を加える。

なお、ここで用いた荷重分割法、三次元有限要素法による解析の概要を以下に示す。

(1) 荷重分割法

荷重分割法の計算には半径方向調整計算と完全調整計算の2つがあるが、ここでは模型実験や有限要素法による解析結果との一致度が比較的良好で、精度的に優れていると考えられる半径方向調整計算を用いた。荷重分割法におけるアーチ要素および片持梁要素は図-7.1のように設定した。なお、天端については、洪水吐を考慮してアーチ要素を省略している。

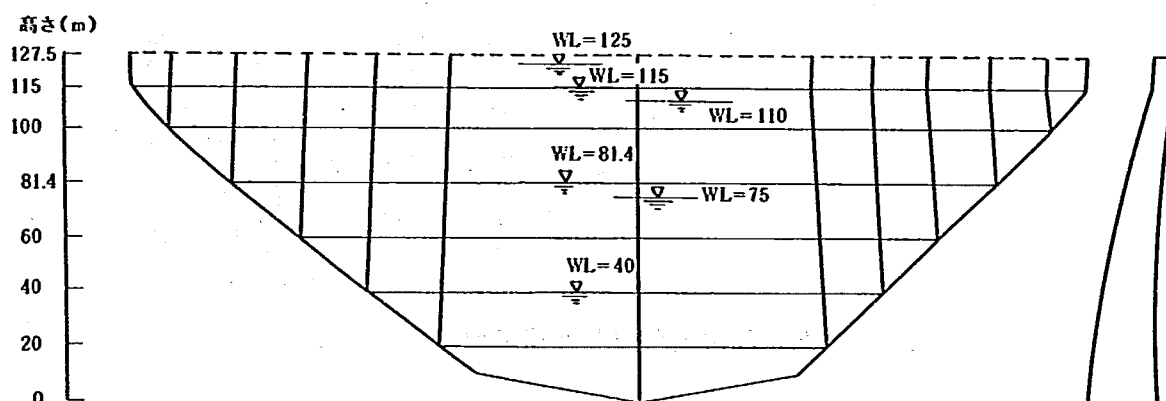


図-7.1 荷重分割法の要素分割

(2) 三次元有限要素法

有限要素法の計算においては、アーチダムを六面体20節点のアイソパラメトリック要素で表現した。要素分割は図-7.2のとおりであり、洪水吐についても図のようにモデル化している。

(3) 解析条件

解析に用いる物性値は、ダムの設計条件をそのまま用いるものとし、表-7.1のように設定した。また、貯水位については荷重分割法では図-7.1に示す7ケース、有限要素法では図-7.2(1)に示す2ケースを設定した。また温度荷重については、実測結果における3月と

9月の平均温度および等置温度勾配の差を参考として、図-7.3(1), (2)に示す値を設定した。
 なお、アーチ方向の温度分布は一定とした。

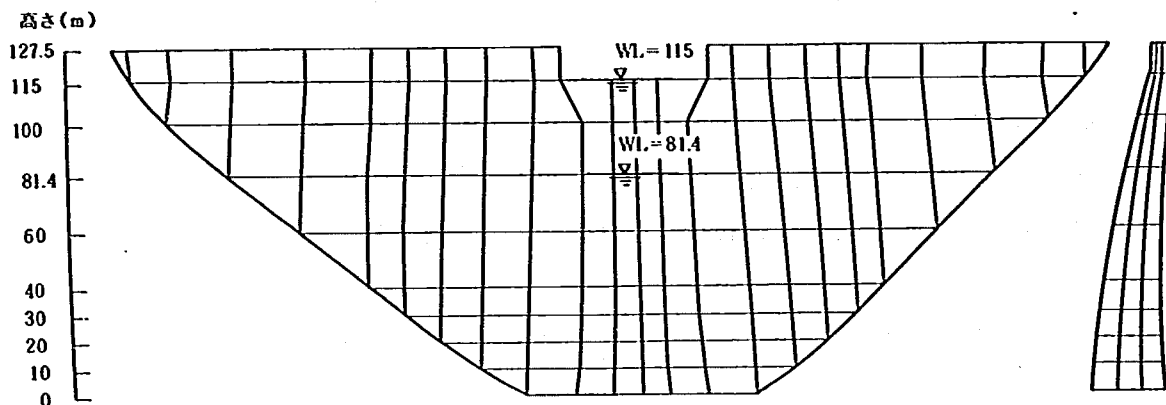


図-7.2(1) 三次元有限要素法の要素分割（堤体）

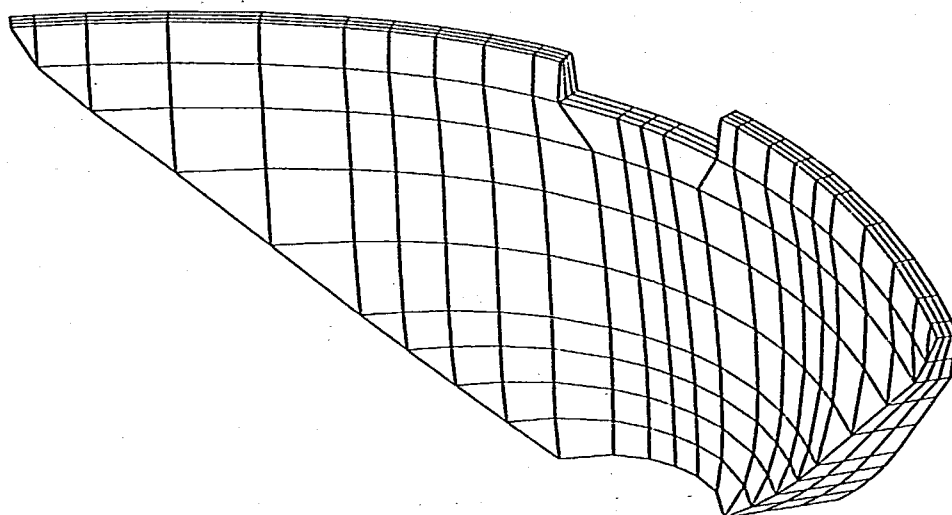


図-7.2(2) 三次元有限要素法の要素分割（堤体）

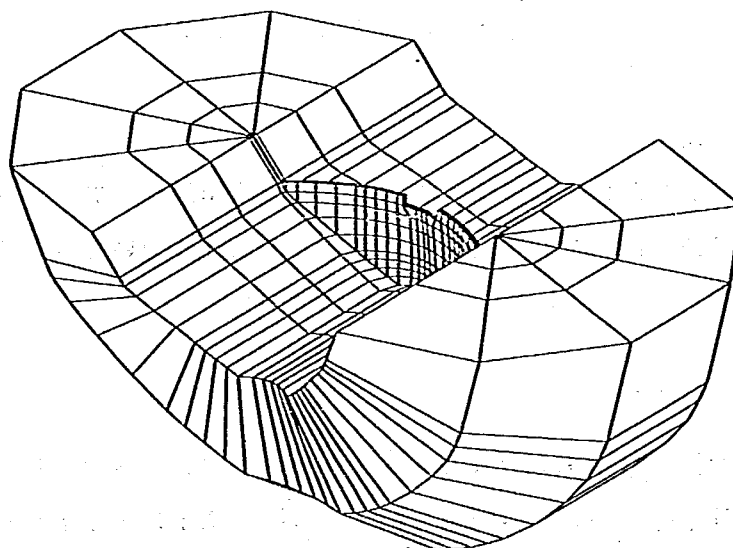


図-7.2(3) 三次元有限要素法の要素分割（堤体と岩盤）

表-7.1 解析に用いた物性

コンクリート	弾性係数 E_c	250,000 kgf/cm ²
	ポアソン比 ν_c	0.2
	熱膨長係数 C	$1.0 \times 10^{-5} \text{deg}^{-1}$
岩盤	弾性係数 E_R	70,000 kgf/cm ²
	ポアソン比 ν_R	0.2
水の単位体積重量 γ_w		1.0 tf/m ³

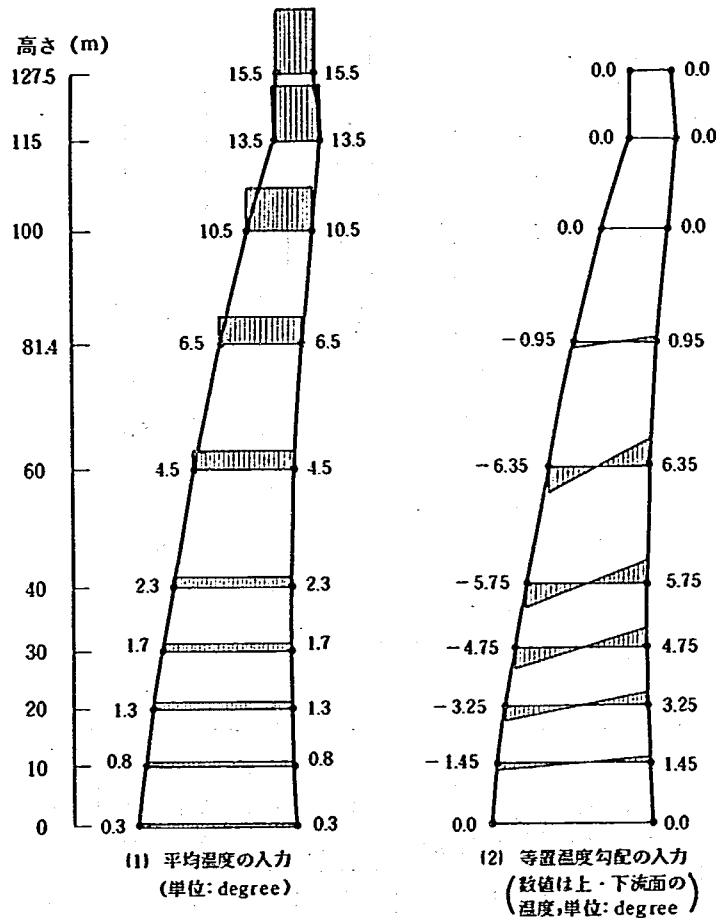


図-7.3 温度荷重の入力条件

7.2 貯水圧による変位, 応力の比較

(1) 貯水圧による変位量の比較

ダム天端クラウンにおける下流方向の変位量の比較を図-7.4に示す。また貯水位が81.4 mおよび115 mの時の変位量の比較を表-7.2に示す。ここで重回帰分析の値とは、「5. 変位の重回帰分析」で述べたところの case-7 の値である。なお、重回帰分析、有限要素法の結果は、逆プラムラインの固定点 (EL.220 m) からの相対変位を示したものであるが、荷重分割法では解析法上このような相対変位は求められないから、便宜上、絶対変位を示して

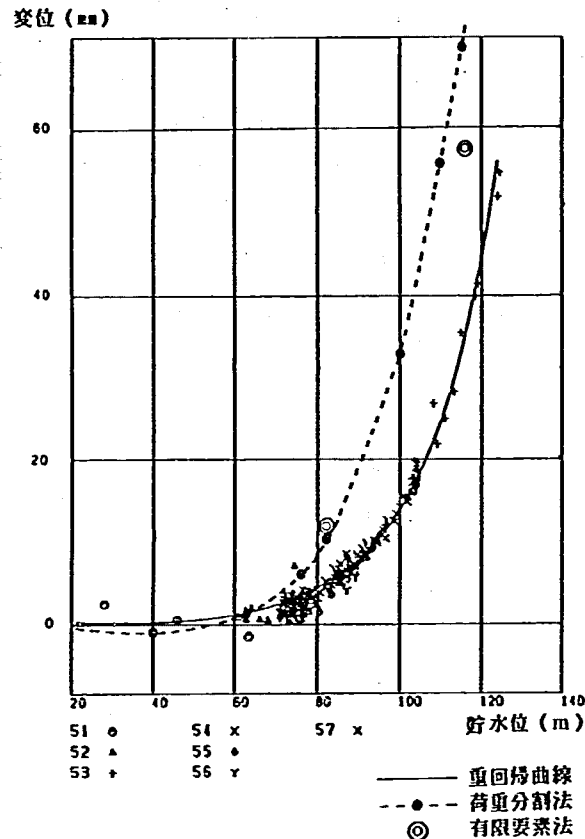


図-7.4 貯水位—変位曲線の比較
(貯水位は EL.260 mを原点とした値)

表-7.2 水圧による変位量の比較

単位: mm, 下流をプラス

成分	貯水位 解析手法	81.4 m			115.0 m		
		重回帰分析	荷重分割法	三次元有限要素法	重回帰分析	荷重分割法	三次元有限要素法
天端クラウン半径方向		4.3	10.2	12.1	34.0	71.2	57.3

注) 貯水位は EL.260 mを原点とした値

いる。しかし、EL.220 mの点は実用上は不動と考えてよいから、三者は同一条件であると考えてよい。

図-7.4 および表-7.2 によれば、荷重分割法、有限要素法の解析結果は重回帰分析の結果よりも大きくなっている。これは、これらの解析に用いたコンクリート（および基礎岩盤）の弾性係数が実際の弾性係数よりも小さいためと考えられる。いま、貯水位が115 mの時の変位が一致するように弾性係数の値を修正すると、荷重分割法の場合では $524,000 \text{ kgf/cm}^2$ 、有限要素法の場合では $421,000 \text{ kgf/cm}^2$ となるが、これは一般的なコンクリートの弾性係数の範囲であり、重回帰分析の結果は数値解析の結果と比較して必ずしもおかしい値を示してい

るものではない。

(2) 貯水圧による応力の比較

荷重分割法および三次元有限要素法による計算によって得られる応力は、上下流面の値であるが、重回帰分析によって求められる応力は上下流面からそれぞれ $0.125 T$ (T は堤体の厚さ) 内部に入ったところの値である。このことから、荷重分割法および三次元有限要素法の計算値については、上下流方向の断面内の応力分布を直線と仮定して、応力計埋設位置での応力値を求め、これを重回帰分析の結果と比較するものとした。

荷重分割法および三次元有限要素法によって得られる応力値と重回帰分析結果から得られる応力値との比較を図-7.5に示す。また、貯水位が81.4 mと115.0 mのときのそれぞれの解析による応力値を表-7.3に示す。これらの結果より明らかなように、重回帰分析、荷重分割法、三次元有限要素法の結果は全般的によく似た応力分布を得ている。

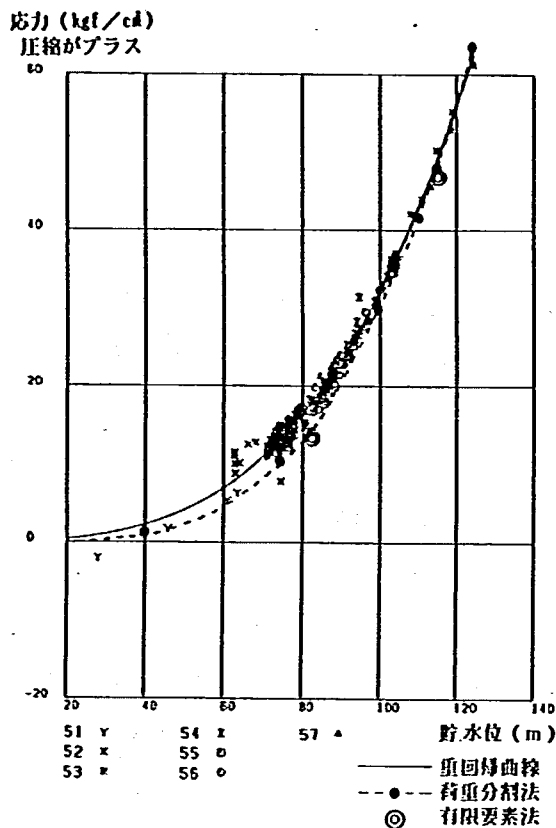
表-7.3に示す応力値について、重回帰分析と荷重分割法、および重回帰分析と三次元有限要素法の相関をとってみると、図-7.6および図-7.7に示すようになり、相関係数は、貯水位が81.4 mと115.0 mのいずれの場合でも、後者（重回帰分析と三次元有限要素法）のほうが高くなっている。

表-7.3 水圧による応力値の比較

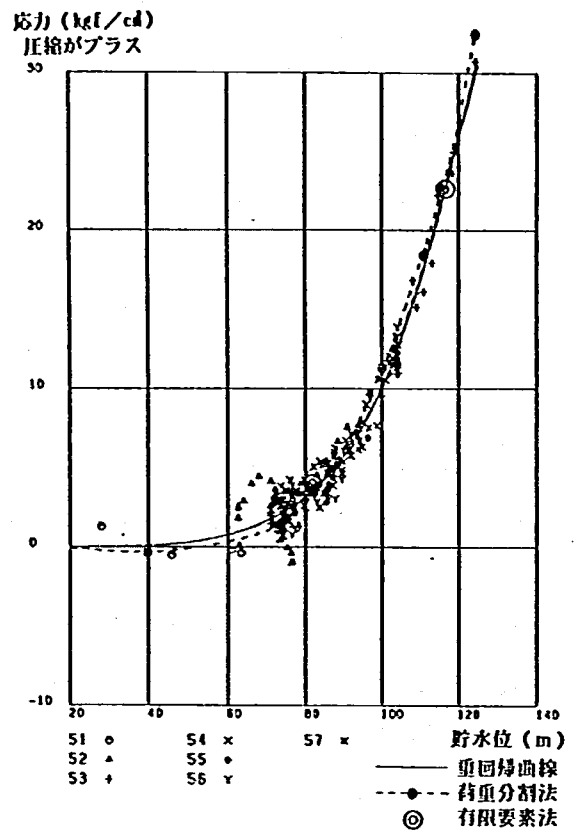
単位: kgf/cm², 圧縮をプラス

ケース名	水 位 解析手法	81.4 m			115.0 m		
		重回 帰 分 析	荷 重 分 割 法	三次元有 限要素法	重回 帰 分 析	荷 重 分 割 法	三次元有 限要素法
③ BL.13 EL.341.4 m 上流面側 水平応力		17.3	14.5	13.4	48.7	48.5	46.3
上流面側 鉛直応力		4.7	5.2	4.5	—	11.5	13.8
下流面側 水平応力		3.6	3.5	4.1	20.2	22.7	22.6
下流面側 鉛直応力		-4.2	-5.4	-3.6	—	-9.9	-12.3
② BL.13 EL.299.4 m 上流面側 水平応力		17.0	20.7	17.6	33.9	44.2	33.8
上流面側 鉛直応力		—	10.6	8.2	—	5.4	2.4
下流面側 水平応力		1.8	5.9	4.1	5.0	16.2	9.2
① BL.13 EL.263.4 m 下流面側 鉛直応力		10.7	6.4	11.9	15.1	23.4	27.5
⑤ BL.22 EL.345.4 m 上流面側 水平応力		1.1	6.7	6.6	3.1	18.7	13.9
下流面側 水平応力		8.7	10.0	9.8	34.6	47.9	38.7
⑥ BL.7 EL.299.4 m 上流面側 水平応力		2.8	3.4	1.5	5.5	7.2	3.8
下流面側 水平応力		7.4	17.9	14.4	20.8	41.1	35.4

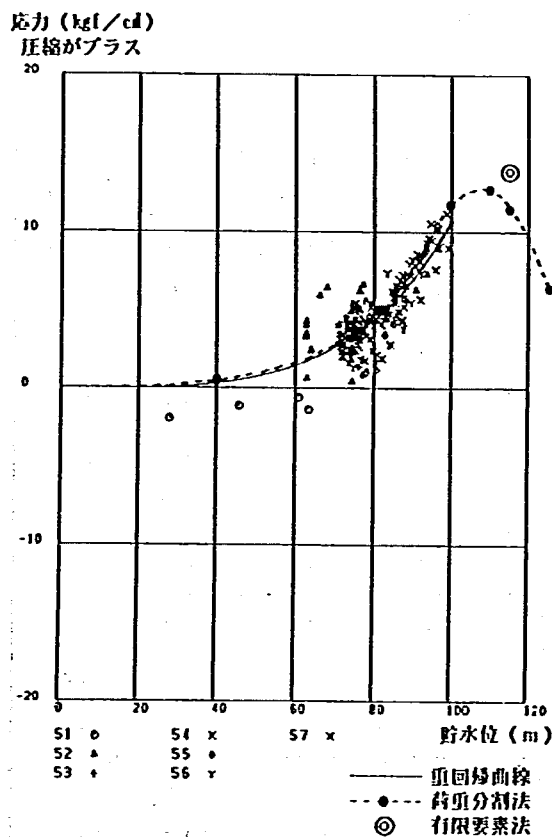
注) 貯水位は EL.260 mを原点とした値



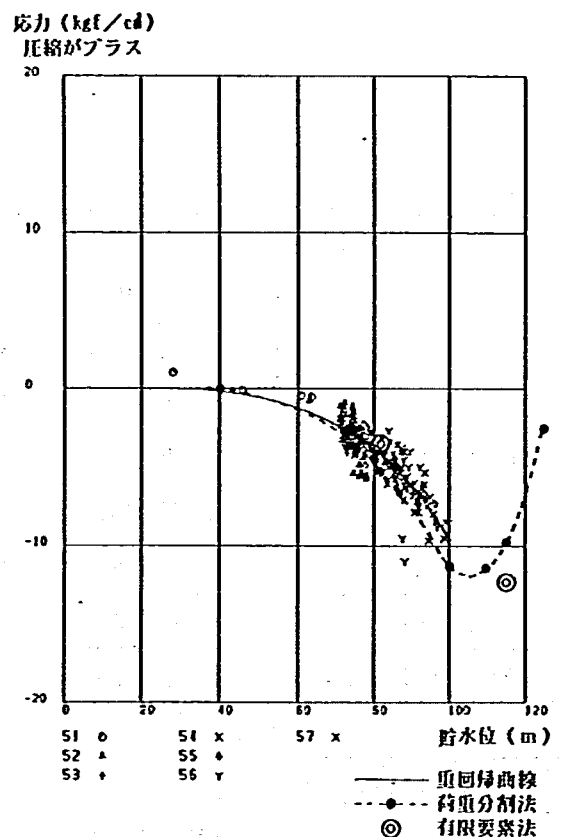
(1) ③断面 BL.13 EL.341.4m 上流面側 水平応力
(貯水位はEL.260mを原点とした値)



(2) ③断面 BL.13 EL.341.4m 下流面側 水平応力
(貯水位はEL.260mを原点とした値)



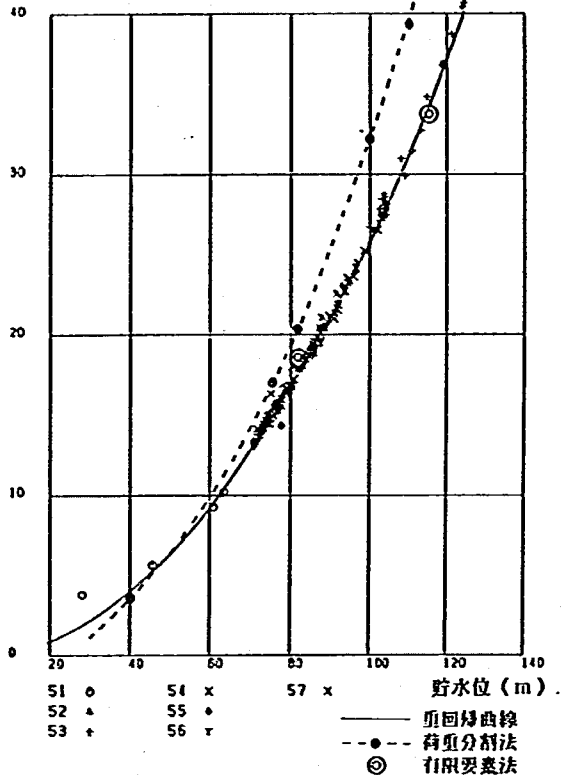
(3) ③断面 BL.13 EL.341.4m 上流面側 鉛直応力
(貯水位はEL.260mを原点とした値)



(4) ③断面 BL.13 EL.341.4m 下流面側 鉛直応力
(貯水位はEL.260mを原点とした値)

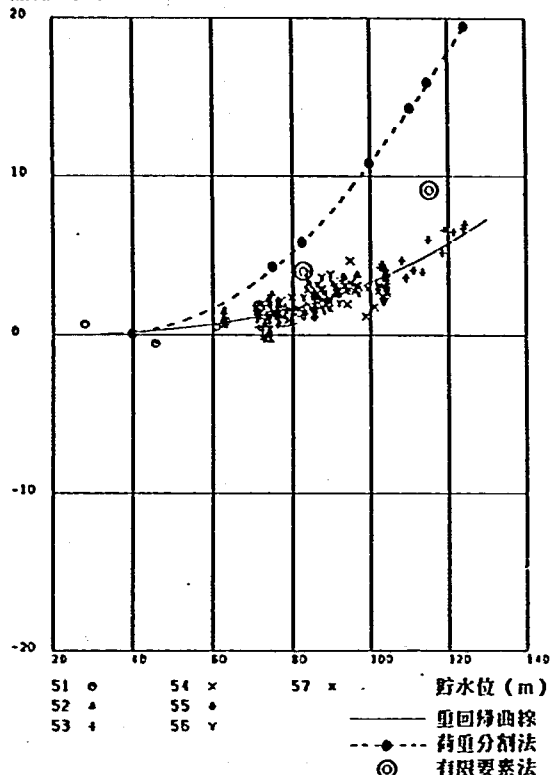
図-7.5 貯水位-応力曲線の比較

応力 (kgf/cm²)
圧縮がプラス



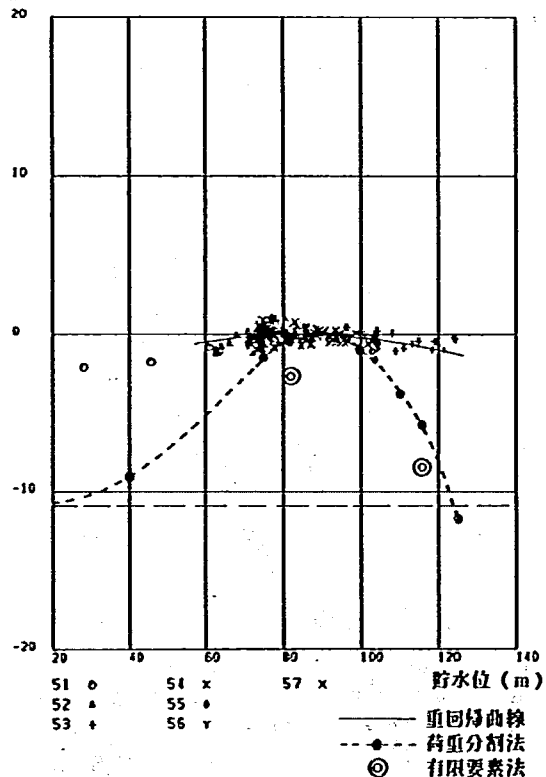
(5) ②断面 BL.13 EL.299.4m 上流面側 水平応力
(貯水位はEL.260mを原点とした値)

応力 (kgf/cm²)
圧縮がプラス



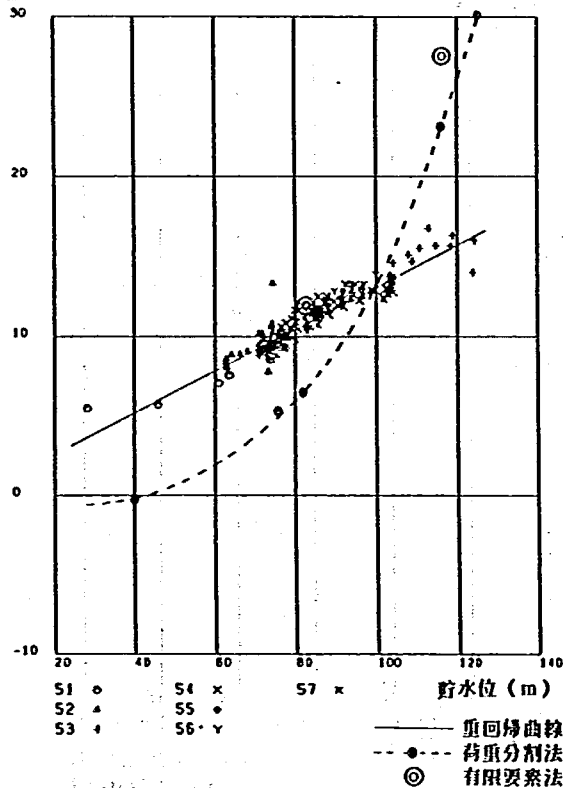
(6) ②断面 BL.13 EL.299.4m 下流面側 水平応力
(貯水位はEL.260mを原点とした値)

応力 (kgf/cm²)
圧縮がプラス



(7) ②断面 BL.13 EL.299.4m 上流面側 鉛直応力
(貯水位はEL.260mを原点とした値)

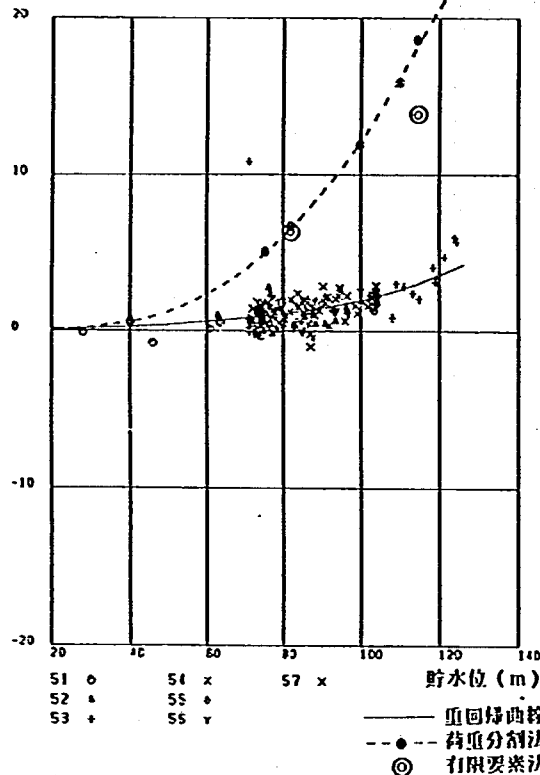
応力 (kgf/cm²)
圧縮がプラス



(8) ①断面 BL.13 EL.263.4m 下流面側 鉛直応力
(貯水位はEL.260mを原点とした値)

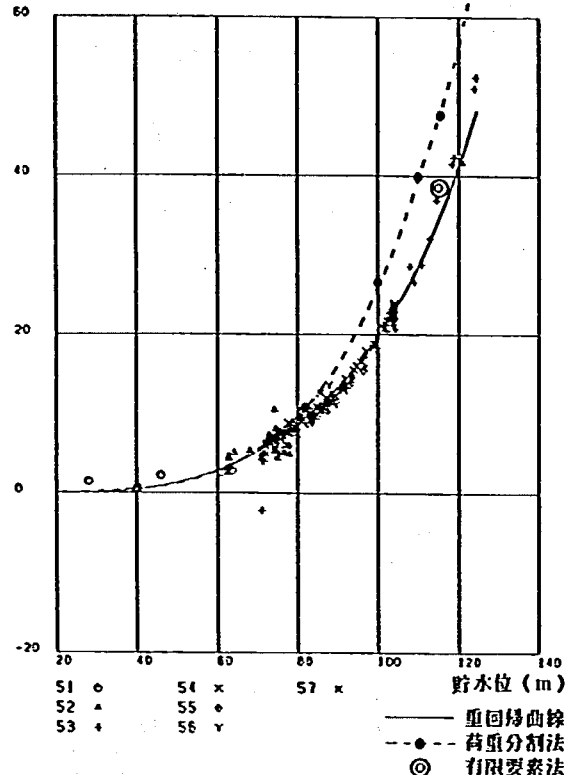
図-7.5 貯水位—応力曲線の比較

応力 (kgf/cm²)
圧縮がプラス



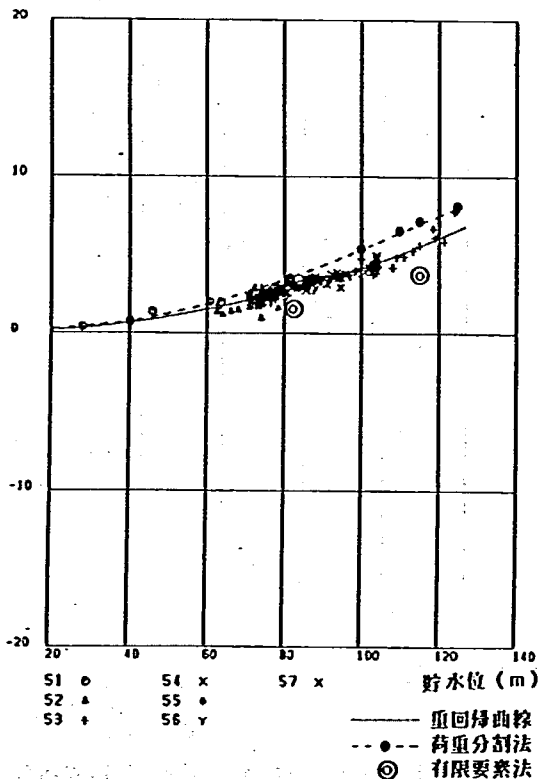
(9) ⑤断面 BL.22 EL.345.4m 上流面側 水平応力
(貯水位はEL.260mを原点とした値)

応力 (kgf/cm²)
圧縮がプラス



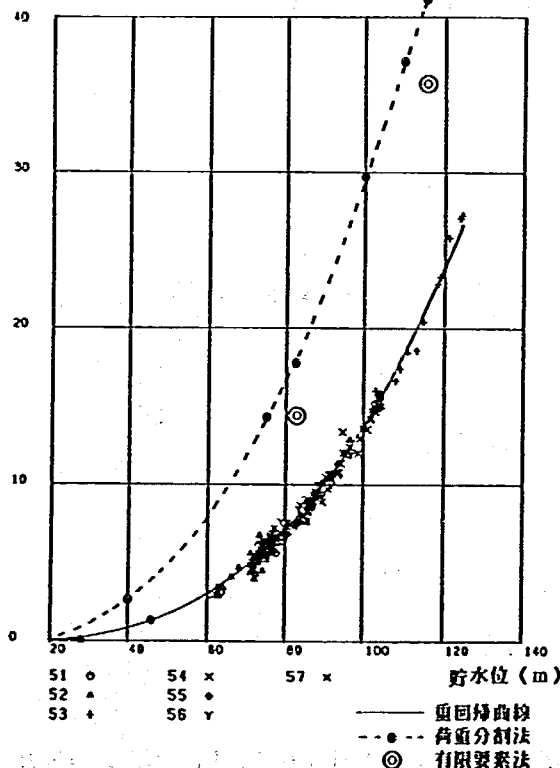
(10) ⑤断面 BL.22 EL.345.4m 下流面側 水平応力
(貯水位はEL.260mを原点とした値)

応力 (kgf/cm²)
圧縮がプラス



(11) ⑥断面 BL.7 EL.299.4m 上流面側 水平応力
(貯水位はEL.260mを原点とした値)

応力 (kgf/cm²)
圧縮がプラス



(12) ⑥断面 BL.7 EL.299.4m 下流面側 水平応力
(貯水位はEL.260mを原点とした値)

図-7.5 貯水位—応力曲線の比較

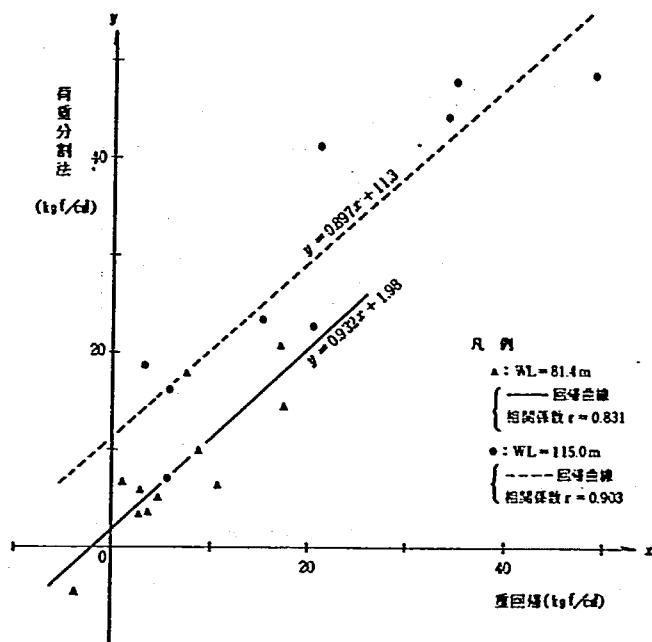


図-7.6 重回帰分析値と荷重分割法から得られる値との相関
(貯水圧によって生じる応力)

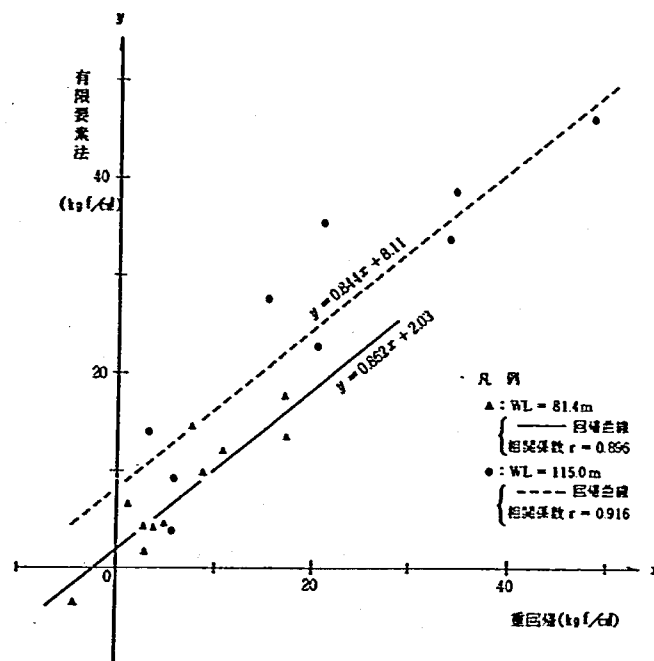


図-7.7 重回帰分析値と三次元有限要素法から得られる値との相関
(貯水圧によって生じる応力)

図-7.5 および表-7.3 からわかるように、重回帰分析と三次元有限要素法の結果があまり一致していない部分は、②断面 (BL.13 EL.299.4 m) の上流面側鉛直応力、①断面 (BL.13 EL.263.4 m) の下流面側鉛直応力、⑤断面 (BL.22 EL.345.4 m) の上流面側水平応力、および⑥断面 (BL.7 EL.299.4 m) の下流面側水平応力であるが、このうち、①、⑤、⑥断面は、いずれもアバットメント沿いの箇所である。重回帰分析の値と三次元有限要素法の値の差異は、クラウン付近で 5 kgf/cm^2 以下、アバットメント付近でも 10 kgf/cm^2 程度である。また、荷重分割法の値と重回帰分析結果との差は、クラウン付近で 10 kgf/cm^2 以下、アバットメント付近で 15 kgf/cm^2 程度以下である。

7.3 温度荷重による変位、応力の比較

(1) 温度荷重による変位量の比較

平均温度および等置温度勾配の年間の変動によって生じるダム天端クラウンの上下流方向の変位量の比較を表-7.4 に示す。ここで、重回帰分析の値は「5. 変位の重回帰分析」で述べたところの case-7 の値である。表からわかるように、重回帰分析では平均温度よりも等置温度勾配の影響が大きく出ているのに対し、荷重分割法や三次元有限要素法では、その傾向が逆転している。ただし、平均温度による値と等置温度勾配による値とを合計すると、重回帰分析の値が -32 mm 、荷重分割法および三次元有限要素法による値が、それぞれ -45 mm 、 -39 mm となり、重回帰分析の結果と荷重分割法および有限要素法の結果は比較的一致した値

となっている。

表－7.4 温度変化による変位量の比較

単位：mm, 下流をプラス

成 分	因 子 解析手法	平 均 温 度			等 置 温 度 勾 配		
		重 回 帰 分 析	荷 重 分 割 法	三 次 元 有 限 要 素 法	重 回 帰 分 析	荷 重 分 割 法	三 次 元 有 限 要 素 法
天端クラウン半径方向		－10.4	－34.9	－30.7	－22.1	－10.6	－8.0

(2) 温度荷重による応力の比較

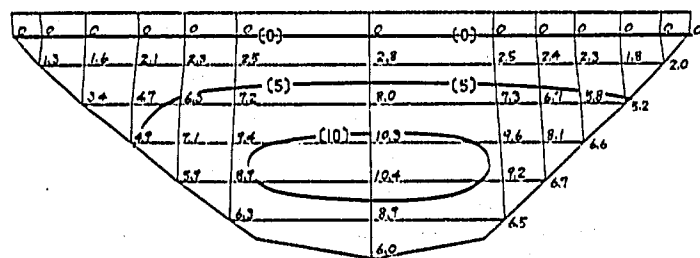
まず、平均温度の年間の変化によって生じる応力分布について、荷重分割法の結果を図－7.8に、三次元有限要素法の結果を図－7.9に示す。同様に、等置温度勾配によって生じる応力分布を図7.10および図－7.11に示す。図－7.8と図－7.9，図－7.10と図－7.11を比較してみると、荷重分割法と三次元有限要素法とでは、水平応力の分布は比較的良く一致しているが、鉛直応力については若干異なる分布を示している。

図－7.8～11に示す応力値は、それぞれ上下流面における値であるため、上下流方向の断面内の応力分布を直線と仮定して応力計埋設位置での応力を求め、重回帰分析結果と比較したものを表－7.5に示す。表－7.5に示す応力値について、重回帰分析と荷重分割法および

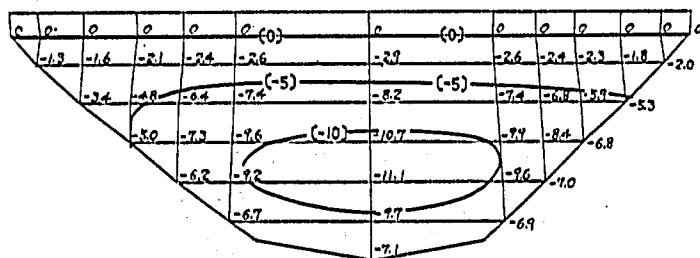
表－7.5 温度変化による応力値の比較

単位：kgf/cm², 圧縮をプラス

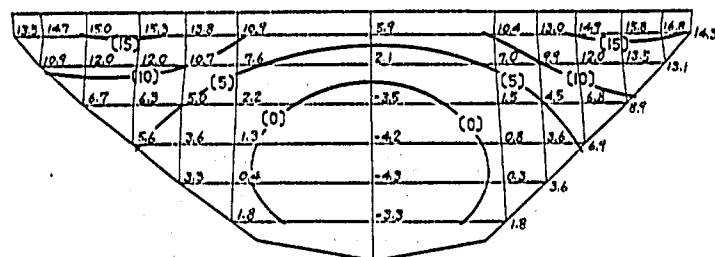
ケ ー ス 名	因 子 解析手法	平 均 温 度			等 置 温 度 勾 配		
		重 回 帰 分 析	荷 重 分 割 法	三 次 元 有 限 要 素 法	重 回 帰 分 析	荷 重 分 割 法	三 次 元 有 限 要 素 法
③ BL.13 EL.341.4 m 上流面側 水平応力		－2.0	－2.0	－0.5	－1.1	－4.5	－4.6
上流面側 鉛直応力		2.2	6.0	5.7	－1.4	－2.5	－2.6
下流面側 水平応力		5.8	7.3	5.2	1.5	0.3	0.2
下流面側 鉛直応力		－2.4	－6.2	－1.9	6.2	2.6	4.3
② BL.13 EL.299.4 m 上流面側 水平応力		0.1	－3.4	－0.4	－9.4	－9.4	－9.1
上流面側 鉛直応力		7.2	7.7	8.1	－3.4	－3.7	－6.1
下流面側 水平応力		－2.4	1.9	3.4	18.5	11.6	14.7
① BL.13 EL.263.4 m 下流面側 鉛直応力		0.7	－5.5	－2.8	3.6	2.0	5.4
⑤ BL.22 EL.345.4 m 上流面側 水平応力		17.0	7.3	15.9	－2.1	－2.0	－2.2
下流面側 水平応力		4.7	－2.7	1.2	4.8	－2.0	0.1
⑥ BL.7 EL.299.4 m 上流面側 水平応力		2.5	2.3	3.8	－8.4	－3.8	－10.4
下流面側 水平応力		－7.1	－3.5	－3.1	21.5	5.3	11.6



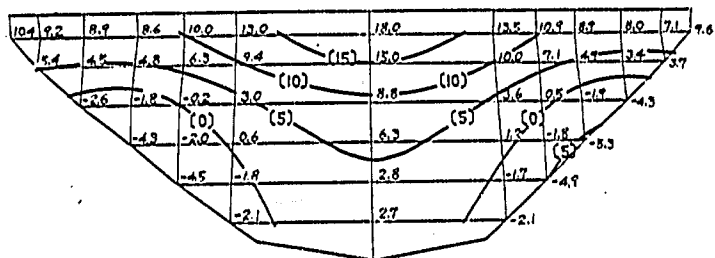
(1) 上流面鉛直応力 σ_u (kgf/cm²)



(2) 下流面鉛直応力 σ_b (kgf/cm²)

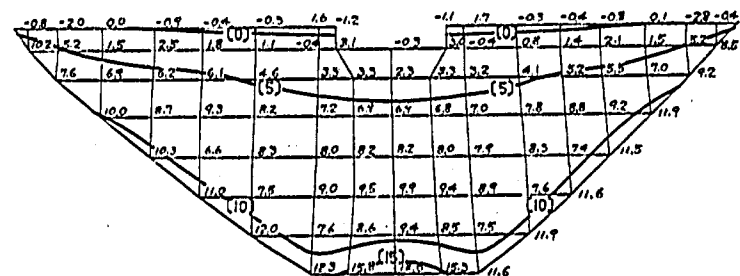


(3) 上流面水平応力 σ_x (kgf/cm²)

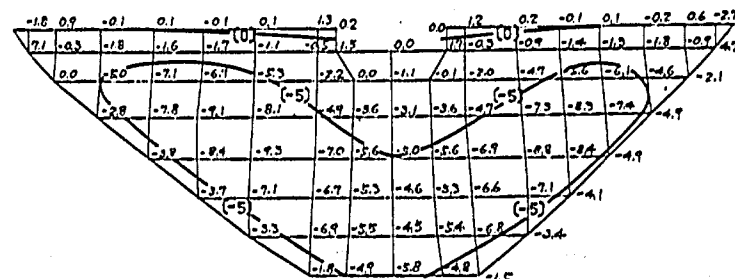


(4) 下流面水平応力 σ_y (kgf/cm²)

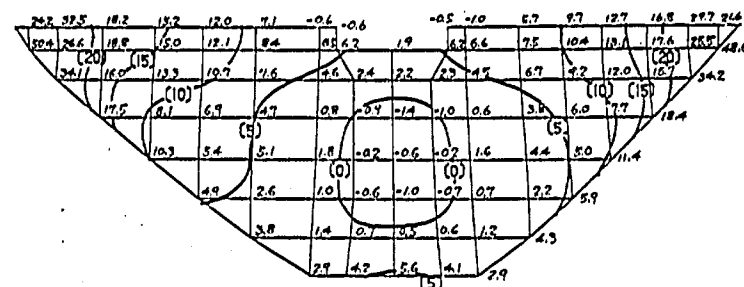
図-7.8 平均温度による応力分布 (荷重分割法)



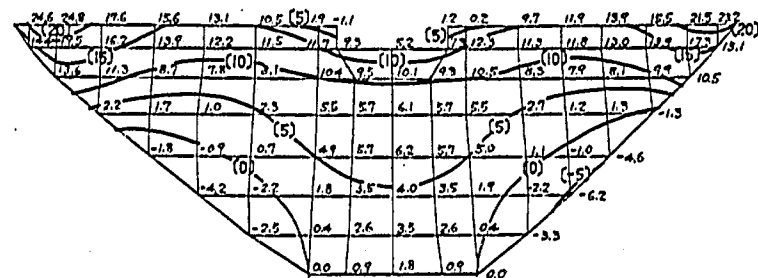
(1) 上流面鉛直応力 σ_u (kgf/cm²)



(2) 下流面鉛直応力 σ_b (kgf/cm²)

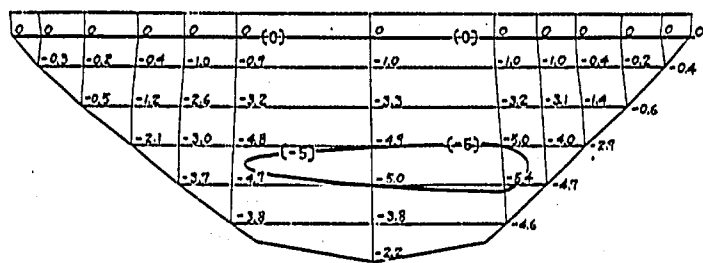


(3) 上流面水平応力 σ_x (kgf/cm²)

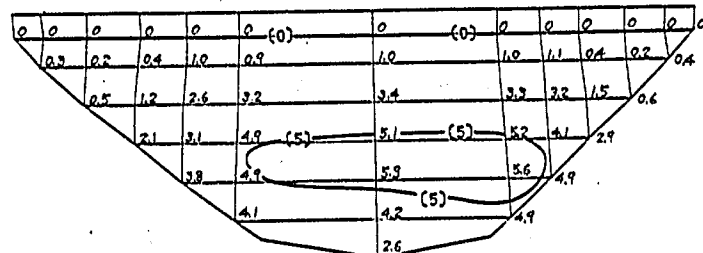


(4) 下流面水平応力 σ_y (kgf/cm²)

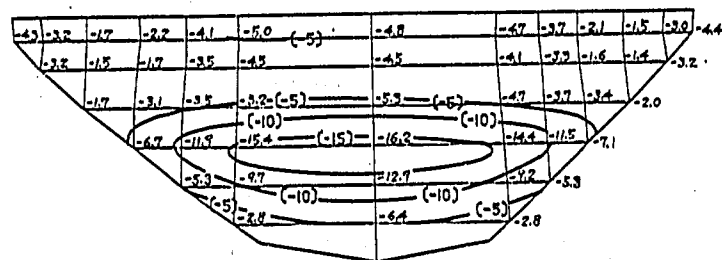
図-7.9 平均温度による応力分布 (有限要素法)



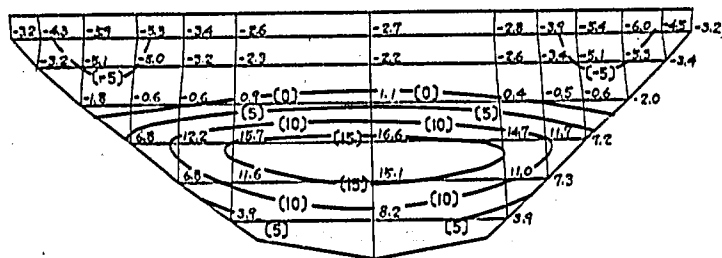
(1) 上流面鉛直応力 σ_u (kgf/cm²)



(2) 下流面鉛直応力 σ_D (kgf/cm²)

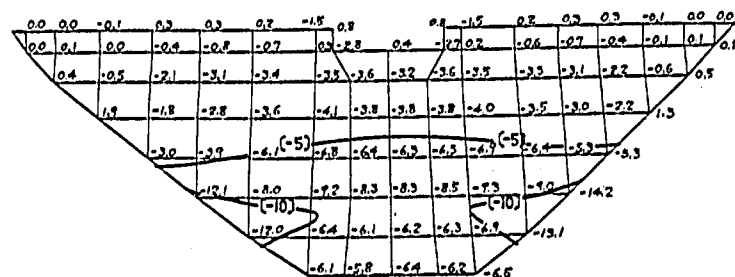


(3) 上流面水平応力 σ_E (kgf/cm²)

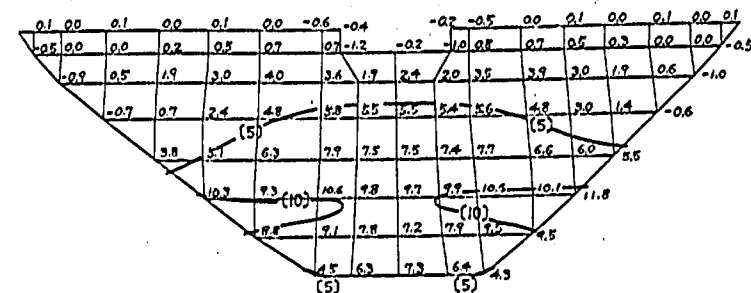


(4) 下流面水平応力 σ_I (kgf/cm²)

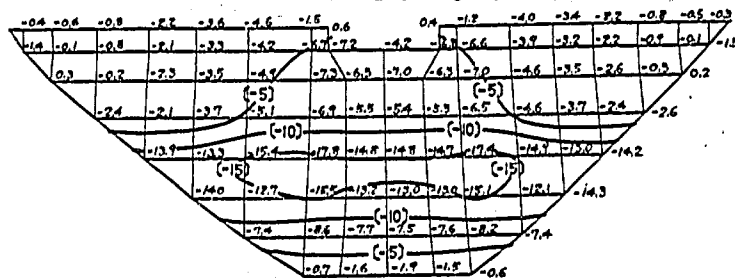
図-7.10 等置温度勾配による応力分布 (荷重分割法)



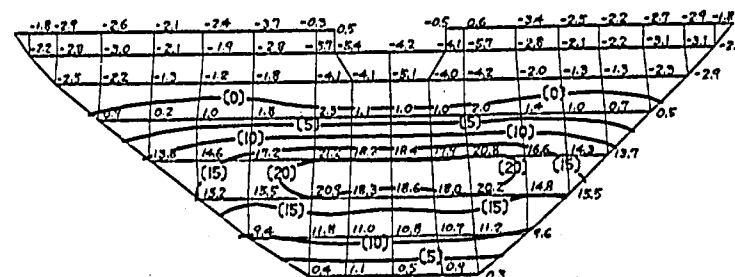
(1) 上流面鉛直応力 σ_u (kgf/cm²)



(2) 下流面鉛直応力 σ_D (kgf/cm²)



(3) 上流面水平応力 σ_E (kgf/cm²)



(4) 下流面水平応力 σ_I (kgf/cm²)

図-7.11 等置温度勾配による応力分布 (有限要素法)

重回帰分析と三次元有限要素法の相関をとってみると、図-7.12および図-7.13に示すようになり、バラツキはあるものの、3手法ともそれぞれ類似した応力値を示している。とりわけ三次元有限要素法の値と重回帰分析の値とは0.9程度の相関を示しており、双方の値は比較的良好一致している。

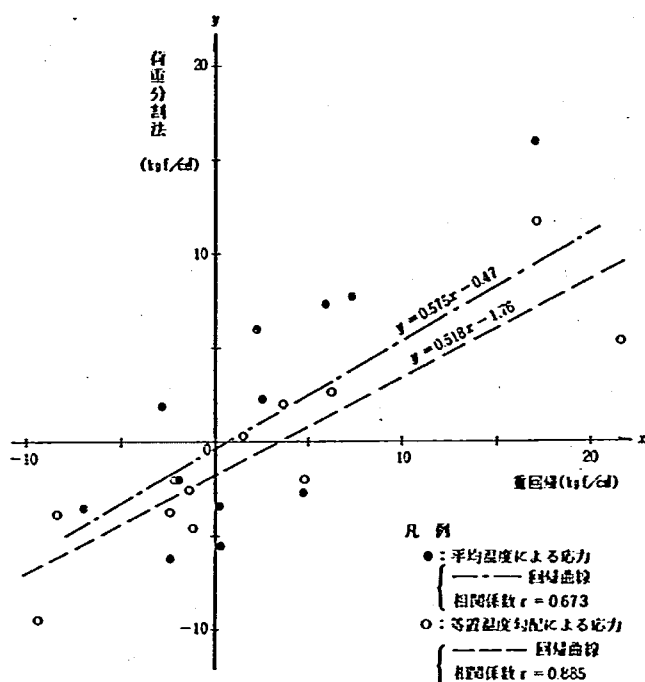


図-7.12 重回帰分析値と荷重分割法から得られる値との相関
(温度荷重によって生じる応力)

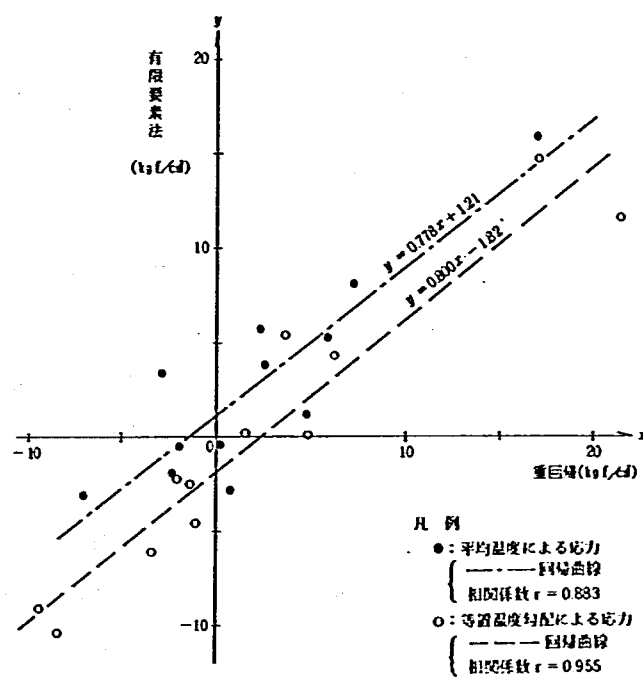


図-7.13 重回帰分析値と三次元有限要素法から得られる値との相関
(温度荷重によって生じる応力)

7.4 考 察

以上の結果を総合すると、貯水による水圧荷重に対するダムの挙動に関しては、三次元有限要素法は実際のダムの挙動(変位、応力)を精度よく表現しているといえる。なお、ダム天端クラウンの上下流方向の変位量が重回帰分析結果よりも大きい理由としては、計算に用いたコンクリートの弾性係数が実際よりも小さいことが考えられる。これは、重回帰分析から得られる残差温度に対する回帰係数が平均で3.0前後であったことから納得のいくところである(「6.3.2 解析結果から得られるダムの応力」参照)。また、クラウン付近に比較してアバット付近で重回帰分析結果と差が大きい点については、①実際の弾性係数が設計値よりも大きいこと、②岩盤のクリープの影響を受け易い箇所であること、③三次元有限要素法ではアバット付近に応力集中が発生し、応力が大きめに出ることなどの理由によるものと考えられる。

一方、荷重分割法についても、水圧荷重によるダムの挙動は、三次元有限要素法ほどではないが、重回帰分析結果と比較的良好一致を示しており、アーチダムの概略設計に用いる計算法としては、十分な精度を有しているといえることができる。

次に、温度荷重によって生じるダムの挙動について述べる。まず、ダム天端クラウンの上下流方向変位については、平均温度による変位量と等置温度勾配による変位量の大小関係が、重回帰分析の結果と荷重分割法や三次元有限要素法の結果と一致しなかった。しかし、これは、平均温度と等置温度勾配の履歴形状が互いに類似していることから、重回帰分析において双方の影響をうまく分離できなかったためと考えられる。これは、平均温度と等置温度勾配による変位の合計を考えると3手法とも比較的似た値を示すことから裏付けできる。これに対して、応力の解析結果については、重回帰分析法、荷重分割法、三次元有限要素法のそれぞれの値が比較的良好な相関を示している。これは、応力については、その断面内の温度分布が他に比べて支配的な因子となることから、各因子によって生じる応力の分離が比較的うまくいったためと思われる。このように、今回の解析結果では、温度によって生じるダムの変位挙動については、重回帰分析から得られた結果が必ずしも実際のダムの挙動を的確に表わしていなかったようである。ただし、平均温度、等置温度勾配の影響の総和については重回帰分析、荷重分割法、三次元有限要素法のそれぞれから得られる変位量が比較的良好な相関関係にあることから、その値は実際のダムの挙動をよく表現しているといえることができる。

また、温度荷重によって生じるダムの鉛直方向応力分布が、荷重分割法と三次元有限要素法とで若干異なった分布傾向を示している点については、堤体の温度変化による体積変化によって、ダムは上下流方向の他に鉛直方向に変形しようとするが、荷重分割法では変位の調整を行う際に、半径方向の変位のみを調整し鉛直方向の変位は調整しないために、鉛直方向応力の精度が低下したものと考えられる。この点から判断して、解析手法の精度としては荷重分割法よりも三次元有限要素法の方が高いと考えられる。このことは、三次元有限要素法と重回帰分析との解析結果の相関性が荷重分割法の場合よりも高いことから裏付けられる。

8. ま と め

今回、実施したアーチダムの重回帰分析の結果、およびこれと荷重分割法、有限要素法の解析結果を比較した結果をとりまとめると次のようになる。

- ① アーチダムの変位は、貯水位、断面内の平均温度、等置温度勾配、クリープによって表現することができる。また、アーチダムの応力については、これらの因子に加えて、残差温度の影響が大きい。
- ② 重回帰解析によって、アーチダムの変位、応力を精度よく分析するには、以下の点には注意する必要がある。
 - a) アーチダムの変位、応力に影響を及ぼす因子には、①で述べたように多くの因子が存在するため、たとえ因子の設定が適切でなくてもこれらの因子が互いに誤差を打ち消してしまい、見かけ上精度が高い解析結果が得られてしまうことがある。
 - b) アーチダムの変位、応力を正しく評価するためには、貯水圧による応答を表わす貯水位の関数形を適切に設定することが必要である。
 - c) 各断面の平均温度、等置温度勾配の履歴は互いに高い相関性を有するため、重回帰分析によって、個々の因子の影響を精度よく評価することは難しい。ただし、これらの温度を総合した結果は、概ね一定の値をとり、全体的にみた温度の影響は精度よく表わすことができる。なお、個々の因子の影響を精度よく評価するのであれば、理論的な考察を基に、温度を入力する断面数を最小限に抑える必要がある。
 - d) クリープの影響は、堤体温度の経年変化や、貯水位の運用の特性（試験湛水時と通常の運用時とにおける貯水状態の差）などの影響と明確に区別することが一般的に難しい。ただし、急激に発生するクリープは比較的精度よく評価することができる。なお、重回帰分析の精度を向上させるためには、温度の場合と同様に、クリープの設定時期を最小限に抑える必要がある。
- ③ 重回帰分析より得られるアーチダムの変位は、荷重分割法、有限要素法の計算値より得られる変位の特性とよく類似しているが、その絶対値は計算値よりも小さくなる傾向にある。これは、設計時において材料の特性（弾性係数）を控え目に評価しているためと考えられる。
- ④ 重回帰分析より得られるアーチダムの応力は、荷重分割法、有限要素法の計算値より得られる応力と比較的よく一致している。有限要素法との差は概ね5～10kgf/cm²程度である。
- ⑤ 荷重分割法、有限要素法による解析は、実物のアーチダムの挙動を精度よく再現しているものと考えられる。

なお、最後に真名川ダムの計測データを提供していただいた建設省北陸地方建設局九頭竜川ダム統合管理事務所の方々に対して厚く謝意を表します。

重回帰分析による
アーチダムの実測挙動解析

—真名川ダムを例に—

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2665号
昭和63年8月(1988)
建設省土木研究所ダム構造研究室
永山 功、片平 博

要 旨 真名川アーチダムを例にとり、変位と応力の実測挙動
に対して重回帰分析を実施し、その解析精度と解析上の問題点
について検討を行った。また、これに併せて荷重分割法、有限
要素法による応力解析を行い、実測値との比較検討を行ったも
のである。

キーワード：アーチダム、実測解析、重回帰分析、荷重分割法、
有限要素法

郵便はがき

40
円切手
をは
いて
下さ
い。

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室 御中

No. _____

土研資料第2665号

No. _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第2665号

重回帰分析によるアーチダムの実測挙動解析

部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏名

印

土木研究所資料第2665号