



土木研究所資料

第 609 号

アーチダム構造設計と模型実験の関連

—計算による応力と実験による応力の比較—

昭和 45 年 7 月

建設省土木研究所

アーチダム構造設計と模型実験の関連

—計算による応力と実験による応力の比較—

建設省土木研究所ダム構造研究室

飯 田 隆 一
柴 田 功
齊 藤 孝 三
増 元 四 郎

1. は じ め に	1
2. アーチダム応力解析に用いる荷重分割法の理論的問題点	2
2-1 格子構造による解析に対する検討	2
2-2 アーチ要素と片持梁要素の調整について	14
2-3 基礎岩盤の変形計算の仮定について	18
3. 構造模型実験の概要	20
3-1 模 型 材 料	20
3-2 模 型 製 作	28
3-3 載 荷 装 置	28
3-4 測 定	31
3-5 模型実験の精度	32
4. 計算値と実験値の比較	35
4-1 たわみについて	35
4-2 曲げモーメント	35
4-3 アーチスラスト	37
4-4 上流面水平応力	37
4-5 下流面水平応力	37
4-6 上流面鉛直応力	37
4-7 下流面鉛直応力	38
4-8 上流面主応力	38
4-9 下流面主応力	38
5. 比較値の考察	39
6. 終 り に	39

1. はじめに

近年河川総合開発の要請から大きなダムが建設されるようになり、基礎岩盤に十分な支持力があるときは経済的であるという理由から形式としてアーチダムが選ばれる。

アーチダムは高次の不静定構造物であり、その応力解析法は非常に複雑である。現在最も普通に行なわれる計算は、米国開拓局によって開発された荷重分割法により、いくつかの水平アーチと片持梁とを要素として選び、これらのたわみが一致するように各要素が分担する荷重に分割する方法で行われている。近年この方法は電子計算機の利用により、精密な計算法が取りいれられているにもかかわらず、その計算過程においては、幾多の仮定を含んでおり、局部的には実際と異なる結果を与えている。したがって現在では、ダムサイトの実際形状に合わせた模型による構造実験による応力の検証が、アーチダムの設計に際しては不可欠なものとされている。

しかし、応力計算は、電子計算機の利用により、短時間にできるが、模型実験は多大な労力と時間を要し、更に、水圧、堆砂圧以外の荷重（温度荷重、自重、地震荷重）に対しては、同時にこれらを加味することが困難であるという難点を持っている。したがって、これらを設計上どのように活用して行くかがより合理的な設計を短時間にするという点で重要な問題となっている。

これまでダム構造研究室では、アーチダムの設計に関係し幾多の構造模型実験を行なっている。これらの実験結果を計算値と種々比較検討することにより、その相違に関する特徴を見出し得るならば、現在まで実験によって補なってきた計算の局部的応力が、ある幅を持って推定できる事になり、ダム設計上有効な役割を果たすことになり得る。

そこでここでは現在行われている荷重分割法と模型実験法についてのあらましと、その問題点について述べ、主としてダム構造研究室で実施した数ヶ所のアーチダムについての模型実験値をもとに、電子計算機による計算結果との比較検討を行い、両者の間の定性的な関係を調べたものである。

2. アーチダム応力解析による荷重分割法の理論的問題点

荷重分割法によるアーチダムの応力解析法は、アーチダムを鉛直、水平の二系の要素に分割し、外荷重を二系の要素に分割して分担させ、二系の交点でのたわみが一致するように分割荷重を求めている。

したがって、荷重分割法によるアーチダムの応力解析法を理論的に検討するに当って、

- (1) 格子構造による解析に対する検討
 - (2) アーチ要素および片持梁要素の調整に対する検討
 - (3) 基礎岩盤の変形計算に対する検討
- に分けて検討する。

2-1 格子構造による解析に対する検討

一般に、取扱いの複雑な三次元構造物を解析する場合に近似計算法として構造物を互に直交する二つの二次元構造系に分割して、格子構造として解析することは古くから行われている。

平板の曲げに対する近似計算法、アーチダム応力解析に対する Ritter 法、試算荷重法（荷重分割法）等はその典型的な例である。この方法に理論的にどのような制約が加えられているかについて考察を加えてみることにする。

一般に二次元的な構造系に分割して解析を行う格子構造による解法は、外荷重と二つの構造系に分割するか、Self-balancing load を作用させ、二つの構造系の交点での各方向の変位を一致せしめることにより解を求めている。それは、荷重分割及び Self-balancing load を作用させるという操作は、明らかに両系の応力を重畳することを前提としている。

一方両系の変位は構造物のそれと一致する様に計算されるから重畳することを前提としてない。これは一見矛盾しているように思われる。この点に着目して考察を進め、格子構造による解法の理論的特性を明らかにする。

水平面内で水圧荷重の作用する方向に x 軸、堤軸方向に y 軸、鉛直方向に z 軸をとるものとする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= 2G \left(l_x - cT + \frac{e - 3cT}{m - 2} \right) \\ \sigma_y &= 2G \left(l_y - cT + \frac{e - 3cT}{m - 2} \right) \\ \sigma_z &= 2G \left(l_z - cT + \frac{e - 3cT}{m - 2} \right) \\ \tau_{xy} &= G \cdot \gamma_{xy}, \quad \tau_{yz} = G \cdot \gamma_{yz}, \quad \tau_{zx} = G \cdot \gamma_{zx} \end{aligned} \right\} (2.1.1)$$

$$\begin{aligned}e_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad e_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad e_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\e &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\end{aligned}$$

にて表わされる。次に鉛直梁要素，および，水平梁要素の応力と，これに対応するひずみ（厳密にはひずみではないが，ひずみと呼ぶことにする）に夫々， c ， a なる記号を付するものとする。

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_x^c + \sigma_x^a, \quad \sigma_y = \sigma_y^c + \sigma_y^a, \quad \sigma_z = \sigma_z^c + \sigma_z^a \\ \tau_{xy} &= \tau_{xy}^c + \tau_{xy}^a, \quad \tau_{yz} = \tau_{yz}^c + \tau_{yz}^a, \quad \tau_{zx} = \tau_{zx}^c + \tau_{zx}^a \\ e - cT &= e_x^c + e_y^c + e_z^c, \quad e_y - cT = e_y^c + e_z^c, \quad e_z - cT = e_z^c + e_x^c \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy}^c + \gamma_{xy}^a, \quad \gamma_{yz} = \gamma_{yz}^c + \gamma_{yz}^a, \quad \gamma_{zx} = \gamma_{zx}^c + \gamma_{zx}^a \\ e - 3cT &= e^c + e^a\end{aligned} \quad (2.1.2)$$

さて，二つの構造系は，外荷重を分割して持ち，しかも，変位は，構造物の変位を示すためには，各構造系の応力と変位との関係は，次のように表わされねばならない。

$$\begin{aligned}\sigma_x^c &= 2G \left(e_x^c + \frac{e^c}{m-2} \right) \\ &= 2G \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - cT - e_x^a + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} - 3cT - e^a \right) \right\} \\ \sigma_y^c &= 2G \left(e_y^c + \frac{e^c}{m-2} \right) \\ &= 2G \left\{ \frac{\partial v}{\partial y} - cT - e_y^a + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} - 3cT - e^a \right) \right\} \\ \sigma_z^c &= 2G \left(e_z^c + \frac{e^c}{m-2} \right) \\ &= 2G \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - cT - e_z^a + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} - 3cT - e^a \right) \right\} \\ \tau_{xy}^c &= G \tau_{xy}^c = G \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} - \gamma_{xy}^a \right) \\ \tau_{yz}^c &= G \tau_{yz}^c = G \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} - \gamma_{yz}^a \right) \\ \tau_{zx}^c &= G \tau_{zx}^c = G \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} - \gamma_{zx}^a \right) \\ \sigma_x^a &= 2G \left(e_x^a + \frac{e^a}{m-2} \right) \\ &= 2G \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - cT - e_x^c + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} - 3cT - e^c \right) \right\}\end{aligned} \quad (2.1.3)$$

$$\begin{aligned}
\sigma_y^a &= 2G \left(\epsilon_y^a + \frac{\epsilon^a}{m-2} \right) \\
&= 2G \left\{ \frac{\partial v}{\partial y} - cT - \epsilon_y^c + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} - 3cT - \epsilon^c \right) \right\} \\
\sigma_z^a &= 2G \left(\epsilon_z^a + \frac{\epsilon^a}{m-2} \right) \\
&= 2G \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - cT - \epsilon_z^c + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} - 3cT - \epsilon^c \right) \right\} \\
\tau_{xy}^a &= G \cdot \tau_{xy}^c = G \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} - \tau_{xy}^c \right) \\
\tau_{yz}^a &= G \cdot \tau_{yz}^c = G \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} - \tau_{yz}^c \right) \\
\tau_{zx}^a &= G \cdot \tau_{zx}^c = G \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} - \tau_{zx}^c \right)
\end{aligned} \tag{2.1.4}$$

構造物の平衡方程式および境界条件は

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= 0 \\
\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= 0 \\
\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0 \\
P_{n \cdot x} &= \sigma_x \cos(n \cdot x) + \tau_{xy} \cos(n \cdot y) + \tau_{xz} \cos(n \cdot z) \\
P_{n \cdot y} &= \tau_{xy} \cos(n \cdot x) + \sigma_y \cos(n \cdot y) + \tau_{yz} \cos(n \cdot z) \\
P_{n \cdot z} &= \tau_{xz} \cos(n \cdot x) + \tau_{yz} \cos(n \cdot y) + \sigma_z \cos(n \cdot z)
\end{aligned} \tag{2.1.5}$$

これらを二つの構造系の平衡方程式と境界条件に分解すると、

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_x^c}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}^c}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}^c}{\partial z} + X^c &= 0 \\
\frac{\partial \tau_{xy}^c}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y^c}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}^c}{\partial z} + Y^c &= 0 \\
\frac{\partial \tau_{xz}^c}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}^c}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z^c}{\partial z} + Z^c &= 0 \\
P_{n \cdot x}^c &= \sigma_x^c \cos(n \cdot x) + \tau_{xy}^c \cos(n \cdot y) + \tau_{xz}^c \cos(n \cdot z) \\
P_{n \cdot y}^c &= \tau_{xy}^c \cos(n \cdot x) + \sigma_y^c \cos(n \cdot y) + \tau_{yz}^c \cos(n \cdot z) \\
P_{n \cdot z}^c &= \tau_{xz}^c \cos(n \cdot x) + \tau_{yz}^c \cos(n \cdot y) + \sigma_z^c \cos(n \cdot z) \\
\frac{\partial \sigma_x^a}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}^a}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}^a}{\partial z} + X^a &= 0 \\
\frac{\partial \tau_{xy}^a}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y^a}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}^a}{\partial z} + Y^a &= 0
\end{aligned} \tag{2.1.6}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \tau_{xz}^a}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}^a}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z^a}{\partial z} + Z^a &= 0 \\ P_{nx}^a &= \sigma_x^a \cos(n \cdot x) + \tau_{xy}^a \cos(n \cdot y) + \tau_{xz}^a \cos(n \cdot z) \\ P_{ny}^a &= \tau_{xy}^a \cos(n \cdot x) + \sigma_y^a \cos(n \cdot y) + \tau_{yz}^a \cos(n \cdot z) \\ P_{nz}^a &= \tau_{xz}^a \cos(n \cdot x) + \tau_{yz}^a \cos(n \cdot y) + \sigma_z^a \cos(n \cdot z) \end{aligned} \right\} (2.1.7)$$

にて表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \text{但し, } X &= X^a + X^c, \quad Y = Y^a + Y^c, \quad Z = Z^a + Z^c \\ P_{nx} &= P_{nx}^a + P_{nx}^c, \quad P_{ny} = P_{ny}^a + P_{ny}^c, \quad P_{nz} = P_{nz}^a + P_{nz}^c \end{aligned} \right\} (2.1.8)$$

とする。ここに、 $X^c, Y^c, Z^c, X^a, Y^a, Z^a$ は荷重分割法における Self-balancing load に相当し、 $P_{nx}^c, P_{ny}^c, P_{nz}^c, P_{nx}^a, P_{ny}^a, P_{nz}^a$ は分割荷重に相当する。

以上の考察から明らかなように鉛直梁要素の応力、変位は(2.1.3), (2.1.6)式より求められる。水平梁要素の応力、変位は(2.1.4), (2.1.7)式より求めることになるが、これら二つの構造系に対する方程式は一般の二次元問題に対する方程式と少し異っている。この相違点についてさらに考察を進めよう。考察を容易にするために(2.1.3), (2.1.4), (2.1.6) (2.1.7)式を次のように分解する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^{c1} &= 2G \left\{ \frac{\partial u_{c1}}{\partial x} - cT + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u_{c1}}{\partial x} + \frac{\partial w_{c1}}{\partial z} - 3cT \right) \right\} \\ \sigma_y^{c1} &= 2G \left\{ -cT + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u_{c1}}{\partial x} + \frac{\partial w_{c1}}{\partial z} - 3cT \right) \right\} \\ \sigma_z^{c1} &= 2G \left\{ \frac{\partial w_{c1}}{\partial z} - cT + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u_{c1}}{\partial x} + \frac{\partial w_{c1}}{\partial z} - 3cT \right) \right\} \\ \tau_{xy}^{c1} &= 0, \quad \tau_{yz}^{c1} = 0, \quad \tau_{xz}^{c1} = G \left(\frac{\partial u_{c1}}{\partial z} + \frac{\partial w_{c1}}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial \sigma_x^{c1}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}^{c1}}{\partial z} + (X^c + \frac{\partial \tau_{xy}^{c2}}{\partial y}) &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}^{c1}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z^{c1}}{\partial z} + (Z^c + \frac{\partial \tau_{yz}^{c2}}{\partial y}) &= 0 \\ P_{nx}^c &= \sigma_x^{c1} \cos(n \cdot x) + \tau_{xz}^{c1} \cos(n \cdot z) \\ P_{nz}^c &= \tau_{xz}^{c1} \cos(n \cdot x) + \sigma_z^{c1} \cos(n \cdot z) \end{aligned} \right\} (2.1.9)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^{a1} &= 2G \left\{ \frac{\partial u_{a1}}{\partial x} - cT + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u_{a1}}{\partial x} + \frac{\partial v_{a1}}{\partial y} - 3cT \right) \right\} \\ \sigma_y^{a1} &= 2G \left\{ \frac{\partial v_{a1}}{\partial y} - cT + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u_{a1}}{\partial x} + \frac{\partial v_{a1}}{\partial y} - 3cT \right) \right\} \\ \sigma_z^{a1} &= 2G \left\{ -cT + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u_{a1}}{\partial x} + \frac{\partial v_{a1}}{\partial y} - 3cT \right) \right\} \end{aligned} \right\} (2.1.10)$$

$$\tau_{xy}^{a1} = G \left(\frac{\partial v^{a1}}{\partial x} + \frac{\partial u^{a1}}{\partial y} \right), \quad \tau_{yz}^{a1} = \tau_{zx}^{a1} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_x^{a1}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}^{a1}}{\partial y} + \left(X^a + \frac{\partial \tau_{xz}^a}{\partial z} \right) = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}^{a1}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y^{a1}}{\partial y} + \left(Y^a + \frac{\partial \tau_{yz}^a}{\partial z} \right) = 0$$

$$P_{nx}^a = \sigma_x^{a1} \cos(n \cdot x) + \tau_{xy}^{a1} \cos(n \cdot y)$$

$$P_{ny}^a = \tau_{xy}^{a1} \cos(n \cdot x) + \sigma_y^{a1} \cos(n \cdot y)$$

$$\sigma_x^{c2} = 2G \left\{ \frac{\partial u^{c2}}{\partial x} + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u^{c2}}{\partial x} + \frac{\partial w^{c2}}{\partial z} \right) \right\}$$

$$\sigma_y^{c2} = 2G \left\{ \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u^{c2}}{\partial x} + \frac{\partial w^{c2}}{\partial z} \right) \right\}$$

$$\sigma_z^{c2} = 2G \left\{ \frac{\partial w^{c2}}{\partial z} + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u^{c2}}{\partial x} + \frac{\partial w^{c2}}{\partial z} \right) \right\}$$

$$\tau_{xy}^{c2} = G \left(\frac{\partial v^{c2}}{\partial x} \right), \quad \tau_{yz}^{c2} = G \left(\frac{\partial v^{c2}}{\partial z} \right), \quad \tau_{zx}^{c2} = G \left(\frac{\partial u^{c2}}{\partial z} + \frac{\partial w^{c2}}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial \sigma_x^{c2}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}^{c2}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}^{c2}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}^{c2}}{\partial z} + \left\{ Y^c + \frac{\partial (\sigma_y^{c1} + \sigma_y^{c2})}{\partial y} \right\} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}^{c2}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z^{c2}}{\partial z} = 0$$

$$0 = \sigma_x^{c2} \cos(n \cdot x) + \tau_{xy}^{c2} \cos(n \cdot y) + \tau_{xz}^{c2} \cos(n \cdot z)$$

$$P_{ny}^c = \tau_{xy}^{c2} \cos(n \cdot x) + \sigma_y^{c2} \cos(n \cdot y) + \tau_{yz}^{c2} \cos(n \cdot z) + \sigma_y^{c1} \cos(n \cdot y)$$

$$0 = \tau_{xz}^{c2} \cos(n \cdot x) + \tau_{yz}^{c2} \cos(n \cdot y) + \sigma_z^{c2} \cos(n \cdot z)$$

$$\sigma_x^{a2} = 2G \left\{ \frac{\partial u^{a2}}{\partial x} + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u^{a2}}{\partial x} + \frac{\partial v^{a2}}{\partial z} \right) \right\}$$

$$\sigma_y^{a2} = 2G \left\{ \frac{\partial v^{a2}}{\partial x} + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u^{a2}}{\partial x} + \frac{\partial v^{a2}}{\partial z} \right) \right\}$$

$$\sigma_z^{a2} = 2G \left\{ \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u^{a2}}{\partial x} + \frac{\partial v^{a2}}{\partial y} \right) \right\}$$

$$\tau_{xy}^{a2} = G \left(\frac{\partial v^{a2}}{\partial x} + \frac{\partial u^{a2}}{\partial y} \right), \quad \tau_{yz}^{a2} = G \left(\frac{\partial w^{a2}}{\partial y} \right), \quad \tau_{zx}^{a2} = \left(\frac{\partial w^{a2}}{\partial x} \right)$$

(2.1.1.1)

$$\frac{\partial \sigma_x^2}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}^2}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xz}^2}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y^2}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}^2}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}^2}{\partial y} + \left(Z^2 + \frac{\partial \sigma_z^2}{\partial z} \right) = 0$$

$$0 = \sigma_x^2 \cos(n \cdot x) + \tau_{xy}^2 \cos(n \cdot y) + \tau_{xz}^2 \cos(n \cdot z)$$

$$0 = \tau_{xy}^2 \cos(n \cdot x) + \sigma_y^2 \cos(n \cdot y) + \tau_{yz}^2 \cos(n \cdot z)$$

$$p_{nz} = \tau_{xz}^2 \cos(n \cdot x) + \tau_{yz}^2 \cos(n \cdot y) + \sigma_z^2 \cos(n \cdot z) + \sigma_z^1 \cos(n \cdot z)$$

$$\sigma_x^3 = 2G \left\{ \frac{\partial u^3}{\partial x} - e_x^3 + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u^3}{\partial x} + \frac{\partial v^3}{\partial y} + \frac{\partial w^3}{\partial z} - e^3 \right) \right\}$$

$$\sigma_y^3 = 2G \left\{ \frac{\partial v^3}{\partial y} - e_y^3 + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u^3}{\partial x} + \frac{\partial v^3}{\partial y} + \frac{\partial w^3}{\partial z} - e^3 \right) \right\}$$

$$\sigma_z^3 = 2G \left\{ \frac{\partial w^3}{\partial z} - e_z^3 + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u^3}{\partial x} + \frac{\partial v^3}{\partial y} + \frac{\partial w^3}{\partial z} - e^3 \right) \right\}$$

$$\tau_{xy}^3 = G \left\{ \frac{\partial v^3}{\partial x} + \frac{\partial u^3}{\partial y} - \gamma_{xy}^3 \right\}, \quad \tau_{yz}^3 = G \left\{ \frac{\partial w^3}{\partial y} + \frac{\partial v^3}{\partial z} - \gamma_{yz}^3 \right\}$$

$$\tau_{zx}^3 = G \left\{ \frac{\partial u^3}{\partial z} + \frac{\partial w^3}{\partial x} - \gamma_{zx}^3 \right\}$$

$$\frac{\partial \sigma_x^3}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}^3}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}^3}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}^3}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y^3}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}^3}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}^3}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}^3}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z^3}{\partial z} = 0$$

$$0 = \sigma_x^3 \cos(n \cdot x) + \tau_{xy}^3 \cos(n \cdot y) + \tau_{xz}^3 \cos(n \cdot z)$$

$$0 = \tau_{xy}^3 \cos(n \cdot x) + \sigma_y^3 \cos(n \cdot y) + \tau_{yz}^3 \cos(n \cdot z)$$

$$0 = \tau_{xz}^3 \cos(n \cdot x) + \tau_{yz}^3 \cos(n \cdot y) + \sigma_z^3 \cos(n \cdot z)$$

$$\sigma_x^3 = 2G \left\{ \frac{\partial u^3}{\partial x} - e_x^3 + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u^3}{\partial x} + \frac{\partial v^3}{\partial y} + \frac{\partial w^3}{\partial z} - e^3 \right) \right\}$$

$$\sigma_y^3 = 2G \left\{ \frac{\partial v^3}{\partial y} - e_y^3 + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u^3}{\partial x} + \frac{\partial v^3}{\partial y} + \frac{\partial w^3}{\partial z} - e^3 \right) \right\}$$

$$\sigma_z^3 = 2G \left\{ \frac{\partial w^3}{\partial z} - e_z^3 + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\partial u^3}{\partial x} + \frac{\partial v^3}{\partial y} + \frac{\partial w^3}{\partial z} - e^3 \right) \right\}$$

$$\tau_{xy}^3 = G \left(\frac{\partial v^3}{\partial x} + \frac{\partial u^3}{\partial y} - \gamma_{xy}^3 \right)$$

(2.1.12)

(2.1.13)

$$\begin{aligned}
\tau_{yz}^a &= G \left(\frac{\partial w^a}{\partial y} + \frac{\partial v^a}{\partial z} - \gamma_{yz}^c \right) \\
\tau_{zx}^a &= G \left(\frac{\partial u^a}{\partial z} + \frac{\partial w^a}{\partial x} - \gamma_{zx}^c \right) \\
\frac{\partial \sigma_x^a}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}^a}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}^a}{\partial z} &= 0 \\
\frac{\partial \tau_{xy}^a}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y^a}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}^a}{\partial z} &= 0 \\
\frac{\partial \tau_{xz}^a}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}^a}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z^a}{\partial z} &= 0 \\
0 &= \sigma_x^a \cos(n \cdot x) + \tau_{xy}^a \cos(n \cdot y) + \tau_{xz}^a \cos(n \cdot z) \\
0 &= \tau_{xy}^a \cos(n \cdot x) + \sigma_y^a \cos(n \cdot y) + \tau_{yz}^a \cos(n \cdot z) \\
0 &= \tau_{xz}^a \cos(n \cdot x) + \tau_{yz}^a \cos(n \cdot y) + \sigma_z^a \cos(n \cdot z)
\end{aligned} \tag{2.1.14}$$

但し,

$$\begin{aligned}
\sigma_x^c &= \sigma_x^{c1} + \sigma_x^{c2} + \sigma_x^{c3}, & \sigma_y^c &= \sigma_y^{c1} + \sigma_y^{c2} + \sigma_y^{c3}, & \sigma_z^c &= \sigma_z^{c1} + \sigma_z^{c2} + \sigma_z^{c3} \\
\tau_{xy}^c &= \tau_{xy}^{c1} + \tau_{xy}^{c2} + \tau_{xy}^{c3}, & \tau_{yz}^c &= \tau_{yz}^{c1} + \tau_{yz}^{c2} + \tau_{yz}^{c3}, & \tau_{zx}^c &= \tau_{zx}^{c1} + \tau_{zx}^{c2} + \tau_{zx}^{c3} \\
\sigma_x^a &= \sigma_x^{a1} + \sigma_x^{a2} + \sigma_x^{a3}, & \sigma_y^a &= \sigma_y^{a1} + \sigma_y^{a2} + \sigma_y^{a3}, & \sigma_z^a &= \sigma_z^{a1} + \sigma_z^{a2} + \sigma_z^{a3} \\
\tau_{xy}^a &= \tau_{xy}^{a1} + \tau_{xy}^{a2} + \tau_{xy}^{a3}, & \tau_{yz}^a &= \tau_{yz}^{a1} + \tau_{yz}^{a2} + \tau_{yz}^{a3}, & \tau_{zx}^a &= \tau_{zx}^{a1} + \tau_{zx}^{a2} + \tau_{zx}^{a3} \\
u &= u^{c1} + u^{c2} + u^{c3} = u^{a1} + u^{a2} + u^{a3}, \\
v &= v^{c1} + v^{c2} + v^{c3} = v^{a1} + v^{a2} + v^{a3} \\
w &= w^{c1} + w^{c2} + w^{c3} = w^{a1} + w^{a2} + w^{a3}
\end{aligned} \tag{2.1.15}$$

とする。

このように三次元構造物に対する弾性方程式を(2.1.9)より(2.1.14)式までに分解すると(2.1.9)～(2.1.12)式は外荷重, 温度荷重に対する調整計算式を示している。これらのうち(2.1.9), (2.1.10)式は, それぞれ鉛直梁要素, 水平梁要素の面内荷重に対する式を示しており, (2.1.12), (2.1.13)式は, 面外荷重に対する式を示している。これらの式はいずれも広い意味での二次元化して取扱われており, 面に直交する方向の応力, 変位の変化はないとして取扱っている。

これらの式をさらに詳細に観察すると(2.1.9), (2.1.10)式はいずれも両構造系の面内荷重に対する式であり, (2.1.11), (2.1.12)式は, 面外荷重に対する式である。即ち(2.1.9)式は, x, z 方向の容積力をそれぞれ, $X^c + \frac{\partial \tau_{xy}^{c2}}{\partial y}, Z^c + \frac{\partial \tau_{yz}^{c2}}{\partial y}$ として, 分割された荷重, P_{nx}^c, P_{nz}^c に対する式で平面ひずみの状態での二次元応力状態として取扱われ,

荷重分割法における半径方向調整，鉛直方向調整，水平軸の周りの回転の調整に相当する。

(2.1.10) 式は水平梁要素の面内荷重に対する式で， x ， y ，方向の容積力をそれぞれ $X^a + \frac{\partial \tau_{xz}^a}{\partial z}$ ， $Y^a + \frac{\partial \tau_{yz}^a}{\partial z}$ ，とし，分割された荷重 P_{xz}^a ， P_{yz}^a に対する式であり，平面ひずみ状態での二次元応力状態として取扱われ，荷重分割法における半径方向調整，接線方向調整，鉛直軸の周りの回転の調整に相当する。

(2.1.11) 式は鉛直梁要素の面外荷重に対する式で， y 方向の容積力を $Y^a + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma_y^a + \sigma_y^{a2})$ とし，分割された荷重 P_{yz}^a に対する式であり，面に直交する方向 (y) での応力変化はないとした広い意味での二次元的取扱を行っている。

(2.1.12) 式は水平梁要素の面外荷重に対する式で， z 方向の容積力を $Z^a + \frac{\partial}{\partial z}(\sigma_z^a + \sigma_z^{a2})$ とし，分割された荷重 P_{xz}^a に対する式であり，面に直交する方向 (z) での応力変化はないとした広い意味での二次元的取扱を行っている。(2.1.11) 式は，鉛直梁要素の接線方向調整，鉛直軸周りの回転の調整に相当し，(2.1.12) 式は鉛直方向調整，水平軸の周りの回転の調整に相当する。

さて，(2.1.9)，(2.1.10) 式は完全な二次元応力であるので問題はないが (2.1.11)，(2.1.12) 式は面外荷重を取扱っているので，この解において，どのような応力変位が生ずるかについて考察してみる。簡単な場合 (y ， z 方向に断面変化のない板に容積力が作用した場合) についての解を求め，これから面外応力の特性について検討を加える。

y 方向の平衡方程式は

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = 0$$

境界条件は

$$x = \pm \frac{t}{2} \text{ にて } \sigma_x = \tau_{xy} = \tau_{xz} = 0$$

そこで全領域にわたって， $\sigma_x = \tau_{xy} = \tau_{xz} = 0$ と仮定する。

さらに簡単にするために $\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0$ なる場合について解を求めてみる。

$$\frac{\partial Y}{\partial y} = 0$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{1}{2G} \iiint \left\{ (m-1) \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} Y dy dz dz - \int \left\{ (m-1) \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right\} f(x \cdot y) dy \\ & - \int \left\{ \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} h(y \cdot z) dz - \int \left\{ \frac{\partial^2}{\partial z^2} - (m-1) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right\} g(z \cdot x) dx = 0 \\ & \frac{1}{2G} \iint \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} - (m-1) \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} Y dz dz - \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} - (m-1) \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right\} f(x \cdot y) \\ & - \int \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (m-1) \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} h(y \cdot z) dz = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.1.16)$$

$$\frac{1}{2G} \iint \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - (m-1) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} Y dy \cdot dz - \left\{ \frac{\partial^2}{\partial y^2} - (m-1) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} h(y \cdot z) \\ - \int \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (m-1) \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right\} g(z \cdot x) dx = 0$$

以上を条件として,

$$u = \frac{1}{2G} \iiint \frac{\partial Y}{\partial x} dy dz + g(z \cdot x) - \int \frac{\partial f(x \cdot y)}{\partial x} \cdot dy$$

$$v = \frac{-1}{2G} \iint Y dz + f(x \cdot y) - \int \frac{\partial h(y \cdot z)}{\partial y} \cdot dz$$

$$w = \frac{-1}{2G} \iint Y dy dz + h(y \cdot z) - \int \frac{\partial g(z \cdot x)}{\partial z} \cdot dx$$

$$\sigma_x = \tau_{xy} = \tau_{xz} = 0$$

$$\tau_{yz} = -\int Y \cdot dz$$

$$\sigma_y = \frac{1}{m-2} \iiint \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} - (m-1) \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} Y \cdot dy \cdot dz \cdot dz$$

$$- \frac{2G}{m-2} \left[\int \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} - (m-1) \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right\} f(x \cdot y) dy \right.$$

$$\left. + \int \left\{ (m-1) \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} h(y \cdot z) dz + \int \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) g(z \cdot x) dx \right]$$

$$\sigma_z = \frac{1}{m-2} \iint \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - (m-1) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} Y \cdot dy \cdot dz \cdot dz$$

$$- \frac{2G}{m-2} \left[\int \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right\} f(x \cdot y) dy \right.$$

$$\left. + \int \left\{ \frac{\partial^2}{\partial y^2} - (m-1) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} h(y \cdot z) dz + \int \left\{ (m-1) \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right\} g(x \cdot z) dx \right]$$

(2.1.17)

となる。いまさらに簡単な例として y, z 方向に変化しない y 方向の剪断力 V と, z 軸の周りのねじれモーメント M が作用した場合を解くと,

$$\int Y \cdot dz = -\frac{V}{A} - \frac{M}{I} x$$

となる。ここに A は単位幅当りの断面積, I は断面二次モーメントとする。

$$f(x \cdot y) = \frac{c}{4Gm} (x^2 - y^2),$$

$$h(y \cdot z) = \frac{y}{2G} (cz + D)$$

$$g(z \cdot x) = 0$$

$$\begin{aligned}
u &= -\frac{M}{2GI}yz - \frac{cxy}{2Gm} \\
v &= \frac{V}{2GA}z + \frac{M}{2GI}zx + \frac{c}{4Gm}(x^2 - y^2 - mz^2) - \frac{D}{2G}z \\
w &= \frac{V}{2GA}y + \frac{M}{2GI}xy + \frac{y}{2G}(Cx + D) \\
\tau_{xy} = \tau_{yz} &= 0, \quad \tau_{yz} = \frac{V}{A} + \frac{M}{I}x \\
\sigma_x = \sigma_y &= 0, \quad \sigma_z = \frac{m+1}{m}\sigma_y \\
\tilde{w}_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} &= 0, \quad \tilde{w}_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{M}{GI}y \\
\tilde{w}_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{M}{GI}z
\end{aligned} \tag{2.1.18}$$

応力の y 方向への変化のないことから $C=0$ とし、さらに $D=2GD_0 - \frac{V}{A}$ とおくと、

$$\begin{aligned}
u &= -\frac{M}{2GI}x \\
v &= \frac{V}{GA}z + \frac{M}{2GI}zx - D_0z \\
w &= \frac{M}{2GI}xy + D_0y
\end{aligned} \tag{2.1.19}$$

となる

以上の解から明かなように、 y, z 方向に断面変化がない場合には、 $\tau_{xz}^{e2}, \tau_{xy}^{e2}, \sigma_x^{e2}$ は 0 となり、この場合に主役を演ずる応力は τ_{yz}^{e2} である。勿論、 y 方向、 z 方向に断面の変化があるときには、二次的な応力として、 $\tau_{xy}^{e2}, \tau_{xz}^{e2}$ 等も生ずる。しかし、これらは、二次的な応力で値は小さいと考えて差支えない。従って (2.1.9) 式の平衡方程式の第一式に含まれる容積力 $\frac{\partial \tau_{xy}^{e2}}{\partial y}$ は無視して差支えない。同様に (2.1.12) 式においても主役を演ずるのは τ_{yz}^{e2} で、 $\tau_{xz}^{e2}, \tau_{xy}^{e2}$ 等は二次的な応力と見なし得る。従って (2.1.10) 式の平衡方程式の第一式に含まれる容積力 $\frac{\partial \tau_{xz}^{e2}}{\partial z}$ は無視し得る。

次に (2.1.13), (2.1.14) 式について考察してみる。

これらの式は、外力、容積力が 0 で、 $e_x^e, e_y^e, e_z^e, \gamma_{xy}^e, \gamma_{yz}^e, \gamma_{zx}^e$ および $e_x^e, e_y^e, e_z^e, \gamma_{xy}^e, \gamma_{yz}^e, \gamma_{zx}^e$ なる固有応力源が存在するときの方程式である。これらの方程式の持つ物理的意味は、これら固有応力源が、加付される前の状態においては、各構造系の相隣れる要素の間には連続性は保たれていないが、これら固有応力源が、加付されると直交する構造系の要素のひずみが固有応力源として加付されるので、各構造系は、その面に直交する方向にも連続性を有するようになる。

では、(2.1.13), (2.1.14) 式によりどのような応力が生ずるか。 $e_x^e, e_y^e, e_z^e, \gamma_{xy}^e$

r_{yz}^2, r_{zx}^2 および $e_x^2, e_y^2, e_z^2, r_{xy}^2, r_{yz}^2, r_{zx}^2$ が適合条件を満足する限り、固有応力源に等しいひずみが、加付されるだけで (2.1.13), (2.1.14) 式によって応力は生じない。しかし、適合条件を満足しないときは、固有応力の形でかなりの応力が生ずることになる。これから一般的には (2.1.13), (2.1.14) 式により、ほとんど応力は生じないが、アバットメント等局部応力を生ずるような部分では、これらの式により応力がある程度の値になることが予想される。

以上三次元構造物を直交する二次元的な構造系に分割して、格子構造として解析する場合の理論的な手続について考察した。

次にこの理論的な考察に現われた計算が実際の荷重分割法にどの程度加味されているかについて簡単に考察してみる。

- (1) 格子構造として解析する場合、調整すべき変位としては、 x 方向変位、 y 方向変位、 z 方向変位、 y 軸の周りの回転、 z 軸の周りの回転、とが考えられる。このうち、 x 方向変位は半径方向変位、 y 方向変位は接線方向変位、 z 軸の周りの回転は鉛直軸の周りの回転として荷重分割法では考慮されている。しかし、 z 方向の変位、 y 軸の周りの回転については考慮されていない。その理由は z 方向の変位は値が小さいからとし、 y 軸の周りの回転は、 z 軸の周りの回転に対して調整すれば、自動的に調整されるとしている。 z 方向変位についてはアーチダムでは、鉛直梁要素、水平梁要素とも z 方向変位を生ぜしめる可能性は比較的小さい場合が多いので（例外としては鉛直方向にもかなりの曲率を有する場合と、鉛直梁要素の中心線が傾いている場合等が考えられる）一般的にはこの方向の調整は無視している。

もし、 z 方向変位および y 軸の周りの回転に対する調整が行われないならば鉛直梁要素では、(2.1.9) 式によってのみ生じ、水平梁要素では生じないことになる。しかし (2.1.18) 式からも明らかなように (2.1.11) 式の解は、

$$\frac{\partial}{\partial z} w_z = \frac{M}{GI}, \quad \frac{\partial}{\partial y} w_y = -\frac{M}{GI}$$

であるから、 z 方向への単位幅当りの y 軸の周りの回転の増分と同量の y 方向への単位幅当りの y 軸の周りの回転の増分が生ずることになる。このため (2.1.14) 式において、これらのひずみを固有応力源として、水平梁要素に加付されることにより、水平梁要素に y 軸の周りの回転が加付される。この (2.1.14) 式により水平梁要素に生ずる y 軸の周りの回転は (2.1.9) 式により鉛直軸の周りの回転と同じ方向で両構造系の y 軸の周りの回転の差は、かなり小さくなると考えられる。しかし、理論的に、一般に z 軸の周りの回転を調整すれば、 y 軸の周りの回転も調整されることを示すことは困難であるが、いずれの構造系も z 軸の周りの回転の増分と、 y 軸の回転の増分との間には、強い関連があり、もし

z 軸の周りの回転の調整を行っても、y 軸の周りの回転が調整されないとして、y 軸の周りの回転の調整を行ったとしても、z 軸の周りの回転の調整がくずれ、z 軸、y 軸の周りの回転を両方調整した数値解を得ることは困難になる。さらに前述したように、(2.1.14) 式により、固有応力源を水平梁要素に加付すれば、両構造系の y 軸の周りの回転角の差は極めて小さくなっていることから考えて、y 軸の周りの回転の調整は必要ないと考えられる。以上から、現在荷重分割法では、x 方向、y 方向の変位と、z 軸の周りの回転について調整を行っている。

$$(2) \quad (2.1.9) \sim (2.1.12) \text{ 式で, } \frac{\partial \tau_{xz}^2}{\partial y}, \frac{\partial \tau_{yz}^2}{\partial y}, \frac{\partial \tau_{xz}^2}{\partial z}, \frac{\partial \tau_{yz}^2}{\partial z}, \frac{\partial}{\partial y}(\sigma_y^{c1} + \sigma_y^{c2}), \frac{\partial}{\partial z}(\sigma_z^{c1} + \sigma_z^{c2})$$

なる容積力の補正項が加えられている。しかし、荷重分割法では $\frac{\partial \tau_{yz}^2}{\partial y}$ のうちの鉛直梁のねじれモーメントによる τ_{yz} の y 方向の勾配のみが加味されている。前述した考察によると、 τ_{xy}^2 , τ_{xz}^2 は二次的な応力で無視してもさしつかえない。また、z 方向の変位は特殊な形の場合を除いて、調整の影響は少なく、y 軸の周りの回転に対する調整は不必要であることから考えると、 τ_{yz}^2 はほとんど値を持たないことになる。また、 $\frac{\partial}{\partial y}(\sigma_y^{c1} + \sigma_y^{c2})$, $\frac{\partial}{\partial z}(\sigma_z^{c1} + \sigma_z^{c2})$ は、ダムの頂部を除いてはほとんど値を有しない。したがって(2.1.9) 式の $\frac{\partial \tau_{yz}^2}{\partial y}$ の接線方向剪断力による τ_{yz}^2 の y 方向の勾配を加味していない点だけが問題となる。しかし、この影響は 100m 程度のアーチダムで 5 kg/cm^2 以下であろう。

- (3) (2.1.9) ~ (2.1.12) 式において、二次元問題の解として平面ひずみの状態において取扱った。これは三次元構造物を二次元化した構造系に分けて取扱うときには、平面ひずみの状態で取扱うべきであると考えたからである。このために面に直角な応力 σ_y^c , σ_z^c が生じた。実際の荷重分割法ではこれを梁理論により取り扱うために、 σ_y^c , σ_z^c は計算されていない。その影響は梁理論で算出した応力に対してポアソン比で示されるので、 σ_y^c が圧縮応力 50 kg/cm^2 に対し、 σ_z^c は 10 kg/cm^2 程度の圧縮応力が発生することになるが、この値から実際上は 100m 位の高さのアーチダムでも問題はないことがわかる。なお、一般にアーチダムは圧縮応力が大きく引張応力が小さいことから考えて、この影響が大きい所は圧縮側への変化として現れ、引張側への影響が出る所はその影響は小さい。さらに引張応力が出易く問題になる部分、あるいは最大圧縮応力の出る部分は、他方向の要素の応力状態がこの影響と反対の符号の応力となるので問題は小さい。

- (4) (2.1.13), (2.1.14) 式にて扱った固有応力源は物理的には相隣れる要素間に連続性を与えるもので、一方の構造系で求めたひずみが他方の構造系での適合条件を満足する限り、(2.1.13), (2.1.14) 式により応力は生じない。しかし、適合条件を満足しないときは、すなわち、応力が急変しているところ、あるいは局部応力が生じているところ等では(2

1.13), (2.1.14) 式により, かなりの修正を受ける可能性がある。鳴子ダムの三次元光弾性実験結果(図2-1-1)によると, 上部 $\frac{2}{3}$ 程度までは等分布荷重を受けた場合の二次元アーチの積分布と類似した積分布を示しているが, 下部の積分布は全く異なっている。これは下部アーチの分担荷重が等分布とかなり異なっているためと考えられるが, (2.1.14)

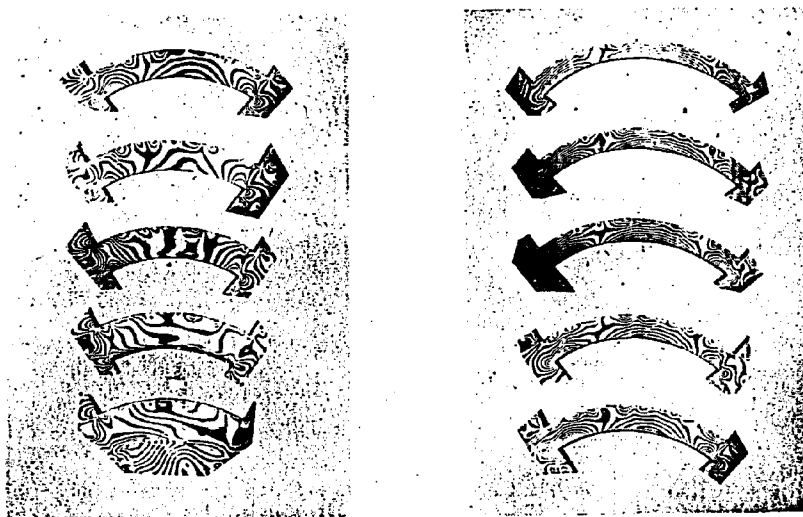


図 2-1-1

式での固有応力源による修正応力がかなり付加されていたものと考えられる。

また一般に模型実験によると, 下部アーチクラウン下流面には計算値よりも大きな引張力が生ずる例が多い。これは岩盤の変形が計算と実験では異っていることと, 下部アーチは支間が小さく厚さが厚いアーチになっているため, 梁理論が合いにくい形になっていることも大きな原因と考えられるが, 三次元光弾性実験の結果を考慮するならば(2.1.14)式による修正応力も大きな影響を与えていると考えられる。

2-2 アーチ要素と片持梁要素の調整について

アーチダムを解析する場合は, 先ず, 等高線の記載されているダム地点の平面図にダムを等高線を用いて描き, 次に数組の水平面とダム下流側に位置する1本の鉛直線で交錯する数組の鉛直面によって, ダムを数組のアーチと片持梁の要素に分割する。ダム構造研究室で使用しているプログラムの例では, アーチ要素の数は6個で図2-2-1のように下から順に1. 2.....6の名称が付けられている。片持梁要素はダムの最大断面と各アーチ要素のアバットメントにとられている。

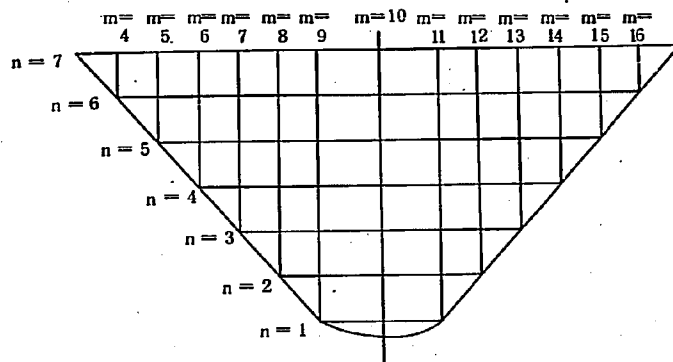


図 2-2-1 アーチダムのエレメント

①

ここで、解析されるダムの変位が完全に一致するためには、アーチにおける3個の直線変位と3個の角変位が、片持梁におけるそれぞれの変位と一致した場合に達成されるのであるが、しかし、この荷重分割法では6個の変位のうち半径方向と切線方向の直線変位及び切線方向と鉛直方向の周りの回転変位の4個のみを満足するものである。したがって、鉛直方向の直線変位と半径方向周りの回転変位に関する調整を欠くものであり、これら2つの変位は相対的に小さいものとして省略されている。

したがって、ダムを荷重分割法によって解析する場合は、まずダムを上記のように、アーチと片持梁の要素の系に置換ると、片持梁は外力として上下流面に働く鉛直および半径方向荷重また内力として中心線に働く接線方向力、ねじれモーメント、曲げモーメントに抵抗する。

②

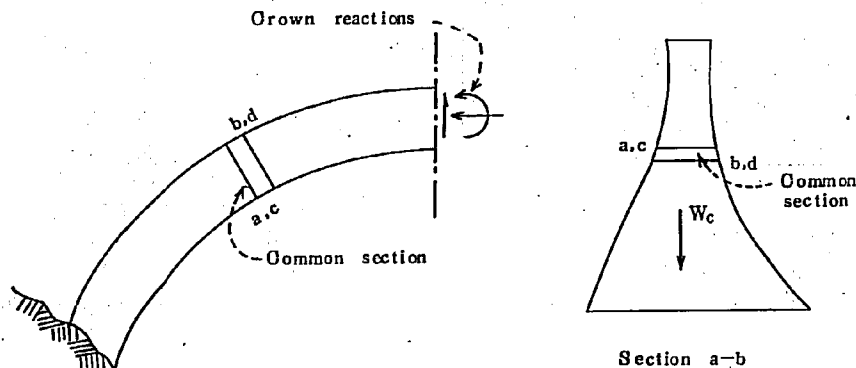


図-2-2-2 荷重分割解析に用いる構造要素

自重は一般に片持梁のみの荷重であるから応力の最終計算において考慮する。次にアーチ要素はアバットメントに端点を持つ不静定構造で外力として表面に働く半径方向荷重、また内力として、中心線に働く接線方向力、水平モーメントおよび鉛直半径方向面に働くねじれモーメントに抵抗する。

なお、図-2-2-3～図2-2-6はこの関係を示す。

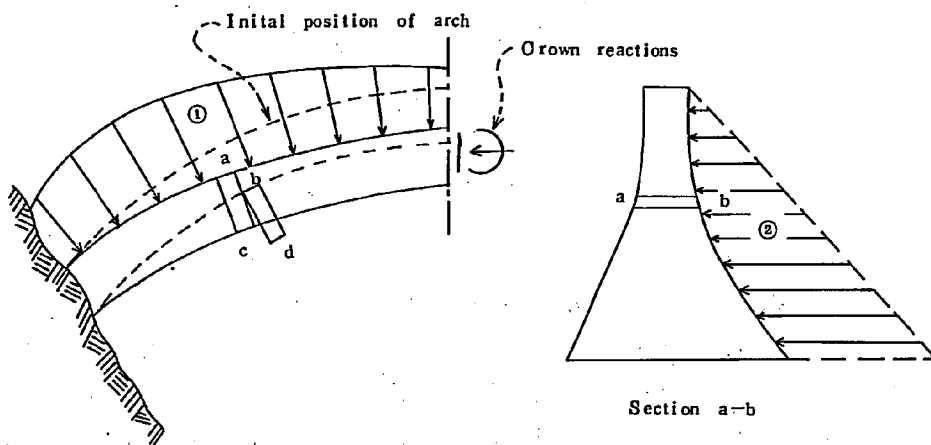


図-2-2-3 水平荷重の適用図

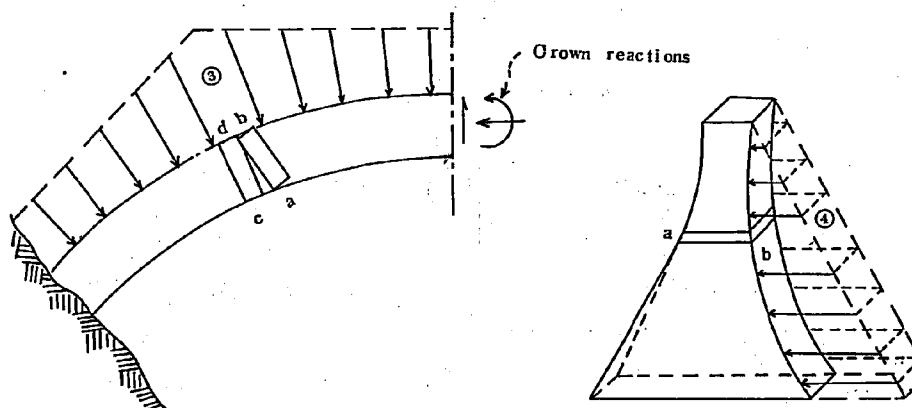


図-2-2-4 半径方向調整

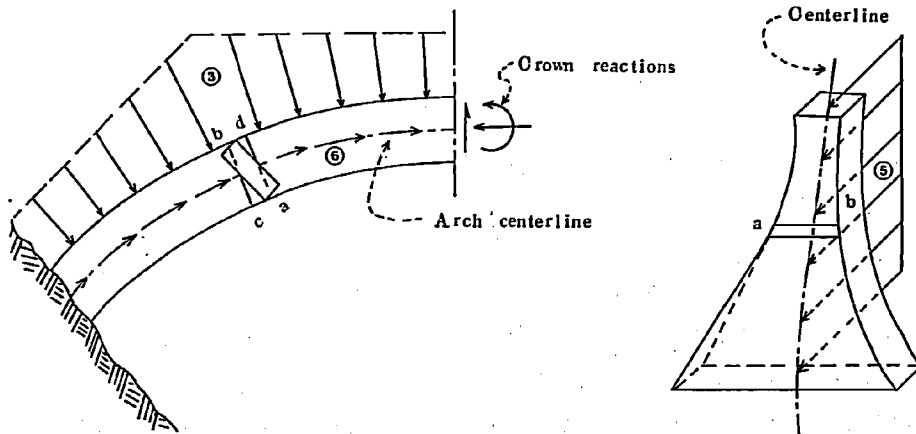


図-2-2-5 切線方向調整

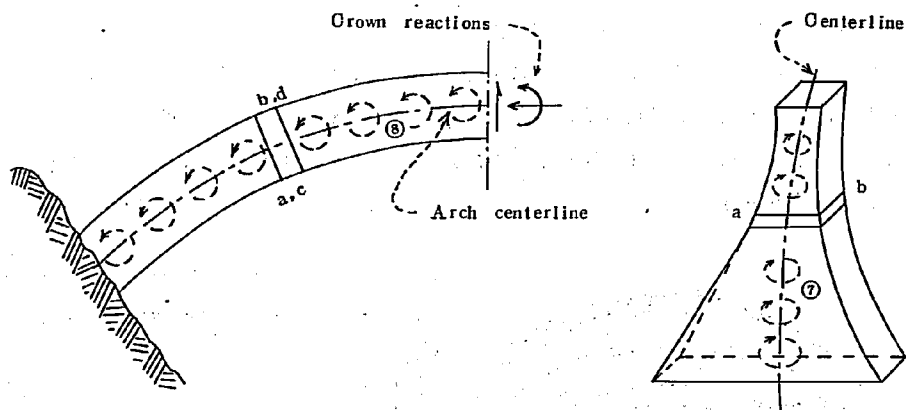


図-2-2-6 ねじれ調整

次に、今一つの解析法で、省略されていることは側方片持梁を考慮するとき、一般に変半径アーチでは、その上下においては半径方向が異なるためねじれており（接線方向のずれ）半径方向荷重による半径方向分力と接線方向分力は、天端と底では各々方向が異なる。したがって、上記の「ねじれ調整」のねじれとは別に、鉛直軸の周りのねじれが生ずるはずであるが、これについての考慮がはられていない。

2-3 基礎岩盤の変形計算の仮定について

- 1) ダム基礎ならびにアバットメントを構成する岩盤材料およびコンクリートは、共に等方等質であって、弾性限界を下回る応力を伴う作用荷重に対しては、十分耐える強さを持っている。
- 2) ダムは谷との接触面全体にわたって基礎およびアバットメントに完全に埋め込まれていてアーチはアバットメントのところで、片持梁は基礎のところで固着している。
- 3) 基礎の変形は基礎面の形状とは無関係である。

等の仮定が用いられているが、アーチダムは高次の不静定構造物であるのでアバットメントの支承条件の影響を著しく受ける。基礎の変形量はVoglの導いた半無限体長方形基礎面が荷重を受けた場合の平均変形に関する方程式から求められている。実際には、基礎は平面ではなく、三次元的な複雑な形状をしている。しかし、この解析法では基礎面に対して、

- 1) 平面として展開する。
- 2) 軸を直線とみなす。
- 3) 面積が等しく、縦横の比率が等しい等価展開面の矩形とする。
- 4) 同一荷重による同一変形量が起る。

という仮定を行っており、これらに検討しなければならない要因があると考えられる。このうち、その仮定で変形量計算に比較的影響の大きなものとして考えられるのが、3)の基礎面を短辺 a 、長辺 b とする矩形の $\frac{b}{a}$ の関数として、変形常数が求められていることである。(図-2-3-1)

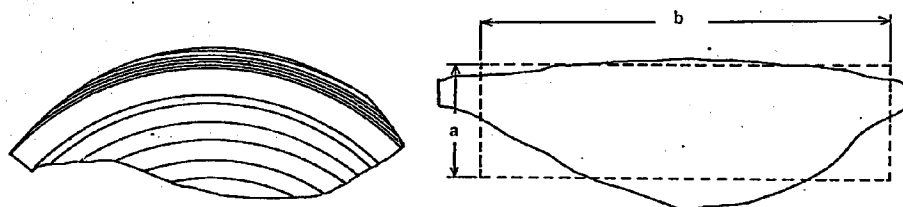


図-2-3-1 等価展開図例

一般に、この矩形を考えると a の値は、実際と比較して河床付近では小さく、上部標高アバットメント付近では逆に大きい。このことは、河床下部アーチのアバットメントの岩盤の変位を小さく、上部アバットメントの岩盤の変位を大きく評価していることになる。

したがって計算値は、実際と比較して、片持梁のベース付近で曲げモーメントが大きく、また、下部アーチではアバットメント付近で曲げモーメントが大きく、クラウンでは小さい値を示すことになりやすい。また、上部アーチでは、曲げモーメントがアバットメントでは

小さく、クラウンでは大きくなりやすいことになるが、上部アーチは薄肉でアーチスパンも長いので、たわみが大きく、アバットメントの変位の影響は小さく、計算値は実際との差異が少ないものとみられる。

⑥

○

3. 構造模型実験の概要

前章に述べた通り非常に精巧な応力計算法である荷重分割法にも解析過程において、いくつかの仮定と省略を行っているため、得られた応力値は実際のものとは局部的に多少の差異が生ずる。

したがって、アーチダムの構造設計に際し、模型実験は計算値の検証修正に対し重要な役割を果している。

3-1 模型材料

一般に模型実験は実物と模型との間に

- 1) 材料の応力、ひずみの関係が相似的事であること。
- 2) 模型が幾何学的に相似的事であること。
- 3) 材料の破壊機構が同一であること。

の条件が満足されていることが必要である。

第一の条件は、実物の材料と、模型の材料の間で、応力-ひずみ曲線が相似形であり、Poisson 比が等しく、さらに塑性変形に対する特性も相似でなければならないということである。しかし、実験を弾性領域内に限るならば、応力とひずみの関係は弾性的であり、Poisson 比が等しいという条件だけでよい。

なお、実物の材料が異方性を持つ場合は、模型材料も同様の異方性をもつことが、必要であるが、実際のダムコンクリートは等方性体と見なしうるので、模型材料に等方等性の物質を用いてさしつかえない。

第二の条件は、当然満足すべきことである。

第三の条件は、破壊実験を行う場合のみに必要なものであり、実験を弾性領域内に限る場合は不必要である。

なお、これらの条件のはかに、応力測定はひずみ測定によって行われるので十分な精度をもって測定されるためには、変形を大きくさせる必要がある。したがって、模型材料の弾性係数が低いということと、模型の製作が容易であるという条件が付加される。

このような条件を満足するものとして従来用いられてきた材料には

- 1) 軽石コンクリート
- 2) 樹脂
- 3) 石膏と珪藻土との混合物

などがあげられる。この中で、軽石コンクリートは前述の条件を満足していると考えられるが、弾性係数を低くすることが困難であり、模型が大型化する欠点がある。

樹脂は、一般にPoisson比がコンクリートに比して大きく、塑性変形もかなり大きくなるが、他の材料に比して、弾性係数の低いものが得られる利点を持っている。

石膏と珪藻土との混合物は、現在ダム構造研究室で用いている材料であるが、その特性は図-3-1-1～図3-1-9に示す通りであり、その応力-ひずみ曲線は、コンクリートのそれに比して、やや直線的になるが、その差は問題にならない程度と考えられ、Poisson比はコンクリートのそれにはほぼ等しいと見なしてよい。

また、この材料は、石膏と珪藻土の配合を変えることにより、弾性係数を $7,000 \text{ kg/cm}^2$ ～ $70,000 \text{ kg/cm}^2$ まで簡単に变化させることができるので、実際の岩盤の弾性係数が各標高によって異なる場合などは、この条件を模型に取り入れることが容易にできる利点を持っている。しかし、破壊機構は、供試体の破断面から観察すると、コンクリートのそれとは異なるようである。(図-3-1-10参照)

また、石膏は、湿度によって弾性係数等が著しく変化するので、もっとも安定した状態である絶対乾燥状態を極力保ちながら実験を進めなければならない、この状態を保つのに多大な設備を要し、また、測定の精度にもかなりの影響をおよぼすというような欠点を持っている。

このようなことから、石膏と珪藻土の混合物は、乾燥を十分にを行い、実験の主目的を弾性領域内の応力測定におく場合には、優れた材料であるということが出来るが、破壊実験に用いることには疑問が残る。

なお、石膏、珪藻土および水の割合の決定はダム構造研究室がこれまでにこなってきた材料試験の結果を用いると便利である。すなわち、まず、模型の弾性係数を実物のコンクリートおよび岩盤の弾性係数の $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{7}$ の範囲で定め、図-3-1-4の $E-W/p$ 曲線より W/p を求め、その W/p を用いて、図-3-1-5より D/p を求める。同様に、図-3-1-6より V_W を求める。次に打設する場合の1パッチの容積を定め、その値を各式に代入すると W 、 D 、 P の値が得られる。(但し、 W =水の重量、 D =珪藻土の重量、 P =石膏の重量、 E =弾性係数を示す。)

このようにして求めた配合により練り混ぜ、打設した材料の弾性係数を測定したものが図-3-1-1、図3-1-2であり、その誤差は、所定の弾性係数の10%程度である。

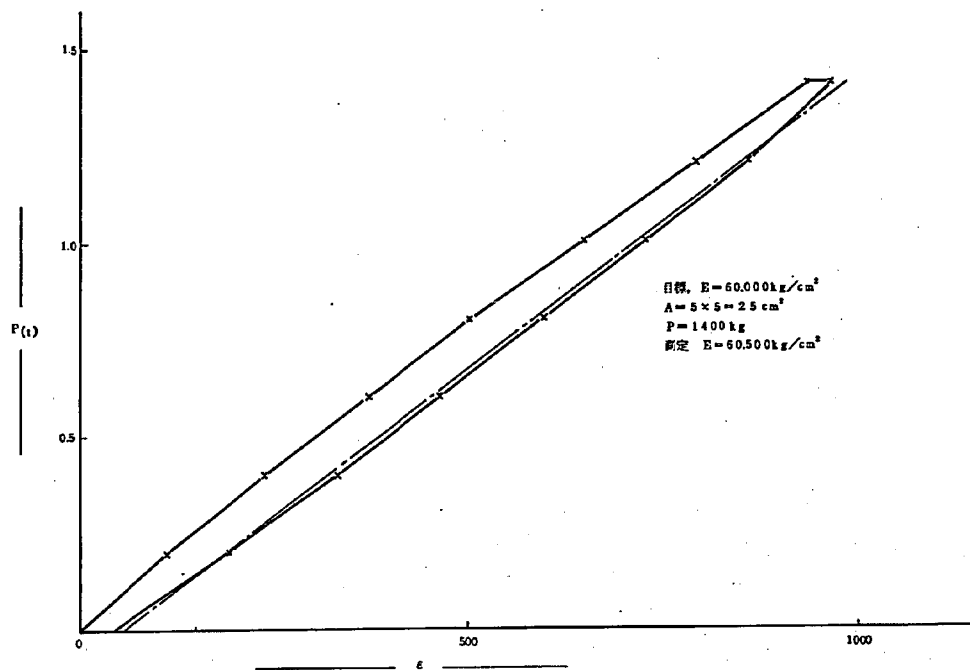


図-3-1-1 荷重-ひずみ曲線

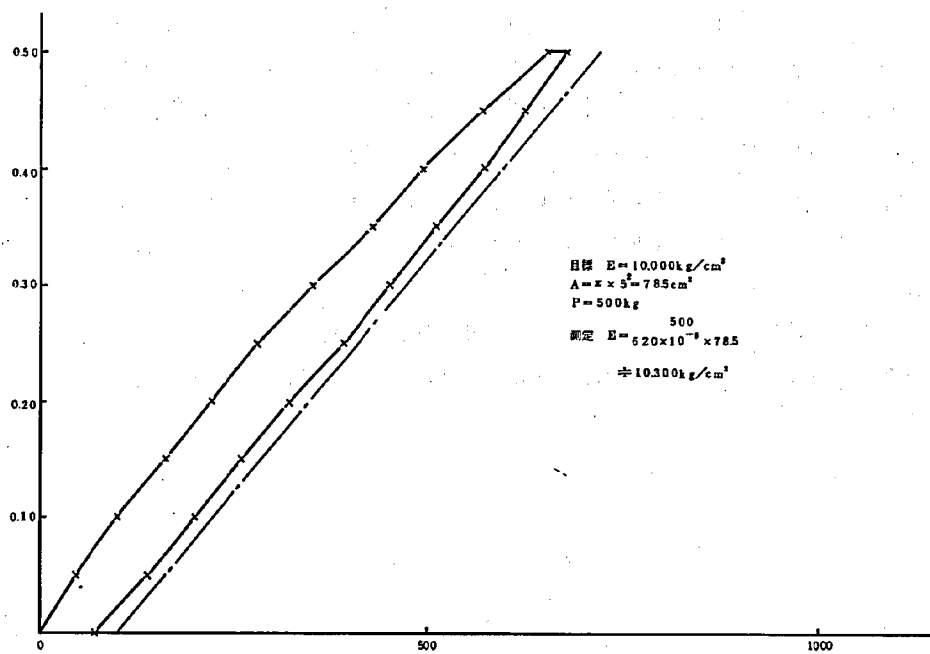


図-3-1-2 荷重-ひずみ曲線

図-3-1-3 石膏と珪藻土の標準水量および凝結試験

水 温	W(cc)	P+D (g)	P (g)	D (g)	W/P	投入	放置	混合	吸水	凝 結 開 始	凝 結 終 了	V cc	V/W
14.0°	300	461	461	0	0.651	2'40"	3'00"	5'00"	16'20"	17'00"	24'40"	450	1.50
11.5	300	317	264	530	1.130	2'20"	3'00"	6'30"	13'10"	14'10"	19'40"	411	1.37
10.8	300	285	2192	65.8	1.369	2'30"	3'00"	6'40"	14'50"	15'30"	22'40"	405	1.35
11.0	300	254	1814	726	1.654	2'35"	3'00"	9'00"	13'00"	13'10"	18'00"	395	1.32
10.7	300	240.7	1605	802	1.870	2'30"	3'10"	8'20"	14'10"	14'00"	20'40"	387	1.27
10.3	200	146	91.3	54.7	2.191	2'00"	3'00"	6'40"	14'00"	14'20"	22'30"	245	1.23
8.5	300	218	1282	89.8	2.340	2'40"	3'40"	5'45"	16'50"	16'30"	25'00"	381.6	1.27
9.2	300	209	1194	89.6	2.513	2'40"	3'10"	8'40"	15'40"	15'50"	23'10"	372.5	1.24
11.7	300	202	1122	89.8	2.674	2'30"	3'00"	7'30"	12'30"	13'40"	17'30"	365	1.22
11.3	300	195	1054	89.6	2.846	2'30"	3'00"	7'50"	12'40"	13'50"	19'20"	362.5	1.21
8.8	300	199	104.7	94.3	2.865	2'50"	3'20"	8'50"	17'40"	16'50"	23'20"	364	1.22
18	300	187	93.5	93.5	3.209	3'10"	5'00"	9'00"	21'20"	17'40"	24'00"	368.3	1.23
18	300	179.7	85.6	94.1	3.506	2'50"	4'50"	9'40"	18'30"	17'30"	24'00"	366.7	1.21
16	300	172.3	78.3	94.0	3.830	3'00"	5'00"	9'20"	16'30"	14'50"	22'20"	370	1.23
17	300	172.7	75.1	97.6	3.997	3'00"	5'00"	9'10"	17'50"	16'20"	24'20"	368.3	1.23
19	300	165.3	68.9	96.4	4.343	3'00"	5'20"	9'40"	22'30"	20'00"	35'20"	360	1.20
20	300	162.3	65.1	97.2	4.578	3'00"	5'00"	9'20"	25'00"	15'40"	28'00"	360	1.20
21	300	158.3	58.5	99.8	5.129	2'40"	4'40"	8'00"	28'40"	18'20"	30'20"	360	1.20
22	300	153.7	54.9	98.8	5.467	3'00"	5'40"	9'20"	21'00"	18'30"	26'20"	360	1.20

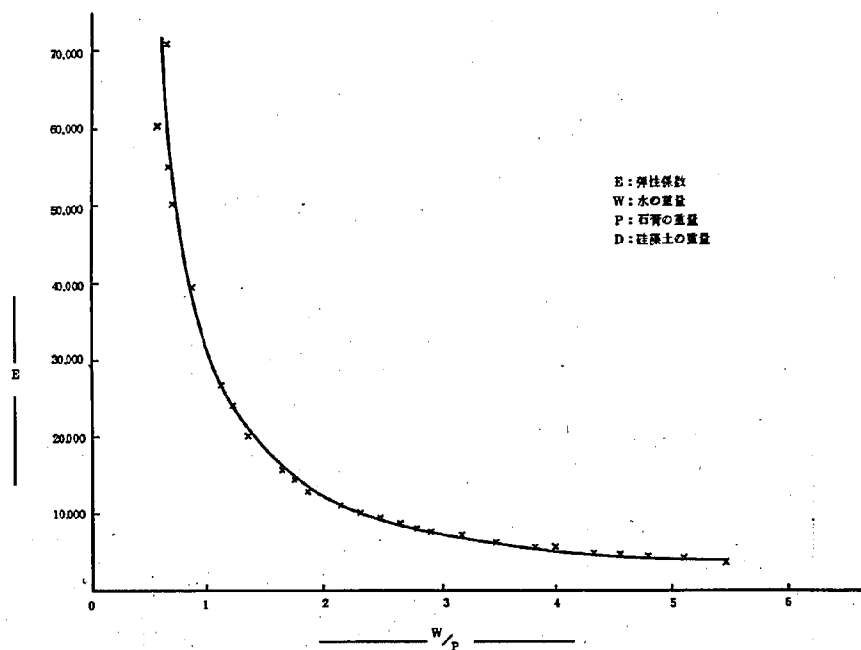


図-3-1-4 $E - W/P$ 曲線

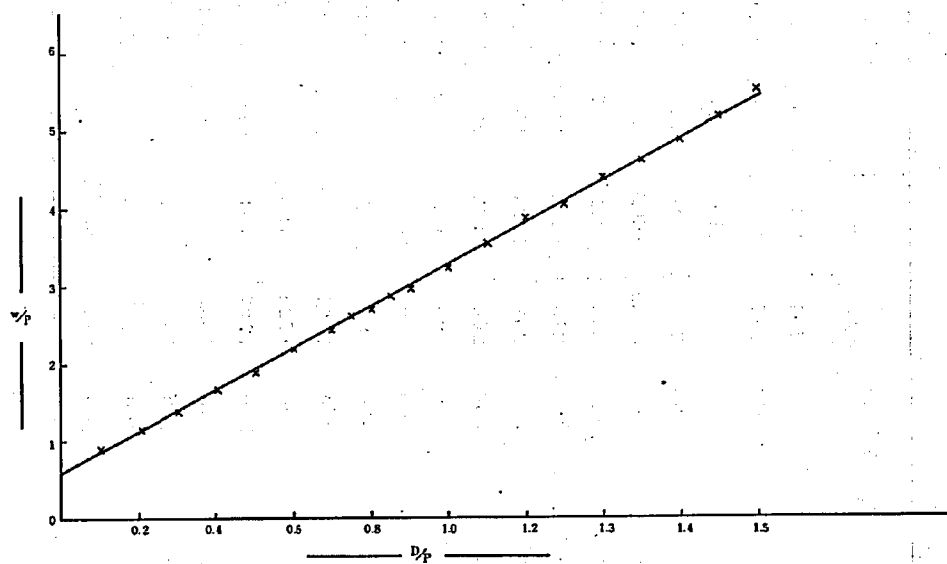


図-3-1-5 $W/P - D/P$ 曲線

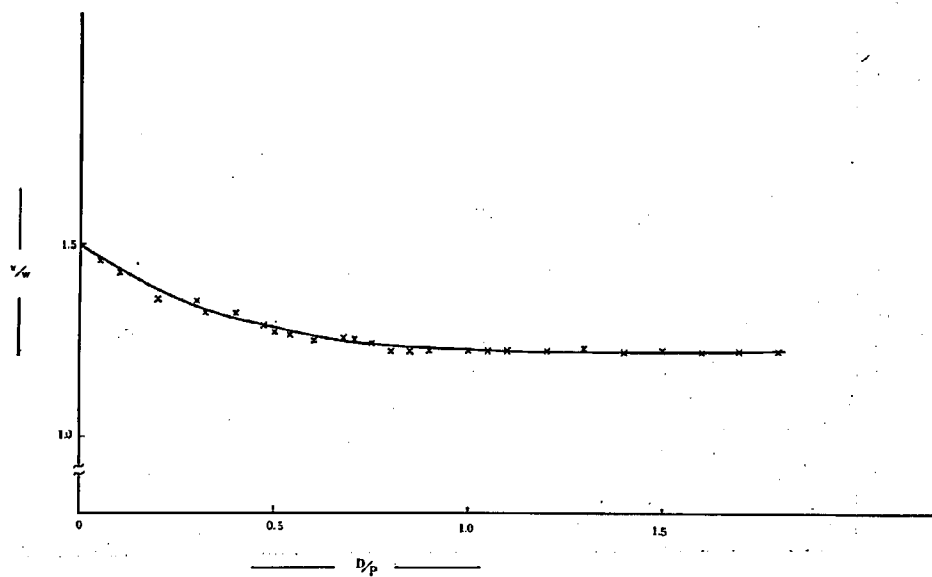


圖-3-1-6 $V/W - D/P$ 曲線

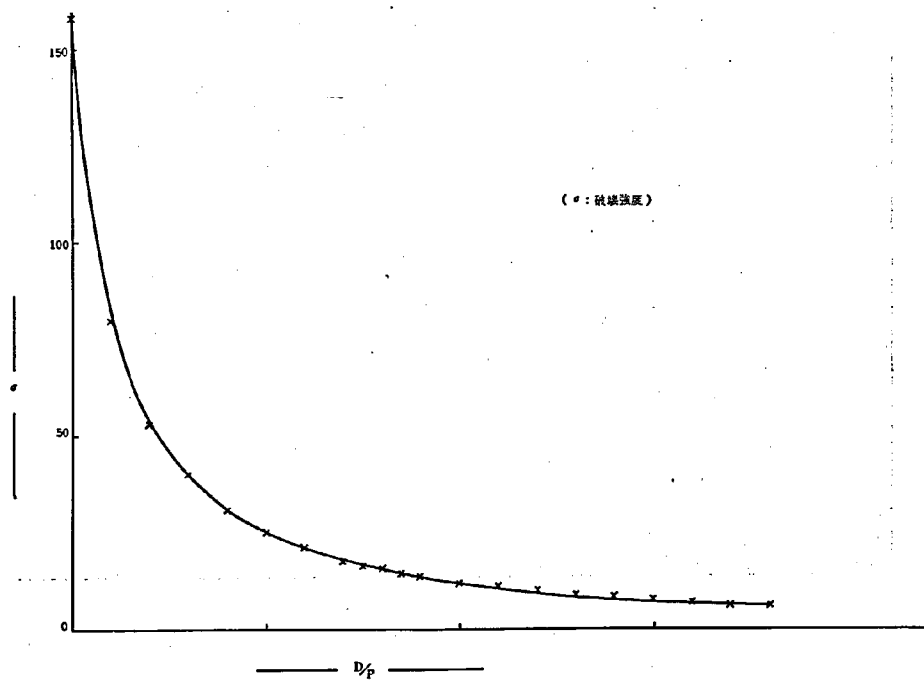


圖-3-1-7 $\sigma - D/P$ 曲線

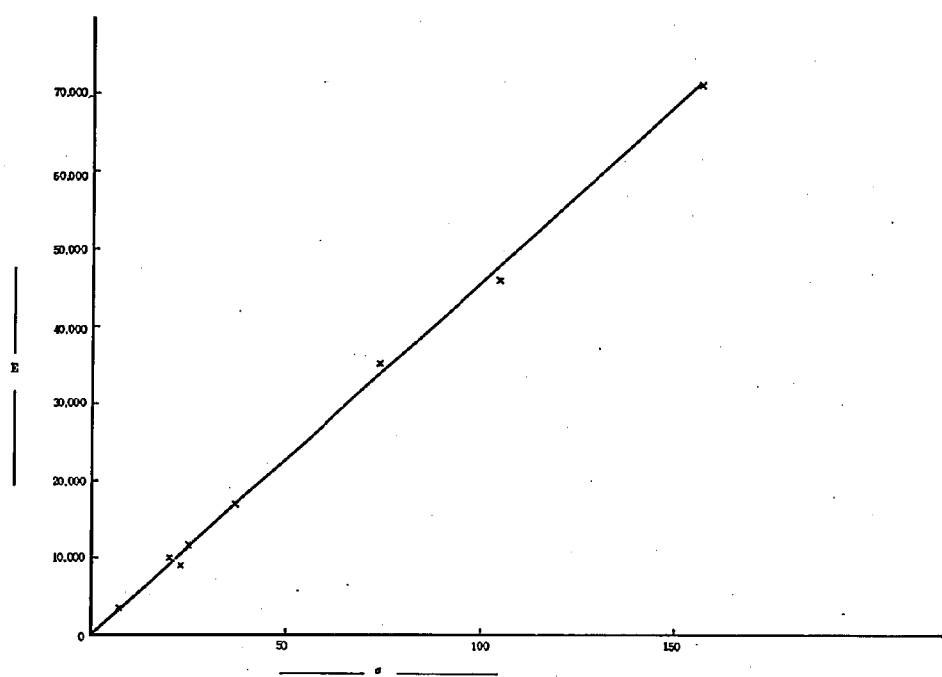


図-3-1-8 E-σ 曲線

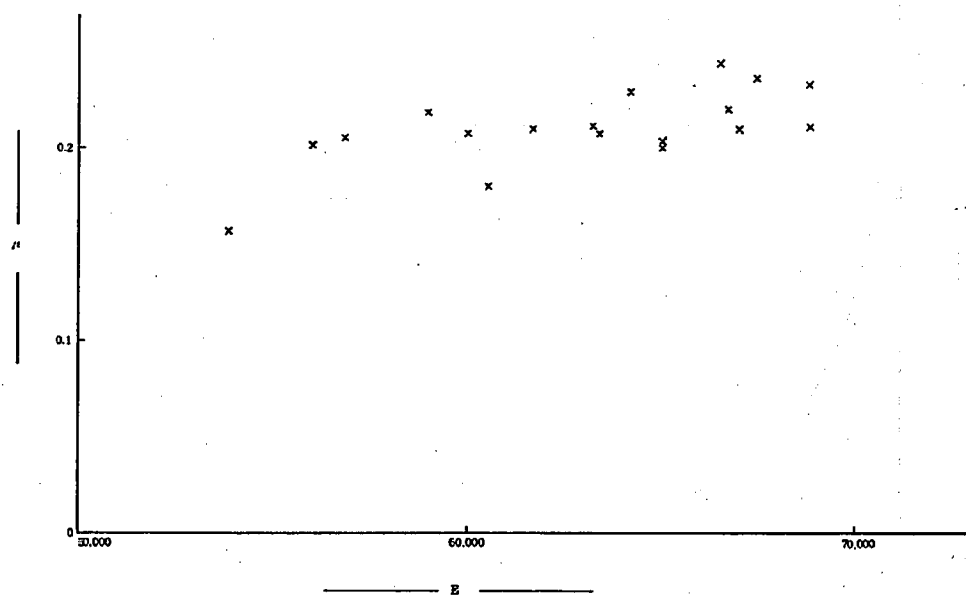
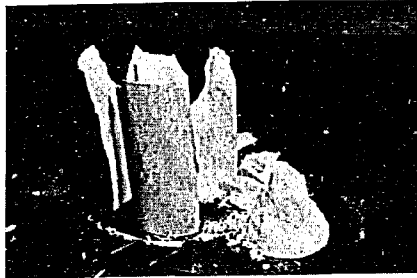


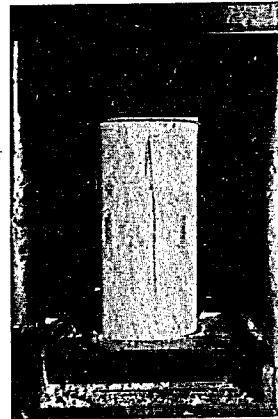
図-3-1-9 ポアソン比

図-3-1-10

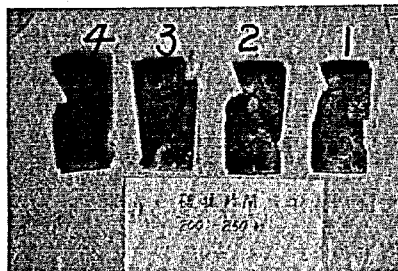
石膏の破壊状況



石膏の縦割れ



コンクリートの破壊状況



3-2 模型製作

模型製作の際の、型枠計算は、電子計算機を用いることによって、計算時間が短縮され、精密な計算を行なうことが出来る。ダム構造研究室には、型枠計算用のプログラムが完成されており、この計算結果を用いて型枠を作り、その中に石膏と珪藻土の混合物を投入して打設するわけであるが、先ず岩盤部分だけを打設し、数日間放置してある程度乾燥させ、その後本体を打設する。これは本体と岩盤の型枠を同時に据付けことが難しくさらに岩盤と本体の弾性係数が大きく異なり、そのため同時に打設すると両者の境界付近で、混合しやすく、所定の弾性係数と異なったものができることを防ぐためである。なお岩盤の弾性係数が、標高により異なる場合は、その異なった配合の材料を連続的に打設する。

打設方法としては、本体打設の場合は、均一なものが要求され、機械練りが理想的であるが、空隙が生じやすく、また高配合のために凝結時間が短くなり打継目が生じやすいので手練りとし、極力ていねいに練り混ぜる。岩盤の場合は、容量が多くなるので石膏用ミキサーを用いて練り混ぜている。このようにして打設した本体および岩盤をゲージ板等により正確に成形し、最後は紙やすり等によって表面を滑らかに仕上げている。

この完全に仕上げられた本体および岩盤を約4ヶ月以上の乾燥期間を費やして、完全に乾燥させて、その後に、アラルダイトあるいは、テラダイト等の接着剤を用いて岩盤に本体を完全に接着させている。もしこの接着が不完全な場合には、アーチの一部がヒンジ構造となりアーチアバットメントの曲げモーメントが小さくなるおそれがあり、極端な場合には、実験中に、本体がすべり、破壊する場合があるので、接着には十分に注意しなければならない。

なお、模型は実験誤差、製作誤差を少なくするために同一模型を2個製作し実験している。

3-3 載荷装置

ダムに作用する荷重の中では静水圧が主体であるので、模型に作用させる荷重も、液体圧の形で作用させるのが理想的である。

しかし、液体圧を作用させるには、実験室の設備、模型材質、模型縮尺等によっては不可能な場合があり、現在までダム構造研究室で行なわれてきた載荷方法には

- 1) 水銀等の比重の大きな液体を作用させる方法
- 2) 油圧ジャッキにより載荷する方法
- 3) ゴムチューブに高圧オイルを送入して載荷する方法

等がある。

これらの載荷方法について検討を加えてみる。

(1)の液体による載荷方法は、液体としては比重のもっとも大きい水銀を用い、水銀をダム

上流面にゴム袋を介して送入し、設計荷重として、静水圧のみを載荷するものである。またその載荷装置は比較的簡単である。

しかし、水銀載荷では、荷重比が小さいので、石膏の弾性係数を低くしなければならず、石膏の弾性歪曲線も直線性が失われやすく、したがって、測定されるひずみも誤差が大きくなる。

一般に本体の場合は、 $30,000 \text{ kg/cm}^2$ 以上の弾性係数が必要であるが、この程度の弾性係数では水銀載荷によって発生するひずみは小さく、測定誤差の実験値の中に占める割合が大きくなる。これらのことより、水銀載荷法は実験の精度が低下することは避けられない。

なお、水銀を使用する場合は、その管理に十分な注意を払い水銀蒸気を発生させないようにしなければならない。(図-3-3-1 参照)

油圧ジャッキによる方法は、模型の上流面に取り付けたフレームに20~30個の油圧ジャッキを取り付け、この油圧ジャッキにより載荷するものである。この方法によると、ひずみ比を大きくとり、ひずみ、たわみを大きく発生させることができるために通常、大型模型実験に用いられる。しかし、荷重が上流面全体に一樣分布せず部分的に集中して作用するため、あるいは複雑なアーチになるとジャッキをダムの上流面に対して、垂直に設置することができずに、ダムの上、下流面、特にジャッキ周辺の応力に乱れを生じやすい傾向がある。

また、ジャッキの正しい位置、方向の取付けに細心の注意を要する。(図-3-3-2 参照)

次に(3)の方法であるが、この方法は、ダム構造研究室が前述の2つの方法の長所を生かして考案したものである。これは模型の上流面に沿って、水平な10個の小室に仕切り、各アーチ型の小室にゴムチューブを入れ、これに油を送入して加圧する方法である。この方法によれば、荷重は、上流面全体に分布させて、作用させることができ、油圧ポンプに特殊な減圧弁をつけ、各層に送られる圧力が一定比を保つようにしておくと、荷重を液体の比重が変化するような状態で任意に調整することができる。また堆砂圧をも設計荷重として作用させることが容易である。しかし、液体による荷重分布は三角形となるがこの方法によると荷重分布は階段状となっている。なお、ゴムチューブの形が複雑で正確に製作することは、困難であるがこのチューブの良悪が実験期間、あるいは精度にも影響を及ぼすのでなるべく形状、材質共に均一なものを製作しなければならない。(図-3-3-3 参照)

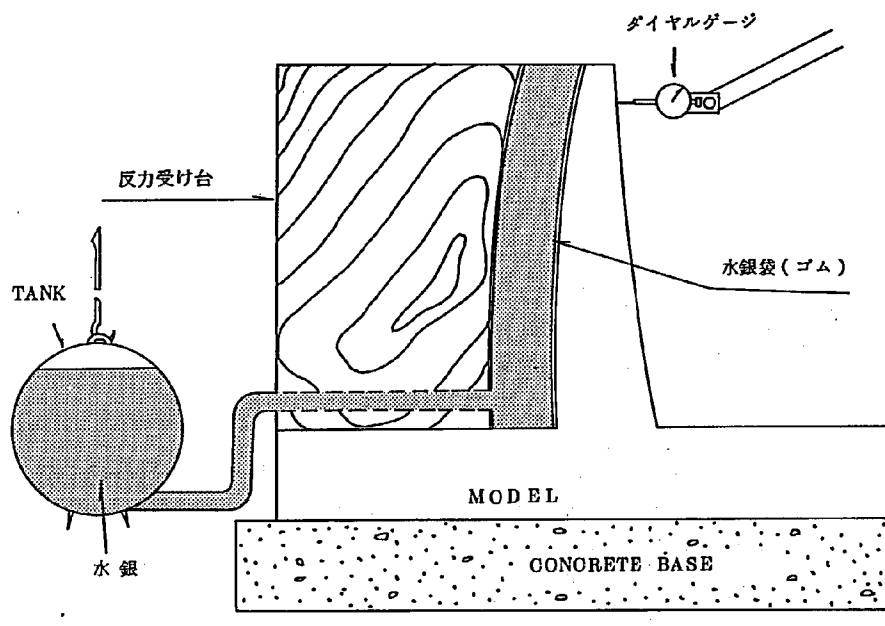


図-3-3-1 水銀式載荷装置

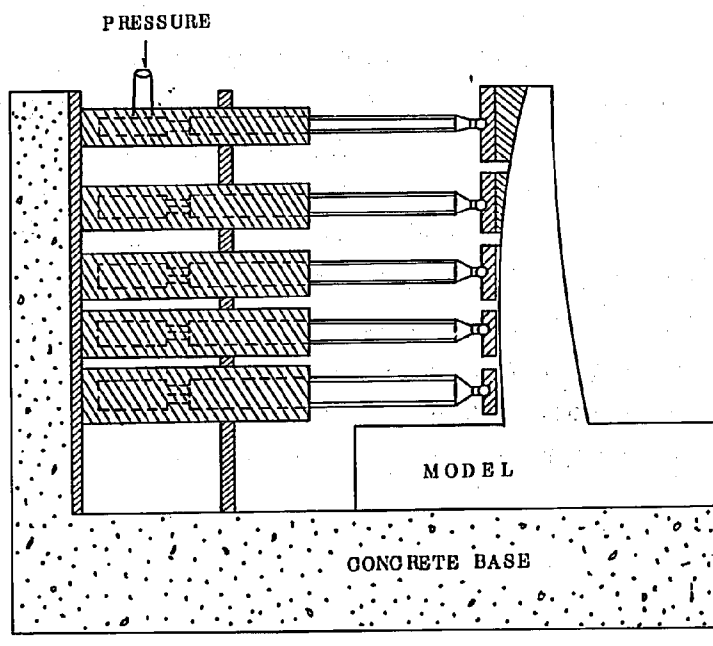


図-3-3-2 オイルジャッキ式載荷装置

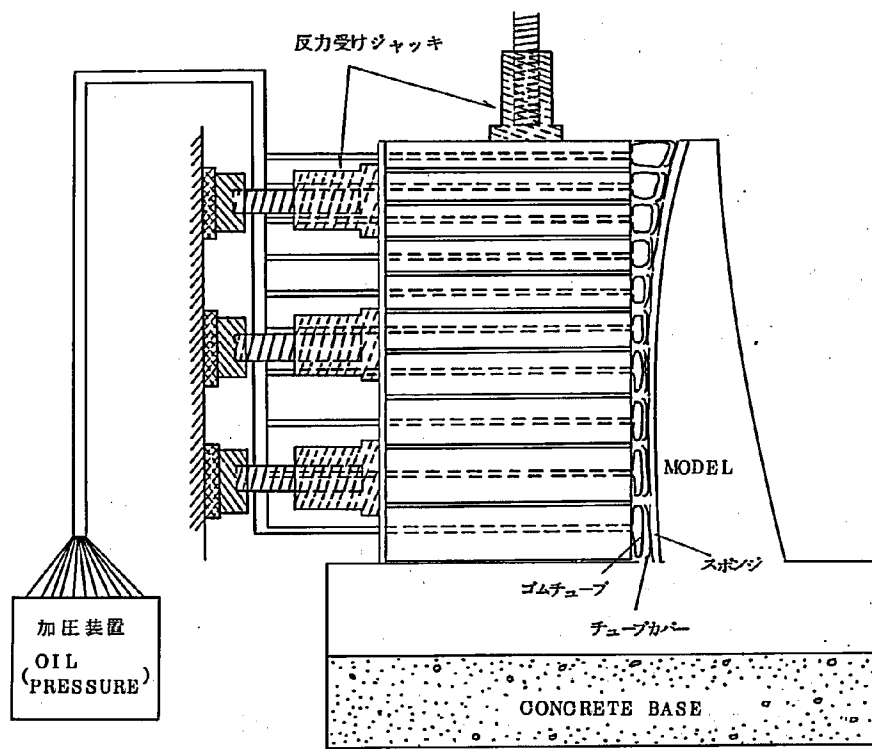


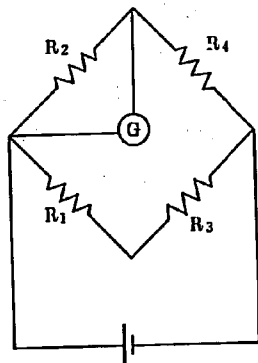
図-3-3-3 ゴムチューブ式载荷装置

3-4 測定

実験は、材料の弾性領域内でひずみ測定と、たわみ測定を行い、曲げモーメント、応力などに換算することを主としており、通常、破壊実験は行ってもその精度はよくない。

ひずみ測定について述べると、ひずみは、下図に示すように、電気抵抗ひずみ計（ロゼット型）を用いて測定する。

Wheatstone bridge



左図では

R_1 : ひずみ計 (active gage)

R_2 : 補償用ひずみ計 (dummy gage)

R_3 : 可変抵抗

R_4 : 固定抵抗

G : 電流計

である。

測定原理は上図の中のGに電流が流れないように R_3 を調節したときに、ひずみ計の抵抗値 R_1 は

$$R_1 = \frac{R_2}{R_4} \times R_3$$

で求められる。

ここで、 R_1 は、被測定物に貼付けられたひずみ計 (active gage) であり、 R_2 は、温度の影響を避けるために用いる (dummy gage) もので、 R_1 と同種のひずみ計を、 R_1 が貼付けている物体と同質の物体に貼り、力の掛からない状態にしておくものであるが、通常ダム構造研究室で行う実験においては、模型を2個製作しているので、一方を R_1 に使用し他方を R_2 として測定する。

R_3 、 R_4 は測定機の中に組み込まれている抵抗である。

また、電圧は一定に保つために測定機の中で調節されている。なお、ひずみ計は、ダム本体の上、下流面に、荷重分割法で計算されている点を主体とし、その他にアバットメントを補充して各面50個所以上に貼付け、鉛直方向、水平方向および斜方向のひずみ値を測定しており、ひずみ計を貼付ける場合にひずみ計の良否が実験の精度に直接的に影響するので、ひずみ計の接着方法、接着剤の選択、あるいは、リード線の結線方法に十分な注意を払い、ひずみ計を損傷しないようにしなければならない。また、ひずみ計は長期間の使用には堪えられないので実験期間中に数回の貼替を行わなければならない。

ひずみの測定は、従来は、インジケータとスイッチボックスにより手動で行ってきたが、最近では、主として、デジタル型多点ひずみ記録装置を用いて自動的に測定している。この装置は、ダム構造研究室で2台所有しており、測点の300成分を測定することが可能である。このようにして数十回測定して得られたひずみ値を平均し、さらに、各アーチ方向および、片持梁方向に各成分のひずみ図を描き、電子計算機を用いて、応力を計算する。なお、デジタル型多点ひずみ記録装置は、測定値をテープにも穿孔記録するので、そのテープを直接電子計算機に通すことによってデータの棄却検定、各成分のひずみ図作成などを行うことができる。したがって途中の測定データの検討整理に有効に利用することができる。

次にたわみの測定について述べると、たわみは模型本体の下流面のひずみ測定点と同じ個所に $1/100$ mm、又は $1/1000$ mm 目盛りのダイヤルゲージを、面に対して垂直になるように設置し、ダイヤルゲージが移動しないように、取り付け台に完全に固定して測定する。その整理は、ひずみと同様に数十回測定した値を平均し、各標高ごとにプロットしてたわみ図を作成する。

3-5 模型実験の精度

模型実験における誤差としては、

1. 模型材料が前述の条件を満足してない場合に生じる誤差
2. 模型製作上の誤差
3. 測定上の誤差（載荷装置及び測定器による誤差）
4. ひずみ計による誤差

等が考えられる。これらの誤差についてさらに詳しく述べると、

(1) 模型材料による誤差は各材料の持つ性質によって異なる。石膏と珪藻土との混合物を材料とした模型についての弾性係数は表3-5-1のようになり、目標とした弾性係数に対して約±13%程度の誤差が出ることは避けられない。しかし、この程度の誤差をもっていても、その加工のしやすさ、ひずみを大きく出せることなどからこの材料が最もよく使われる。

表3-5-1 ダム模型の弾性係数

単位：kg/cm²

ダム名		目標とした弾性係数	材料試験結果の弾性係数	採用した弾性係数
綾北ダム	堤体	50,000	55,970~63,420	60,220
	岩盤	30,000	33,800~35,800	34,500
		22,500	22,300~24,800	23,200
		12,500	17,400~18,500	18,120
		10,000	11,000~13,300	12,300
		7,500	8,900~9,800	9,300
室牧ダム	堤体	50,000		43,600
	岩盤	14,000		16,500
		8,000		8,400
二瀬ダム	堤体	50,000	53,900~67,300	57,100
	岩盤	30,000	32,100~36,000	33,800
		25,000	23,800	23,800
		15,000	14,800~17,100	15,700
		7,500	9,200~10,000	9,500
川俣ダム	堤体	50,000		48,000
	岩盤	11,500		11,900
		16,600		17,000
稻花ダム	堤体	35,000	28,900~31,400	30,000
	岩盤	7,000	6,600~7,900	7,200
矢作ダム	堤体	60,000	68,700~70,700	70,000
	岩盤	14,000	17,000~20,000	18,000
		10,000	12,000	12,000
青蓮寺ダム	堤体	60,000		58,000
	岩盤	12,000		13,200
豊平峡ダム	堤体	50,000	54,000~67,000	60,000
	岩盤	14,000	15,000~17,800	16,500
		10,000	8,800~10,000	9,400

- (2) 製作上の誤差は、型枠計算における電子計算機の使用、あるいは成形技術の進歩等により大巾に減少されるものと考えられる。

なお、前述したようにダム構造研究室では模型を2個製作して両方の模型について測定し、この誤差を消去するようにしている。

- (3) 測定上の誤差に関しては、載荷荷重が所定通り模型に作用しているかどうか、また模型に生じた歪が正確に測定されているかどうかということである。まず載荷装置による誤差としては、ゴムチューブ式では、ゴムチューブの製作上の不均一から生ずるフープテンションの影響によって載荷が不正確になっている場合があり、ジャッキ式では、ジャッキシリンドラの摩擦による出力損失がある。したがって、ゴムチューブ式では、ゴムチューブの寸法を一定の割合で大きく作り、フープテンションを減少させたり、ジャッキの場合は、あらかじめジャッキの検定を行って、損失量を計算しておくなど、これらの影響を少なくするための考慮がなされている。測定器による誤差は、以前の手動操作によるインジケータでは、 $\pm 5 \times 10^{-6}$ cmの最小読みであったが、現在使用中のデジタル型多点ひずみ記録装置の測定誤差は $\pm 3 \times 10^{-6}$ cmと比較的小さくなっている。

- (4) ひずみ計による誤差としては、ひずみ計自身が持っている個有誤差と、その貼り付けや結線等の技術的なことから生ずる誤差がある。ひずみ計の個有誤差は避けられないとしても貼り付けに際しての模型表面の空隙等については、接着剤(BC-11)をアセトンで2倍に薄め、あらかじめ下塗りを行って模型表面の弾性係数を変えないで、その影響を少なくするなどの努力をしている。

総じてこれらの誤差を観察してみると、同一載荷状態において、測定された値で $\pm 5 \times 10^{-6}$ cm程度、ひずみ計を新規に貼替えて行った状態でも $\pm 1.5 \times 10^{-6}$ cm程度示されることが多く、これは実物の応力に換算して $\pm 3 \sim 4$ kg/cm²に相当する。

なお、実験は通常50回もの測定値の中からおかしい値は棄却し、平均値から応力計算がなされるので、実際は誤差の範囲はさらに小さいものとみられる。またこれらの誤差が測定値の中に占める割合を少なくするために、ひずみを大きく発生させることが望ましい。実際には、石膏と珪藻土との混合物の弾性領域はコンクリートの弾性領域よりも広いので模型に生ずるひずみを大きくしても差し支えないと考えられるので、実物に対する模型のひずみ比を1.5～2.0として測定するのが最適である。

4 計算値と実験値の比較

一般にアーチダムの構造設計は、荷重分割法による計算と模型実験を同時に行い、両者の応力を比較しながら進められる。しかし模型実験は多大な労力と時間を必要とするので、ダム設計の工程に大きな影響を与えている。したがって現在までに構造設計を行った数個のアーチダムの計算による応力と実験による応力を比較し、この関連性を求めておくことと構造設計上大きな効果がある。

ここでは、ダムに加わる荷重条件が同一の場合、すなわち、水圧、堆砂圧、自重が加わった場合の計算値と実験値の比較を行なってみる。なお、この比較においては、実験値に対して半径方向調整計算による値の示す傾向が完全調整計算値よりも比較的によく一致し、さらに実際の構造設計では計算が簡便な半径方向調整計算による応力を主として用いるので実験値を半径方向計算値と比較して示すことにした。(表4-1参照)

4-1 たわみについて

半径方向のたわみが実験値と半径方向調整計算値が比較的一致しているのは鳴子ダム、川俣ダムであるが、下部標高クラウンでは実験値がやや小さく示される傾向がある。他のダムでは実験値と計算値は多少異なった分布をしていて、特に綾北ダム、室牧ダム、二瀬ダム、裾花ダム、青蓮寺ダムにおいては、実験値が半径方向調整計算値に比して、クラウンで10~40%大きく示されている。

したがって、谷がU字形断面をなし、かつアーチ形状が定半径アーチに近いほど、実験値と、半径方向調整計算値は比較的によく一致し、V字形の谷の変半径アーチほど、両者の差は大きくなる傾向にあり、クラウンで10~40%実験値が大きく示されている。

4-2 アーチ曲げモーメント

各ダム共に実験値と半径方向調整計算値は上部標高で一致し、下部標高になるほど異なる傾向にある。

鳴子ダム、川俣ダムの実験値は半径方向調整計算値とその分布形状がよく一致しているが、下部標高で多少負側に移行している傾向にある。これに反し、綾北ダム、青蓮寺ダム、矢作ダム、豊平峡ダムの実験値は、半径方向調整計算値に比し、下部標高で正側に移行している。

以上のことからU字形の谷の定半径に近いアーチダムのアーチ曲げモーメントは、下部標高で実験値が、半径方向調整計算値よりもクラウンで小さく、アバットメントでは負の曲げモーメントがやや大きくなりやすいが、この移行量は小さい。また、V字形の谷のフラットな放物線アーチダムでは、下部標高で実験値が半径方向調整計算値よりも、クラウンで20~30%大きくなり、アバットメントでは負の曲げモーメントが50~120%正側に移行

表 4 - 1 比較を行なったダム一覧表

ダム名	形 状	施 工	設 計	模 型 実 験	備 考
鳴子ダム		東北地建	東北地建研 土	研	模型材料；ゴム 圧縮空気により載荷 円弧アーチ
綾北ダム		宮崎県	宮崎県研 土	研	模型材料；石膏 ゴムチューブ載荷 円弧アーチ
室牧ダム		富山県	富山県研 土	建設技術研究所	模型材料；石膏 ジャッキ載荷 円弧アーチ
二瀬ダム		関東地建	関東地建研 土	研	模型材料；石膏 ゴムチューブ載荷 円弧アーチ
川俣ダム		関東地建	関東地建研 土	研	模型材料；石膏 ゴムチューブ載荷 円弧アーチ
裾花ダム		長野県	長野県研 土	建設技術研究所	模型材料；石膏 水銀載荷 放物線アーチ
青蓮寺ダム		水資源開発公団	水資源開発公団 土	水資源開発公団	模型材料；石膏 ジャッキ載荷 放物線アーチ
矢作ダム		中部地建	中部地建研 土	研	模型材料；石膏 ゴムチューブ載荷 放物線アーチ
豊平峡ダム		北海道開発局	北海道開発局 土	研	模型材料；石膏 ゴムチューブ載荷 放物線アーチ

する。

4-3 アーチスラスト

クラウンでは、全般的に実験値が半径方向調整計算値に比して、20～50%小さく示されている。アバットメントでは綾北ダム、室牧ダム、裾花ダムが実験値の方が、半径方向調整計算値に比して、20～40%大きくでている他は、全般的に、実験値の方が30～40%小さく示されている。したがって実験値は半径方向調整計算値に比して、全般的に小さく示されるとしてよい。

4-4 上流面水平応力

綾北ダムおよび二瀬ダムのクラウン下部標高部分を除き、他の全てのダムの実験値が半径方向調整計算値に比してクラウン付近で小さい値を示している。

鳴子ダム、室牧ダム、二瀬ダム、川俣ダムの各円弧アーチダムのクラウンにおける実験値は、半径方向調整計算値の約60～80%程度の値を示し、また、裾花ダム、矢作ダム、豊平峡ダムの各放物線アーチダムでは両者の差は小さく、比較的良好一致している。

4-5 下流面水平応力

各ダム共に、実験値と半径方向調整計算値との間にはかなり差があり、ダム全体についてクラウンとアバットメントに分けて比較すると次のようなことがわかる。

まず、クラウンについて比較すると、鳴子ダム、室牧ダムの上部標高の実験値は完全調整計算値とはほぼ一致するが、他のダムでは、実験値が半径方向調整計算値、完全調整計算値よりも小さく示されており、特に下部標高においては鳴子ダムを除き、実験値が半径方向調整計算値よりも大きく引張側へ移行している。なお円弧アーチダムよりも放物線アーチダムの方が、この傾向が強く、下部標高について平均すると、10～30 kg/cm² 引張側への移行となる。

次に、アバットメントで比較すると青蓮寺ダム、矢作ダム、豊平峡ダムの放物線アーチダムの実験値は半径方向調整計算値よりも小さくて、60～80%程度の値を示している。

4-6 上流面鉛直応力

全てのダムで実験値が半径方向調整計算値に対して、圧縮側に移行している。下部標高はどこかの傾向は強く、片持梁ベースにおける移行量は、円弧アーチダムで5～20 kg/cm²、放物線アーチダムで20～30 kg/cm² に達している。

4-7 下流面鉛直応力

上流面鉛直応力とは反対に、全ダム共に実験値は計算値に対し、引張側に移行している。片持梁ベースにおけるその移行量の最も少ないのが鳴子ダムの 2 kg/cm^2 、最も大きいのが川俣ダムの 45 kg/cm^2 で各ダムについて平均すると $10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ である。また、この移行によって実験値が負の値を示しているのは綾北ダム、二瀬ダム、川俣ダム、矢作ダム、豊平峡ダムであるが、平均約 -10 kg/cm^2 前後で比較的小さい。

4-8 上流面主応力

裾花ダム、青蓮寺ダムの実験値に於ける第一主応力が完全調整計算値よりも $10 \sim 20 \%$ 大きく示されている他は、全ダムで実験値が完全調整計算値よりも $10 \sim 30 \%$ ほど小さく示されている。また放物線アーチダムの完全調整計算値で示されているアバットメント沿の負の応力は実験値で $10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ 圧縮側に移行している。

4-9 下流面主応力

圧縮応力を各ダムについて実験値と完全調整計算値について比較してみると、実験値がわずかにアバットメントで大きく、クラウンで小さくなる傾向が示されているが判然としない。

引張応力の比較では、各ダムを通じて2つの特徴がみられる。その一つは、下部標高クラウン沿に計算値で示されている水平方向の圧縮応力が実験値では引張側に移行していることである。この移行量は、フラットな放物線アーチダムが円弧アーチダムに比べて大きく、最大で裾花ダムの 44 kg/cm^2 であるが、平均 $18 \sim 28 \text{ kg/cm}^2$ の範囲である。次に下部標高のアバットメントに計算値で示されていた岩盤に平行な斜方向の引張応力が、綾北ダム、室牧ダム等の円弧アーチでは $20 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ 程度圧縮側に移行している。これに対し、裾花ダム、矢作ダム、青蓮寺ダムの各放物線アーチダムでは $5 \sim 10 \text{ kg/cm}^2$ ほど引張側に移行している。

5 比較値の考察

実験値と計算値について種々比較を行ってきたが、その中で両者の間にいくつかの関連性がある。これを列挙すれば次のとおりである。

- 1) 上流面水平応力は実験値と半径方向調整計算値の比較では差異が少ない。
- 2) 下流面水平応力は下部標高クラウンで、実験値が半径方向調整計算値に比して、引張側に $10 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ 移行する。
- 3) 上流面鉛直応力は、側方片持梁ベースで実験値が半径方向調整計算値に比して圧縮側に $20 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ 移行する。
- 4) 下流面上部の鉛直応力は、側方片持梁ベースで実験値が半径方向調整計算値に比して、引張側に $10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ 移行する。
- 5) 下流面下部の主応力の岩盤に平行な応力は実験値が完全調整計算値に比して、放物線アーチダムでは引張側に $5 \sim 10 \text{ kg/cm}^2$ 移行する。

次にダムの形状の違いによる実験値と計算値の比較に検討を加えてみる。まず各ダムの形状を谷形から、分類してみると、鳴子ダムは等厚で上流面定半径であり、川俣ダムも下部標高 EL 870~910 m を除き等厚であり、かつ深いU字形をなしている。これに対し、綾北ダム、青蓮寺ダム、矢作ダム等は典型的なV字形の谷をなしている。U字形のダムとV字形のダムの実験値と半径方向調整計算値のうち、アーチ曲げモーメントについて比較してみると、U字形の鳴子、川俣両ダムは割合よく一致しており、V字形のダムでは下部標高で実験値が大きく出ている傾向にあることがわかる。したがって、U字形のダムは、実験値と計算値はおおむね一致しV字形のダムは特に下部標高で異った値を示すとみて良いであろう。これについて若干、考察してみると半径方向調整計算値が、その計算過程においてねじれ調整を欠くために、この違いが生ずるものとみられる。すなわち、U字形のダムはアバットメントの傾斜が急なため、側方片持梁における鉛直軸まわりのねじれの影響が小さいので実験値と半径方向調整計算値は比較的差が小さく、V字形のダムではアバットメントの傾斜が緩く、ねじれの影響が大きく、両者の差が大きくなっていくものと推察される。このことは、このねじれ調整を考慮している完全調整計算値が実験値に近づいていることから裏付けられる。

次に、ダムの形状は、以前はほとんどが円弧アーチダムであったが、最近ではほとんど放物線アーチが採用されるようになった。放物線アーチダムは、基礎岩盤が、ダム荷重をより安全に支持するようにアーチスラストを出来るだけ山側に向けたものであり、その中心角は、円弧アーチのそれが約 120 度前後あるのに対し、約 75 度前後の非常にフラットな平面状態となっているのが特徴である。円弧アーチダムに比し、放物線アーチダムは各応力共引張側への移行が多いという傾向を示している。

6 終りに

アーチダムの応力解析に用いられている荷重分割法と、模型実験について種々検討を行ってきたが要約すると、

1) 一般にアーチダムは下部標高で局部応力が生じやすく、固有応力源が加付されると、これにより修正応力を受けるので応力分布は乱れやすい。

2) 荷重分割法の精度は優れているが

(i) 基礎変形量計算に「等価展開法」の仮定を行っていること。

(ii) ねじれた片持梁による影響が加味されていないこと。

(iii) 片持梁鉛直方向の直線変位調整が省略されていること。

などの仮定と省略を行っており、このうち主として、(i)が実験値との相違を生ずる主な原因となっていると推定される。

3) ダムの形がU字形に近いほど、実験値と半径方向調整計算値は一致し、V字形に近くなるほど、特に下部標高で両者は異なる傾向をもつ。

4) 実験値による応力値は、計算値による応力値に比し、次のような定性的傾向を示す。

(i) 下流面アーチクラウン下部標高で水平応力が半径方向調整計算値に比し、 $10 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ 引張側に移行する。

(ii) 上流面側方片持梁ベースの鉛直応力が半径方向調整計算値に比し $20 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ 圧縮側に移行する。

(iii) 下流面側方片持梁ベースの鉛直応力が、半径方向調整計算値に比し、 $10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ 引張側に移行する。

(iv) 下流面アバットメントで岩盤に平行な斜め主応力が、完全調整計算値に比し、 $5.0 \sim 10.0 \text{ kg/cm}^2$ 引張側に移行する。

以上であるが、これらを定量づけるため、さらに今後も検討を続けたい。なお、今後、ダムの設計に際しては、上記の定性的な事項は特に考慮されるべきである。



元 諸 の ム ダ 各

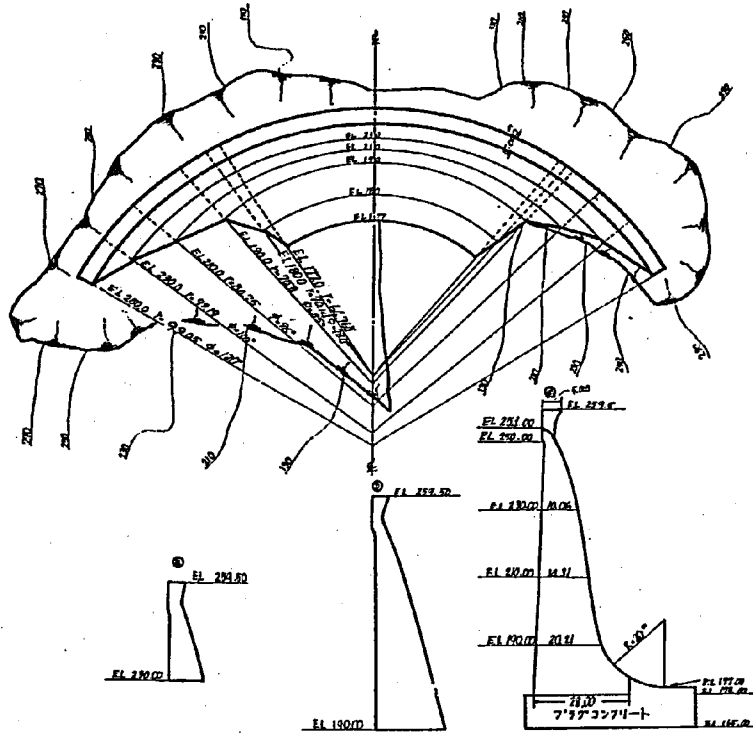


鳴 子 ダ ム

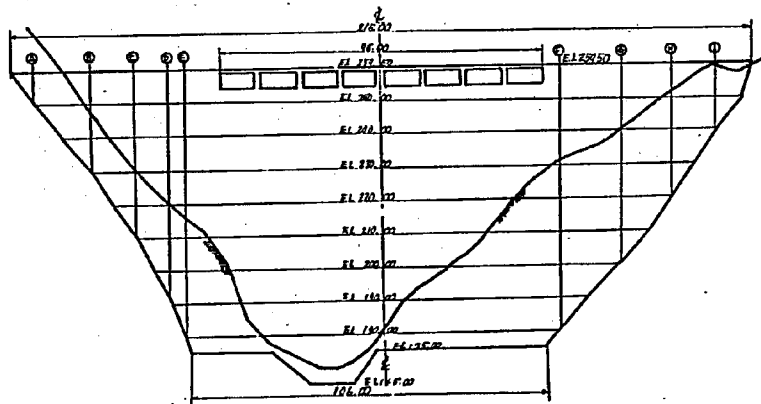
高 さ	半 径	クラウン のダム厚	左岸アバット メントのダム厚	左岸側中心角	右岸アバットメ ントのダム厚	右岸側中心角
89.5	99.06	3.88	3.88	59°30'	3.88	62°00'
84.7	99.06	3.88	3.88	59°30'	3.88	62°00'
80.0	99.06	3.88	3.88	59°00'	3.88	56°00'
72.5	97.10	6.46	6.46	55°18'	6.46	56°00'
65.0	94.77	8.78	8.78	52°04'	8.78	55°49'
57.5	92.33	10.54	10.54	49°59'	10.54	52°59'
50.0	88.96	12.48	12.48	48°30'	12.48	51°30'
42.5	85.70	14.20	14.20	48°37'	14.20	49°25'
35.0	82.05	16.24	16.24	46°15'	16.24	46°45'
27.5	78.91	17.75	17.75	44°53'	17.75	45°10'
20.0	75.70	20.21	20.21	44°00'	20.21	42°00'
12.5	73.50	24.05	24.05	42°33'	24.05	38°40'
5.0	70.20	28.00	28.00	40°30'	28.00	36°00'
2.5	70.20	28.00	28.00	40°30'	28.00	33°30'
0	70.20	28.00	28.00	40°30'	28.00	33°30'

鳴子ダム一般図

(a) 平面図及次片持梁断面図



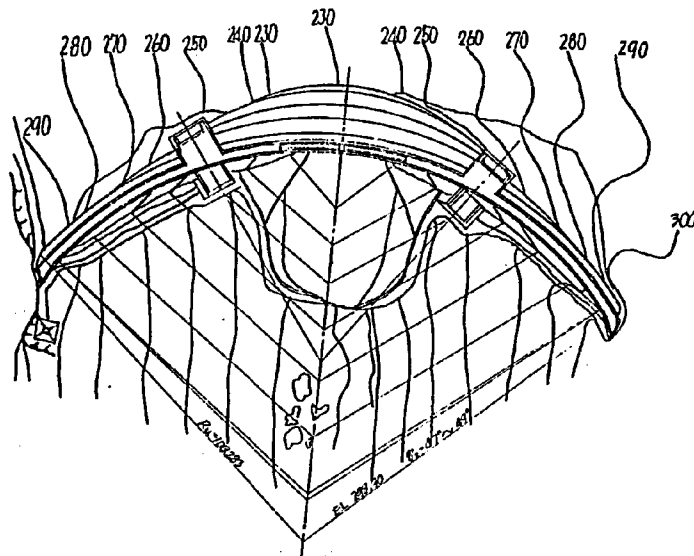
(b) 展開図(軸線)



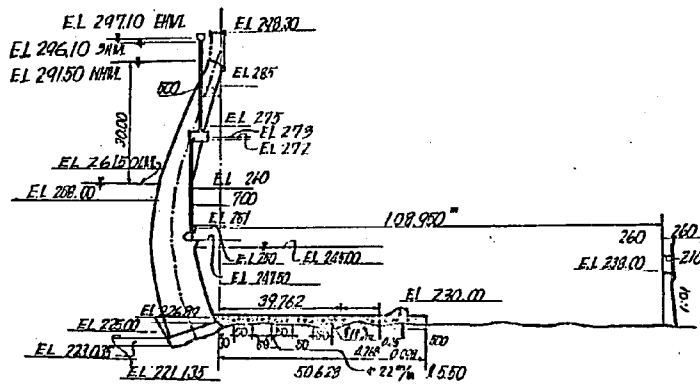
綾 北 ダ ム

高 さ	半 径	クラウン のダム厚	左岸アバット メントのダム厚	左岸側 中心角	右岸アバットメ ントのダム厚	右岸側 中心角
73.30	103,283	2,890	2,890	47°49'	2,890	47°49'
69.15	97,169	3,462	3,462	50°06'	3,462	50°06'
65.00	92,500	4,034	4,034	51°59'	4,034	51°59'
57.50	84,063	5,069	5,069	52°49'	5,069	52°49'
50.00	75,625	6,103	6,103	53°02'	6,103	53°02'
42.50	67,188	7,133	7,133	53°18'	7,133	53°18'
35.00	58,750	8,172	8,172	53°38'	8,172	53°38'
27.50	50,313	9,207	9,207	54°05'	9,207	54°05'
20.00	41,875	10,241	10,241	54°44'	10,241	54°44'
16.25	37,656	10,759	10,759	54°52'	10,759	54°52'
12.50	33,438	11,276	11,276	54°11'	11,276	54°11'
8.75	29,219	11,793	11,793	51°53'	11,793	51°53'
5.00	25,000	12,310	12,310	45°50'	12,310	45°50'
2.50	22,188	12,655	12,655	36°31'	12,655	36°31'
0	19,375	13,000	13,000	36°31'	13,000	36°31'

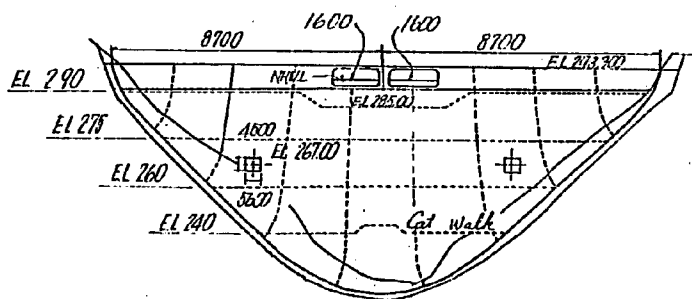
稜北ダム一般図



(a) 平面図



(b) 断面図

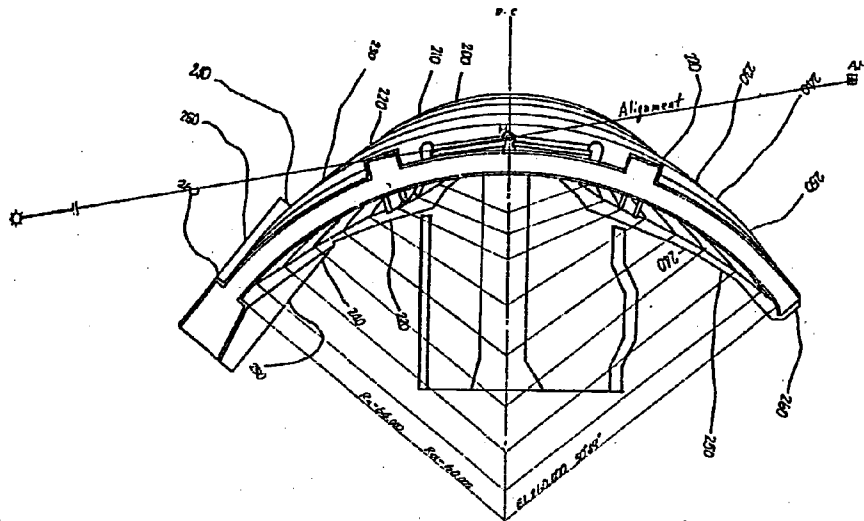


(c) 展開図

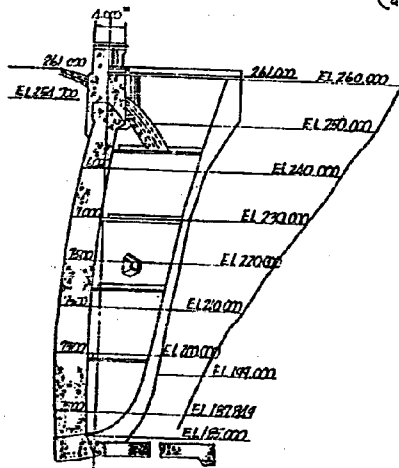
室 牧 ダ ム

高 さ	半 径	クラウン のダム厚	左岸アバットメ ントのダム厚	左岸側中心角	右岸アバットメ ントのダム厚	右岸側中心角
76.0	62.000	4.00	4.00	50°49'	4.00	50°49'
72.0	61.160	4.30	4.30	51°07'	4.30	51°07'
68.0	60.215	4.70	4.70	51°33'	4.70	51°33'
64.0	58.400	5.10	5.10	51°49'	5.10	51°49'
60.0	56.000	5.50	5.50	51°35'	5.50	51°35'
52.5	51.239	6.25	6.25	51°27'	6.25	51°27'
45.0	47.000	7.00	7.00	51°49'	7.00	51°49'
37.5	41.918	7.34	7.75	52°15'	7.75	52°15'
30.0	37.301	7.50	8.50	52°48'	8.50	52°48'
22.5	32.819	7.50	9.50	53°29'	9.50	53°29'
15.0	27.727	7.50	10.00	54°20'	10.00	54°20'
10.0	24.257	7.50	10.40	49°44'	10.40	49°44'
5.0	20.912	7.50	10.48	45°08'	10.48	45°08'
2.5	15.000	7.50	11.00	22°00'	11.00	22°00'
0	11.300	7.50	11.00	22°00'	11.00	22°00'

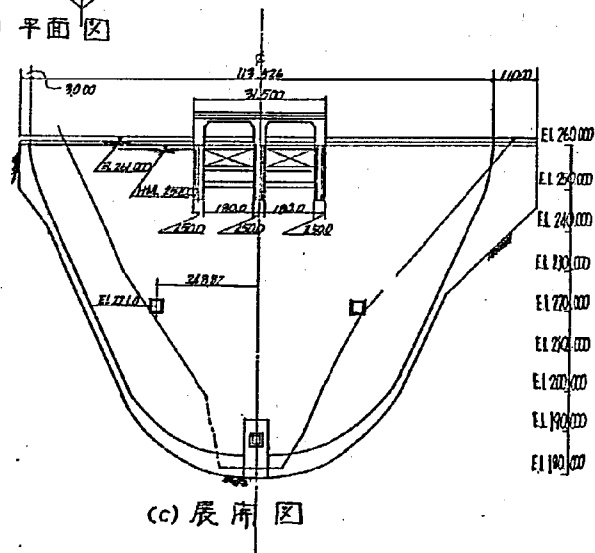
室牧ダム一般図



(a) 平面図



(b) 断面図

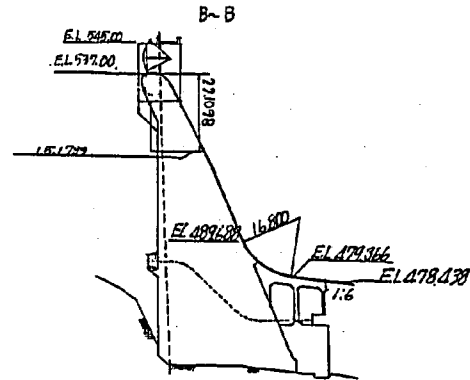
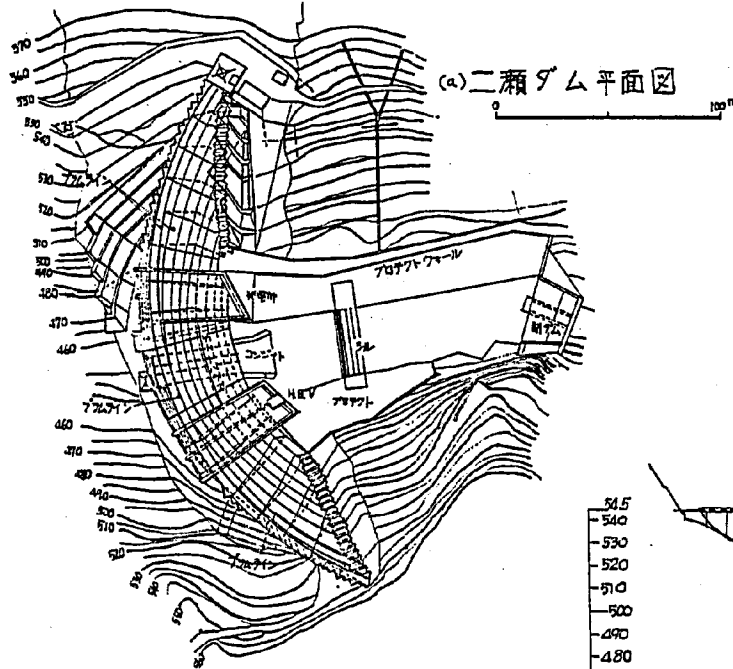


(c) 展席図

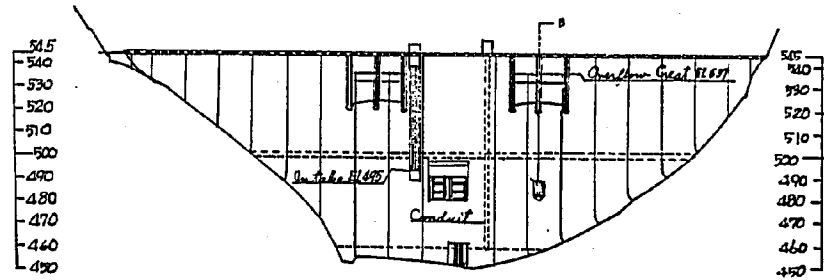
二 瀬 ダ ム

高 さ	半 径	クラウン のダム厚	左岸アバット メントのダム厚	左岸側中心角	右岸アバットメ ントのダム厚	右岸側中心角
95.0	127,478	4.00	4.00	64° 50'	4.00	62° 50'
90.0	127,800	4.40	5.10	63° 30'	5.10	64° 20'
85.0	123,800	5.30	6.80	61° 00'	6.80	63° 40'
75.0	119,200	8.65	11.16	58° 10'	11.16	62° 22'
65.0	113,400	12.81	15.50	54° 40'	15.50	61° 05'
55.0	105,000	16.97	19.60	50° 30'	19.60	59° 50'
45.0	100,100	21.16	23.75	46° 50'	23.75	58° 30'
35.0	93,930	25.29	27.90	42° 55'	27.90	57° 10'
25.0	87,140	29.50	32.20	39° 05'	32.20	54° 45'
20.0	84,200	31.50	33.60	37° 10'	33.60	52° 40'
15.0	81,650	33.60	35.70	35° 20'	35.70	45° 55'
10.0	79,430	35.70	37.70	37° 30'	37.70	33° 10'
5.0	77,500	37.75	38.40	33° 20'	38.40	31° 20'
2.5	76,680	38.80	38.98	30° 55'	38.98	32° 15'
0.0	75,950	39.83	39.50	30° 55'	39.50	32° 15'

二瀬ダム一般図



(b) 断面図

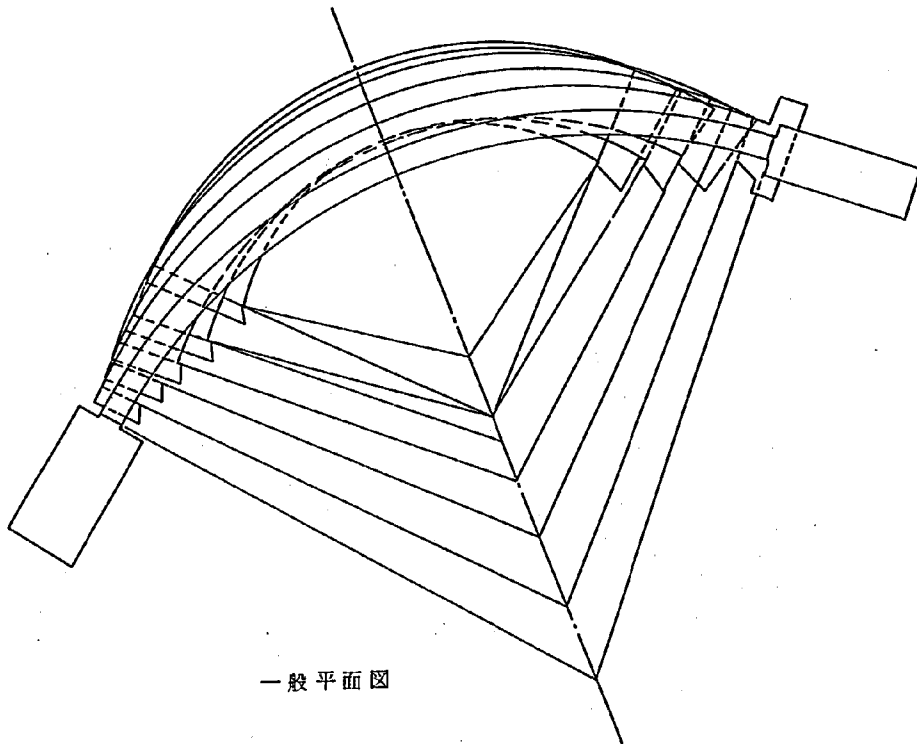


(c) 正面図(上流面展示)

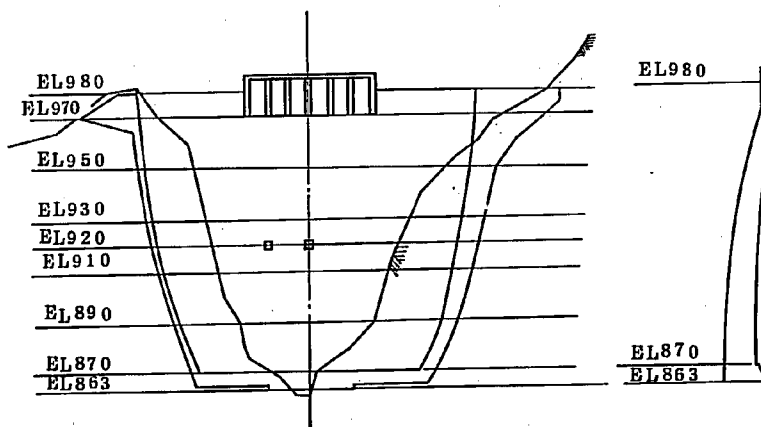
川 俣 ダ ム

高 さ	半 径	クラウン のダム厚	左岸アバット メントのダム厚	左岸側 中心角	右岸アバット メントのダム厚	右岸側 中心角
120.0	95,802	3.08	3.08	39° 11'	3.08	39° 11'
115.0	95,510	3.18	3.18	39° 15'	3.18	39° 15'
110.0	93,000	4.00	4.00	40° 00'	4.00	40° 00'
100.0	88,040	5.52	5.52	41° 31'	5.52	41° 31'
90.0	83,160	6.88	6.88	43° 00'	6.88	43° 00'
80.0	78,360	8.08	8.08	44° 30'	8.08	44° 30'
70.0	73,640	9.12	9.12	45° 00'	9.12	45° 00'
60.0	69,250	10.00	10.00	47° 30'	10.00	47° 30'
50.0	65,440	10.72	10.72	49° 00'	10.72	49° 00'
40.0	61,483	11.28	11.80	50° 19'	11.80	50° 19'
30.0	57,486	11.68	13.06	50° 49'	13.06	50° 49'
20.0	53,782	11.92	14.45	50° 13'	14.45	50° 13'
10.0	49,815	12.00	15.84	48° 50'	15.84	48° 50'
5.0	48,315	15.00	18.84	42° 30'	18.84	42° 30'
0	46,815	18.00	21.84	42° 30'	21.84	42° 30'

川俣ダム一般図



一般平面図



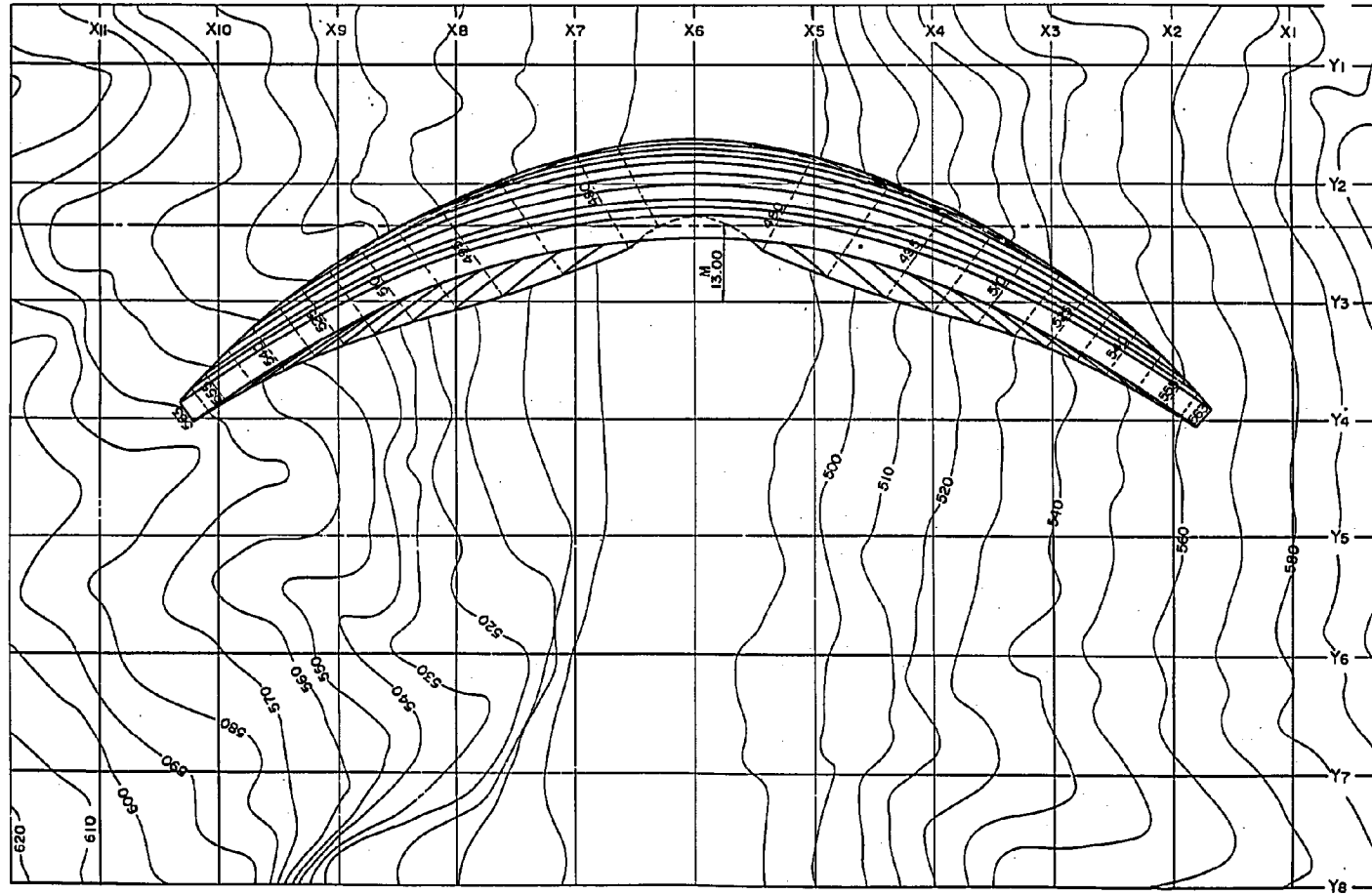
展開図

裾 花 ダ ム

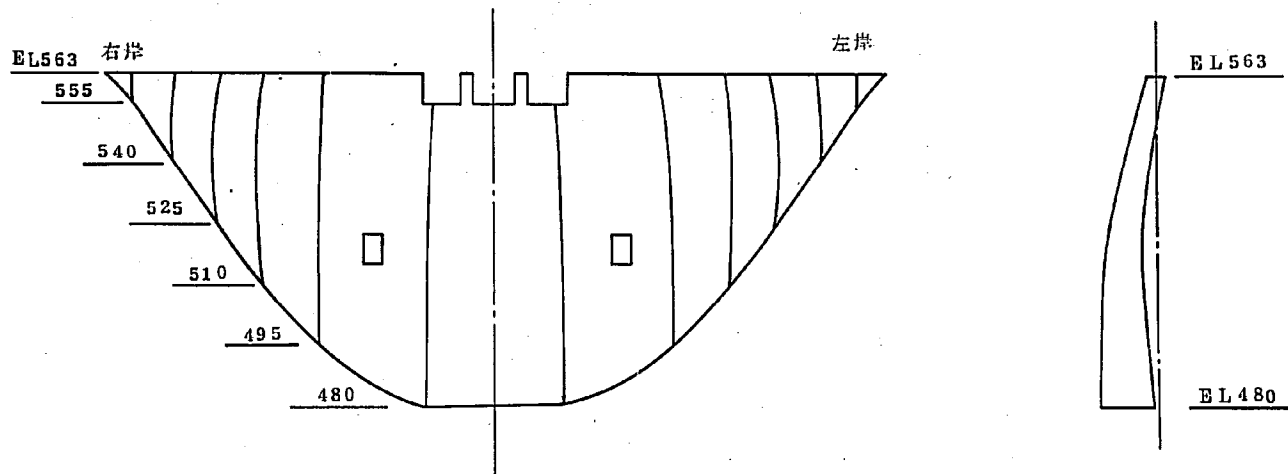
高 さ	ス パ ン	クラウン のダム厚	左岸アバット メントのダム厚	左岸側中心角	右岸アバットメ ントのダム厚	右岸側中心角
83.2	172,000	4,000	4,000	37°00'	4,000	37°00'
79.2	167,158	4,434	5,117	37°00'	5,117	37°00'
75.2	162,316	4,867	6,000	37°00'	6,000	37°00'
67.7	153,236	5,681	7,438	37°00'	7,438	37°00'
60.2	144,158	6,494	8,875	37°00'	8,875	37°00'
52.7	135,078	7,307	10,313	37°00'	10,313	37°00'
45.2	126,000	8,120	11,750	37°00'	11,750	37°00'
37.7	116,004	8,934	13,188	37°00'	13,188	37°00'
20.2	104,172	9,744	14,625	37°00'	14,625	37°00'
27.7	90,504	10,560	16,063	36°50'	16,063	36°50'
15.2	75,000	11,373	17,500	36°20'	17,500	36°20'
7.7	54,652	12,187	18,200	34°25'	18,200	34°25'
0.2	31,000	13,000	17,463	30°00'	17,463	30°00'
0.1	30,674	13,011	17,443	29°55'	17,443	29°55'
0	30,348	13,022	17,423	29°55'	17,423	29°55'

裾花ダム平面図

s=1/1000



裾花ダム下流面展開図 $S = \frac{1}{1500}$

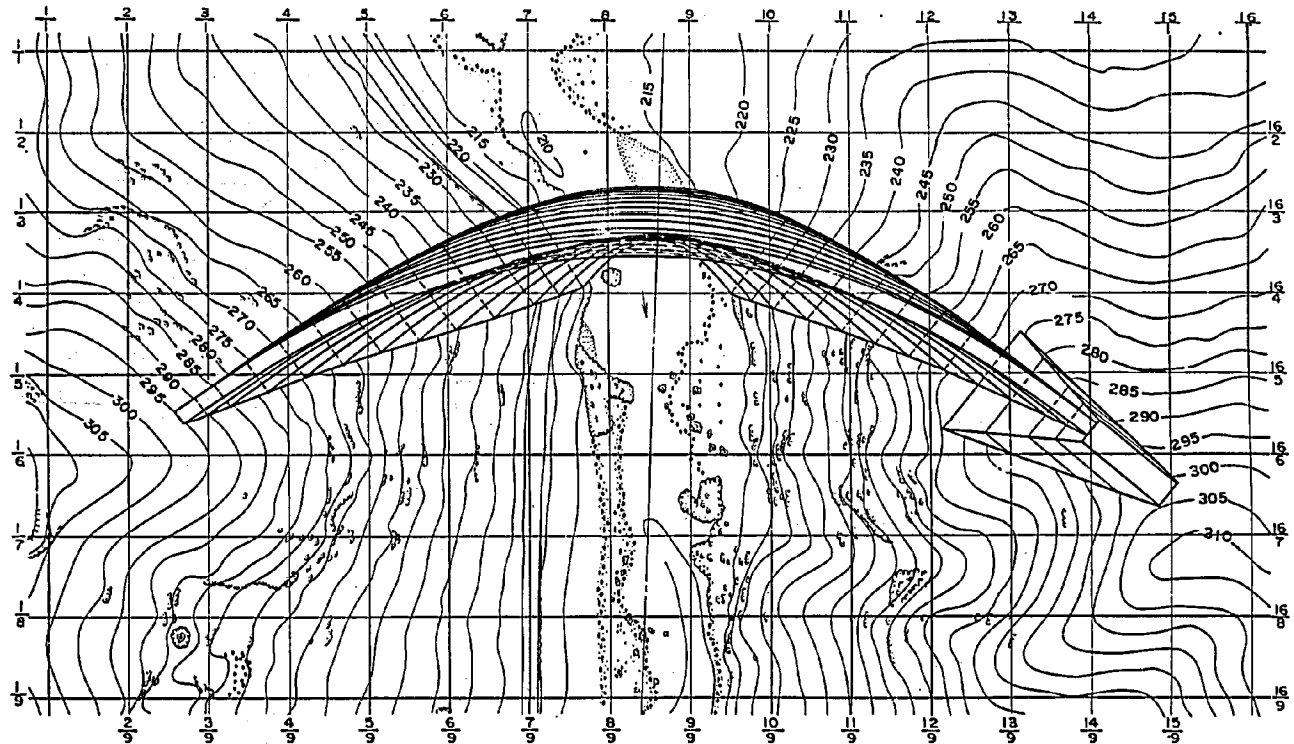


青 蓮 寺 ダ ム

高 さ	ス パ ン	クラウン のダム厚	左岸アバットメ ントのダム厚	左岸側中心角	右岸アバットメ ントのダム厚	右岸側中心角
82.0	190,727	4.00	4,000	31° 53'	4.00	33° 35'
77.5	190,432	4,494	4,625	33° 01'	4,699	34° 44'
73.0	189,700	4,988	6,323	34° 10'	6,613	35° 53'
65.5	184,565	5,811	8,456	35° 39'	9,026	37° 25'
58.0	174,582	6,634	10,667	36° 33'	11,556	38° 28'
50.5	157,988	7,457	12,750	36° 33'	13,917	38° 28'
43.0	141,396	8,281	14,833	36° 33'	16,278	38° 28'
35.5	124,803	9,104	16,917	36° 33'	18,639	38° 28'
28.0	108,211	9,927	19,000	36° 33'	21,000	38° 28'
20.5	91,244	10,750	20,884	36° 28'	22,908	38° 10'
13.0	73,796	11,573	22,370	36° 11'	23,910	37° 20'
8.0	62,094	12,122	23,138	35° 58'	24,074	36° 29'
3.0	50,423	12,671	23,730	35° 39'	23,836	35° 23'
1.5	47,022	12,835	23,873	35° 30'	23,686	35° 00'
0	43,592	13,000	24,000	35° 30'	23,500	35° 00'

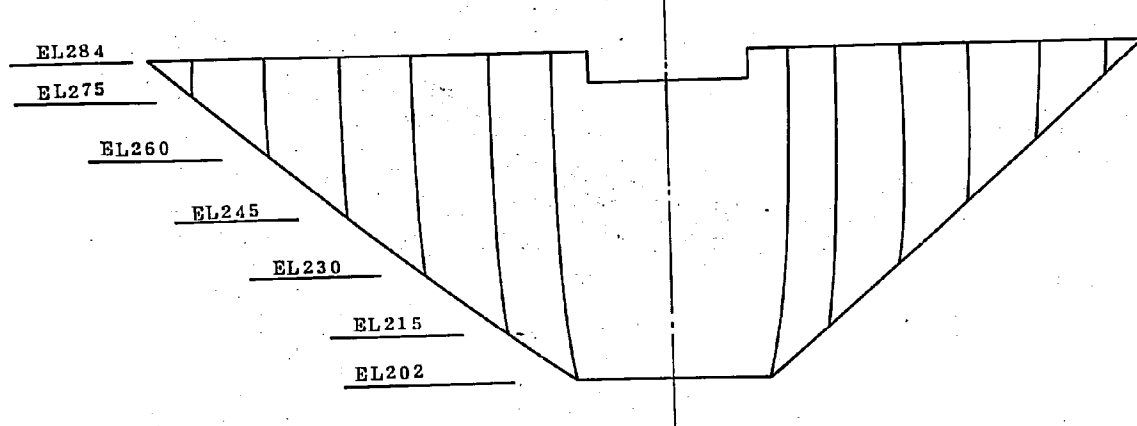
青迎寺ダム平面図

S=1/1500



青蓮寺ダム展開図

$$S = \frac{1}{2000}$$

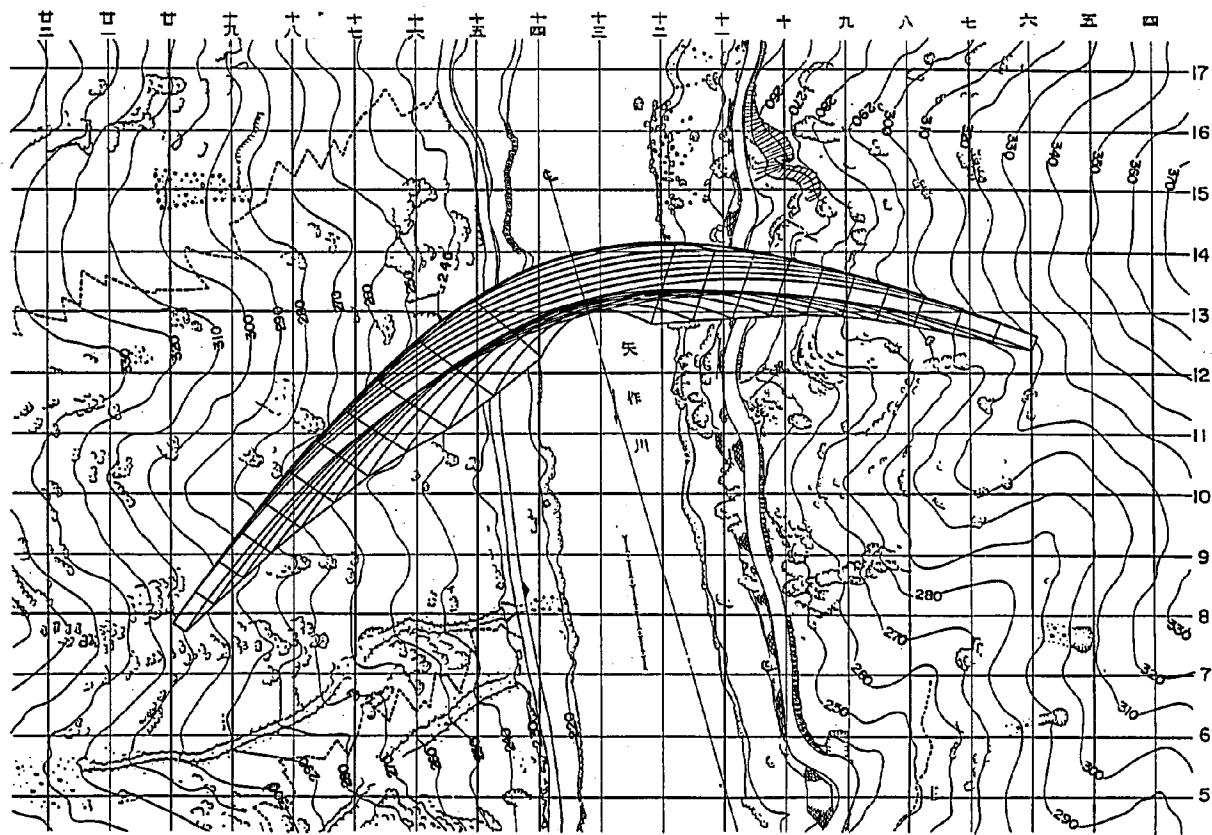


矢 作 ダ ム

高 さ	ス パ ン	クラウン のダム厚	左岸アバット メントのダム厚	左岸側中心角	右岸アバット メントのダム厚	右岸側中心角
100.0	294,000	5.00	5.00	36°55'	5.00	40°41'
95.0	283,000	5.75	6.00	36°32'	6.20	40°27'
90.0	272,400	6.50	7.00	36°10'	7.40	40°16'
80.0	250,800	8.00	9.00	35°24'	9.80	39°57'
70.0	229,200	9.50	11.00	34°37'	12.20	39°43'
60.0	207,600	11.00	13.00	34°00'	14.60	39°35'
50.0	186,000	12.50	15.00	33°48'	17.00	39°32'
40.0	163,700	14.00	17.25	33°48'	19.70	39°32'
30.0	140,000	15.50	20.00	33°48'	23.00	39°32'
20.0	114,590	17.00	22.77	33°41'	26.90	39°30'
10.0	85,000	18.50	25.08	33°17'	29.25	37°59'
5.5	69,458	19.17	25.97	33°00'	29.10	36°10'
1.0	52,117	19.77	26.77	32°40'	28.20	33°22'
0.5	50,067	19.92	26.85	32°40'	28.06	33°00'
0	47,990	20.00	26.93	32°40'	27.90	33°00'

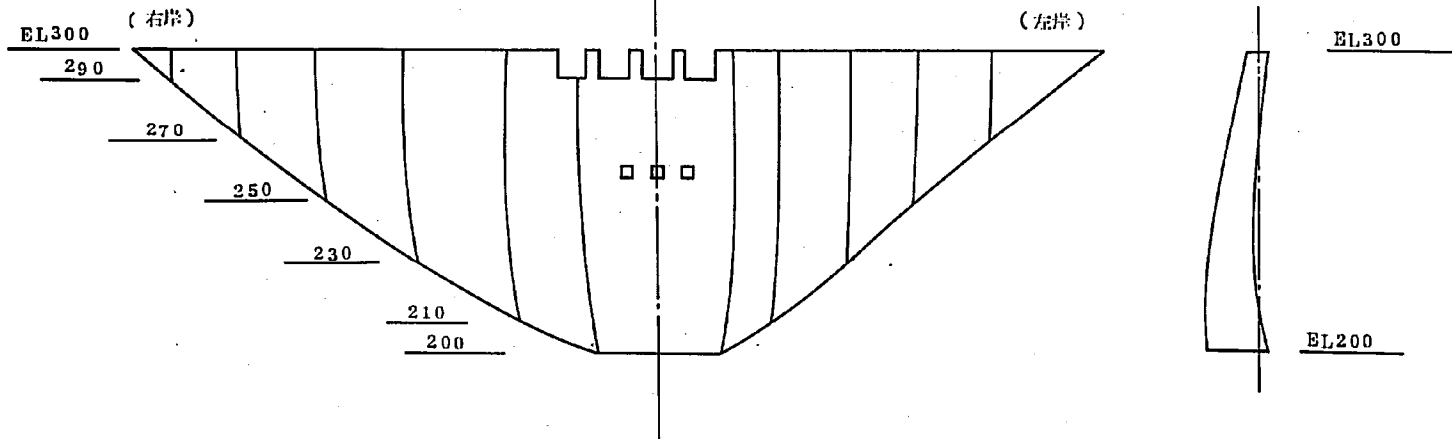
矢作ダム平面図

S = 1/2000



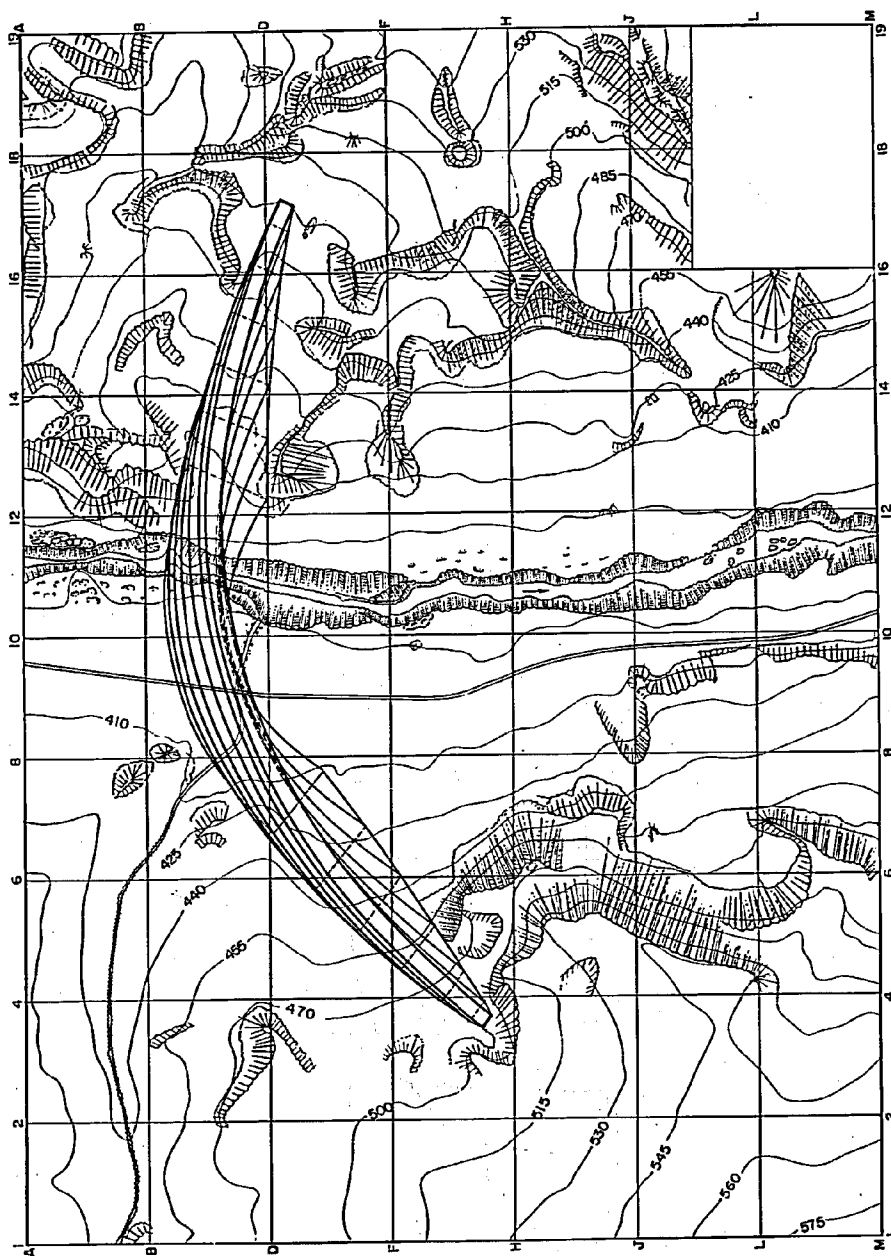
矢作ダム下流面展開図

$S = \frac{1}{2000}$



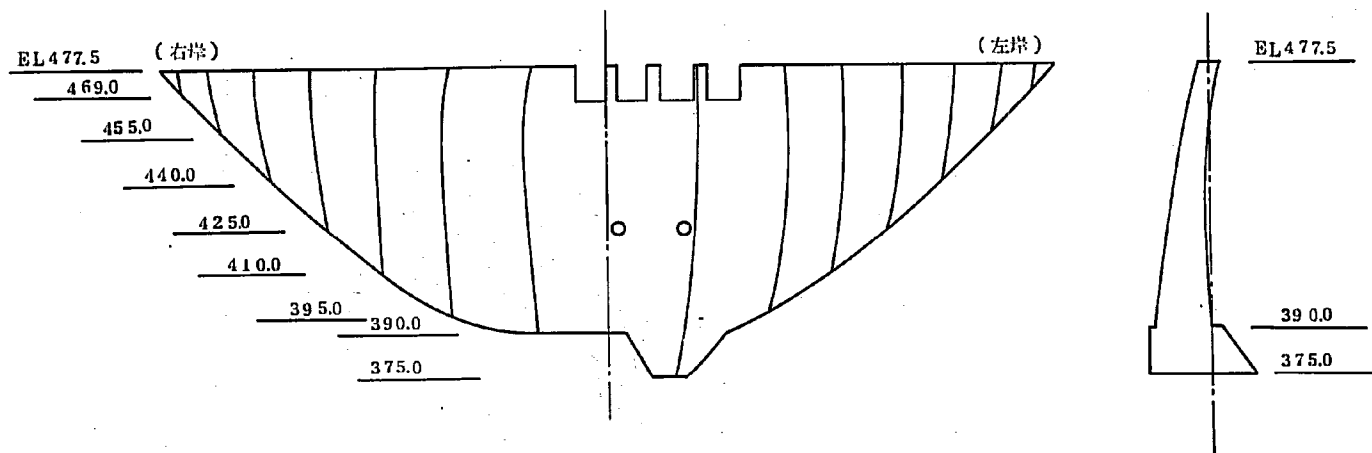
豊 平 峡 ダ ム

高 さ	スパン	クラウン のダム厚	左岸アバットメ ントのダム厚	左岸側中心角	右岸アバットメ ントのダム厚	右岸側中心角
87.5	278,980	5.00	5.00	37°45'	5.00	37°12'
83.2	273,680	5.73	6.18	37°38'	6.46	37°22'
79.0	267,880	6.46	7.38	37°30'	7.91	37°30'
72.0	257,232	7.66	9.32	37°20'	10.31	37°40'
65.0	245,222	8.86	11.27	37°14'	12.71	37°46'
57.0	230,843	10.14	13.36	37°11'	15.28	37°50'
50.0	214,900	11.43	15.45	37°11'	17.85	37°50'
42.5	198,175	12.72	17.55	37°35'	20.43	37°48'
35.0	181,450	14.00	19.64	37°15'	23.00	37°45'
27.5	169,185	15.29	21.53	37°23'	25.17	37°44'
20.0	148,000	16.57	23.82	37°40'	26.57	37°29'
12.5	131,275	17.86	25.91	38°05'	27.18	37°02'
5.0	108,700	19.14	28.00	38°38'	27.00	36°22'
2.5	98,575	19.57	28.70	38°50'	26.52	36°06'
0	87,150	20.00	29.39	38°50'	26.44	36°06'



豊平峽ダム平面図

豊平峡ダム下流面展開図 $3 \sim \frac{1}{2000}$



アーチダム応力の計算値と実験値との比較

ダ ム		名	称
鳴	子	ダ	ム
綾	北	ダ	ム
室	牧	ダ	ム
二	瀬	ダ	ム
川	俣	ダ	ム
裾	花	ダ	ム
青	蓮 寺	ダ	ム
矢	作	ダ	ム
豊	平 峽	ダ	ム

C

鳴

子

ダ

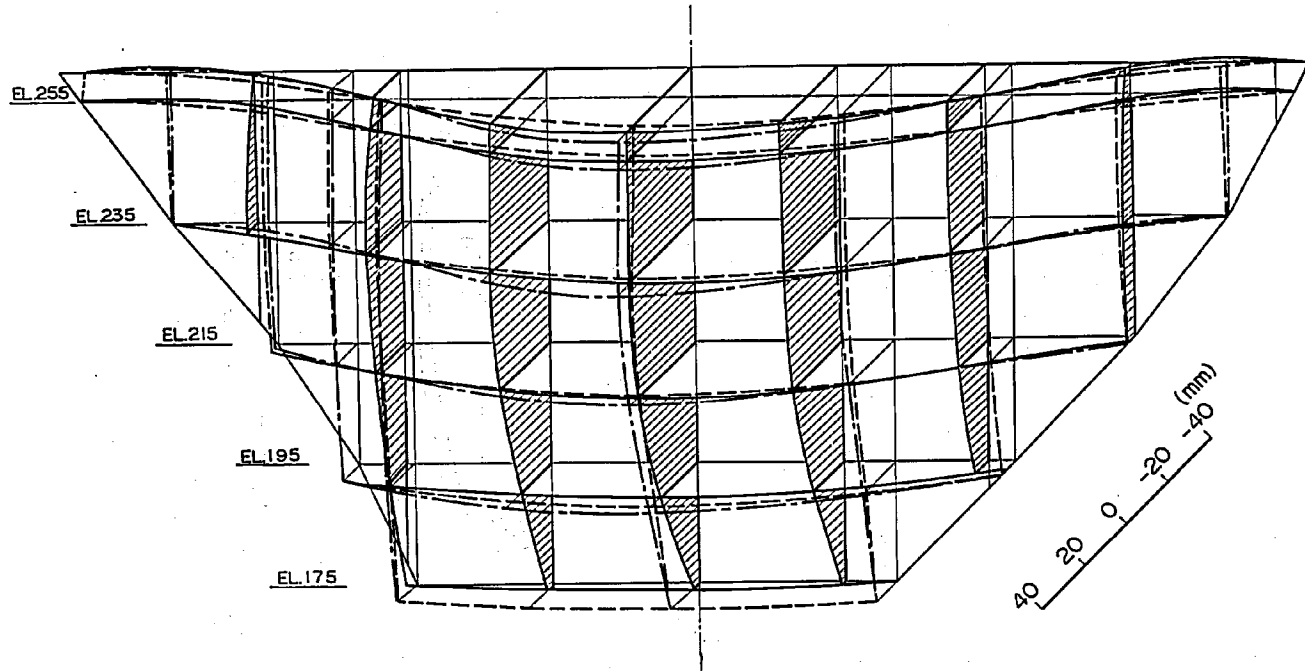
ム

C

半径方向撓み図

左岸

右岸

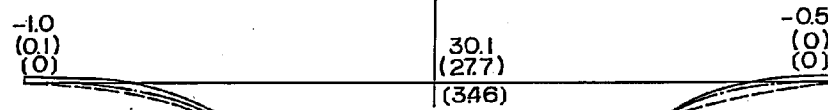


アーチ・
エレメント 半径方向撓み図

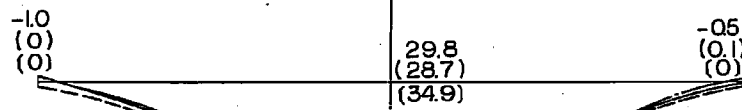
左 岸

右 岸

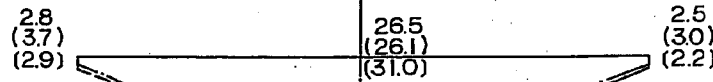
EL. 255



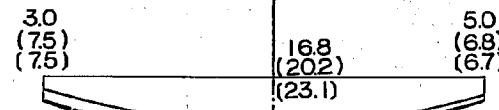
EL. 235



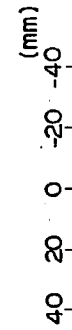
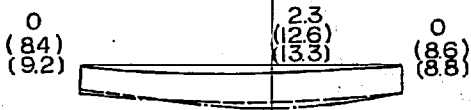
EL. 215



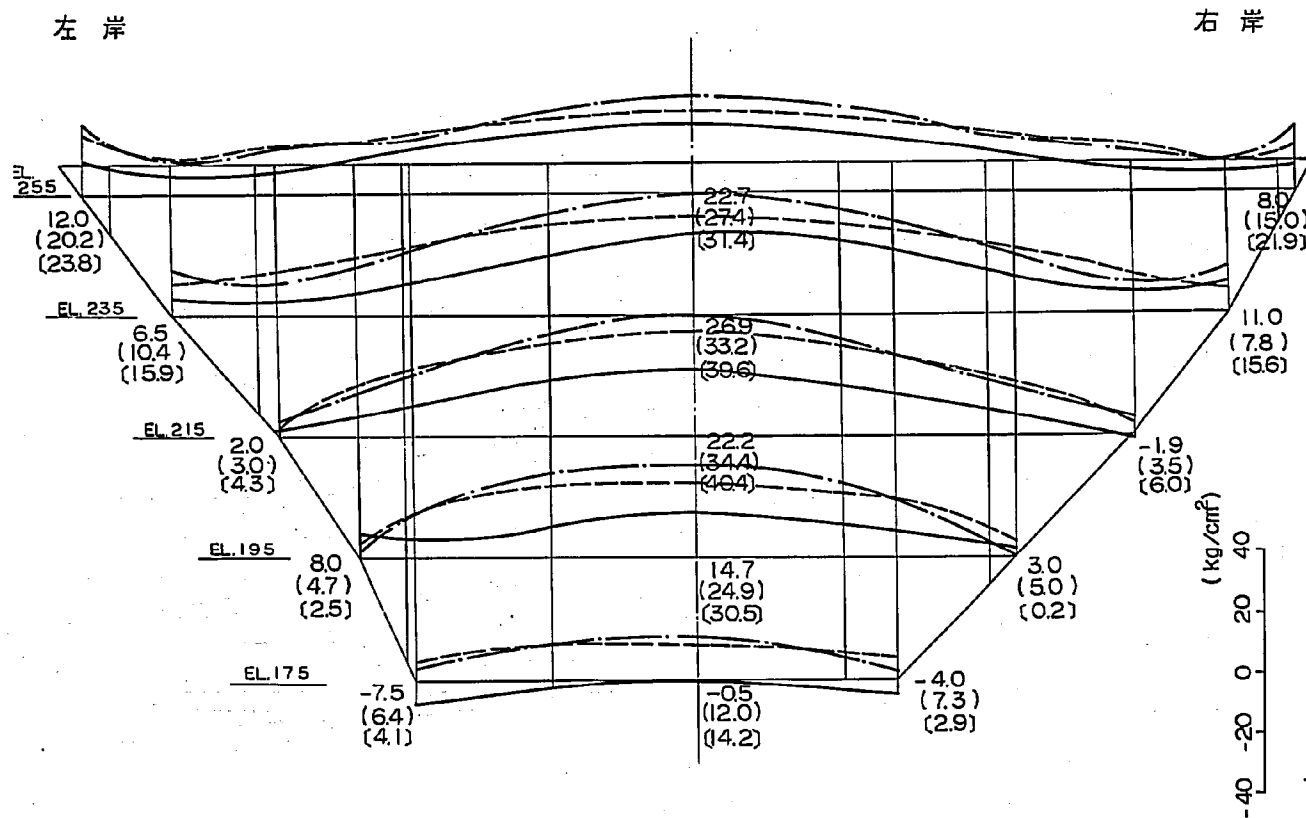
EL. 195



EL. 175



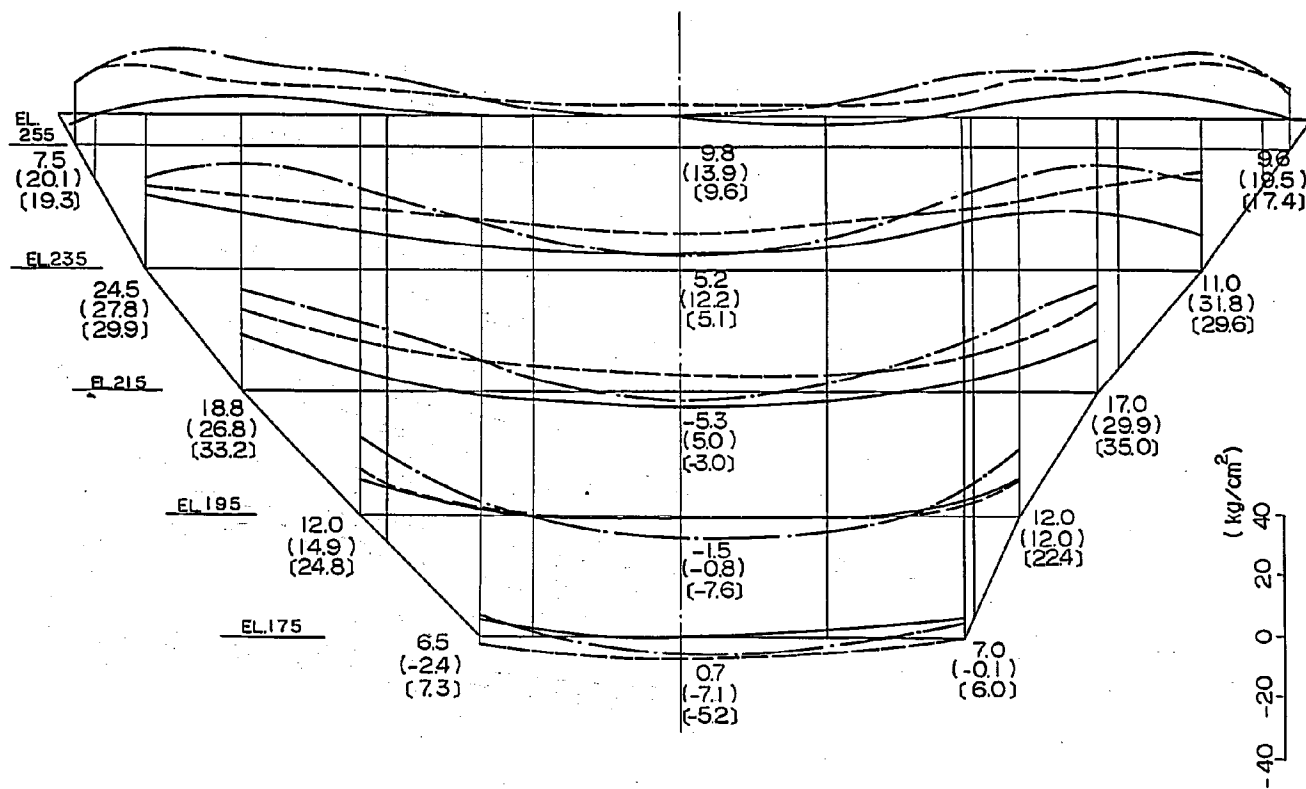
水平方向应力分布图（上流面）



水平方向应力分布图（下流面）

右岸

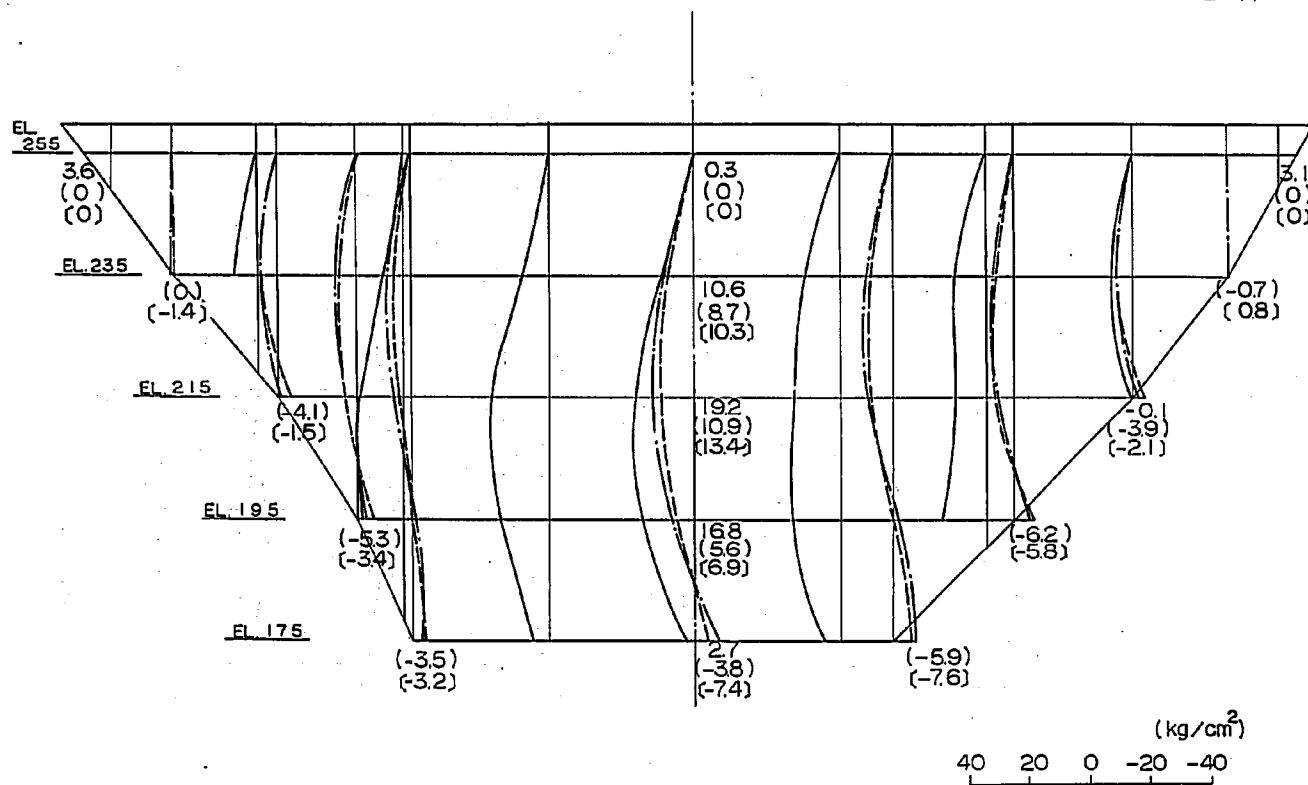
左岸



鉛直方向応力分布図（上流面）

左 岸

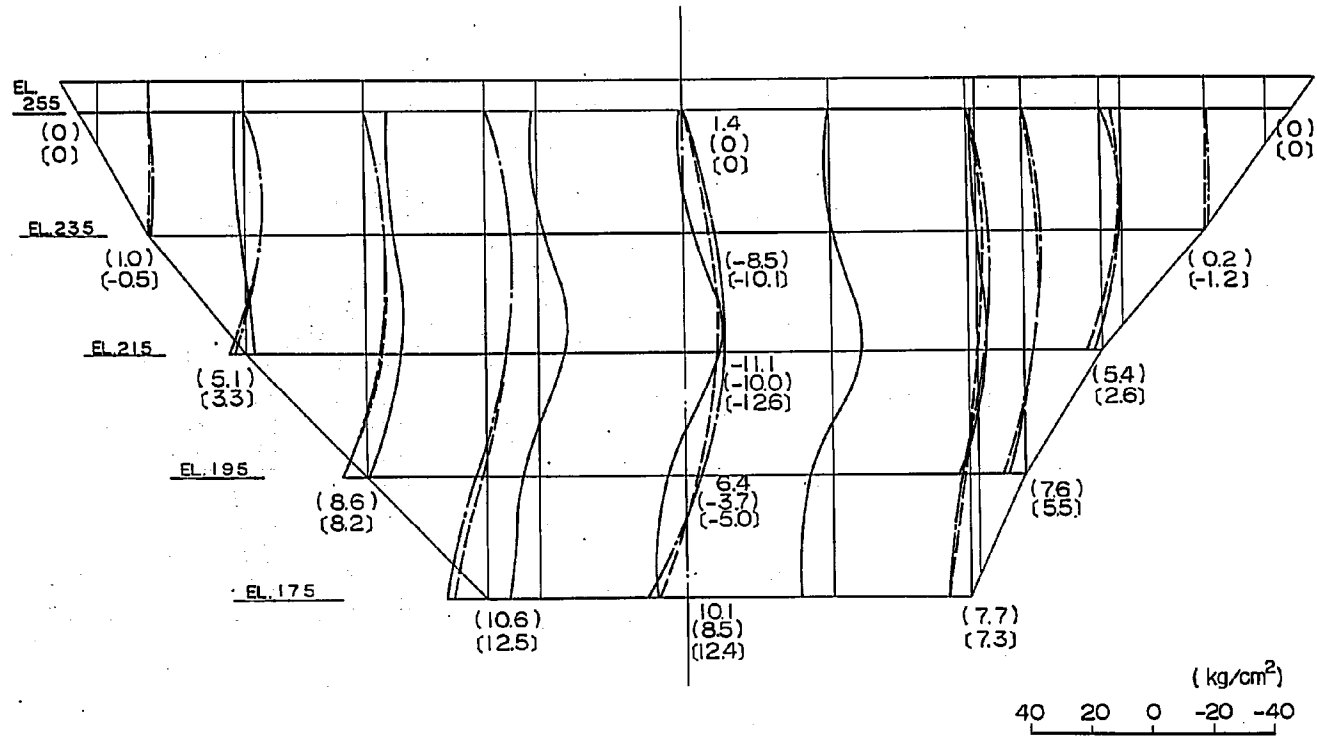
右 岸



鉛直方向応力分布図（下流面）

右岸

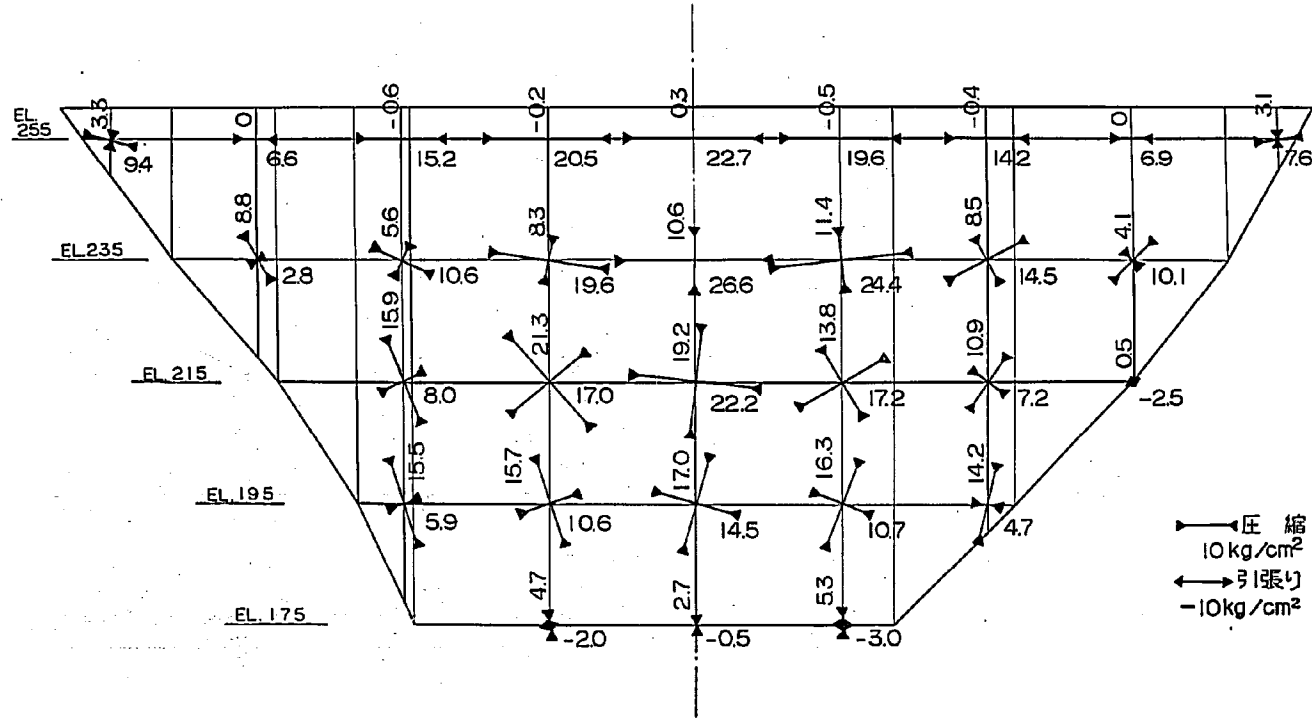
左岸



主 應 力 図 (上流面)
実 驗 値

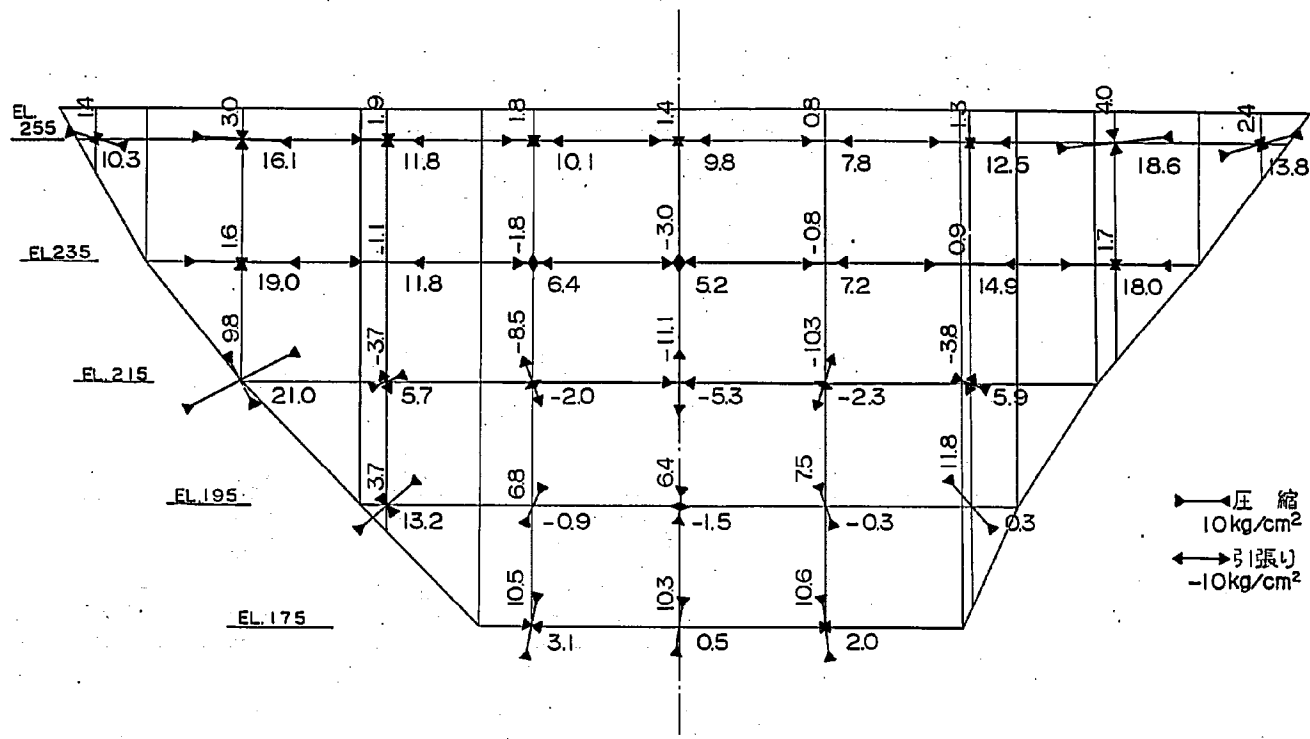
左 岸

右 岸



右岸

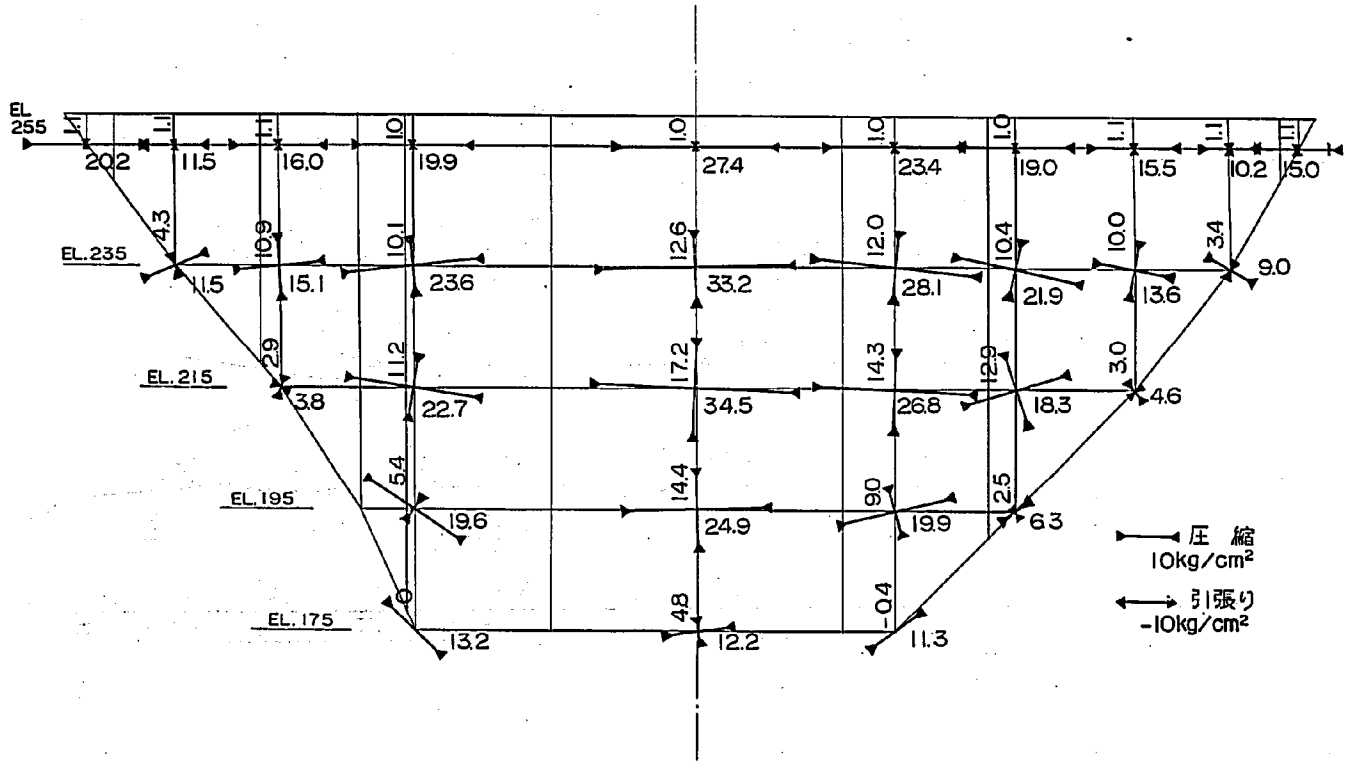
左岸



主 応 力 図 (上流面)
計算値

左 岸

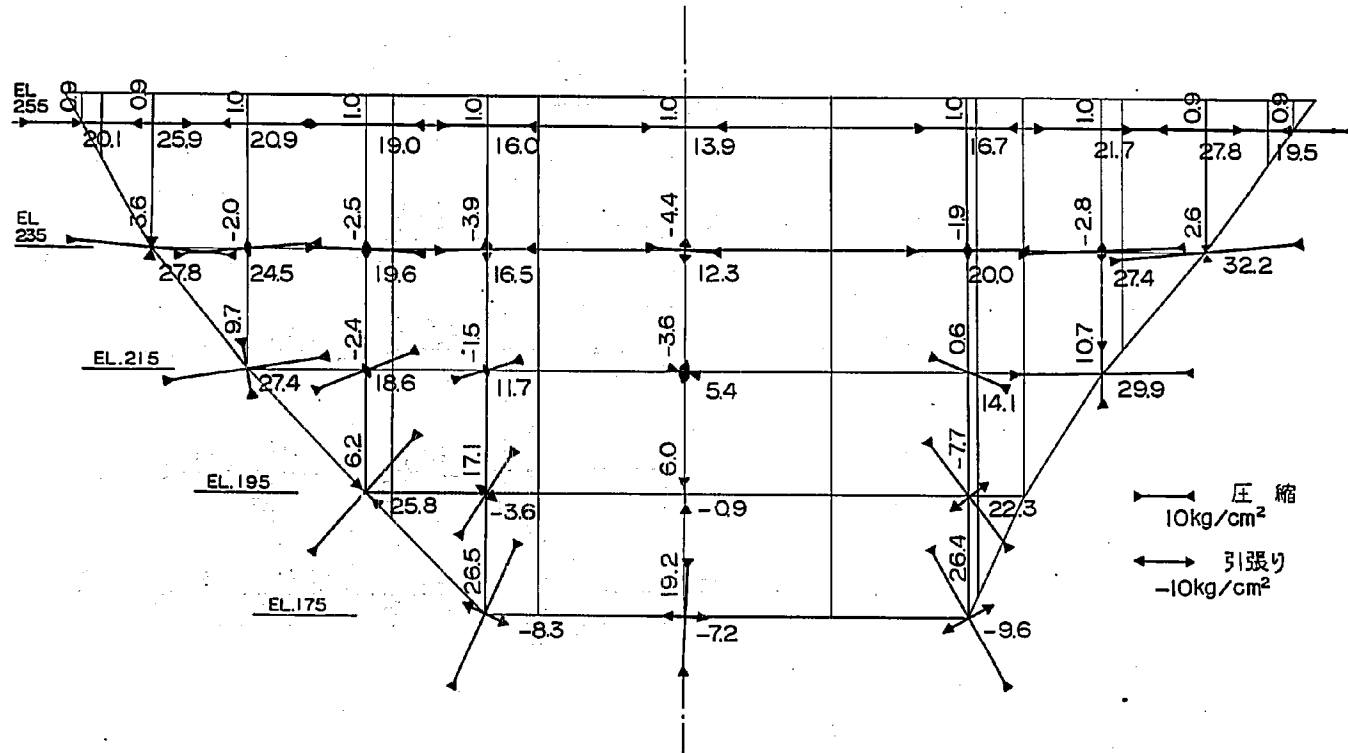
右 岸



主 応 力 図 (下流面)
計算値

右 岸

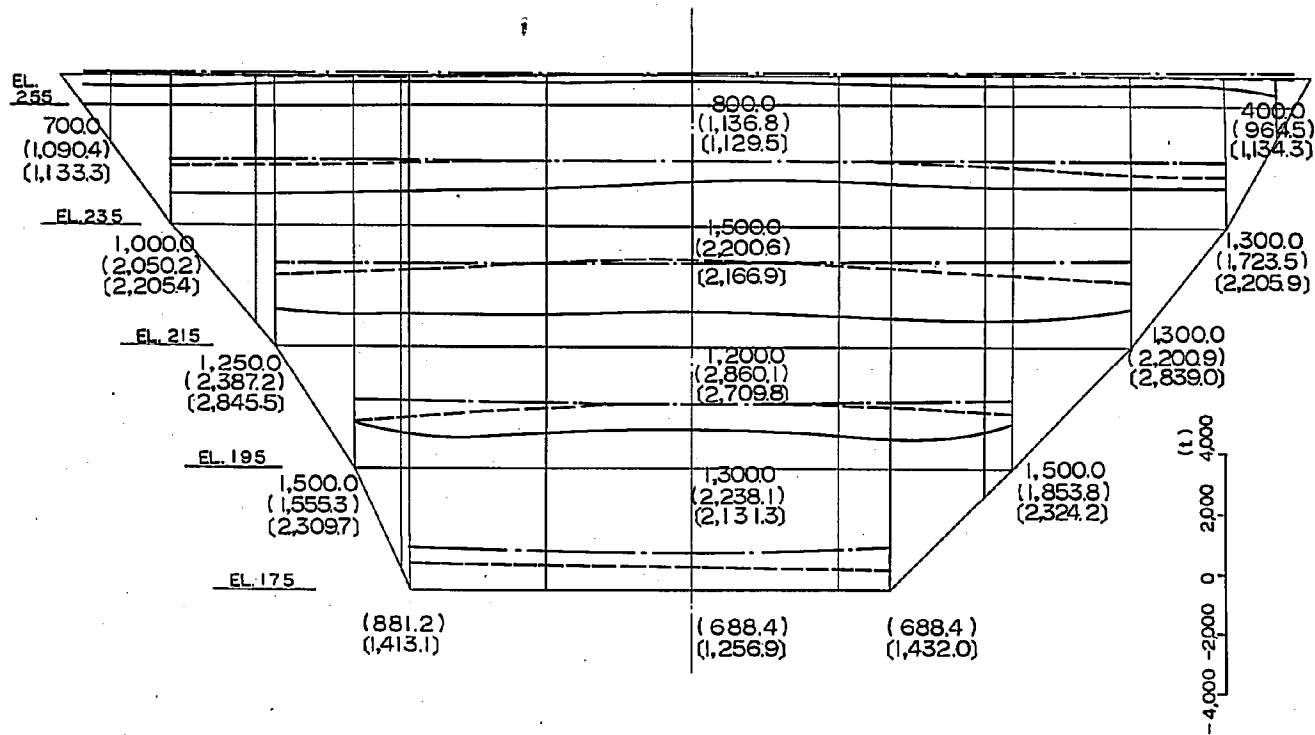
左 岸



アーチ・スラスト図

左岸

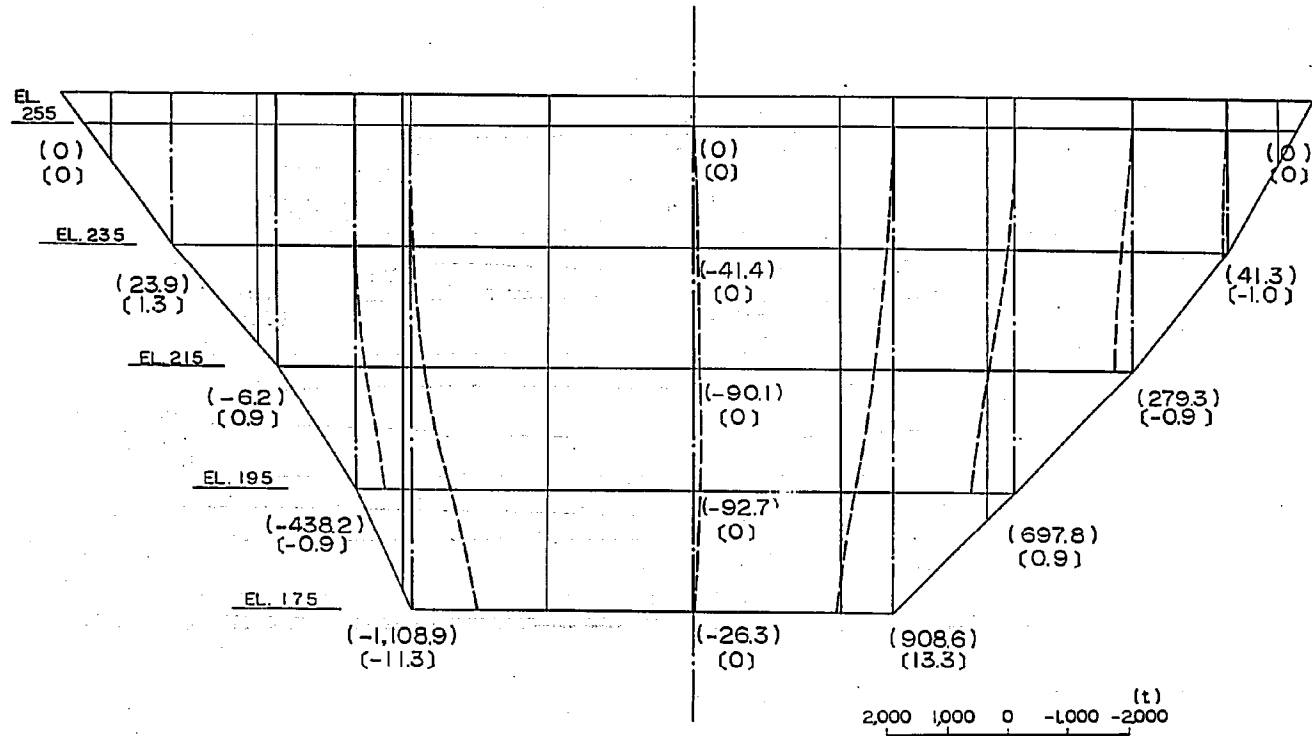
右岸



片持梁スラスト図

左岸

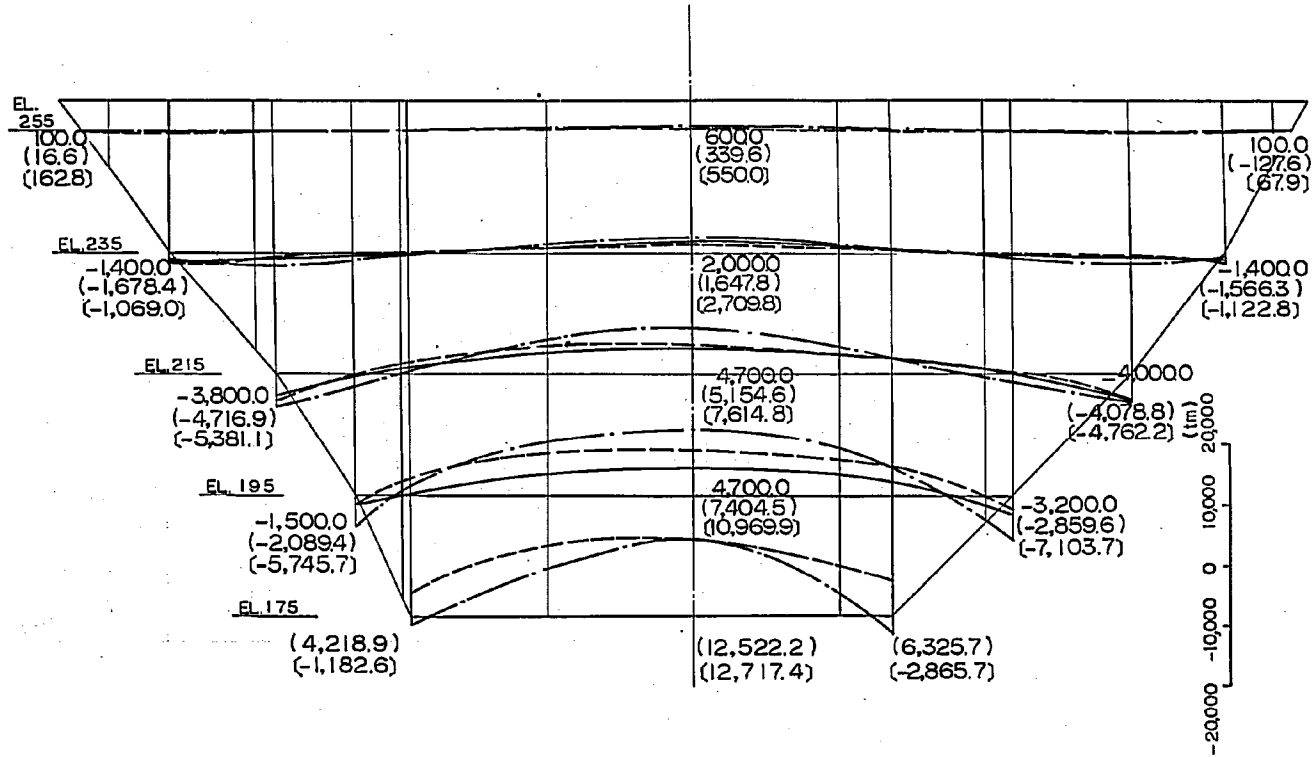
右岸



アーチ・モーメント分布図

左岸

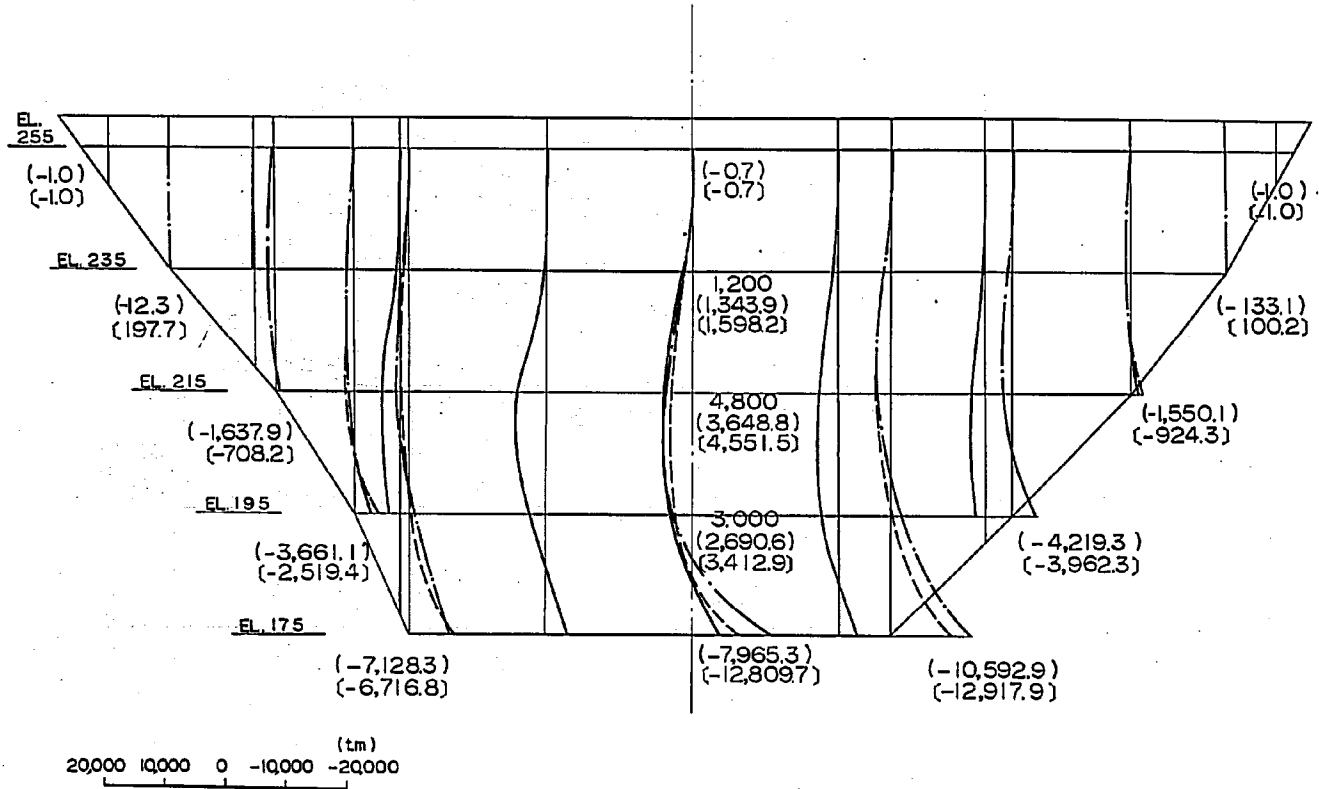
右岸



片持梁モーメント分布図

左岸

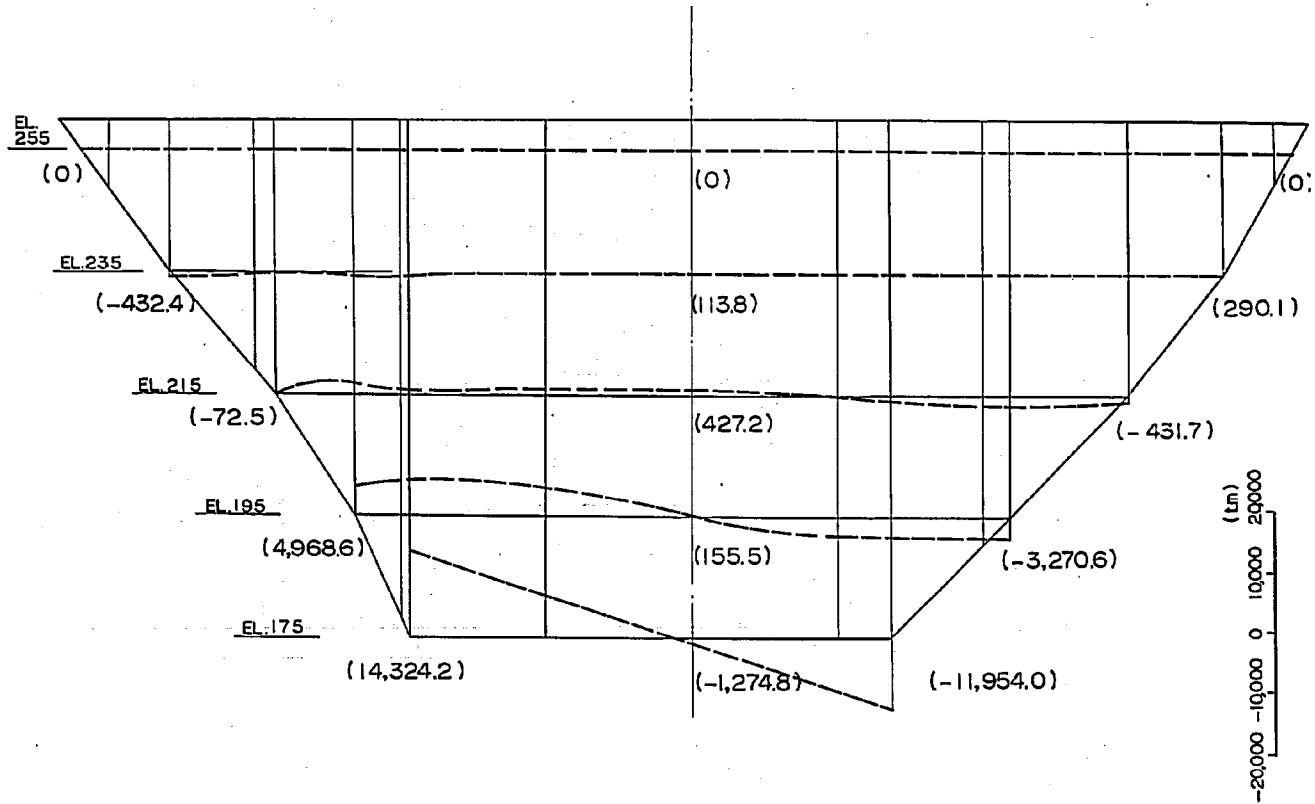
右岸



捩れモーメント図

左岸

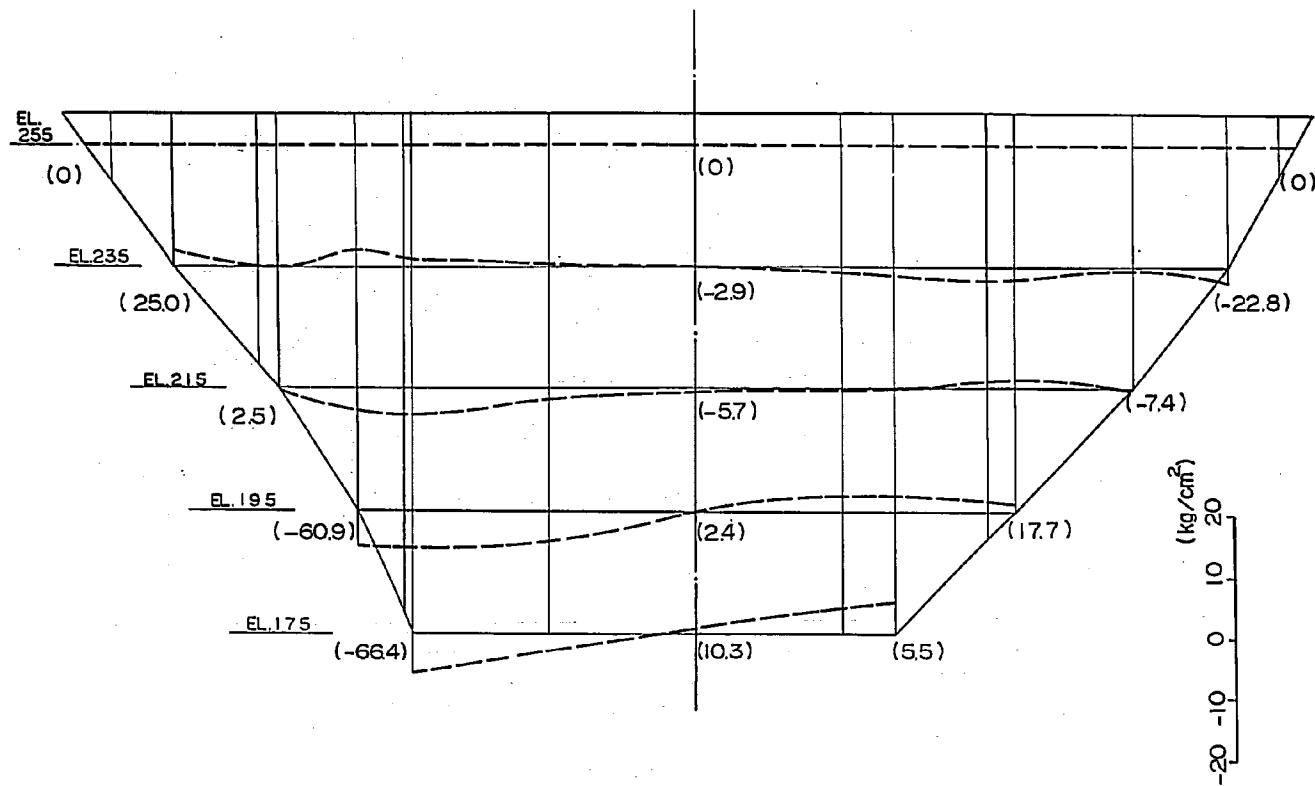
右岸



剪 断 应 力 图 (上流面)

左 岸

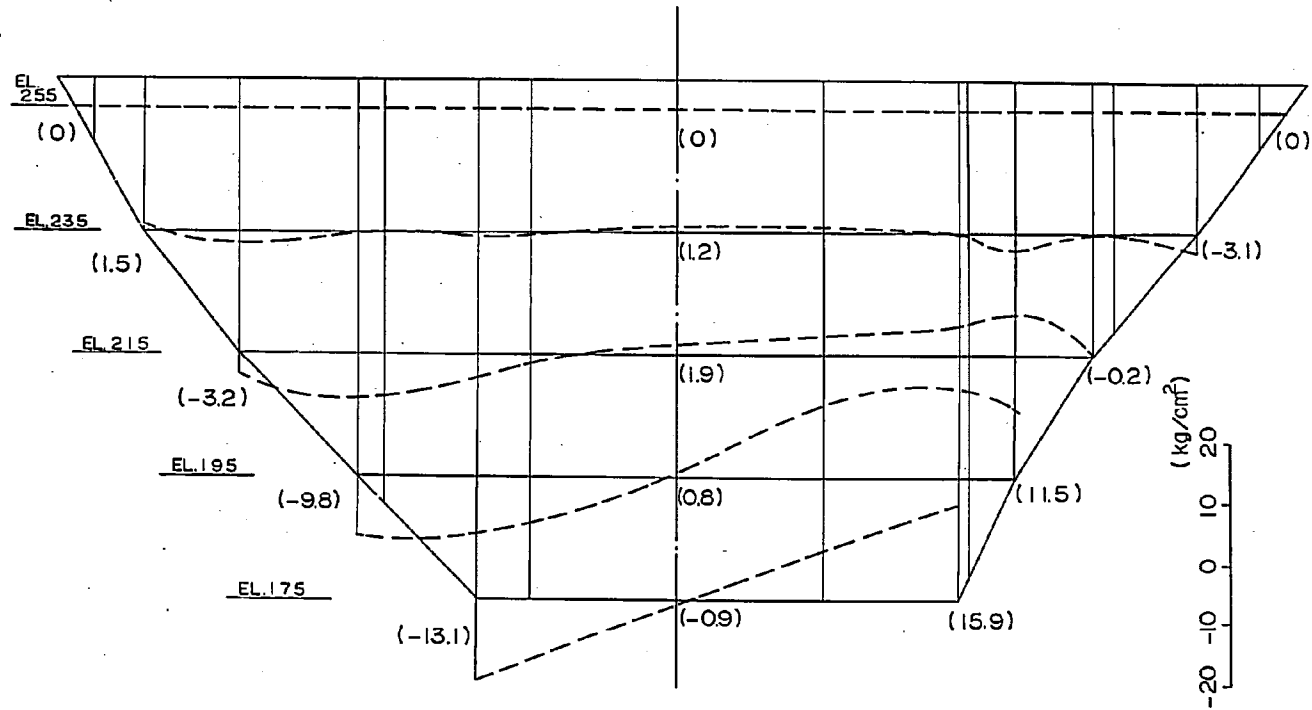
右 岸



剪 断 应 力 图 （下 流 面）

右 岸

左 岸



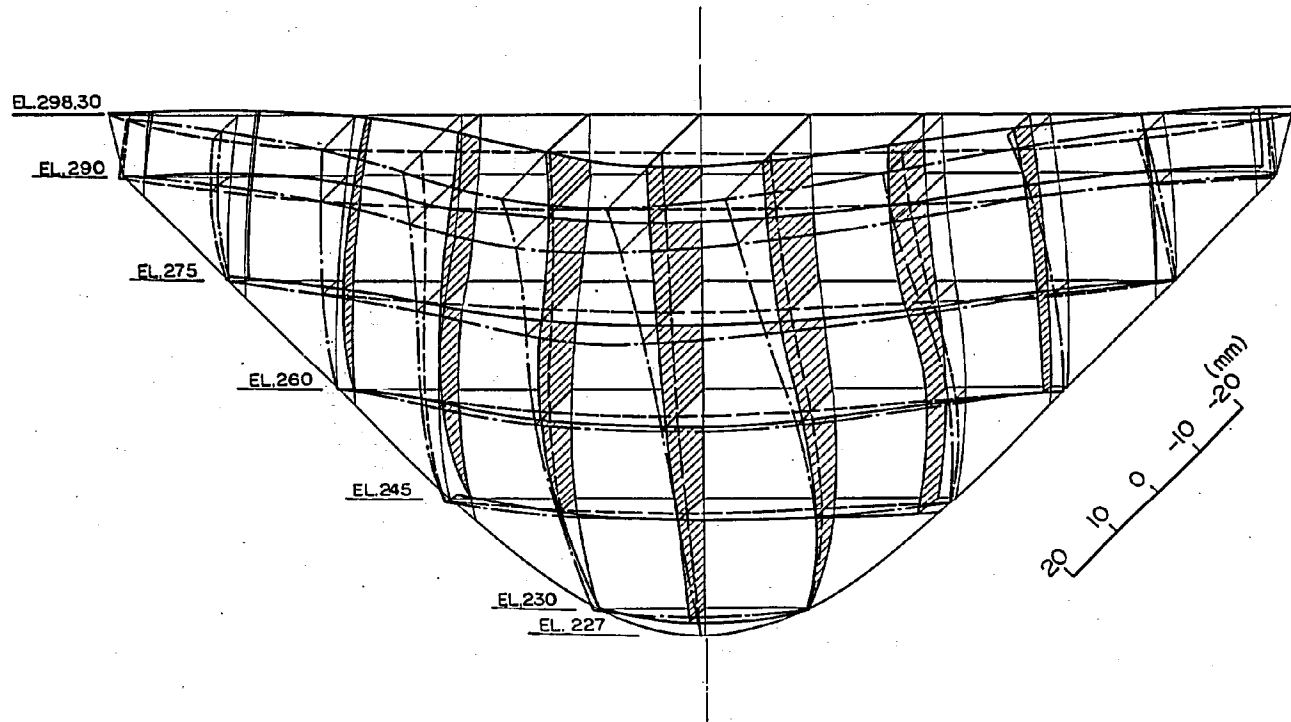
ム　ダ　北　綾　に

に

半径方向撓み図

左岸

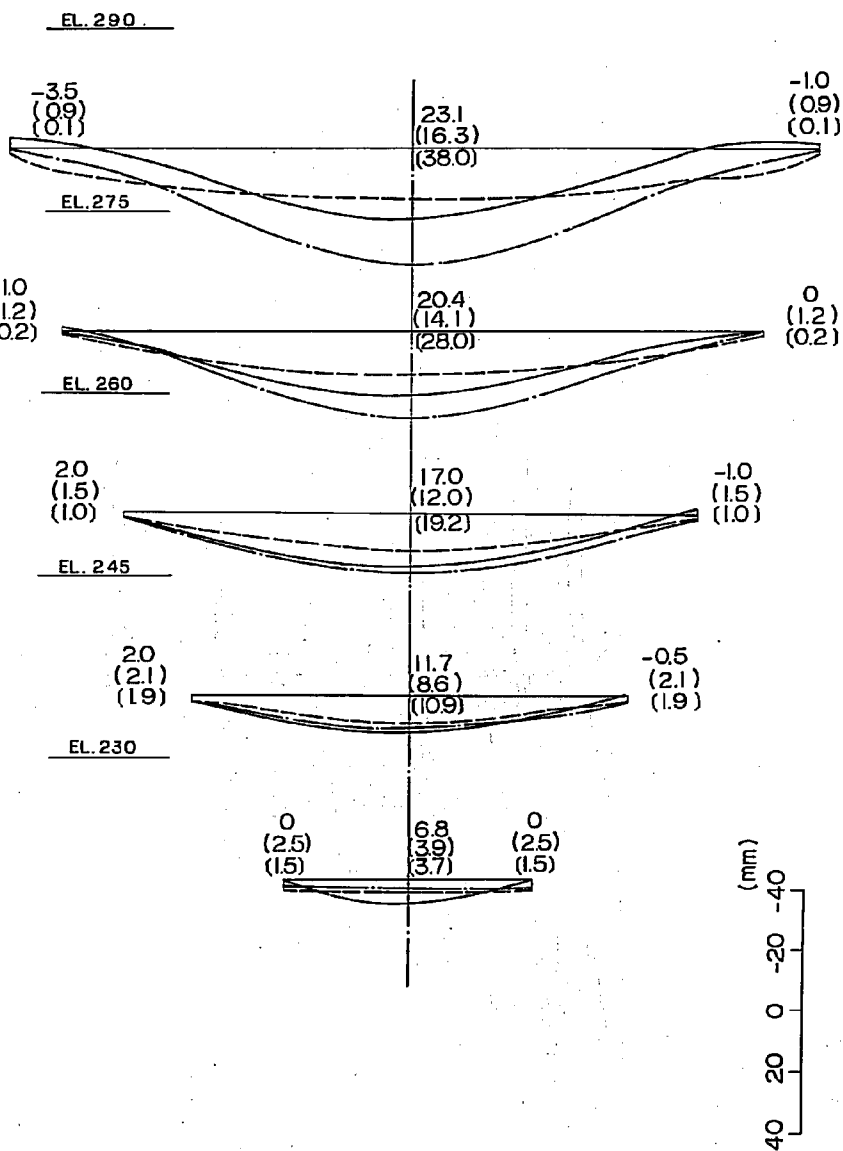
右岸



左岸

右岸

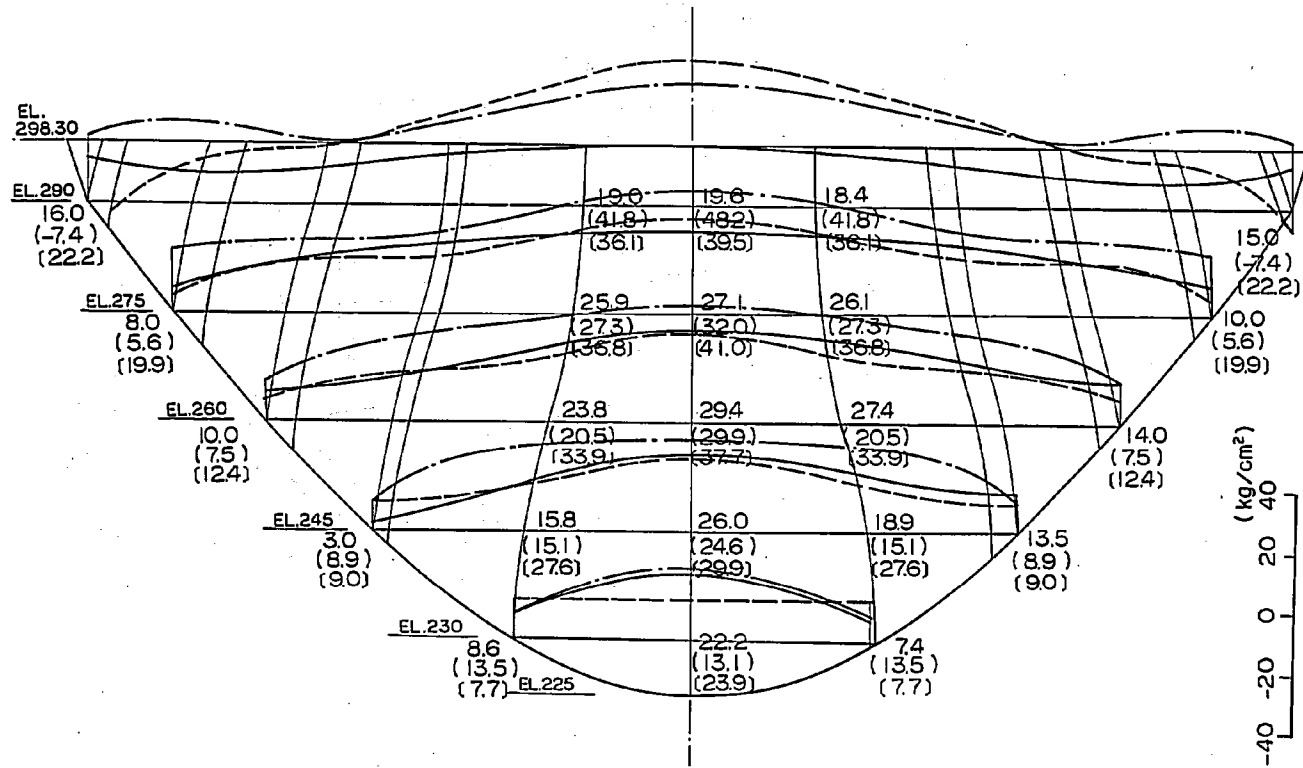
アーチ
エレメント
半径方向掘み図



水平方向应力分布图（上流面）

左岸

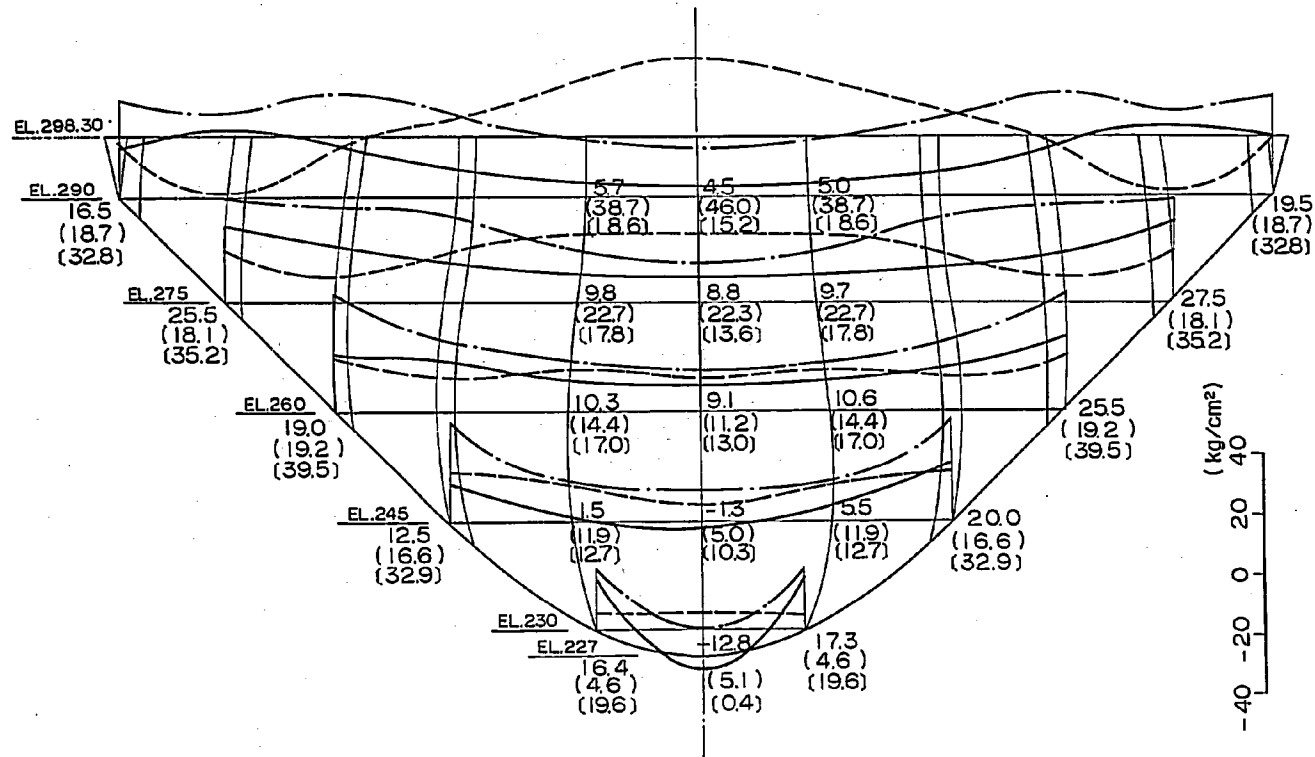
右岸



水平方向应力分布图（下流面）

右岸

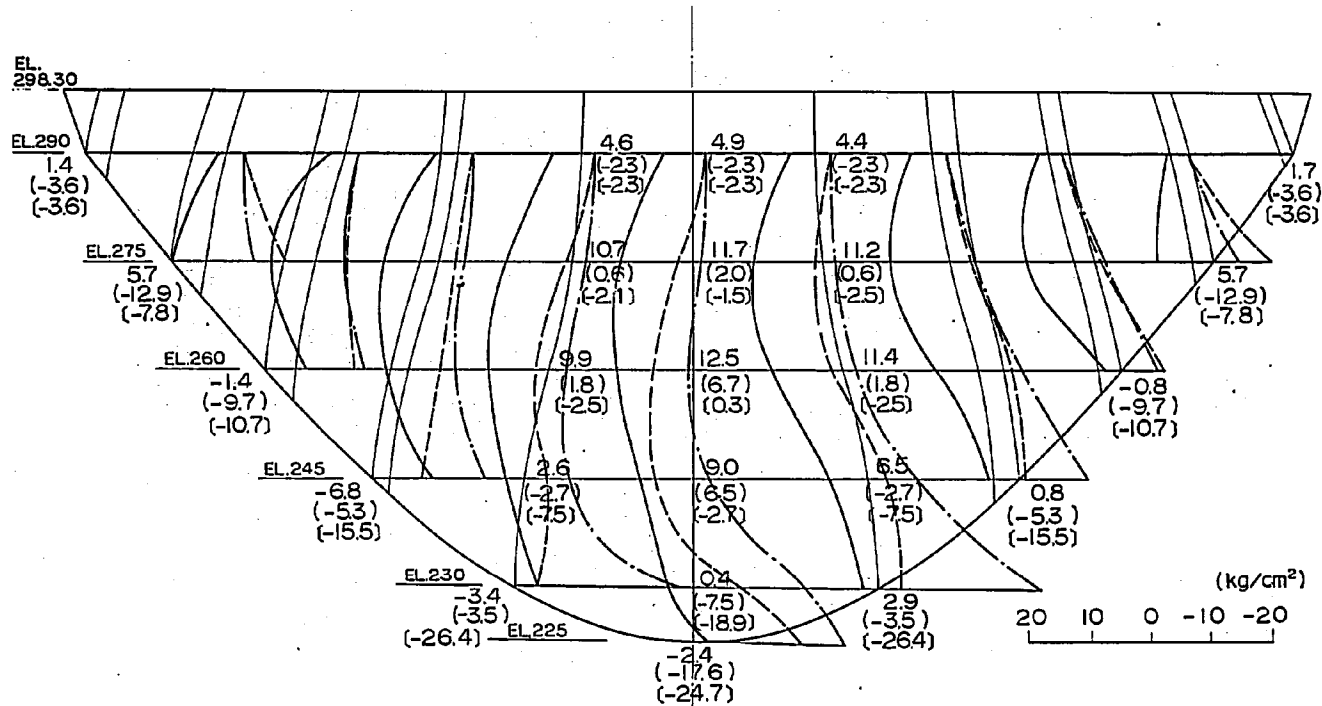
左岸



鉛直方向応力分布図（上流面）

左 岸

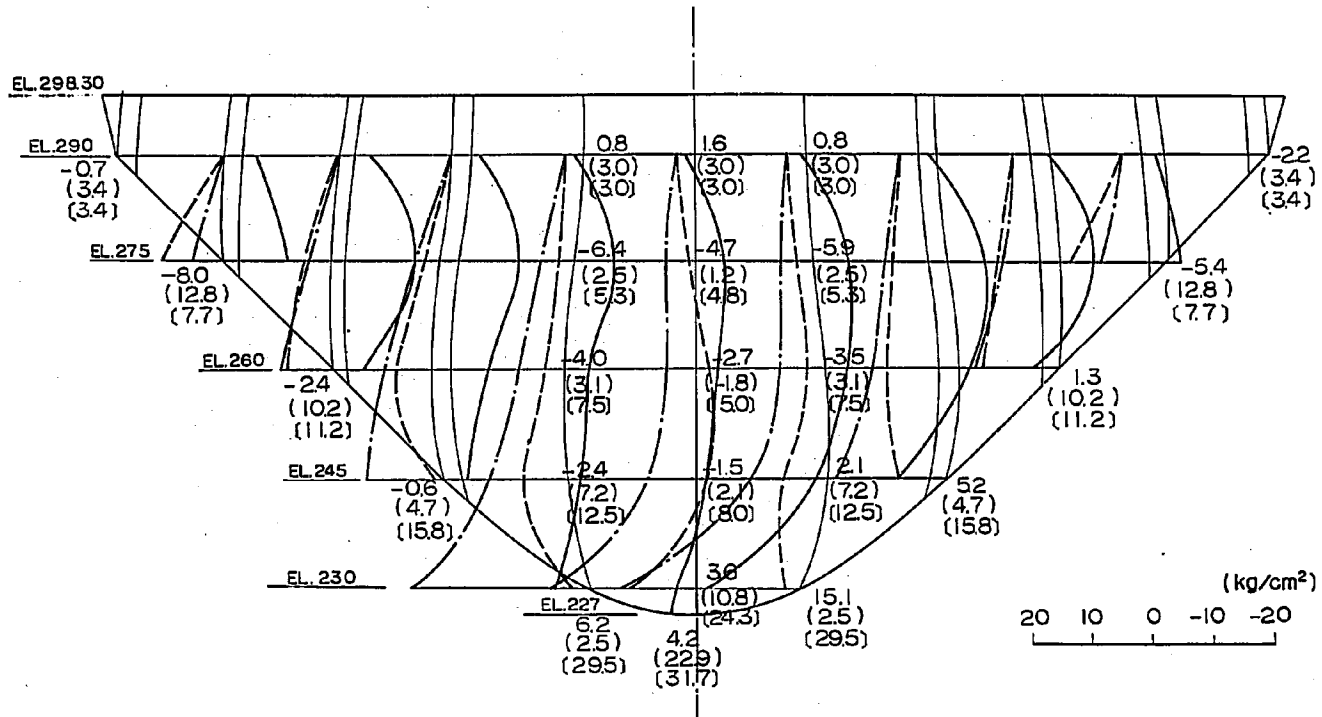
右 岸



鉛直方向応力分布図（下流面）

右岸

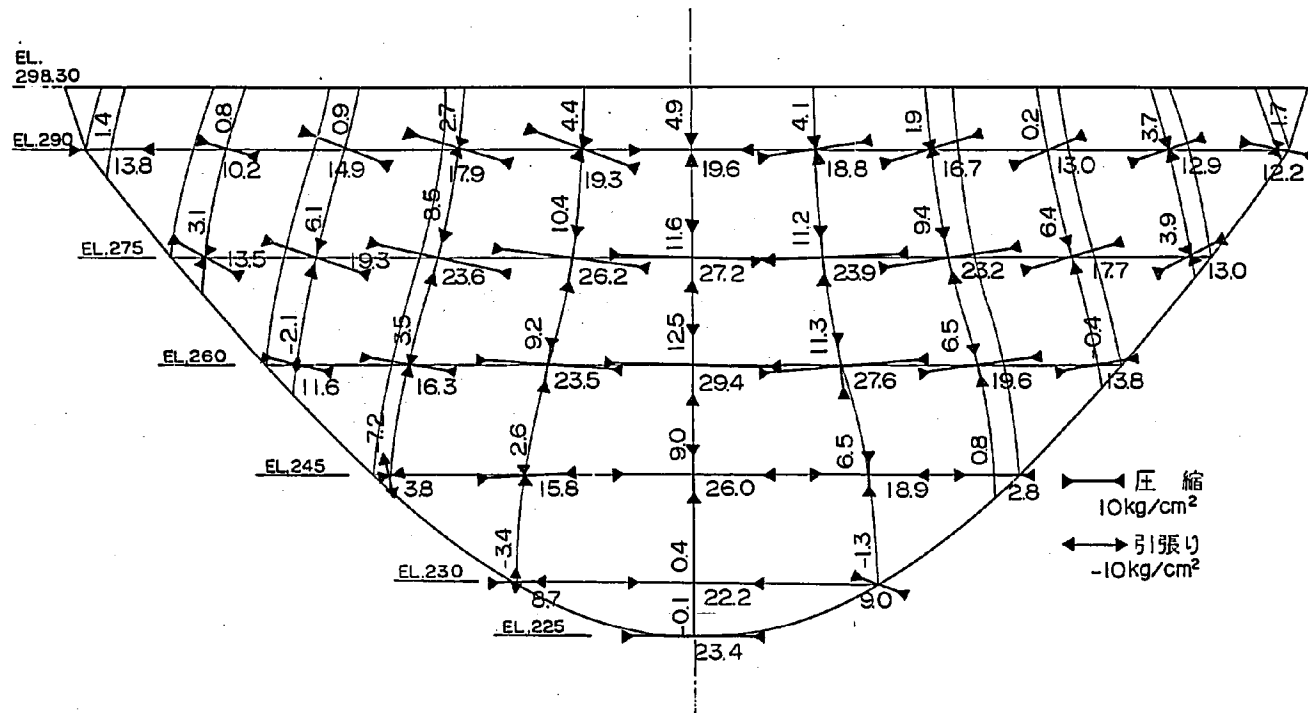
左岸



主 応 力 図 (上流面)
実 験 値

左 岸

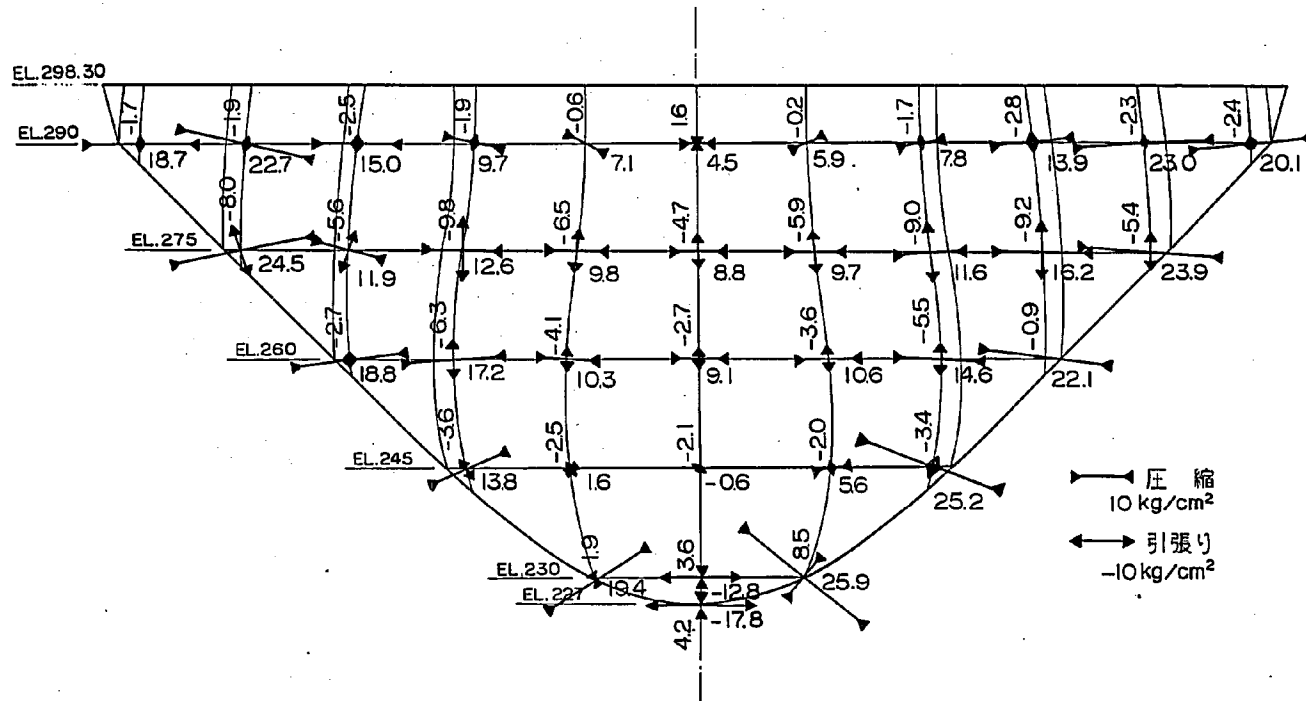
右 岸



主 応 力 図 (下 流 面)
実 験 値

右 岸

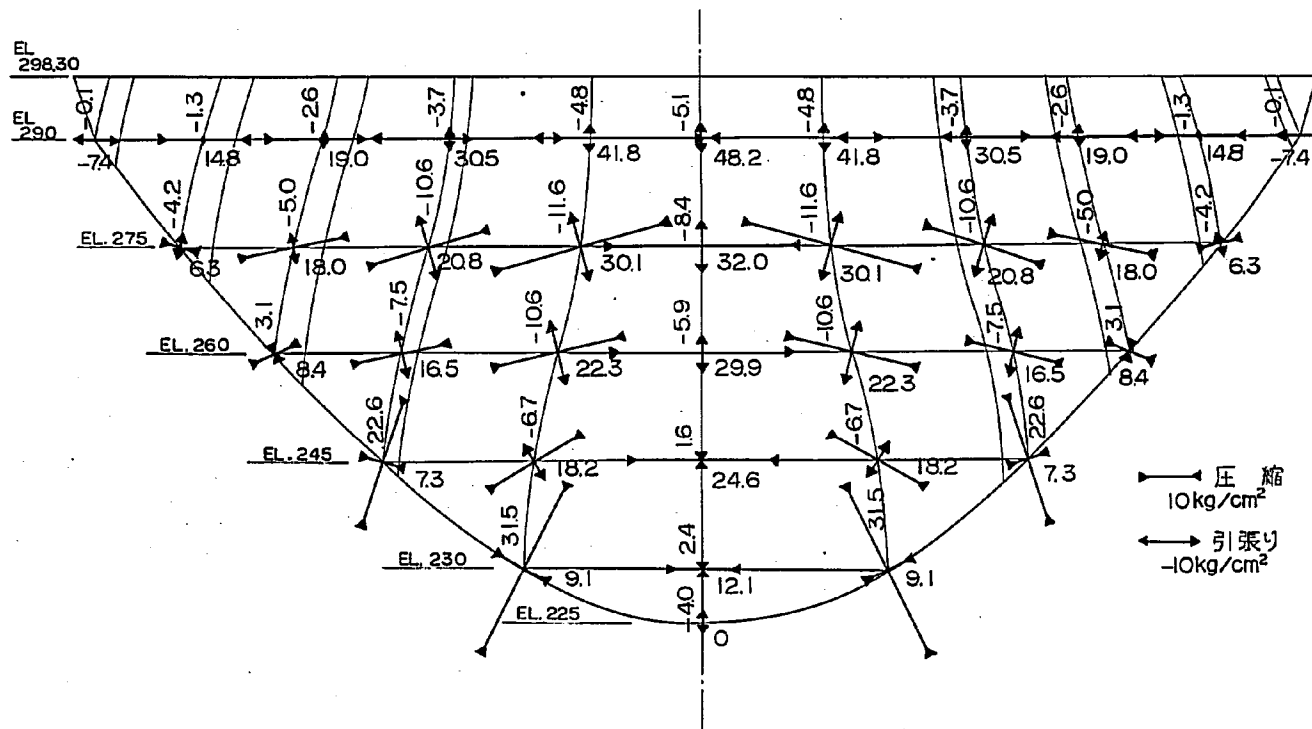
左 岸



主 応 力 図 (上流面)
計算値

左 岸

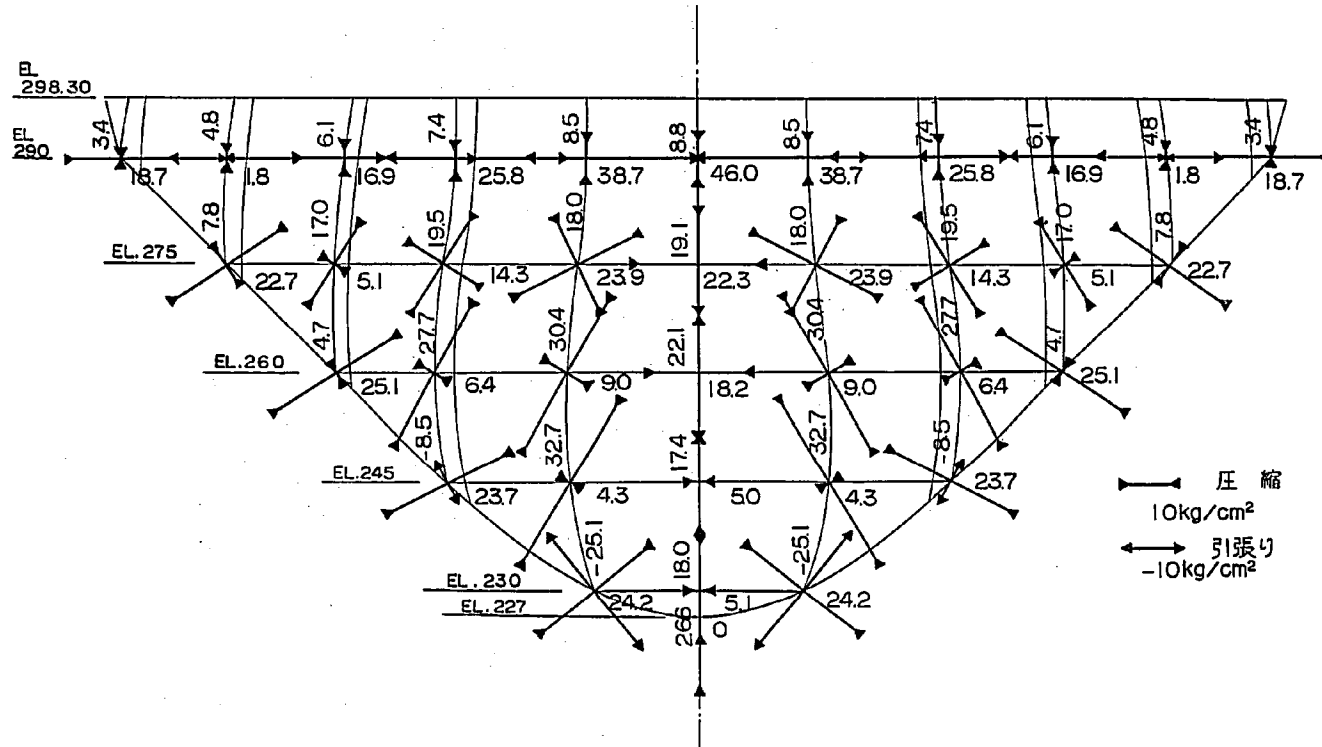
右 岸



主 應 力 図 (下流面)
計算値

右 岸

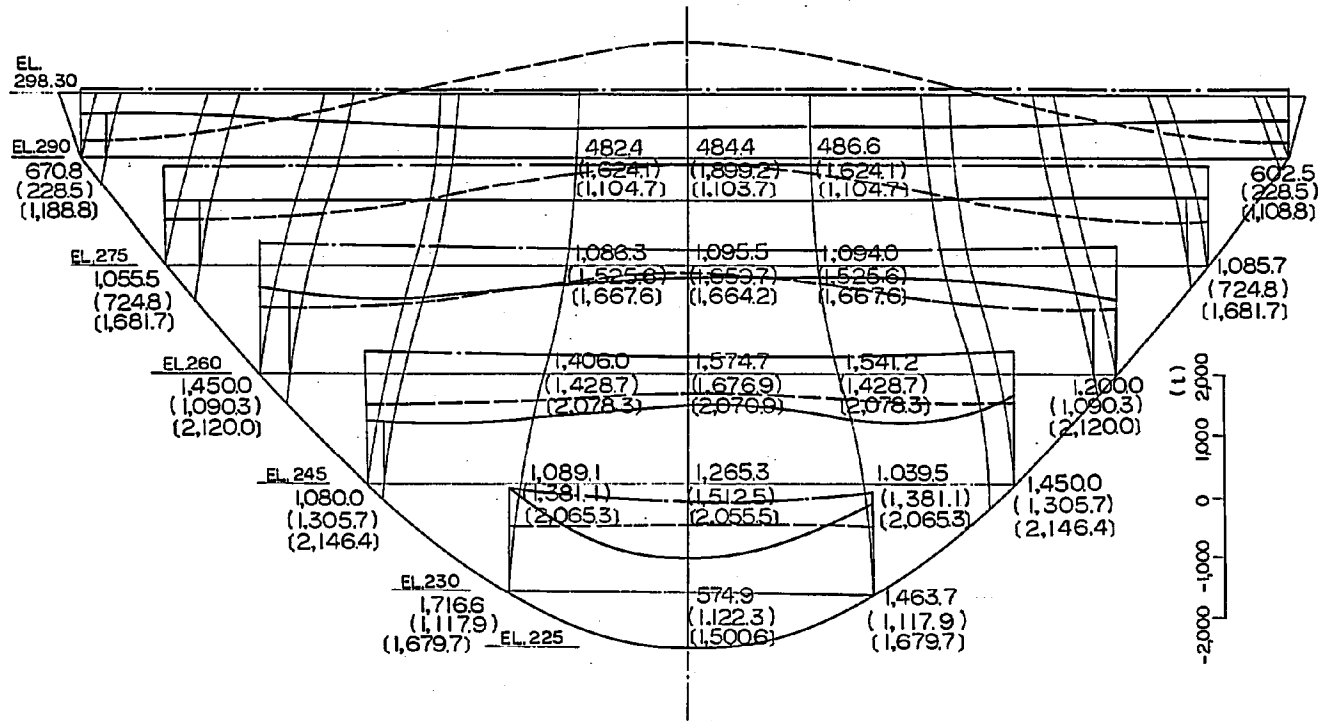
左 岸



アーチ・スラスト図

左岸

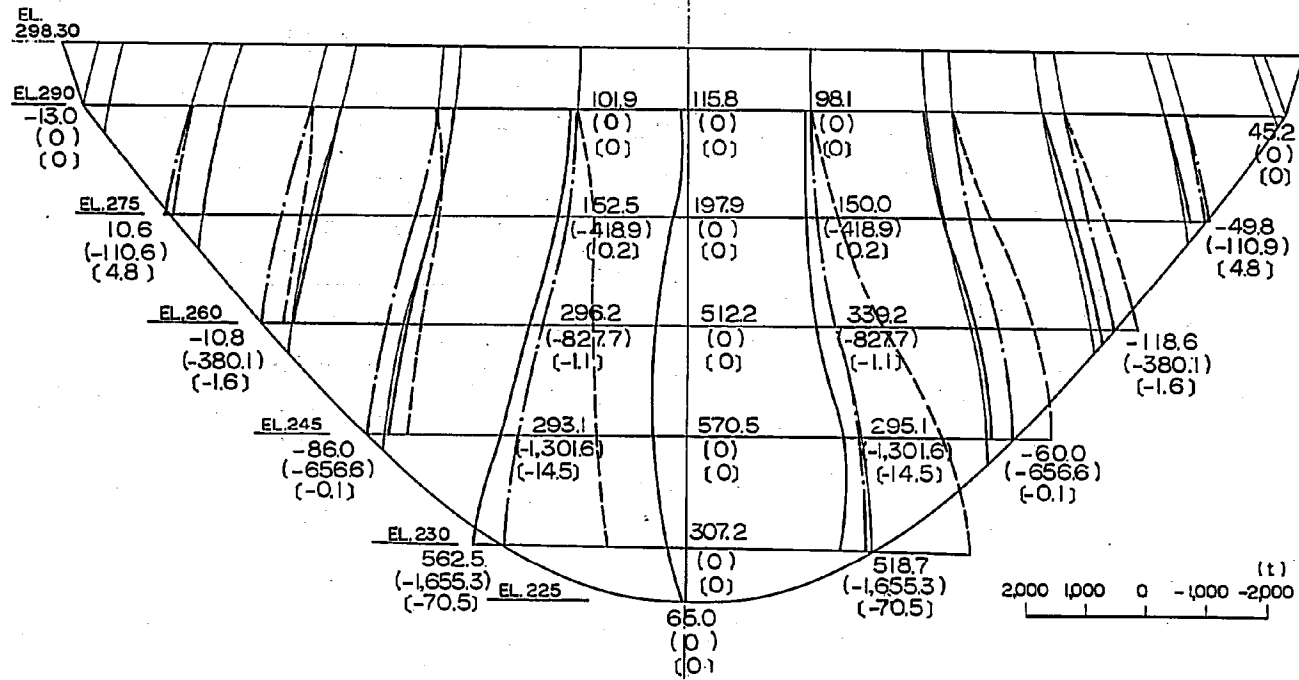
右岸



片持梁スラスト図

左岸

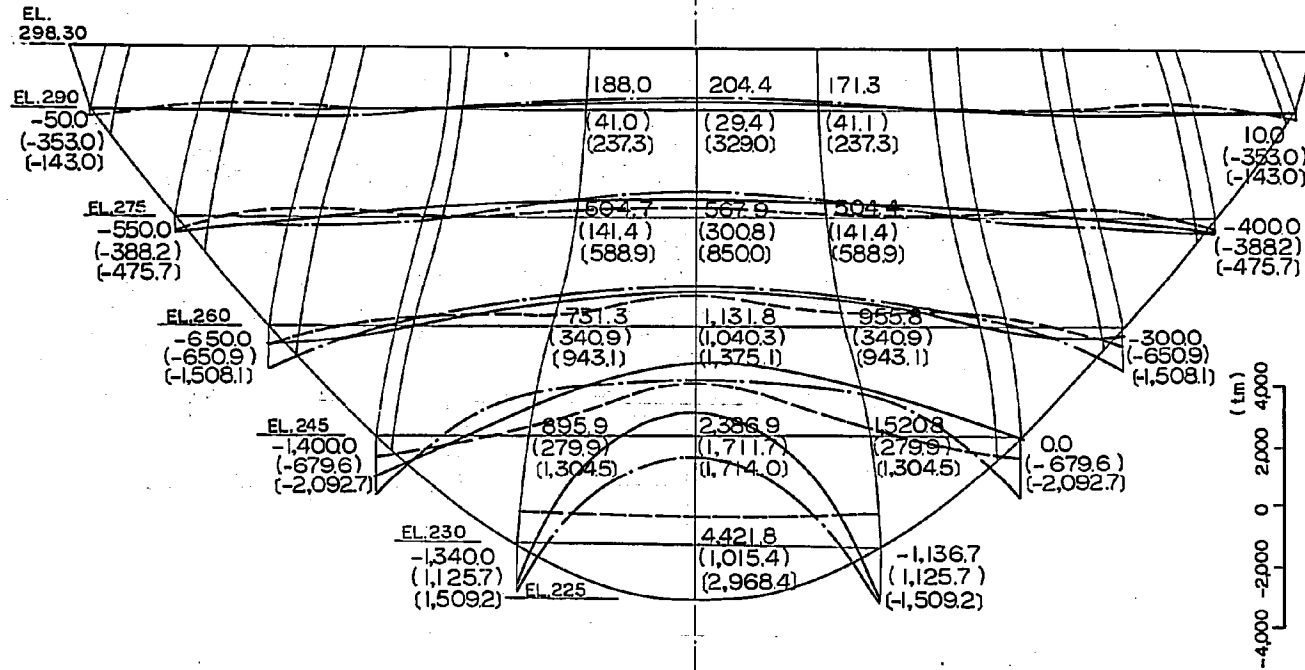
右岸



アーチ・モーメント分布図

左岸

右岸



片持梁モーメント分布図

左岸

右岸

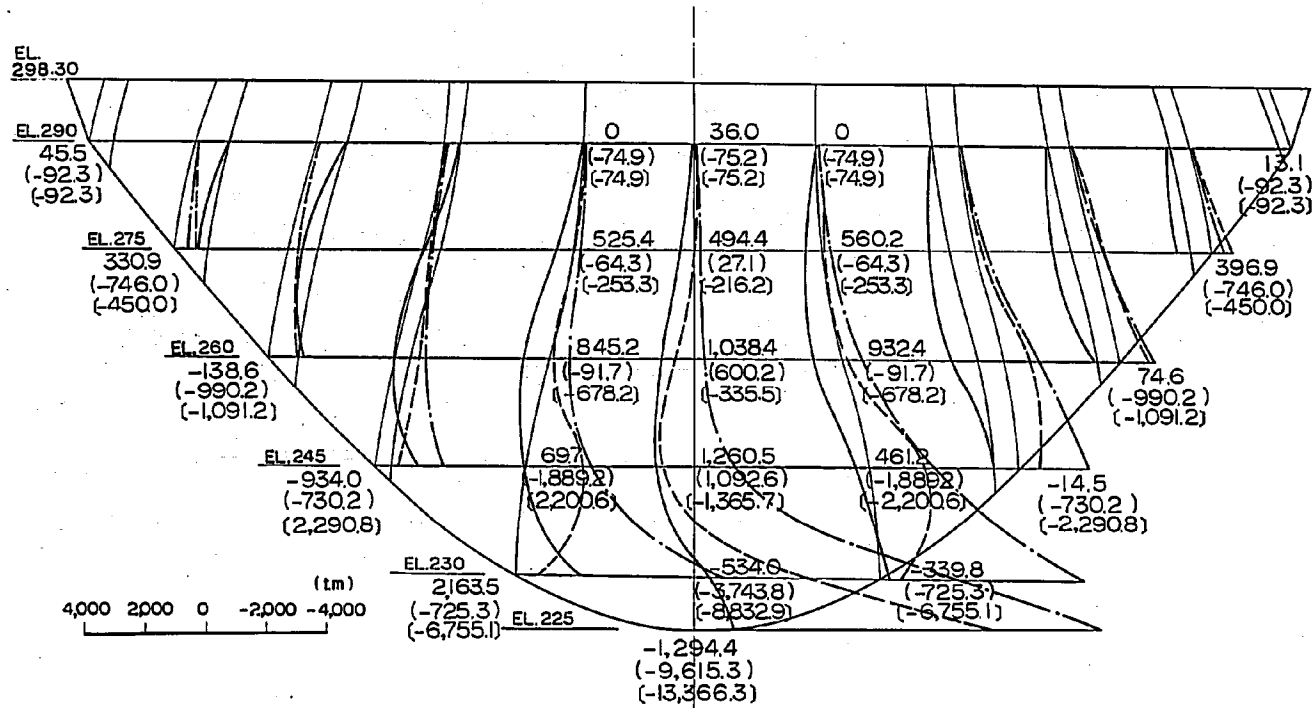
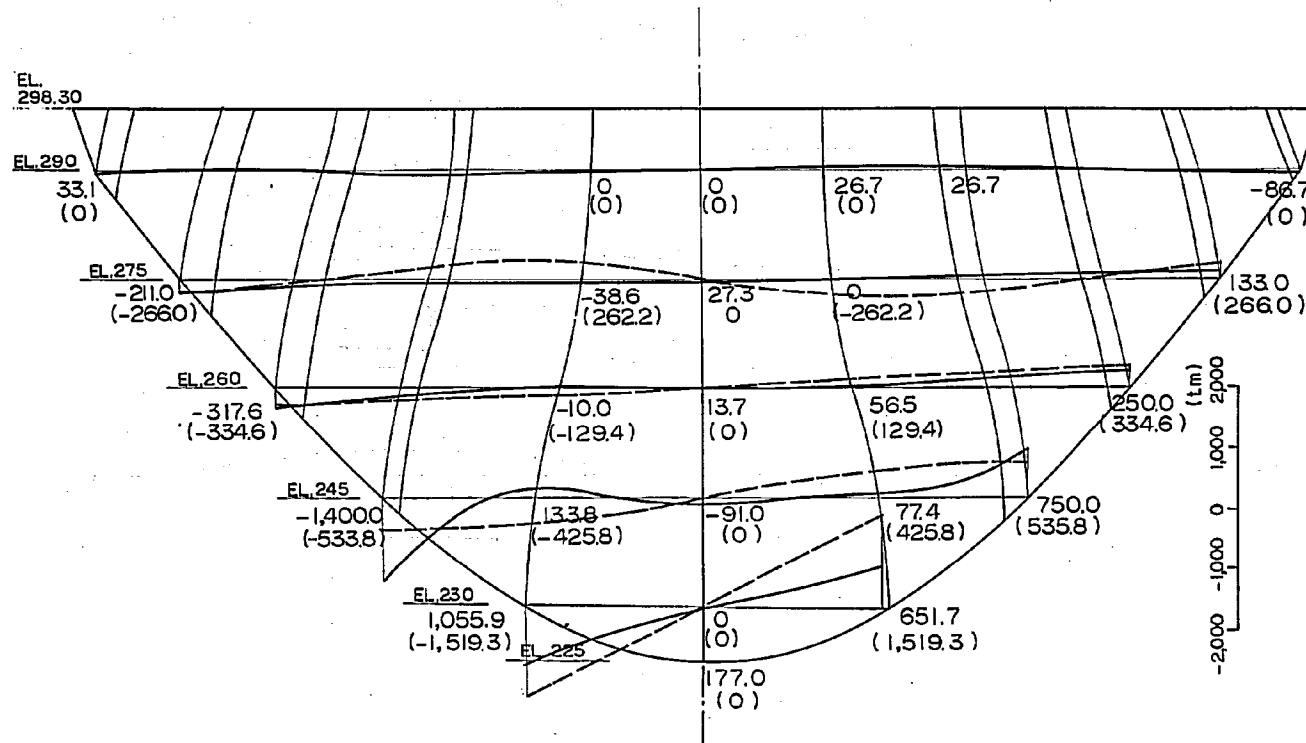


図 ト モ ー メ ン ト 振 捩

左 岸

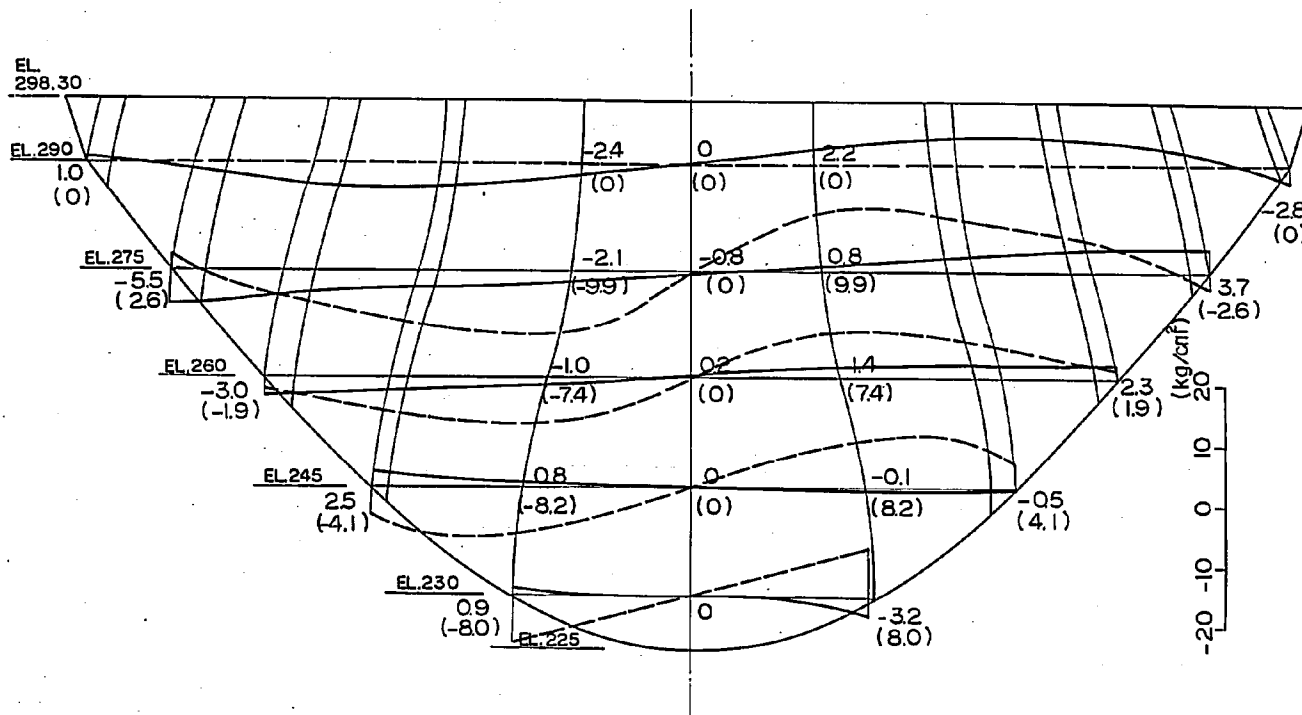
右 岸



剪 断 应 力 图 (上 流 面)

左 岸

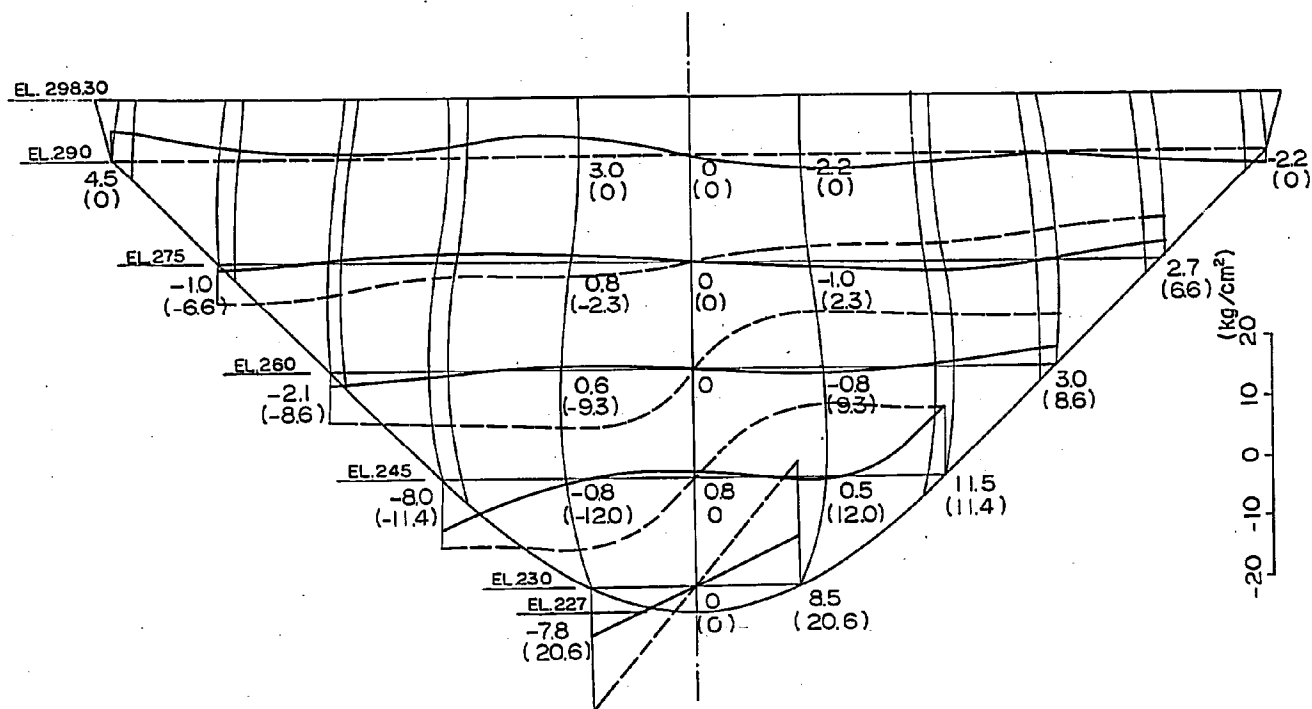
右 岸



剪 断 应 力 图 (下流面)

右 岸

左 岸



室 牧 ダ ム

€

半径方向撓み図

左岸

右岸

EL.261

EL.253

EL.245

EL.230

EL.215

EL.200

EL.190

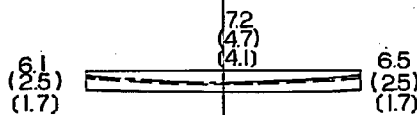
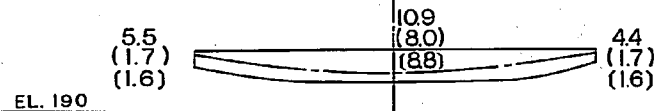
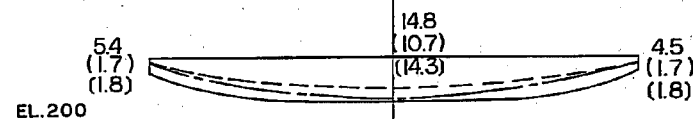
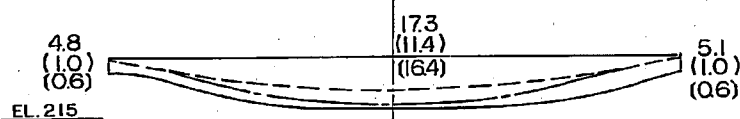
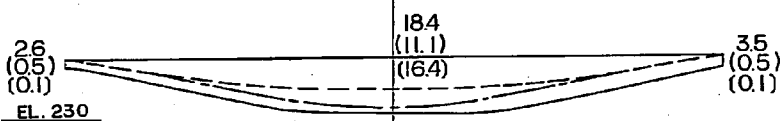
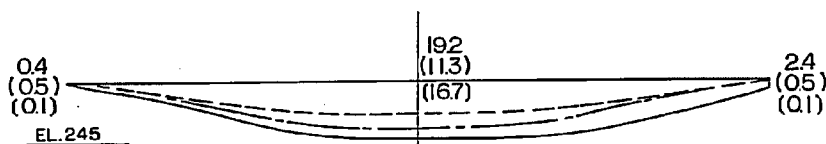
EL.185

20 10 0 -10 -20 (mm)

左 岸

右 岸

EL. 253



(mm)

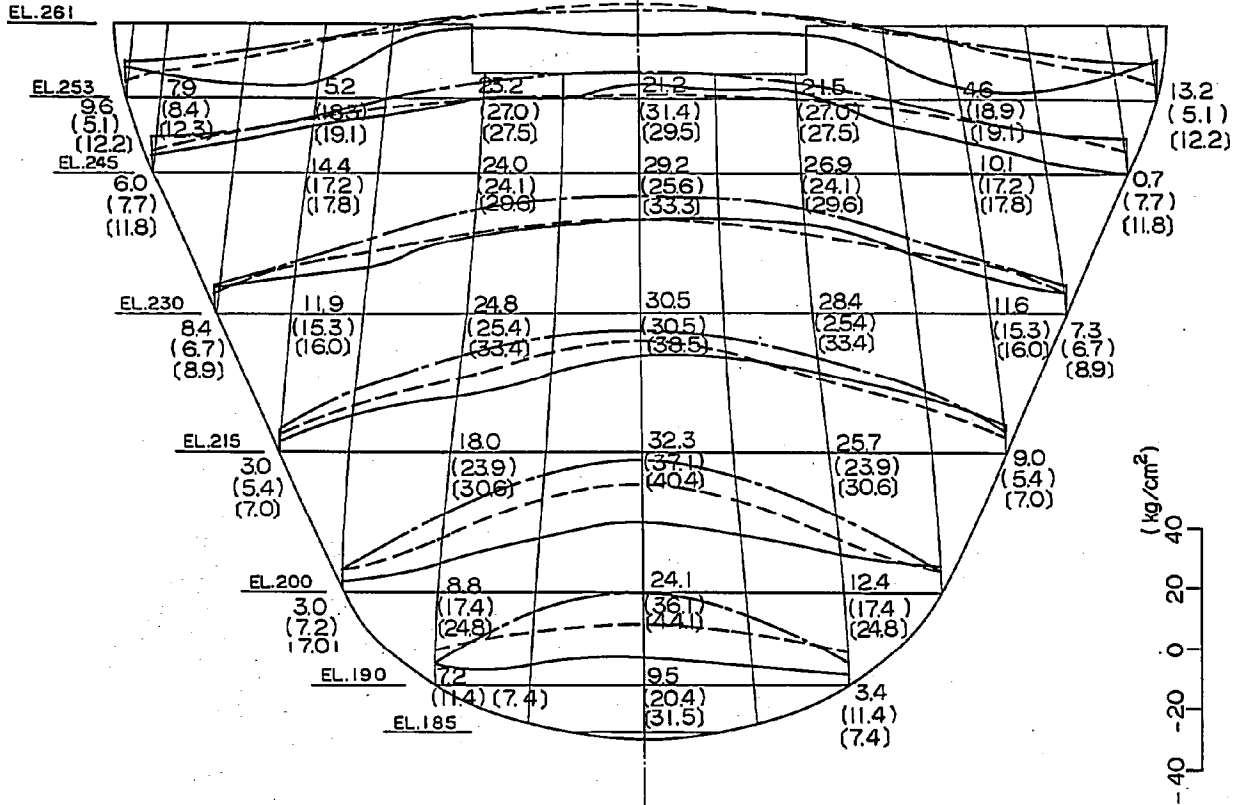
40
20
0
-20
-40

断面方向掘み図
フェーンメント

水平方向应力分布图（上流面）

左岸

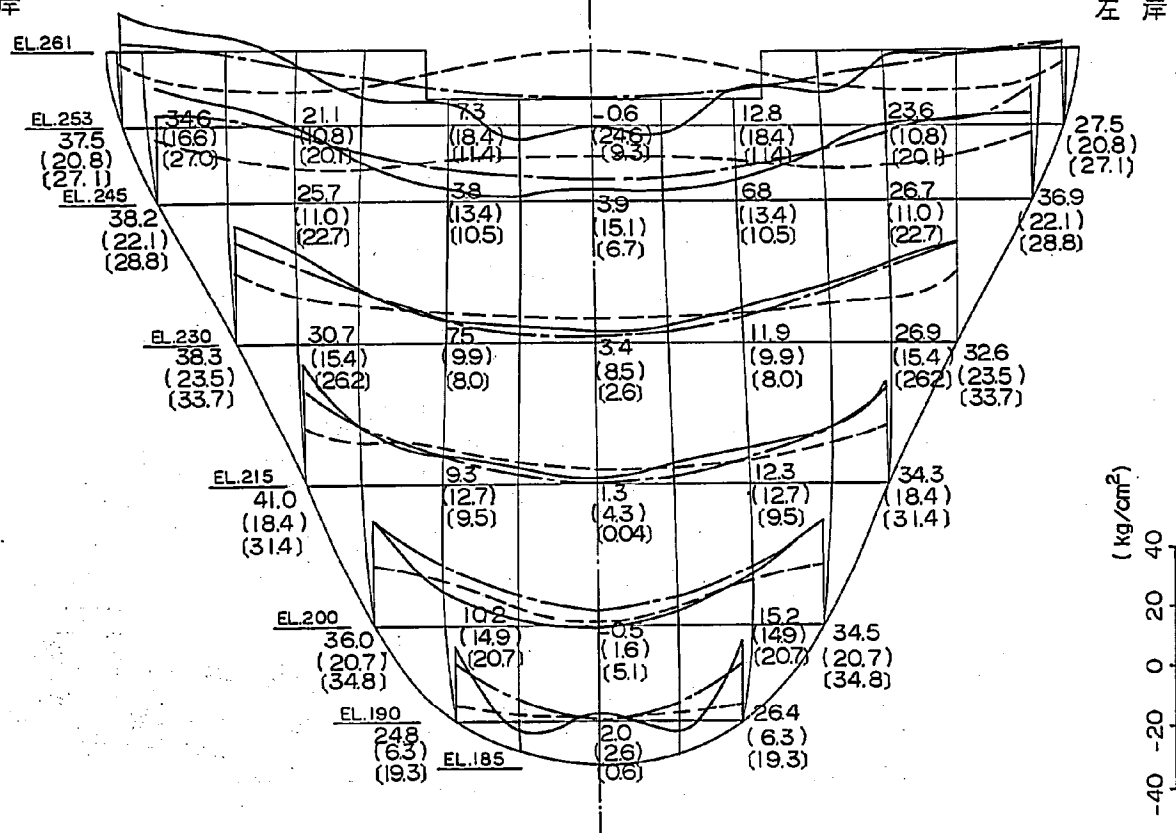
右岸



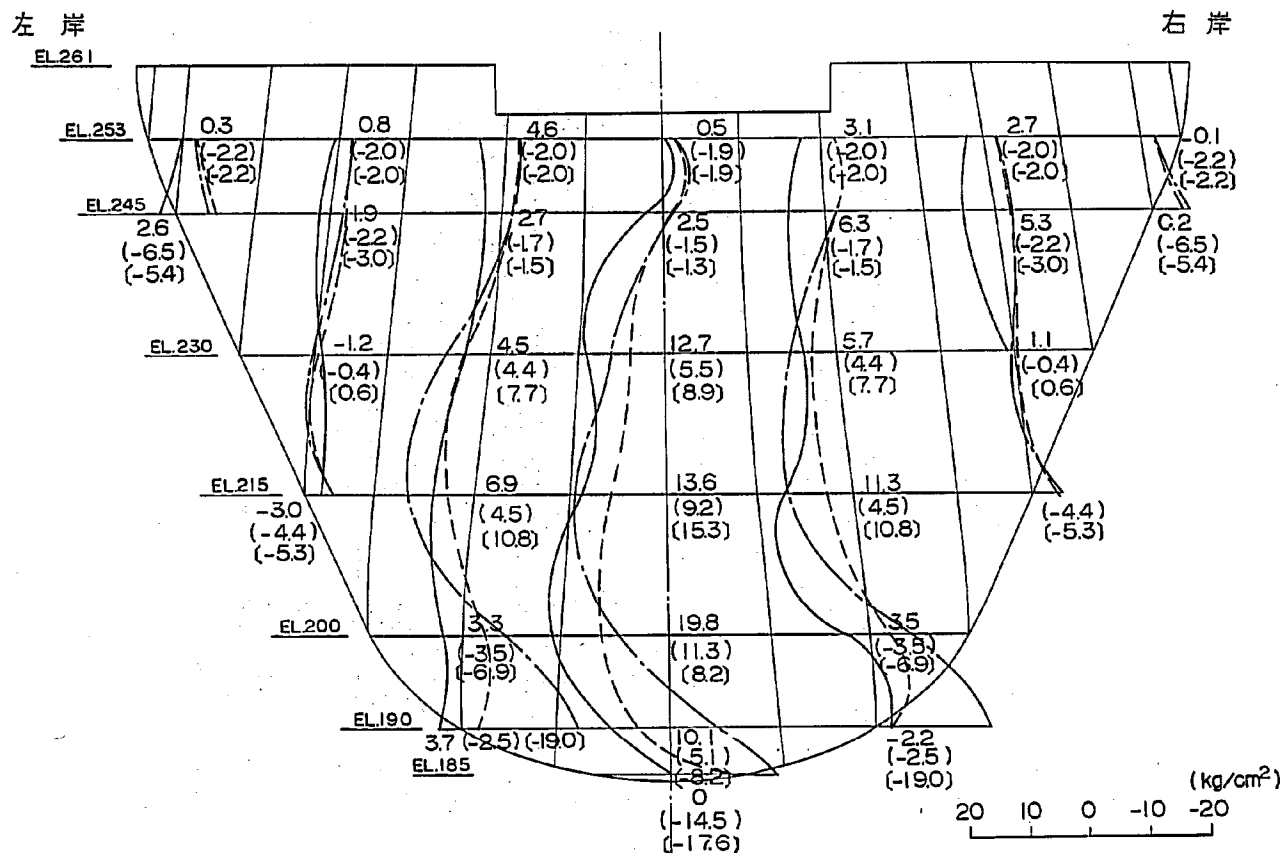
水平方向応力分布図（下流面）

右岸

左岸



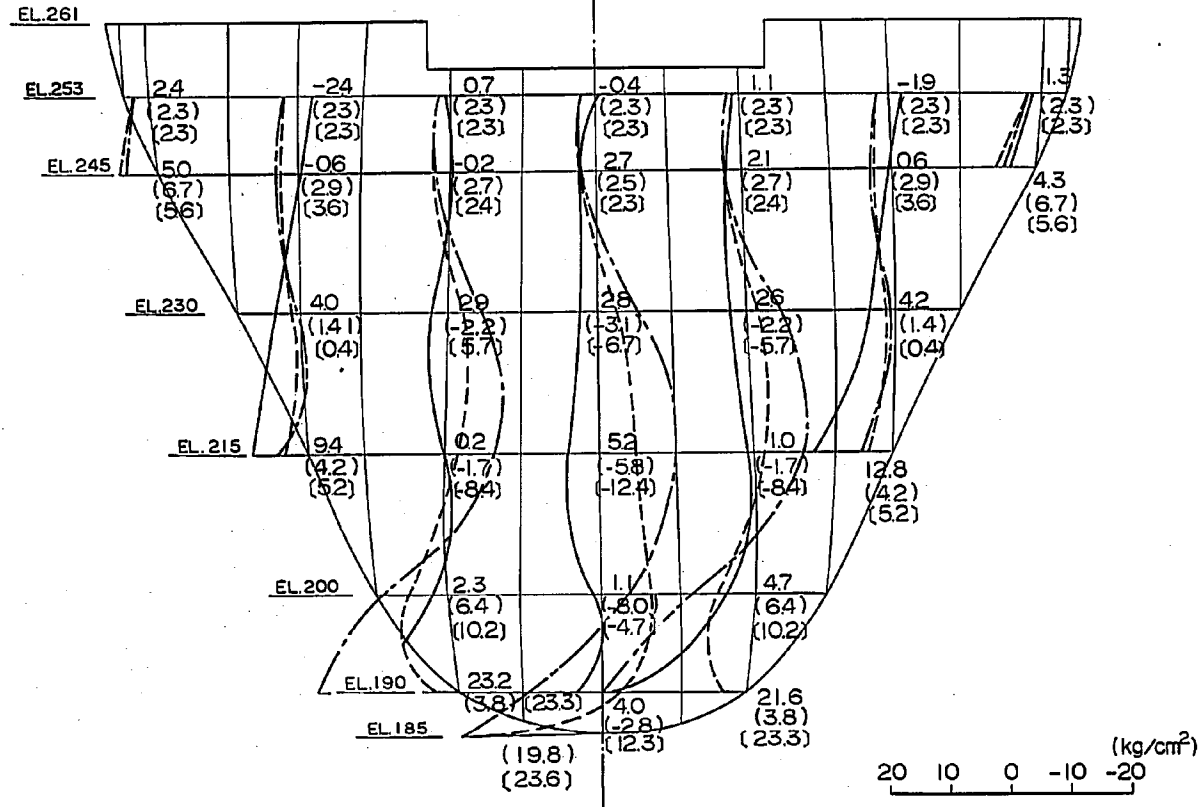
鉛直方向応力分布図（上流面）



鉛直方向応力分布図（下流面）

右岸

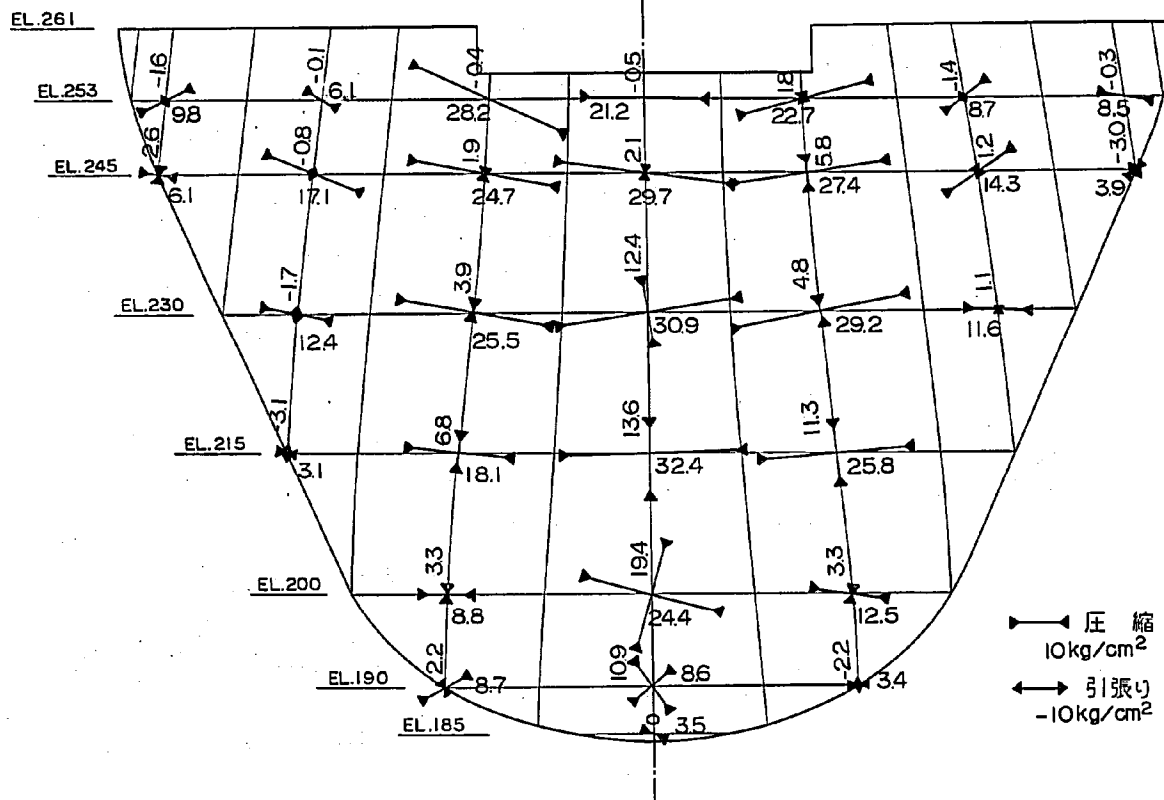
左岸



主 應 力 図 (上流面)
実 験 値

左 岸

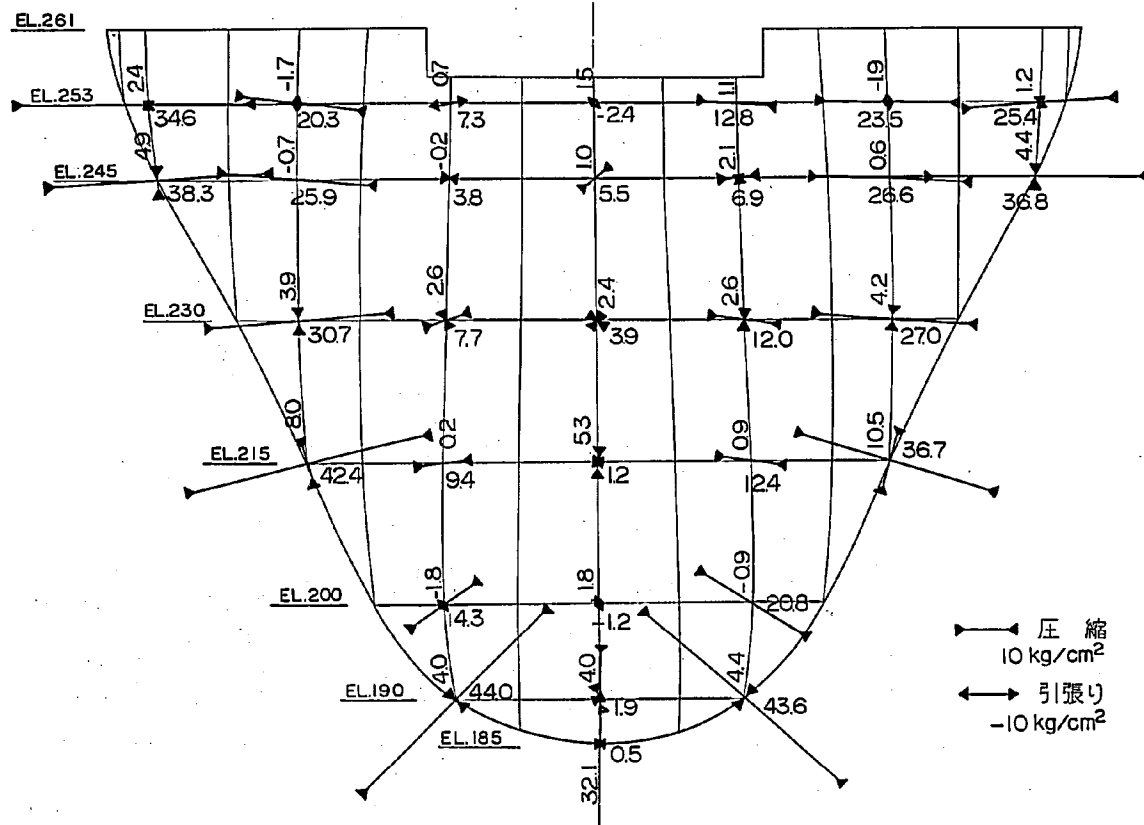
右 岸



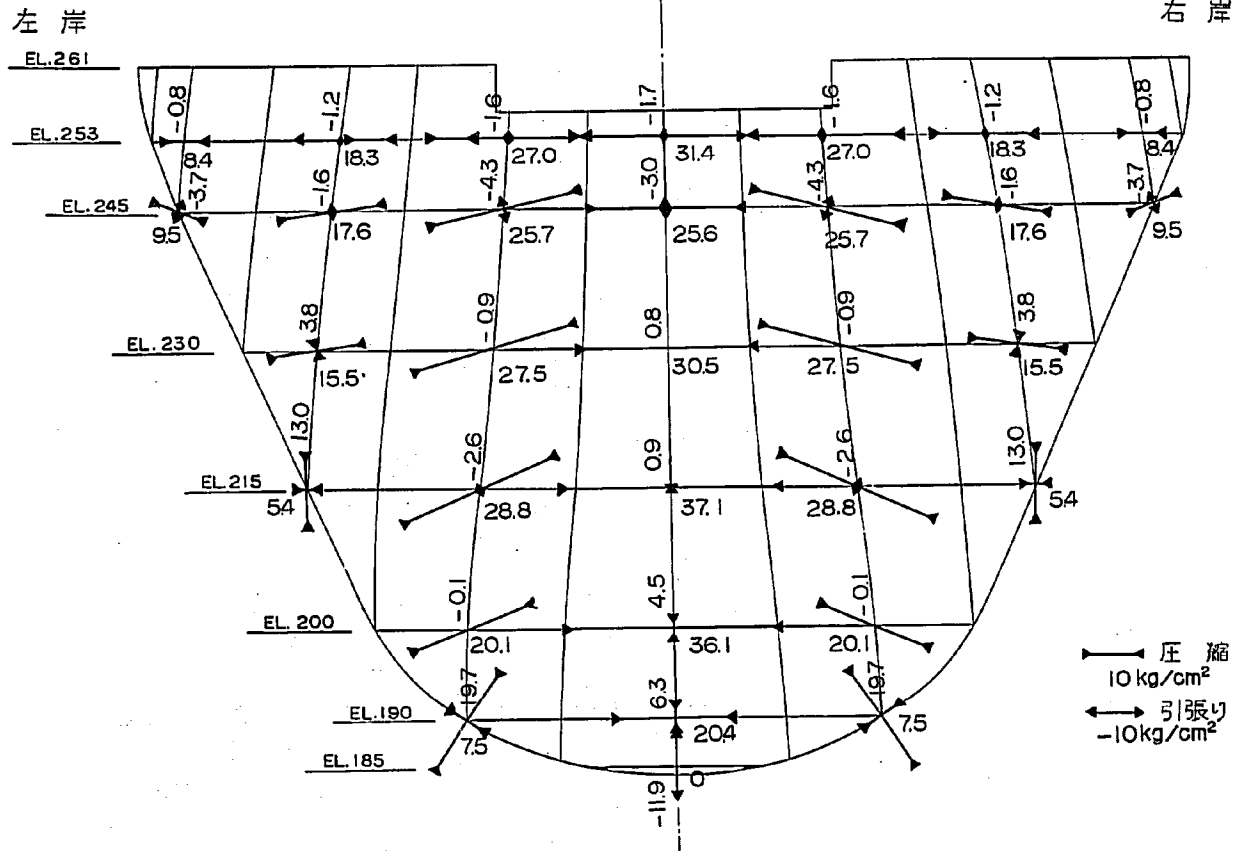
主 応 力 図 (下 流 面)
実 験 値

右 岸

左 岸



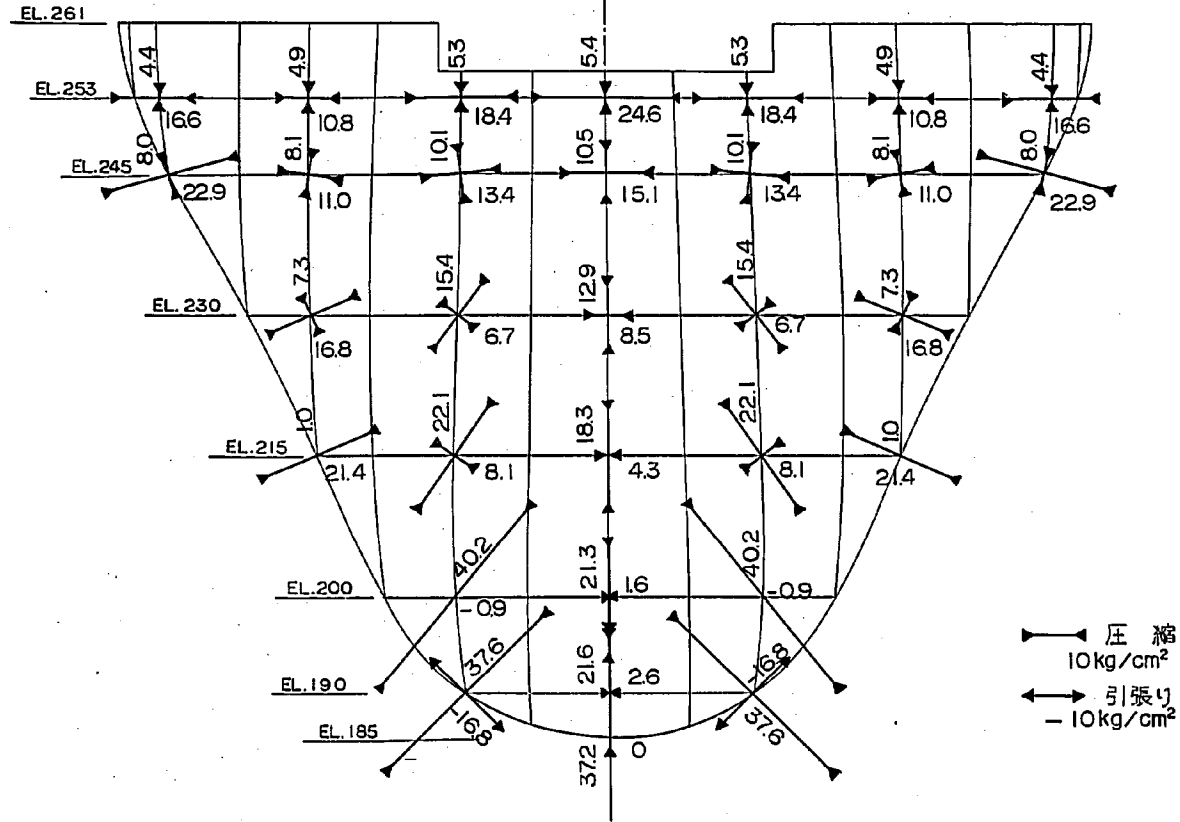
主 応 力 図 (上流面)
計 算 値



主 応 力 図 (下流面)
計算値

右 岸

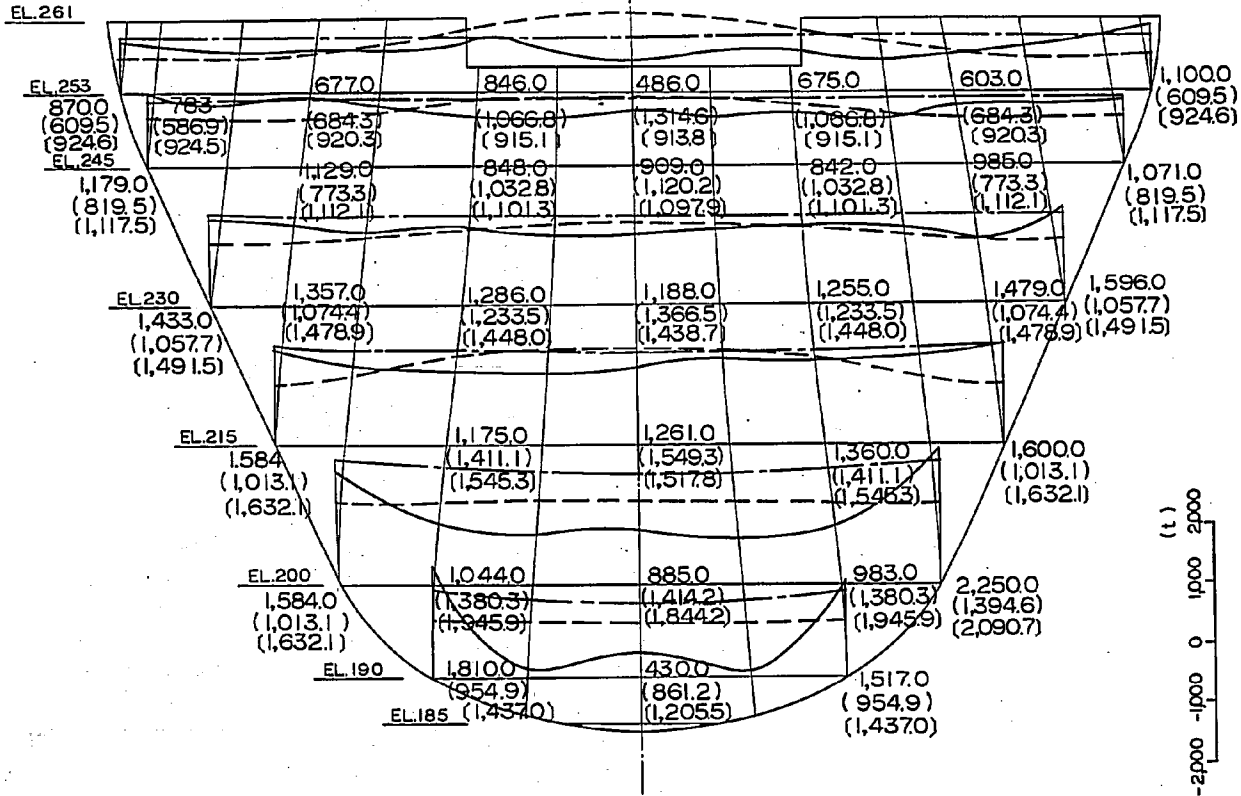
左 岸



アーチ・スラスト図

左岸

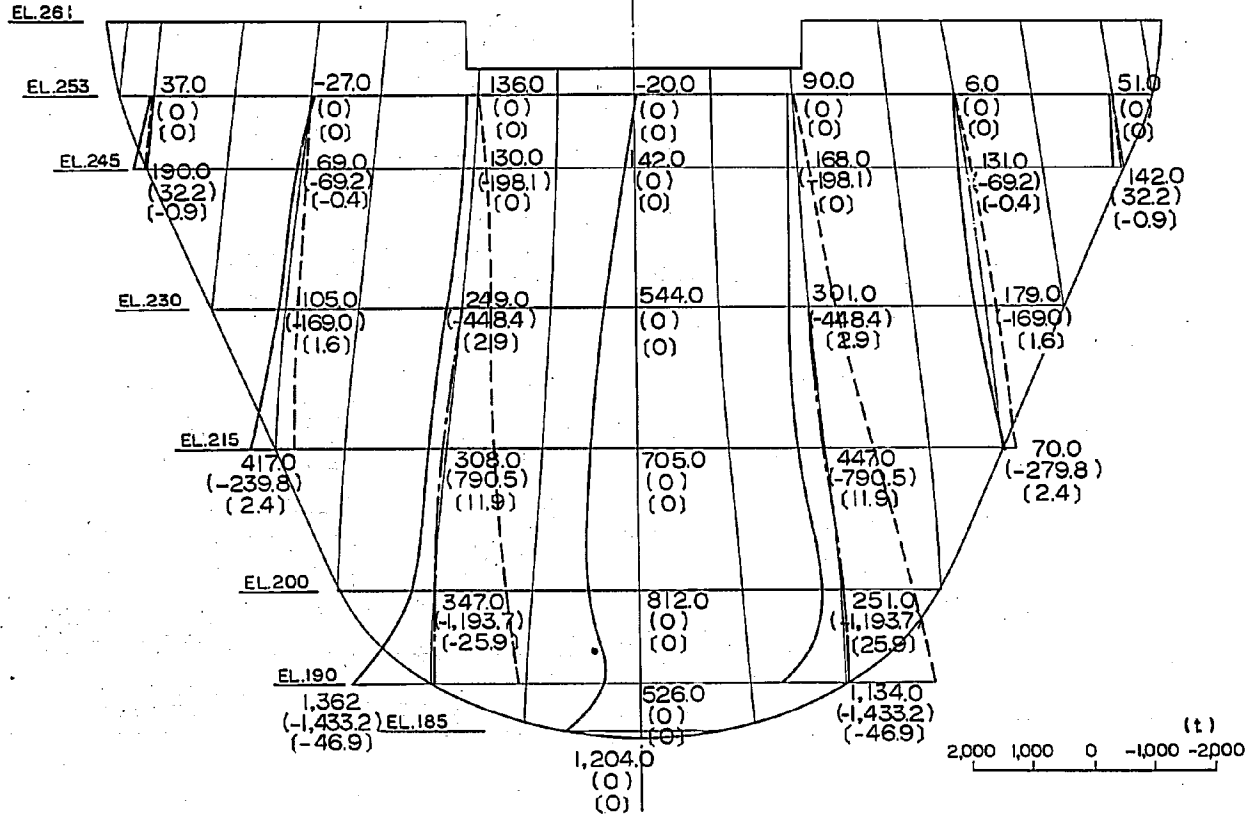
右岸



片持梁スラスト図

左岸

右岸

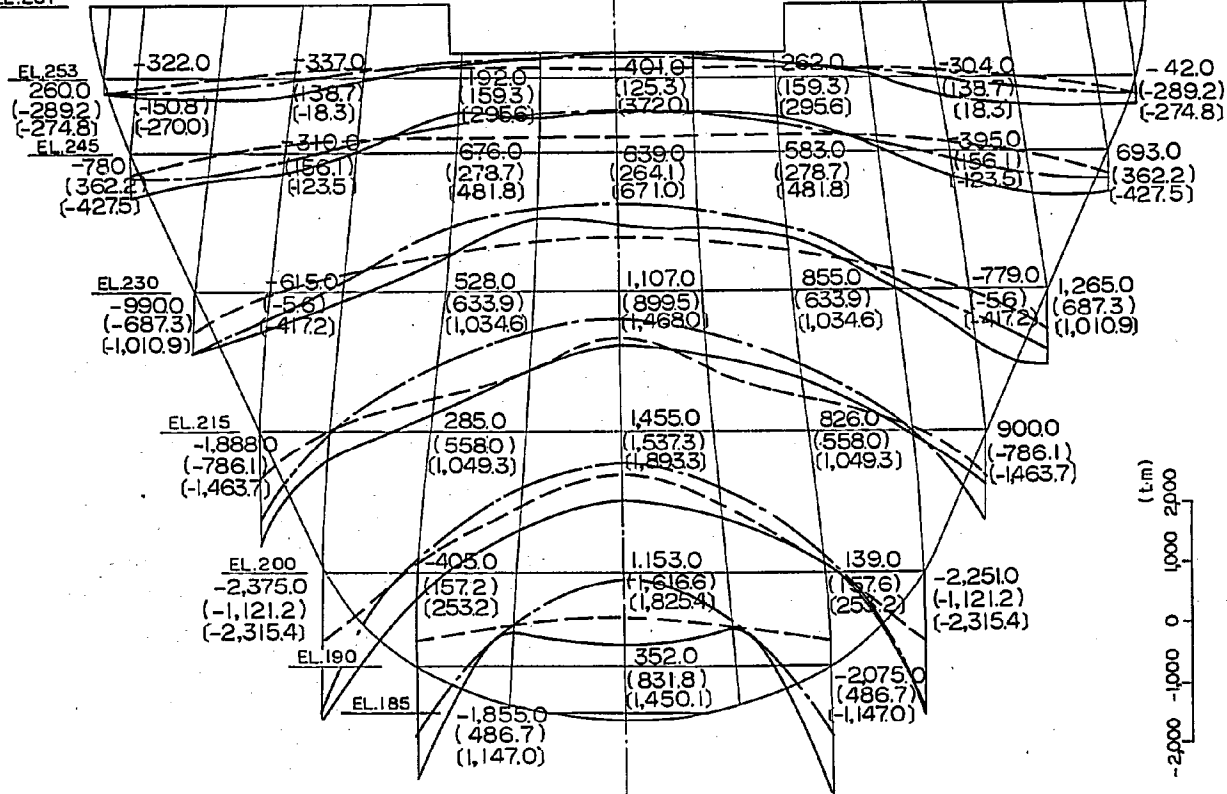


アーチ・モーメント分布図

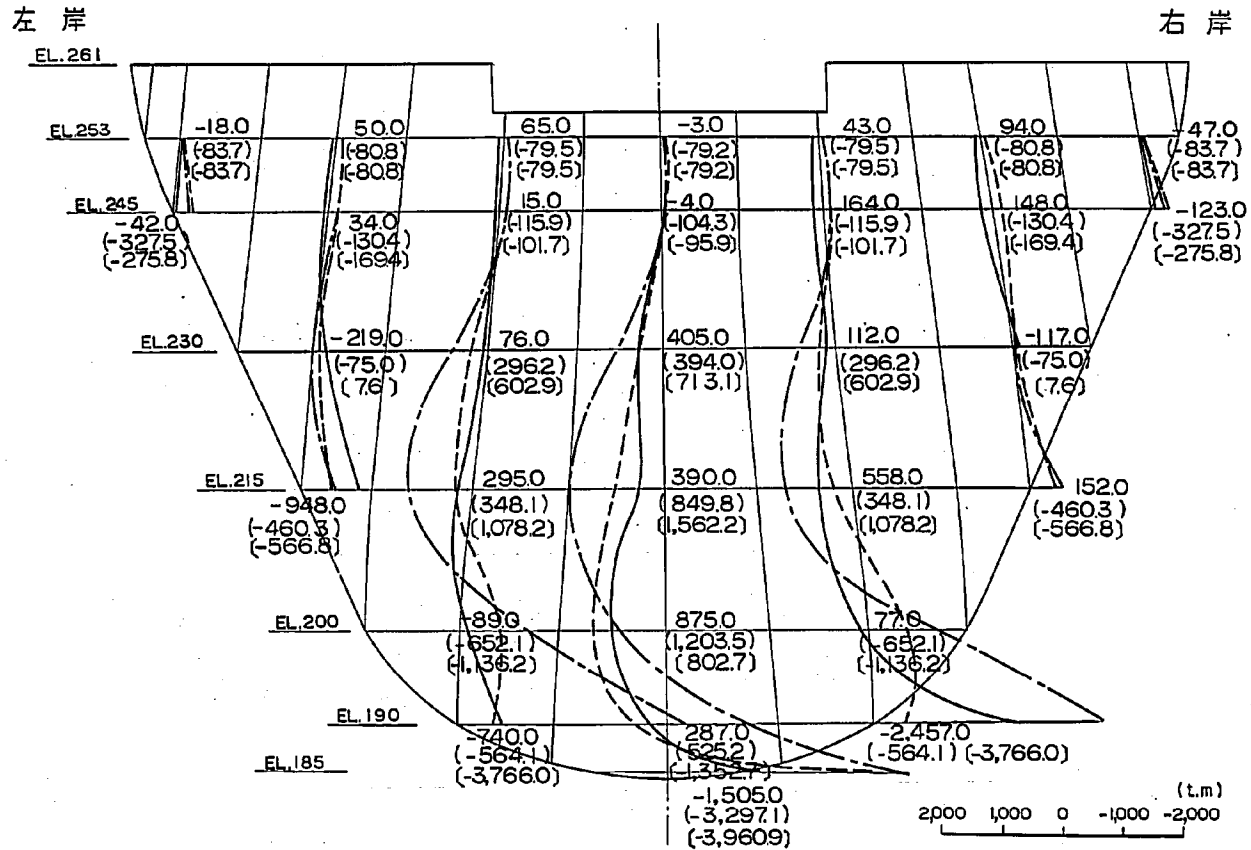
左岸

右岸

EL.261



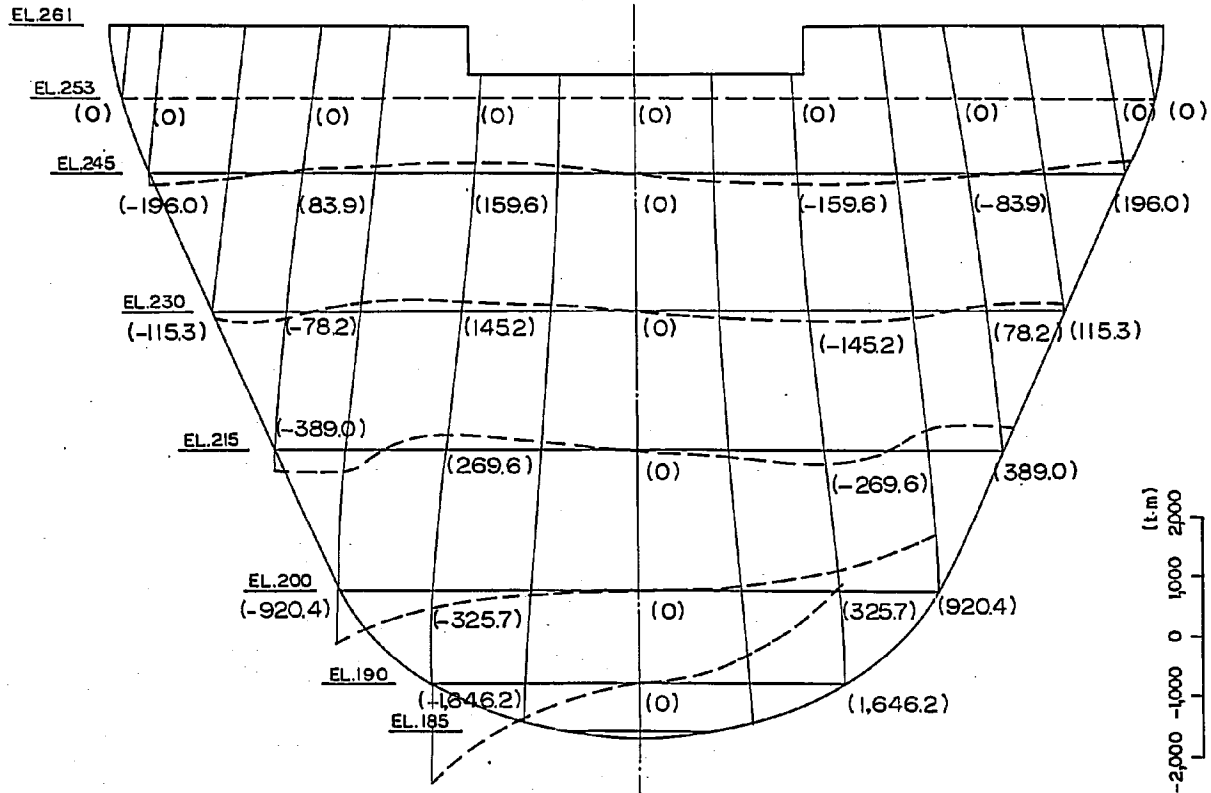
片持梁モーメント分布図



捩 れ モ ー メ ン ト 図

左 岸

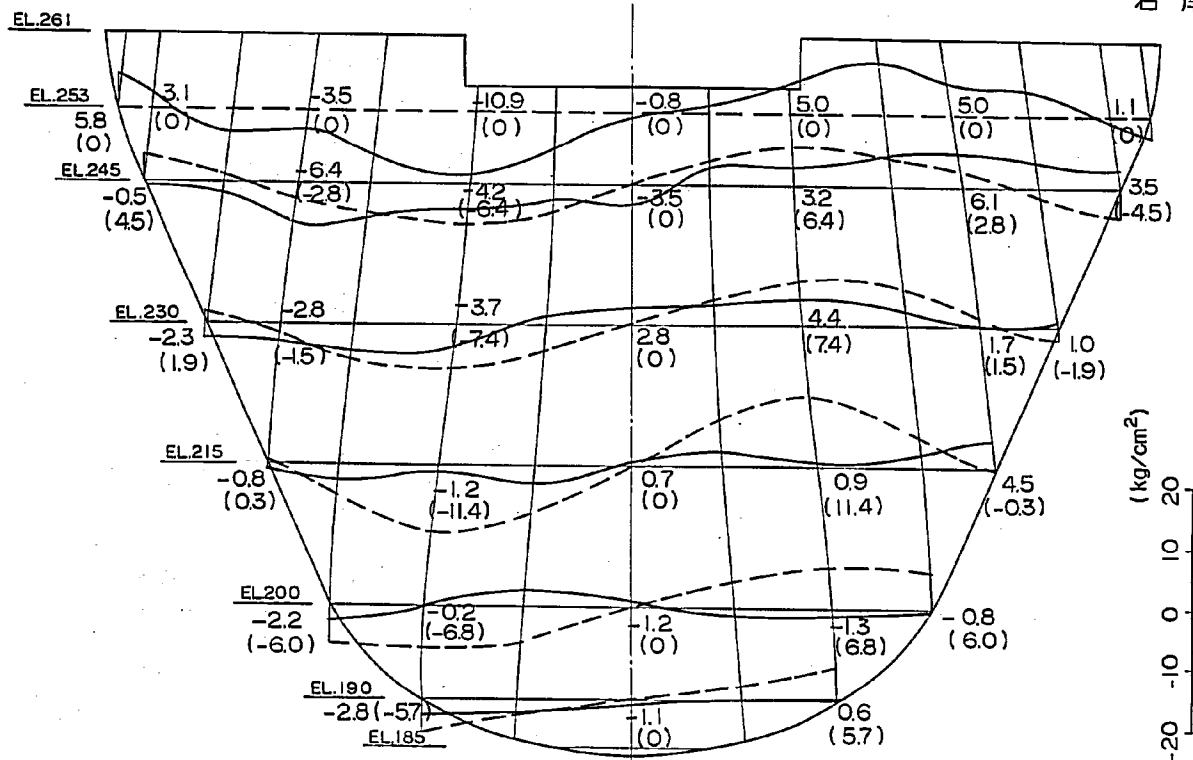
右 岸



剪 断 应 力 图 (上 流 面)

左 岸

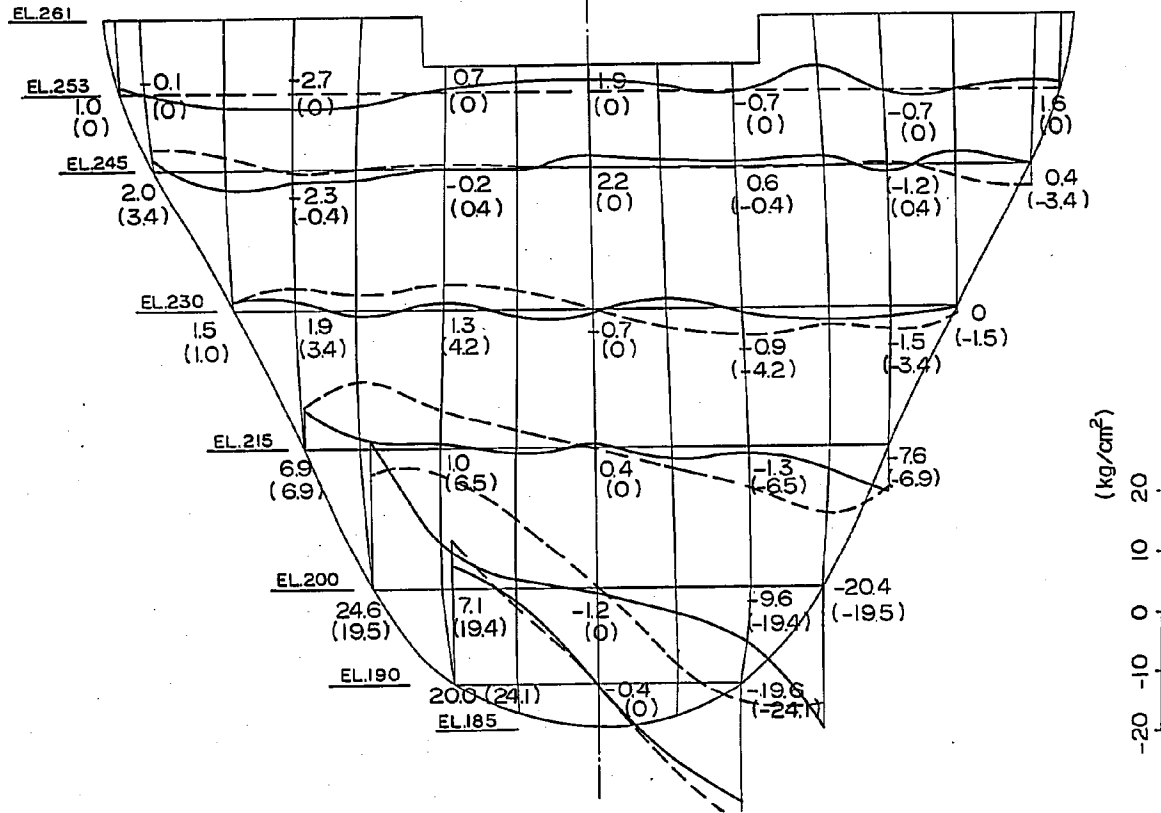
右 岸



剪 断 应 力 图 (下流面)

右 岸

左 岸



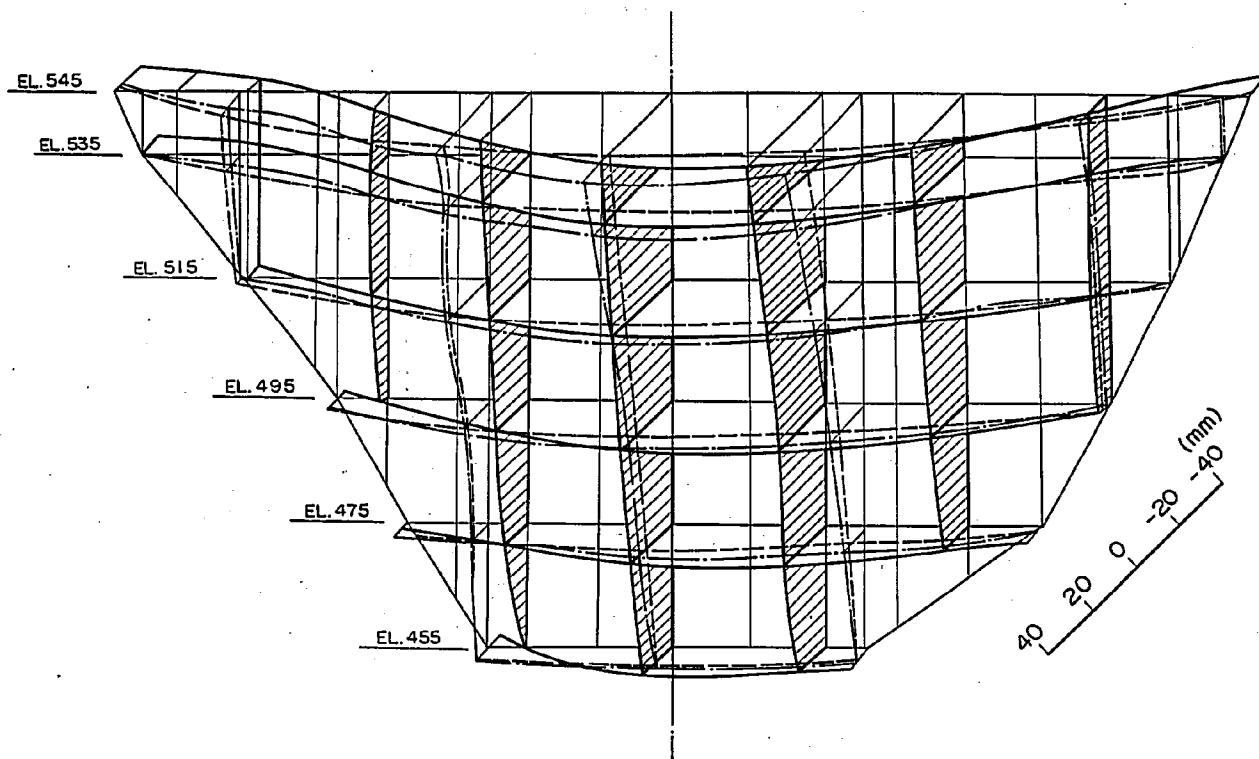
ム ダ 瀬 二

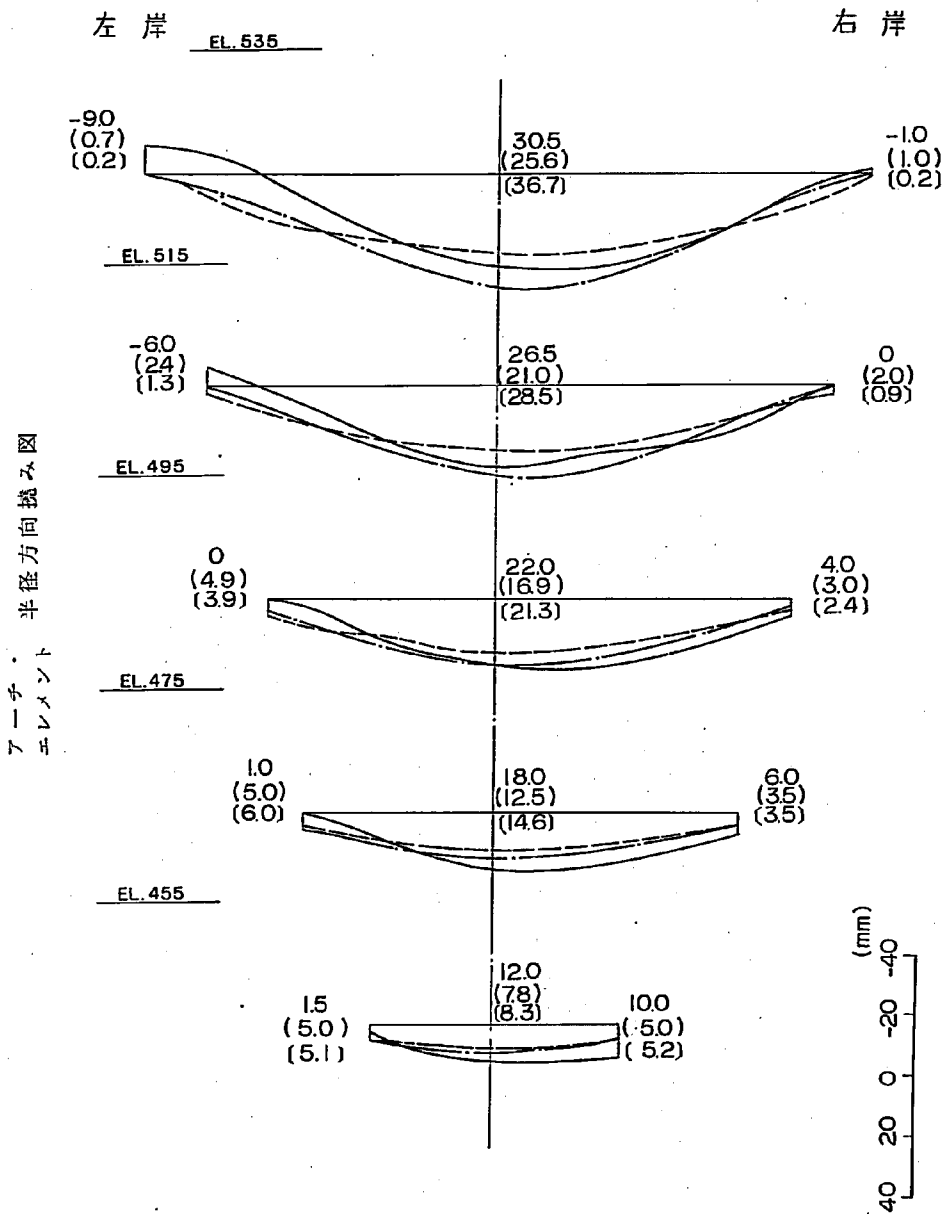
℃

半径方向撓み図

左岸

右岸

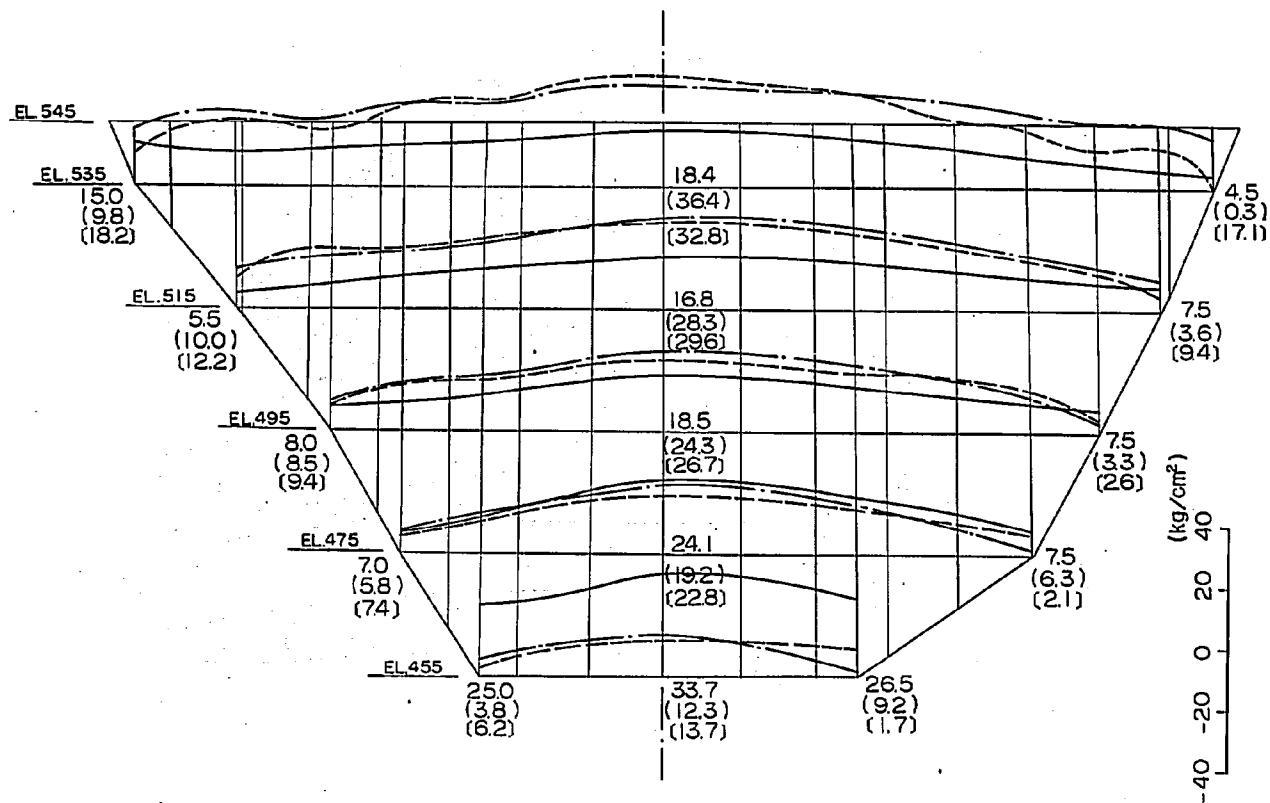




水平方向应力分布图（上流面）

左岸

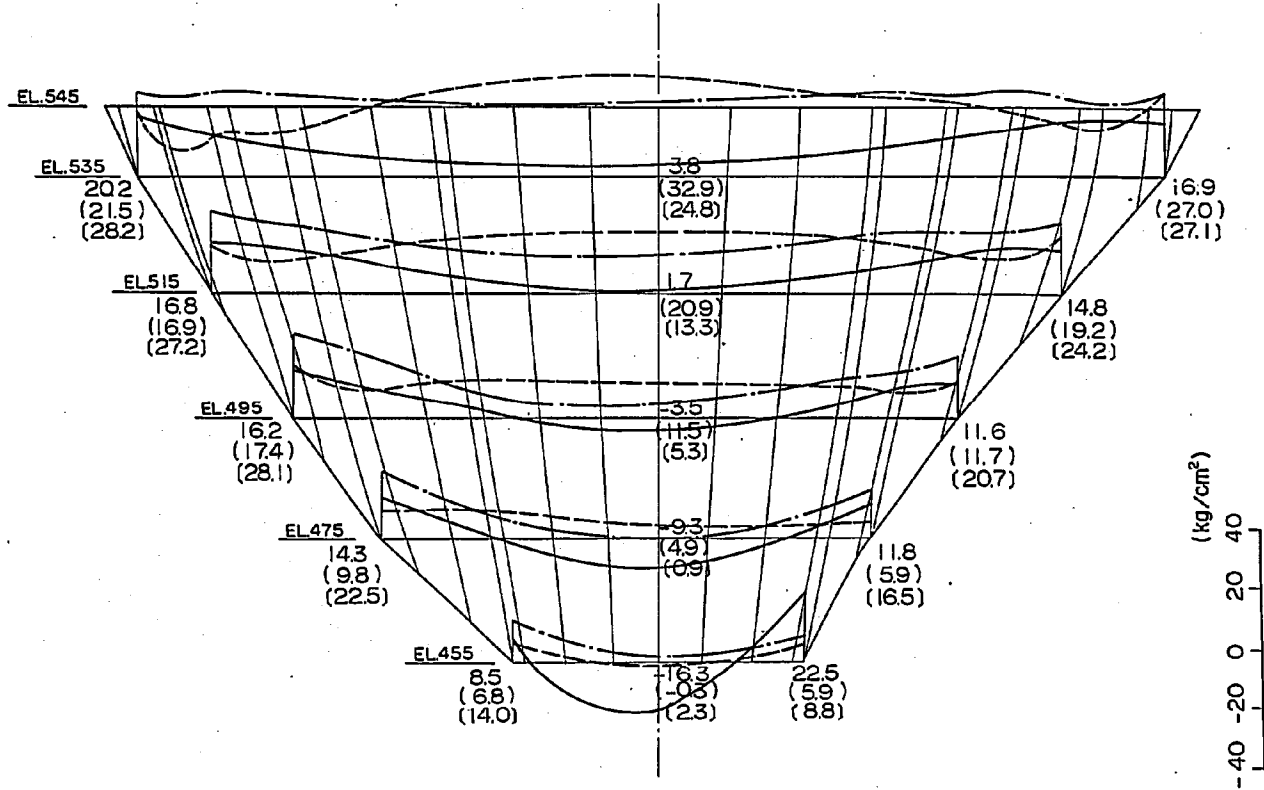
右岸



水平方向应力分布图（下流面）

右岸

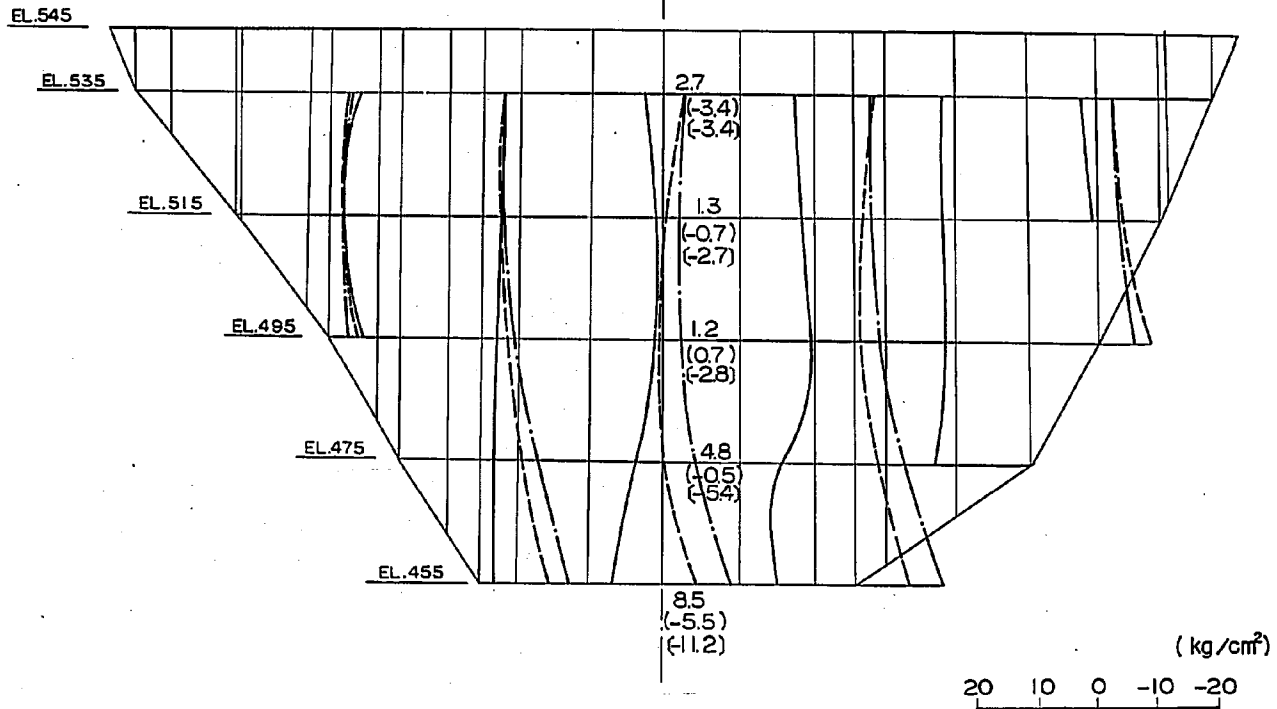
左岸



鉛直方向応力分布図（上流面）

左 岸

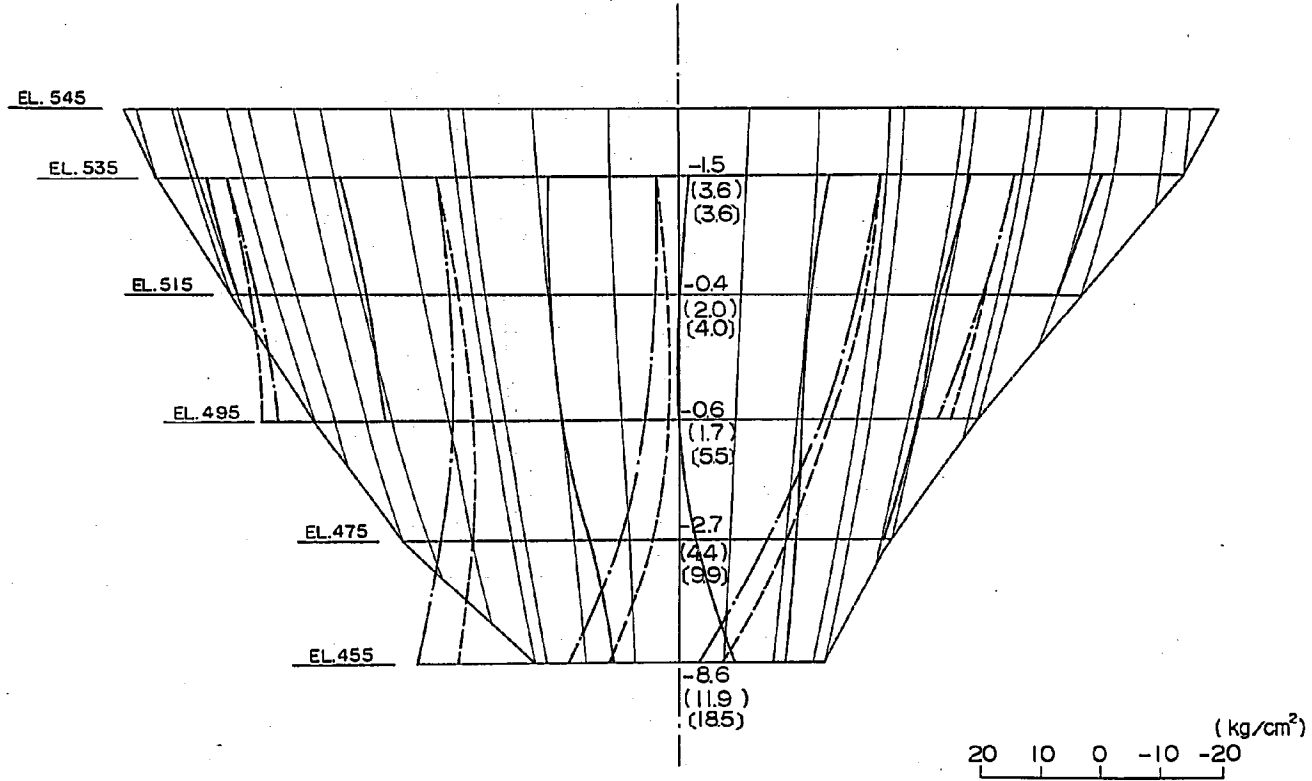
右 岸



鉛直方向応力分布図（下流面）

右岸

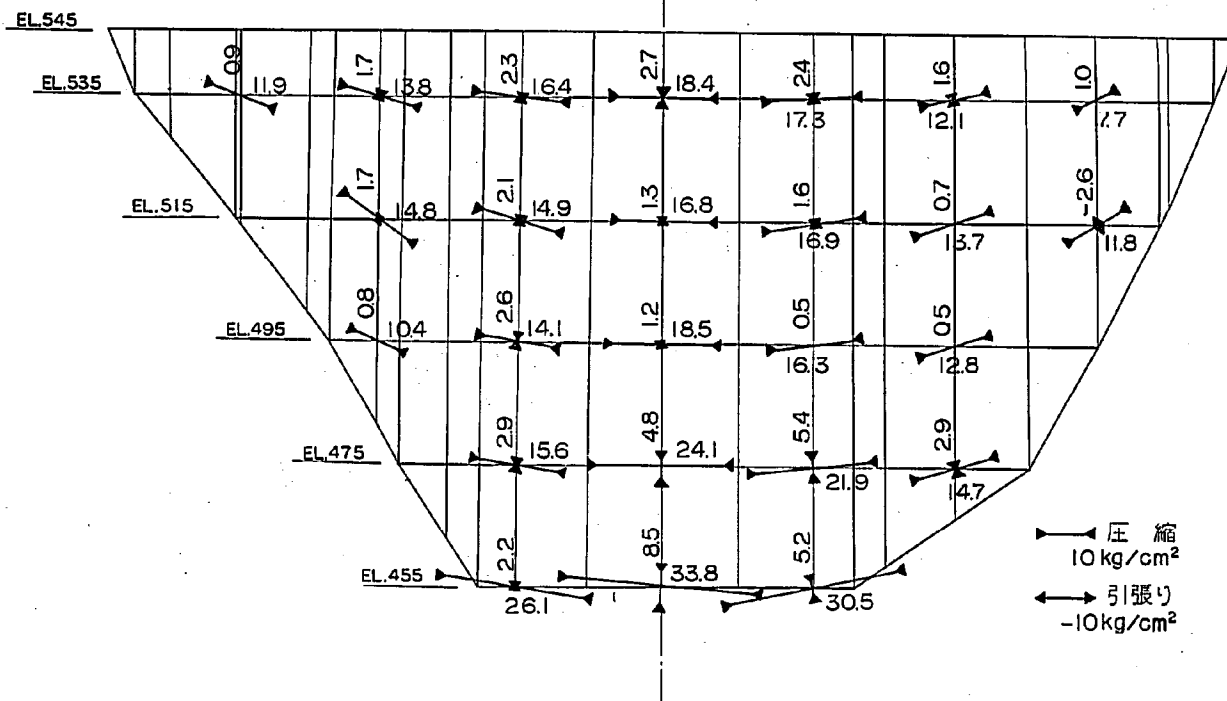
左岸



主 応 力 図 (上流面)
実 験 値

左 岸

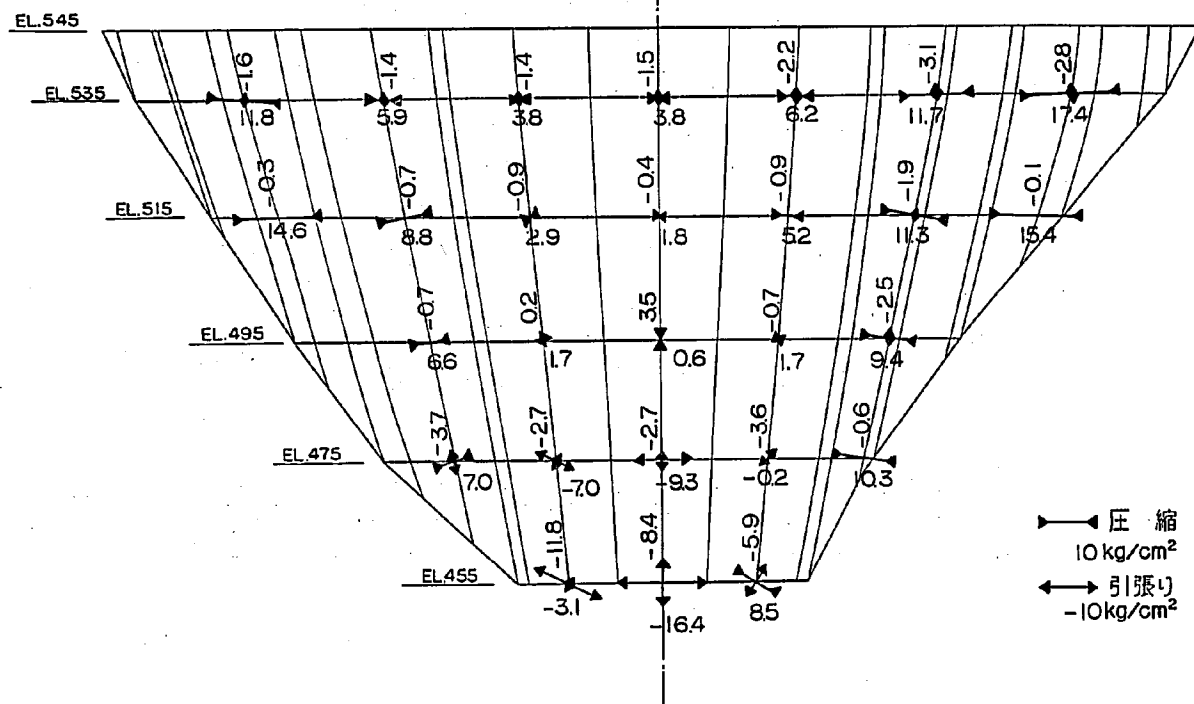
右 岸



主 應 力 図 (下 流 面)
実 験 値

右 岸

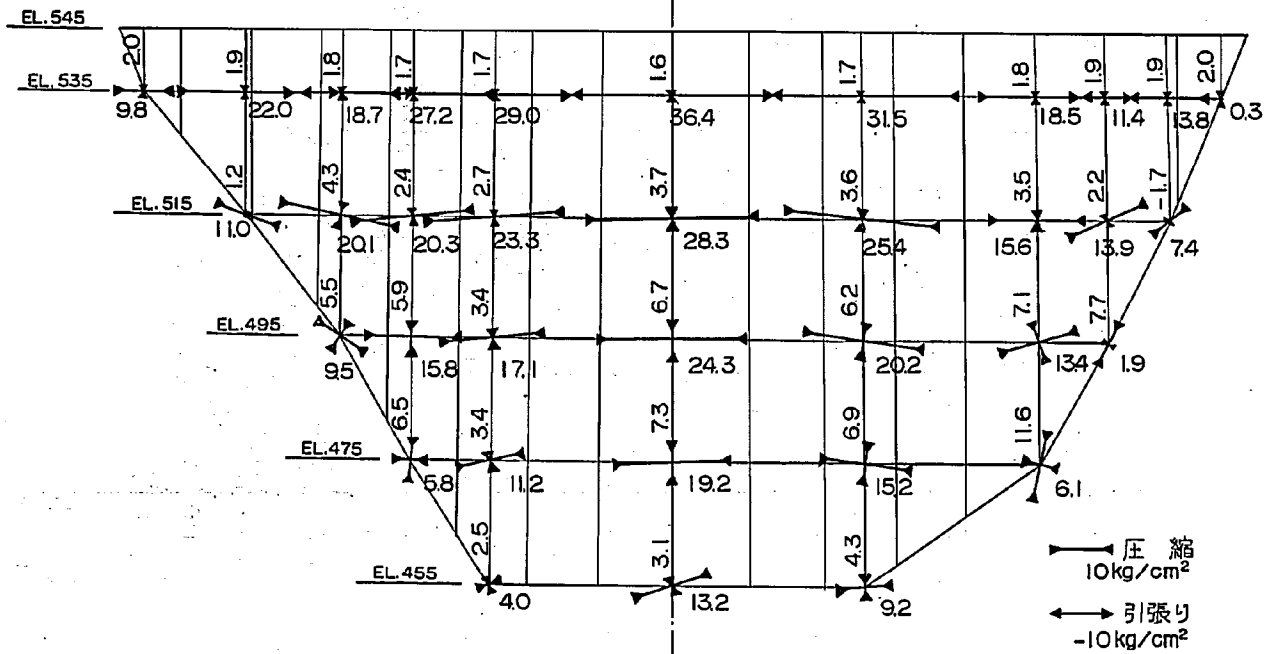
左 岸



主 応 力 図 (上流面)
計 算 値

左 岸

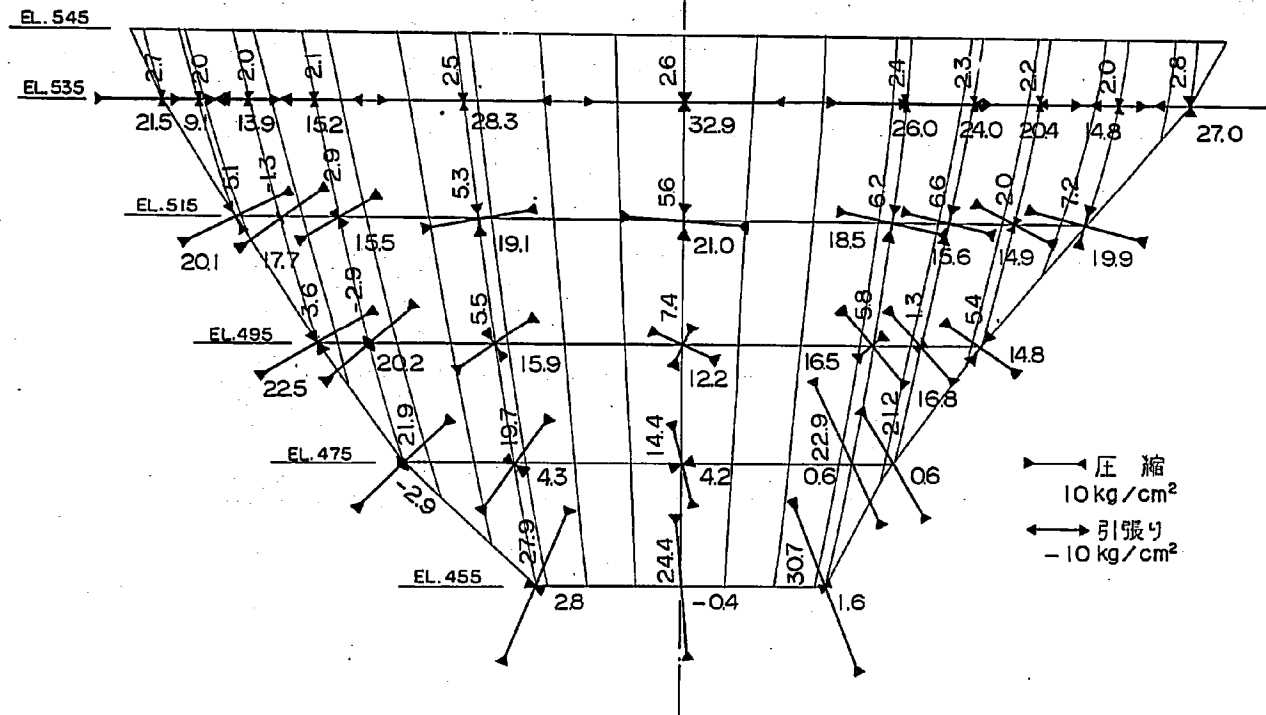
右 岸



主 応 力 図 (下流面)
計算値

右 岸

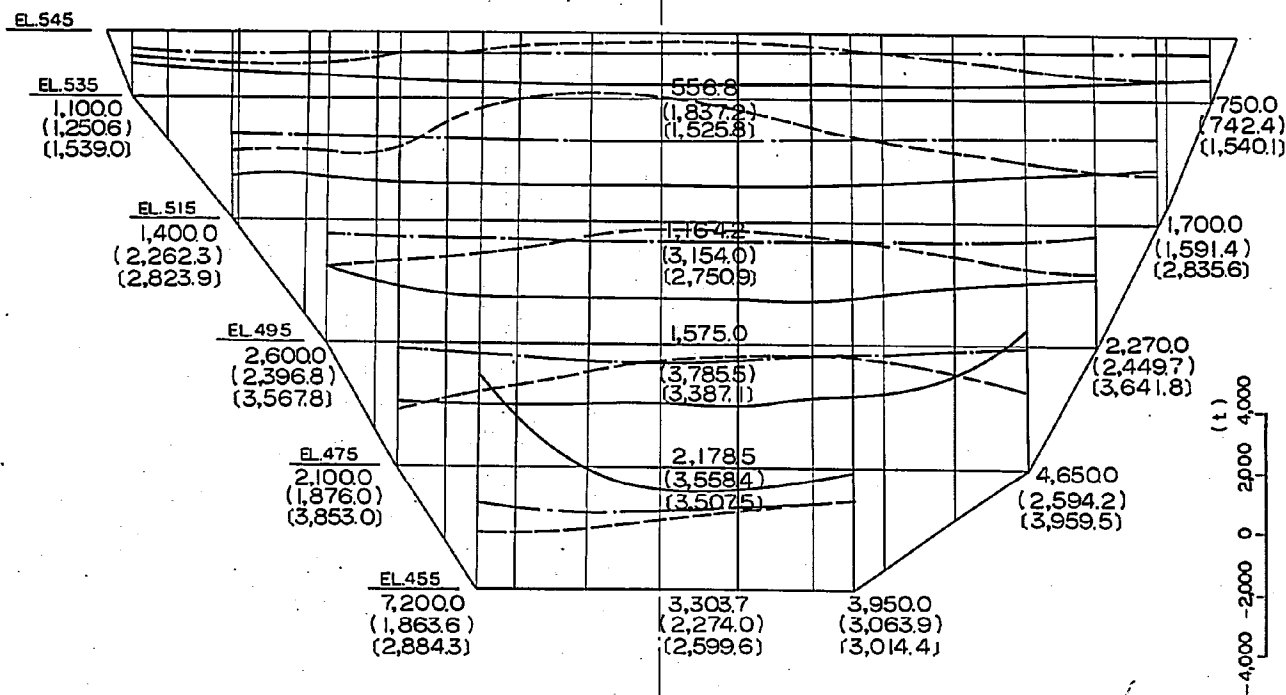
左 岸



アーチ・スラスト図

左岸

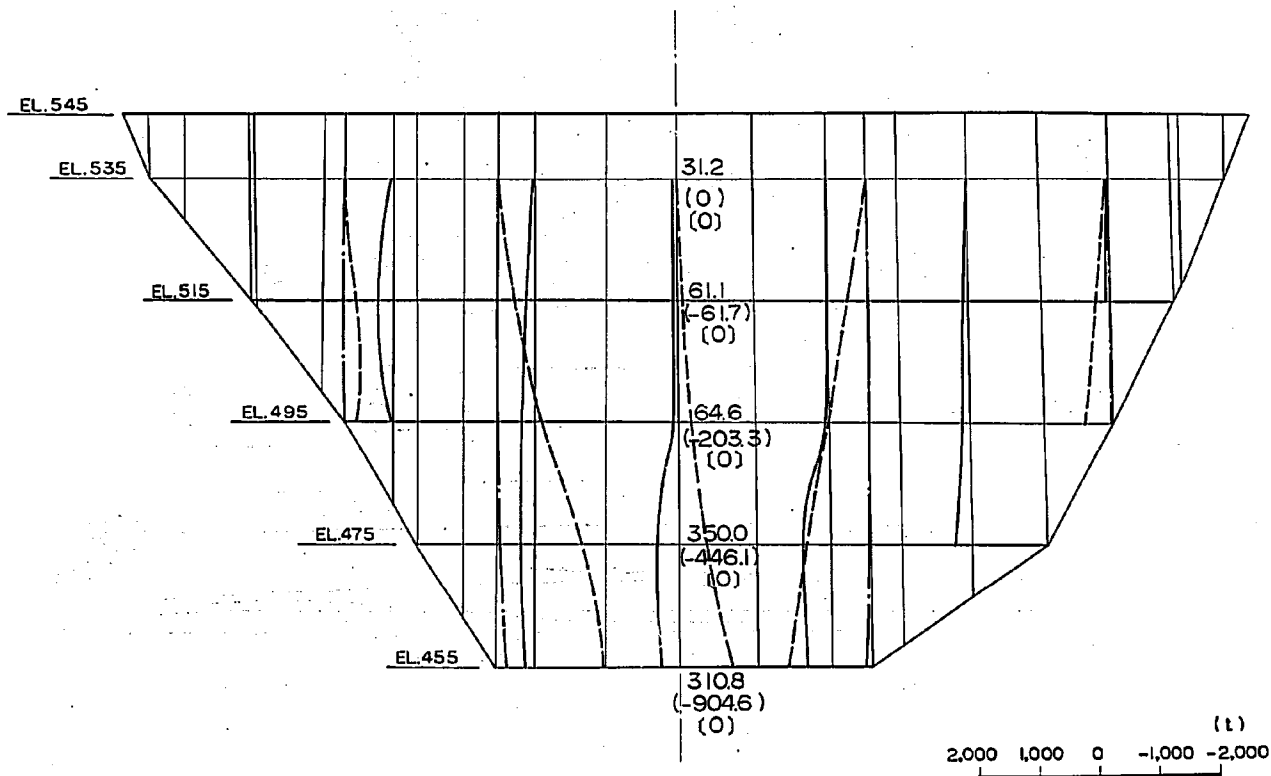
右岸



片持梁スラスト図

左岸

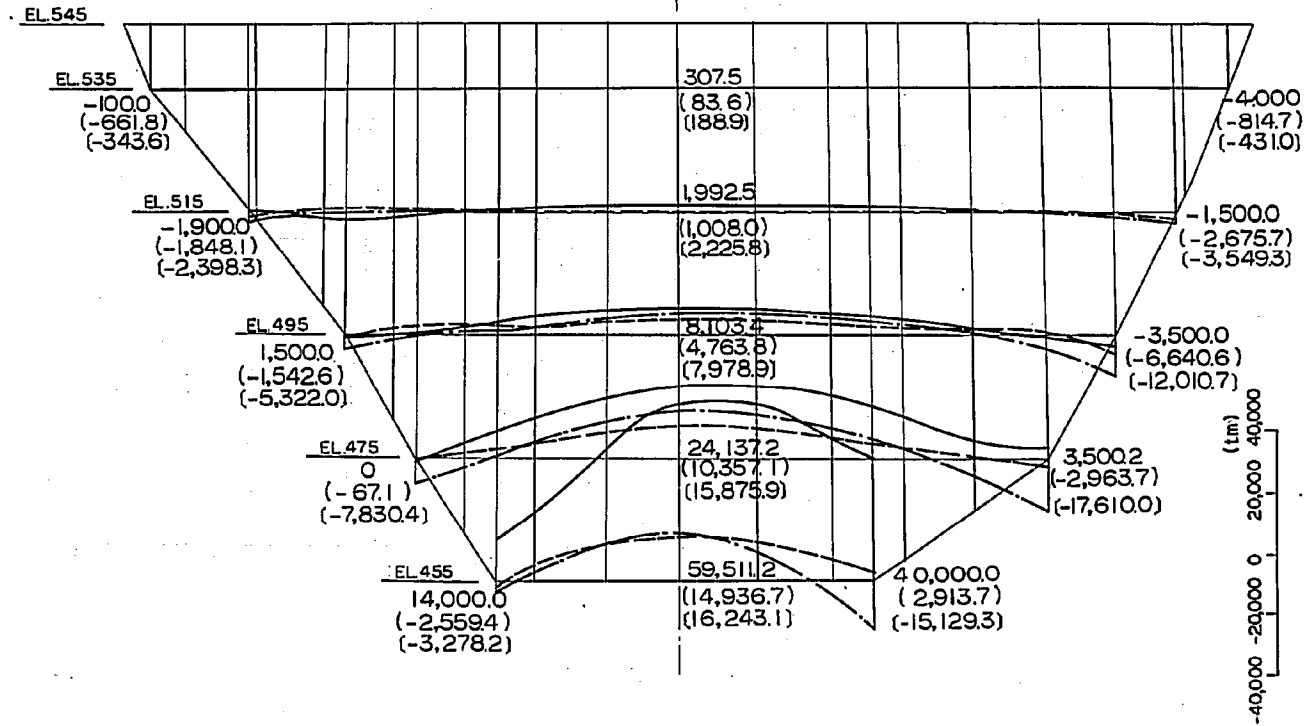
右岸



アーチ・モーメント分布図

左岸

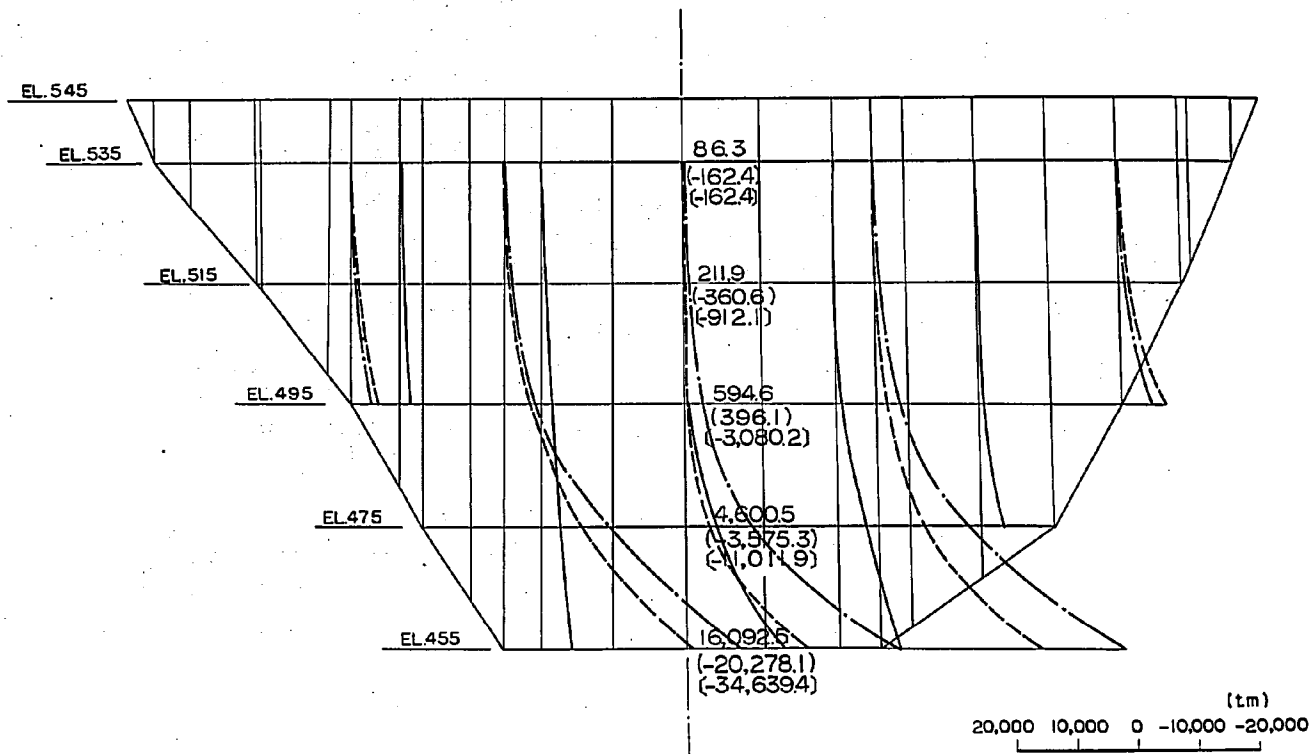
右岸



片持梁モーメント分布図

左岸

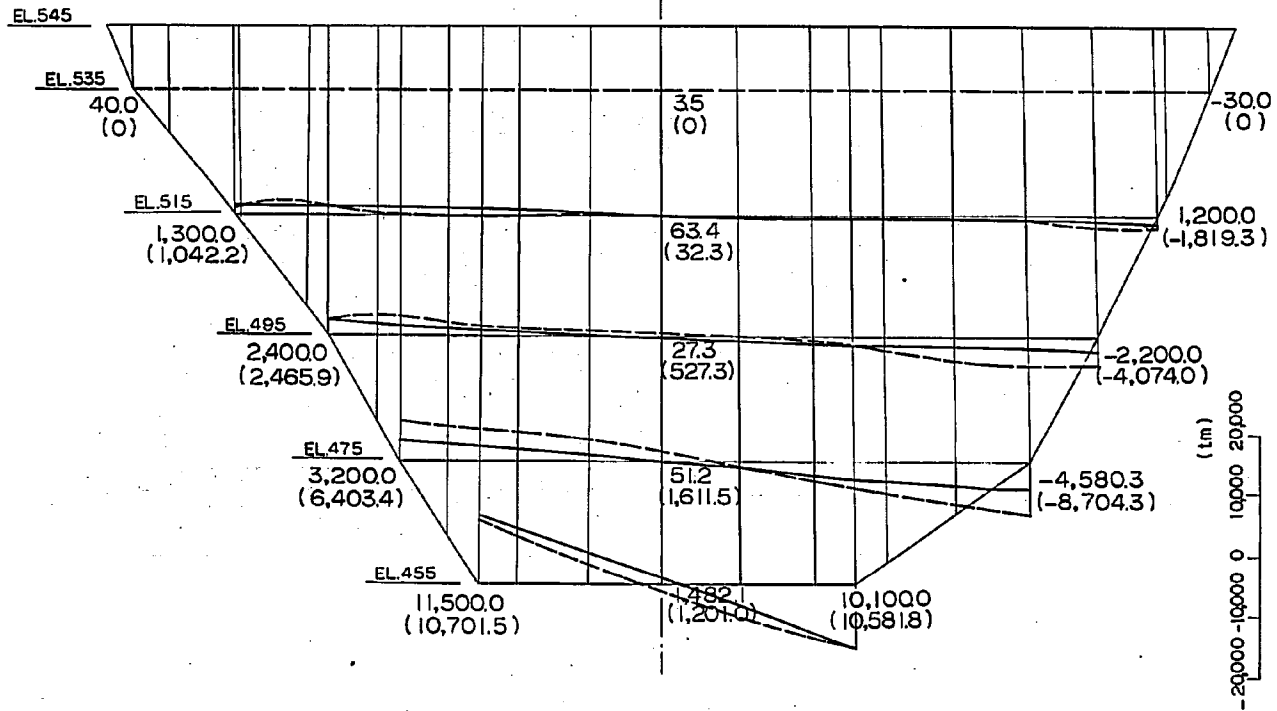
右岸



捩れモーメント図

左岸

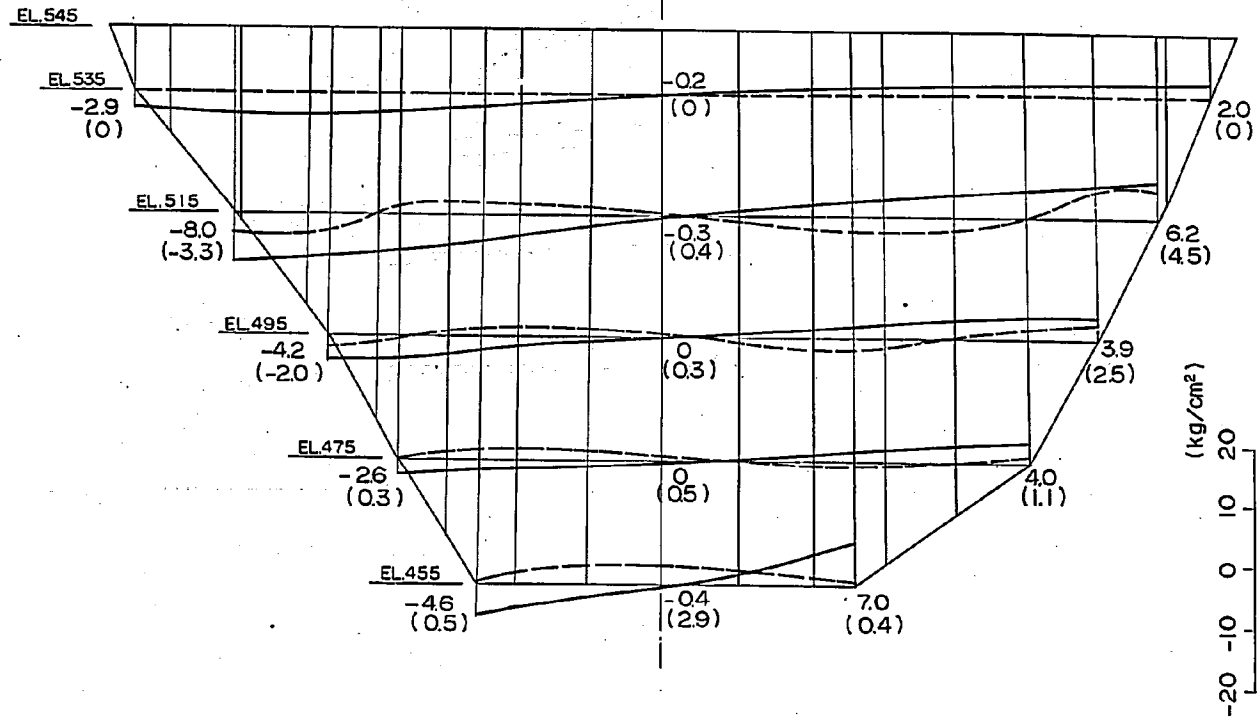
右岸



剪 断 应 力 图 (上 流 面)

左 岸

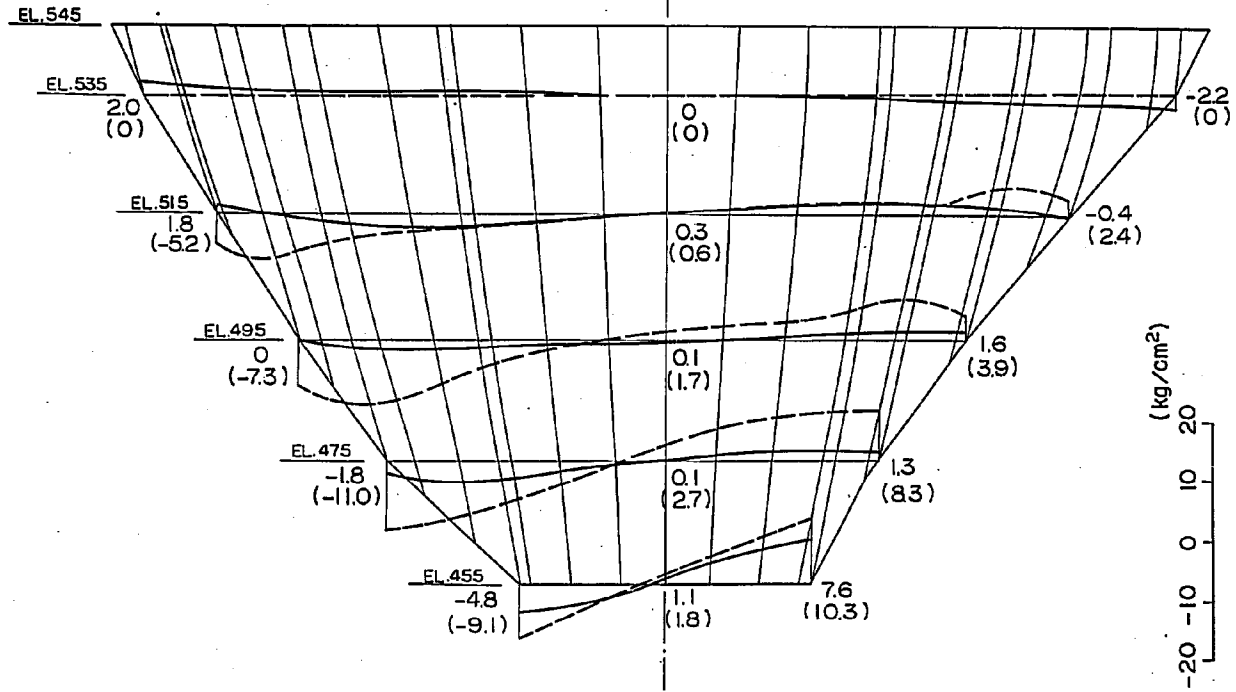
右 岸



剪 断 应 力 图 （下流面）

右 岸

左 岸



3

川 俣 ダ ム

1

半径方向撓み図

左岸

右岸

EL.980

EL.970

EL.950

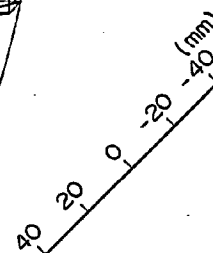
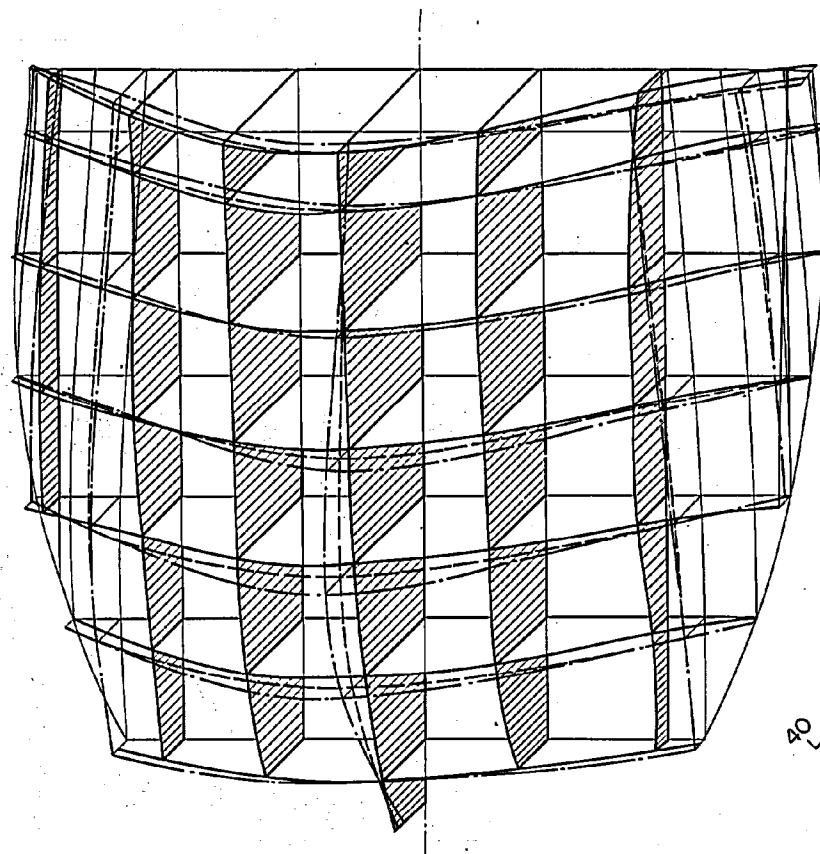
EL.930

EL.910

EL.890

EL.870

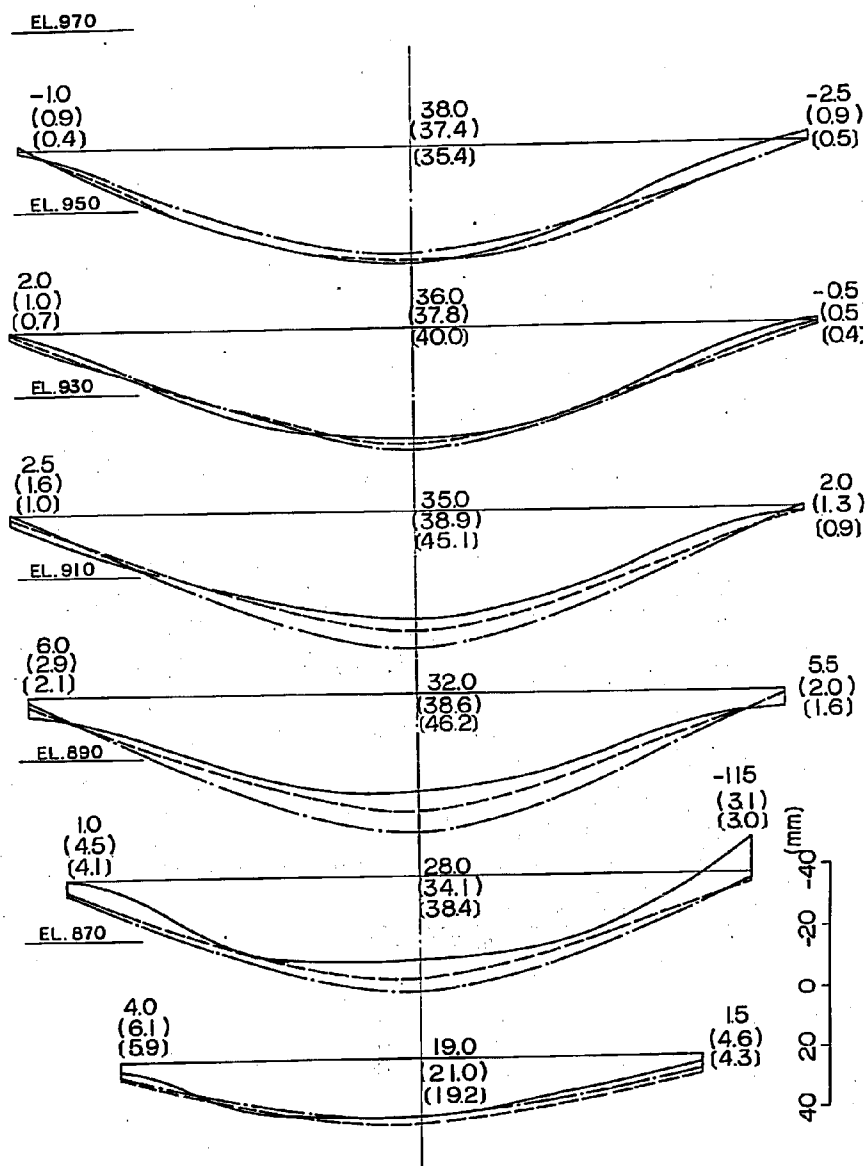
EL.860



左 岸

右 岸

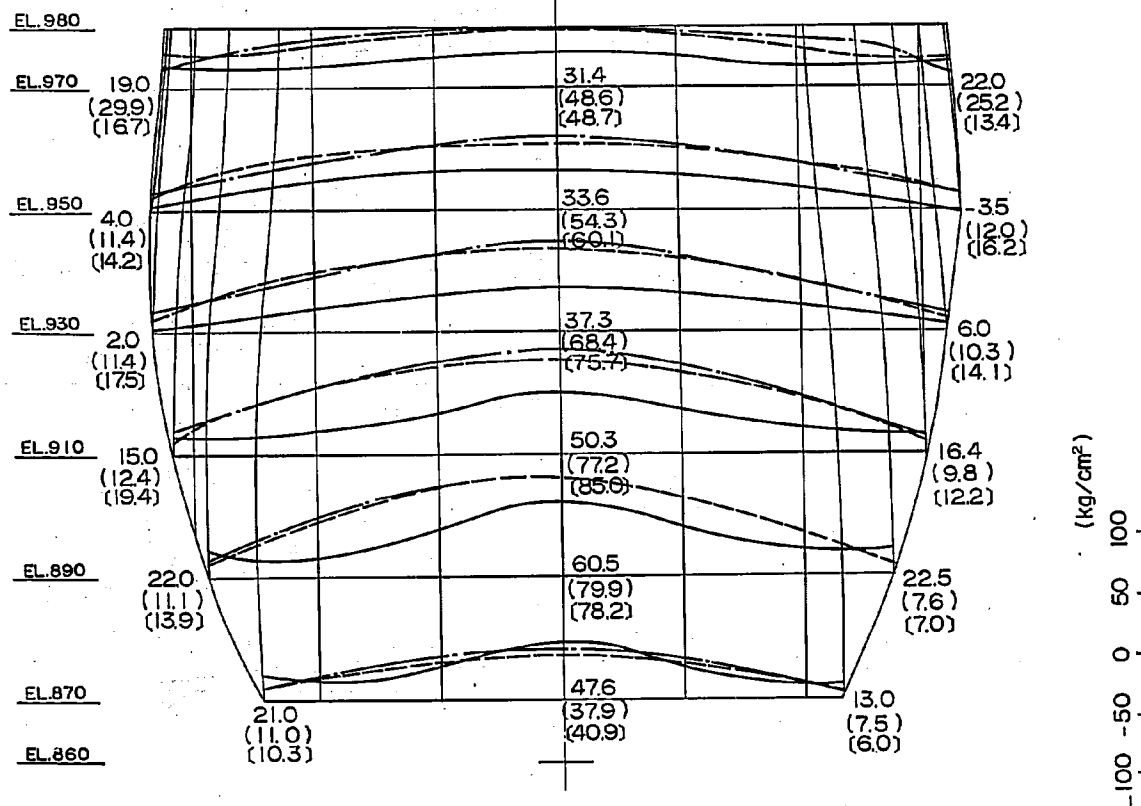
アーチ・エレメント
半径方向撓み図



水平方向应力分布图（上流面）

左岸

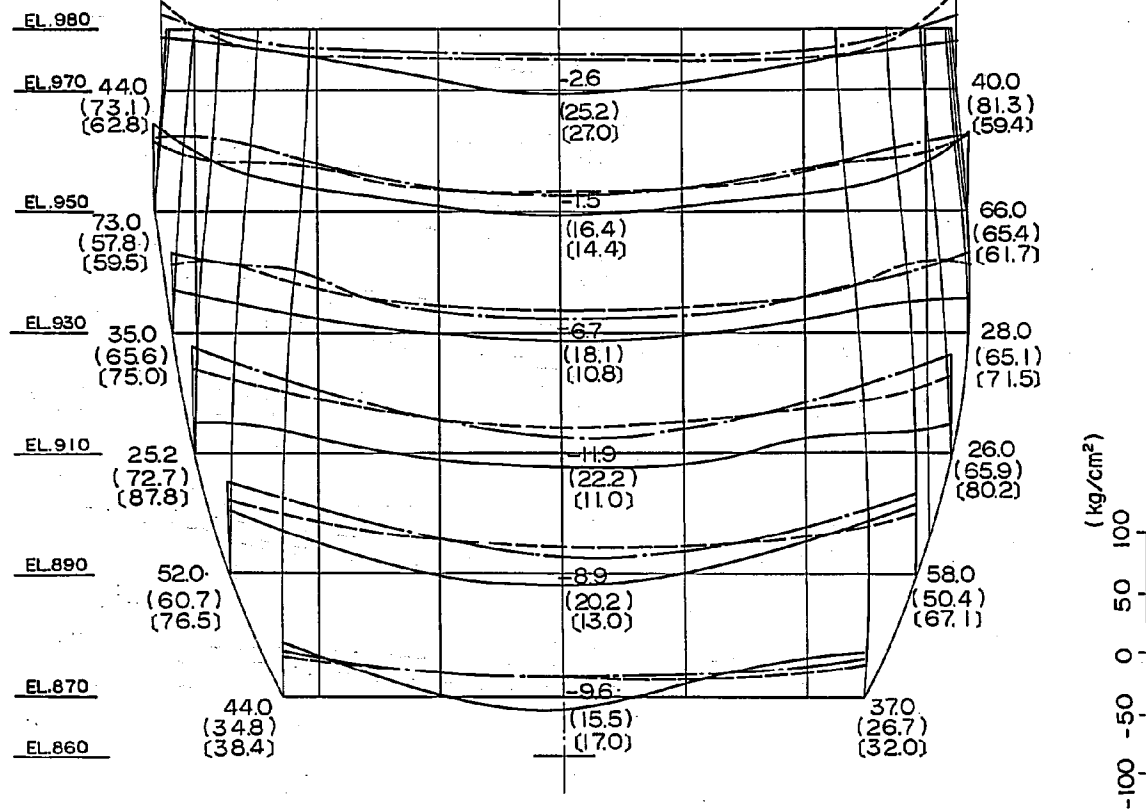
右岸



水平方向应力分布图（下流面）

右岸

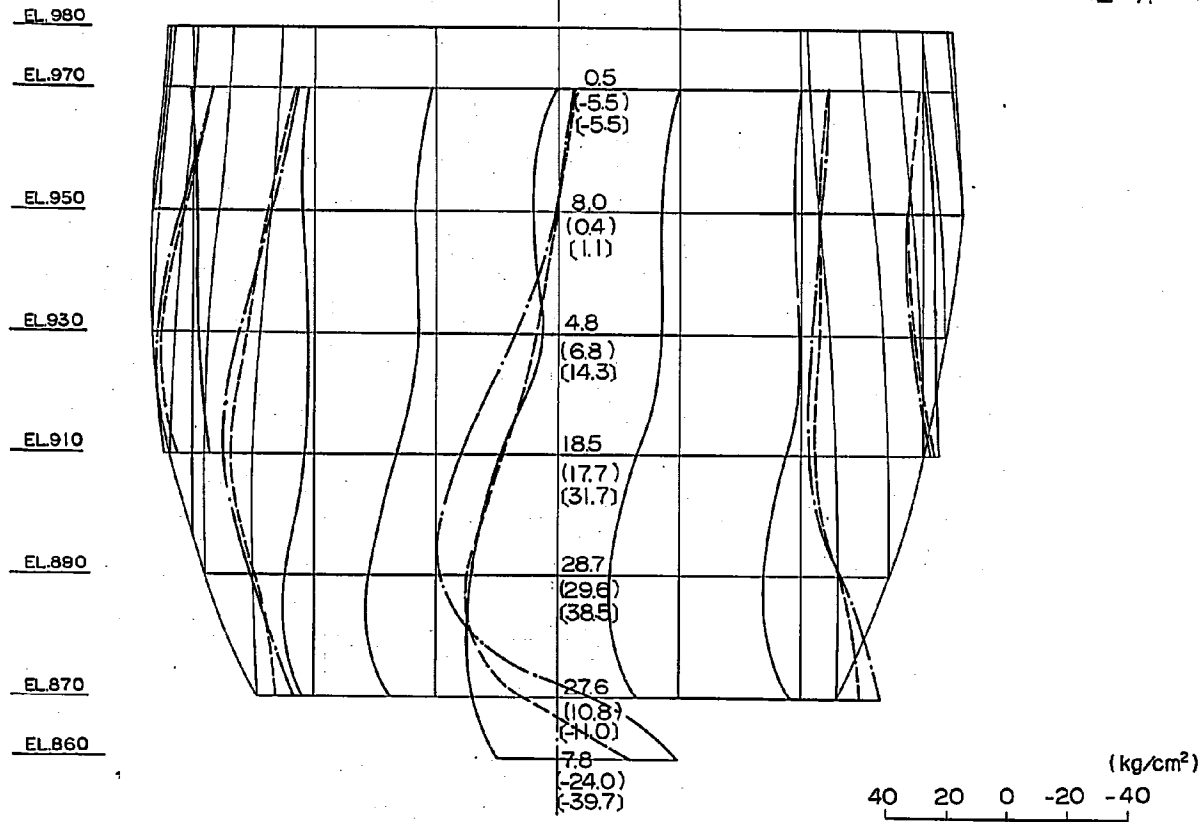
左岸



鉛直方向応力分布図（上流面）

左岸

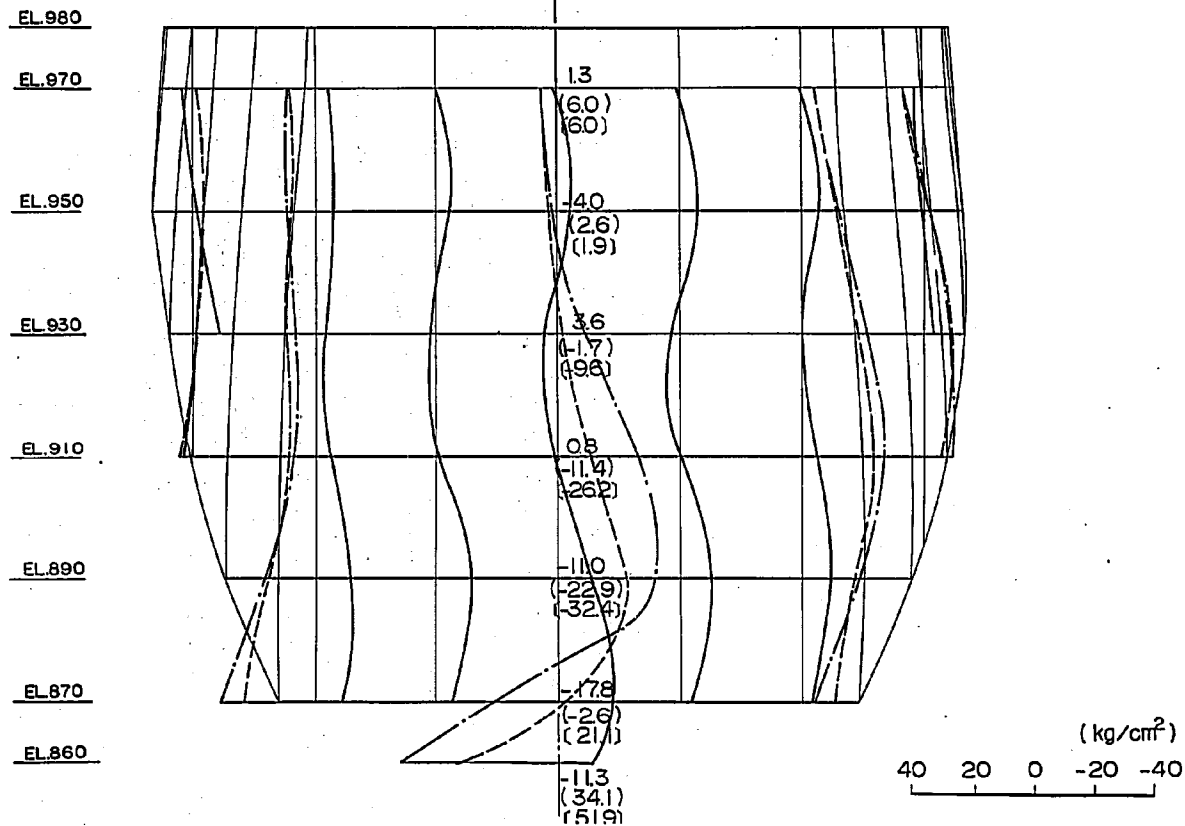
右岸



鉛直方向応力分布図（下流面）

右岸

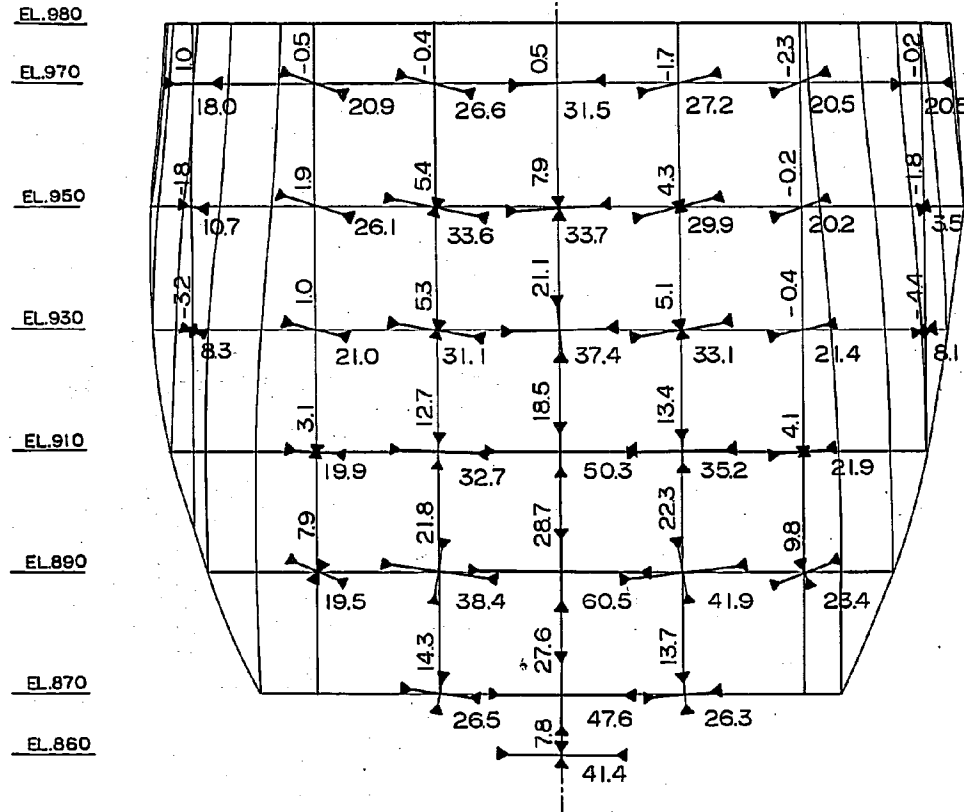
左岸



主 応 力 図 (上流面)
実 験 値

左 岸

右 岸

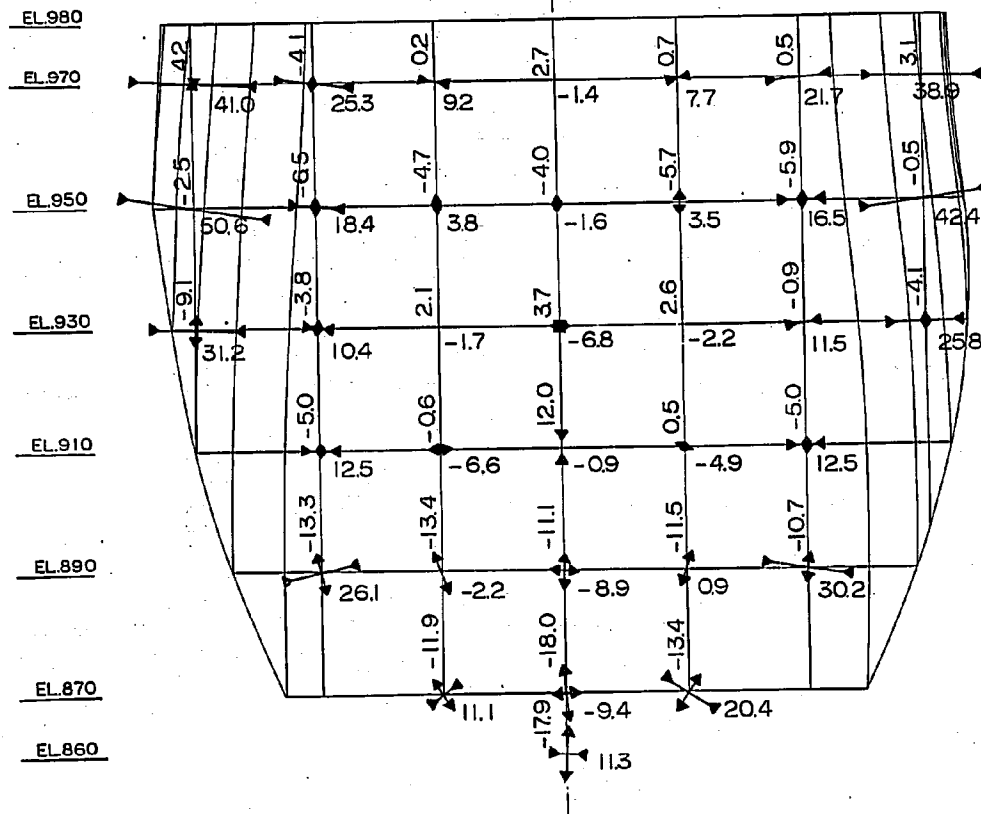


圧 縮
20 kg/cm²
引 張
-20 kg/cm²

主 応 力 図 (下 流 面)
実 験 値

右 岸

左 岸

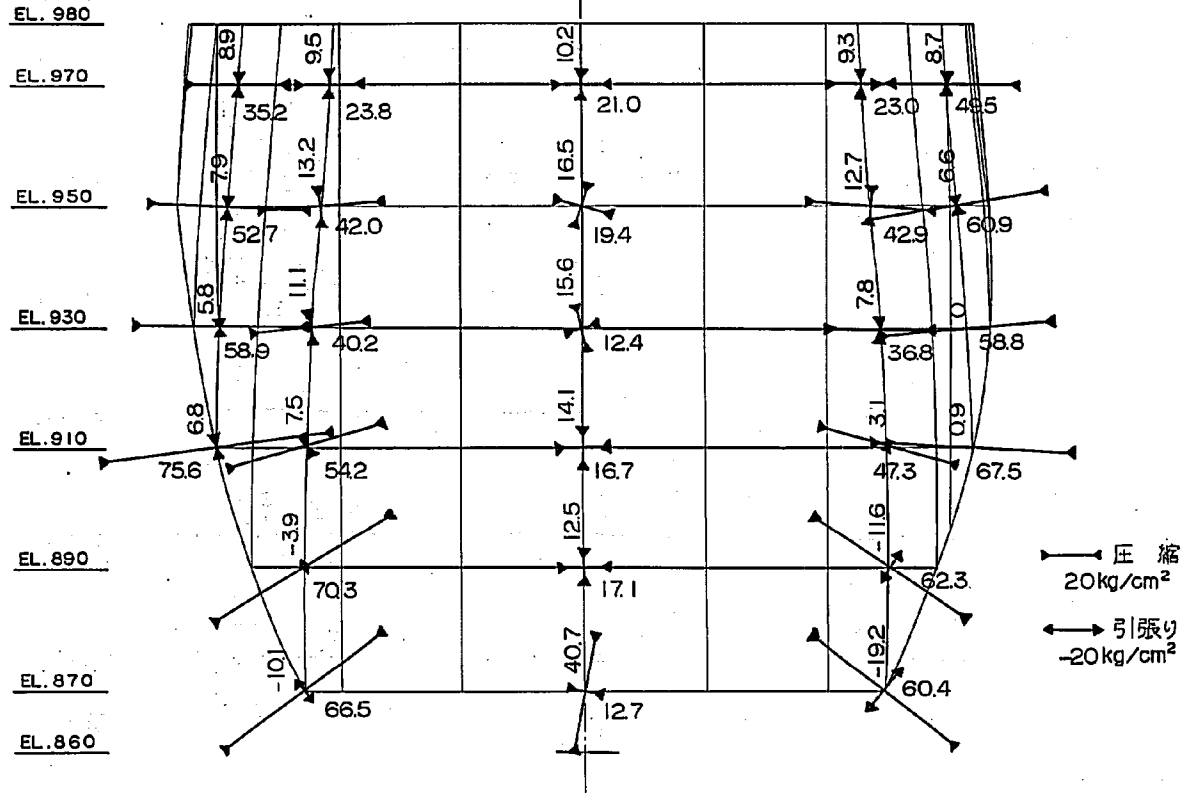


圧 縮
20kg/cm²
引 張 り
-20kg/cm²

主 応 力 図 (下流面)
計 算 値

右 岸

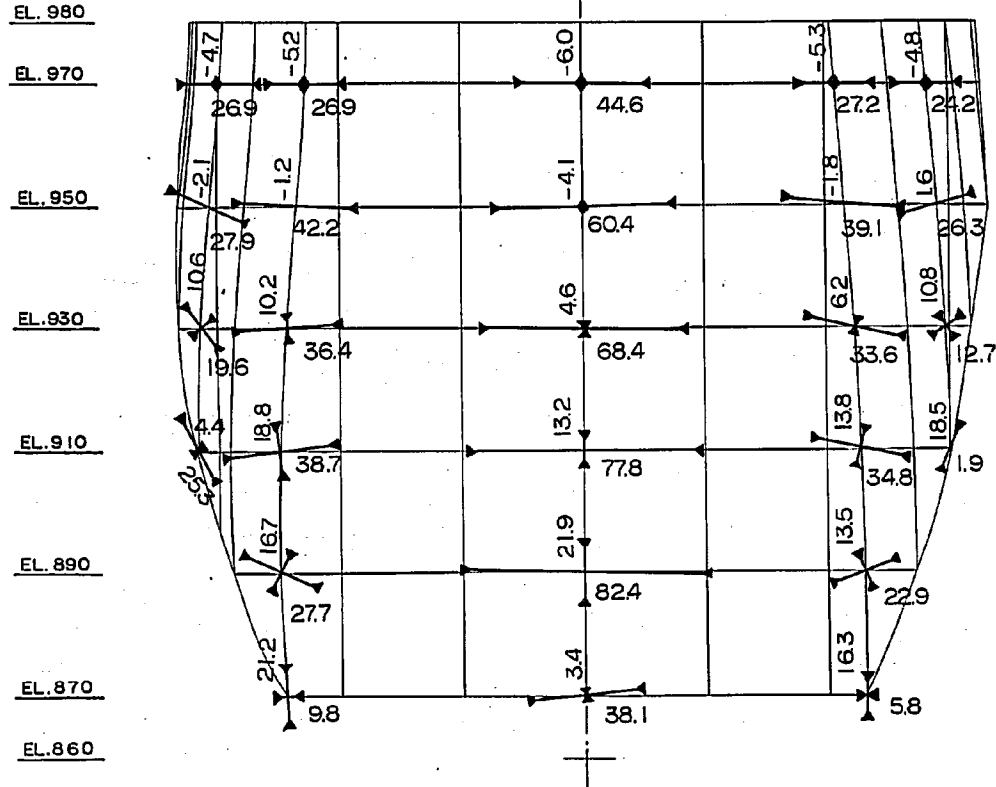
左 岸



主 応 力 図 (上流面)
計算値

左 岸

右 岸

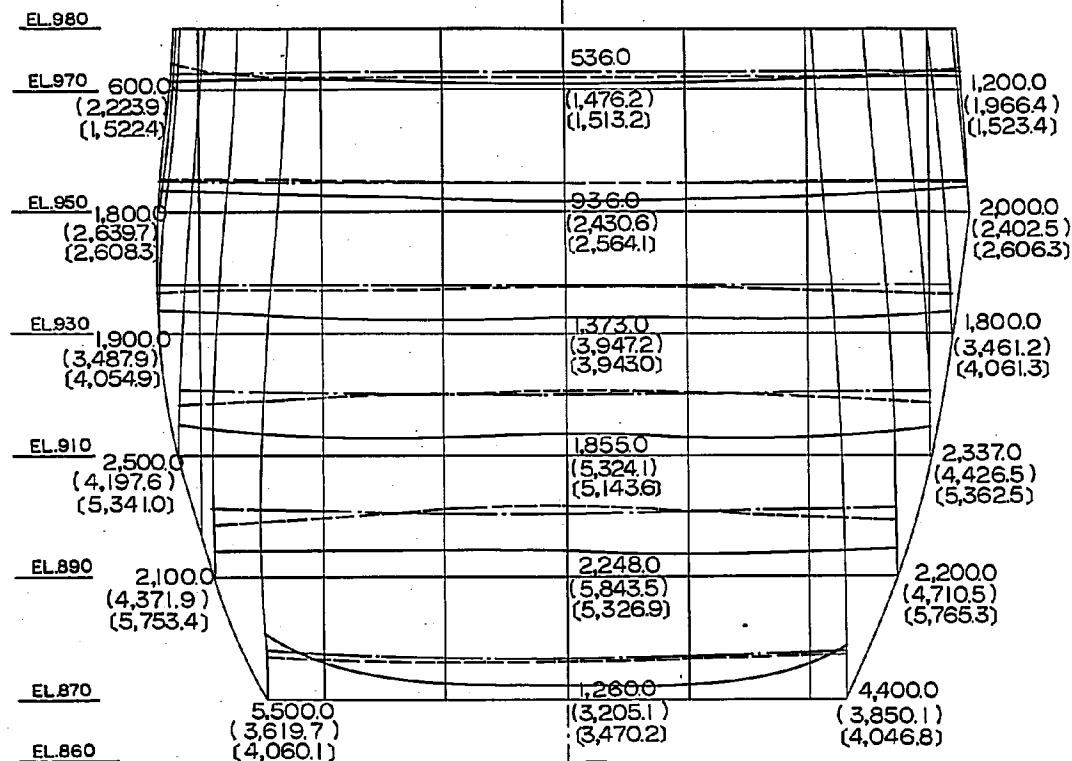


圧 縮
 20kg/cm²
 引 張 り
 -20kg/cm²

アーチ・スラスト図

左岸

右岸



(1)
0000
0005
0
0005
0000

片持梁スラス図

左岸

右岸

EL.980

EL.970

EL.950

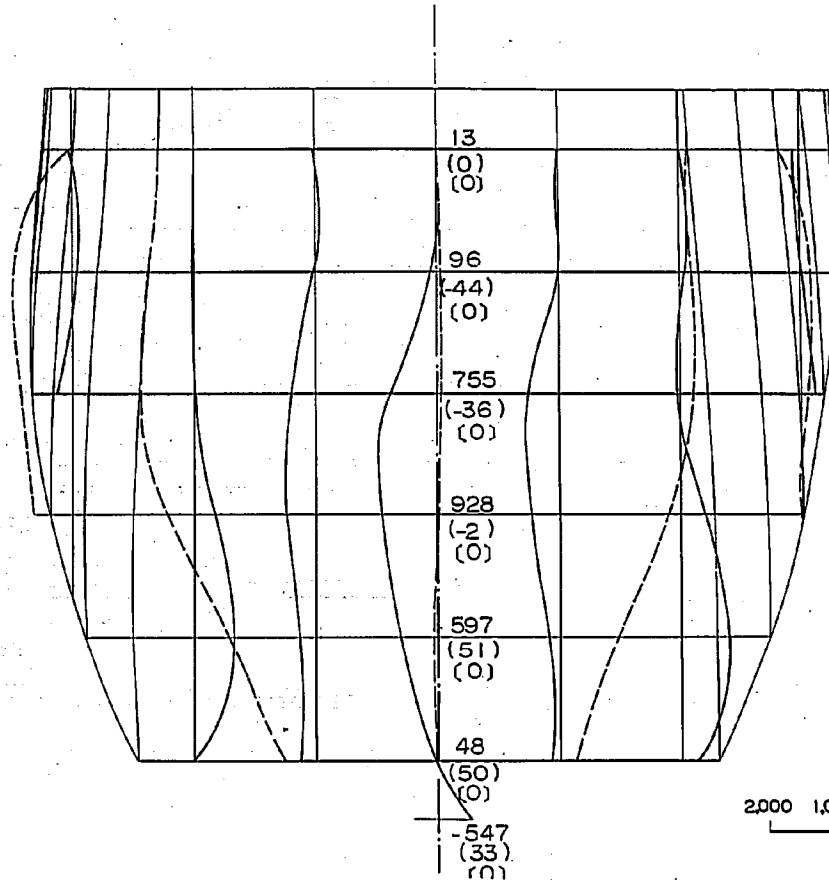
EL.930

EL.910

EL.890

EL.870

EL.860

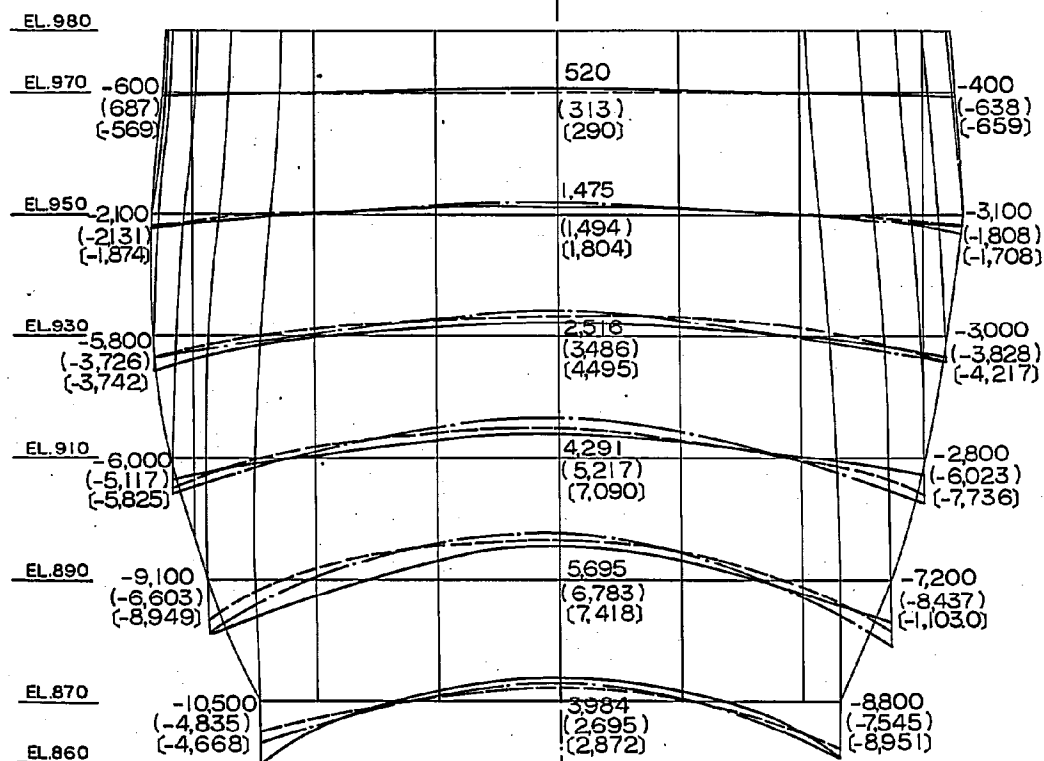


(t)
2,000 1,000 0 -1,000 -2,000

アーチ・モーメント分布図

左岸

右岸

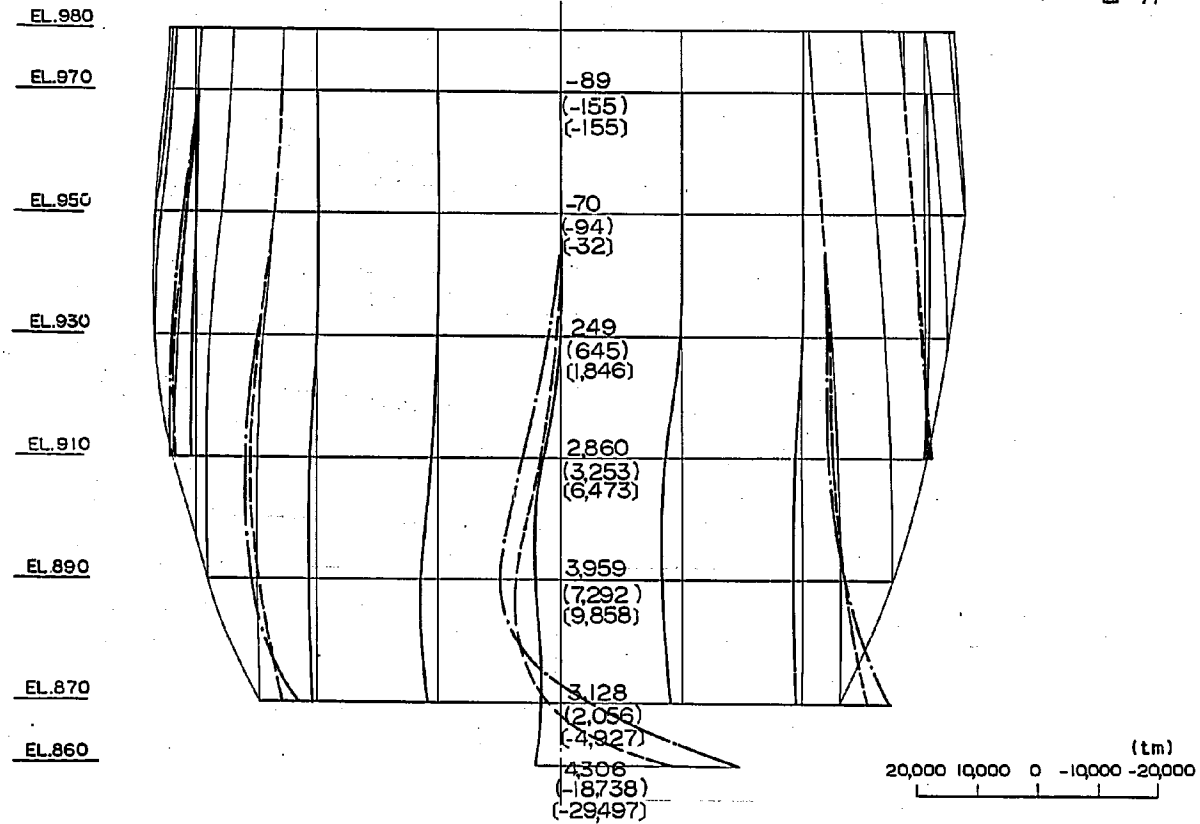


(mm)
20000
0
-20000

片持梁モーメント分布図

左岸

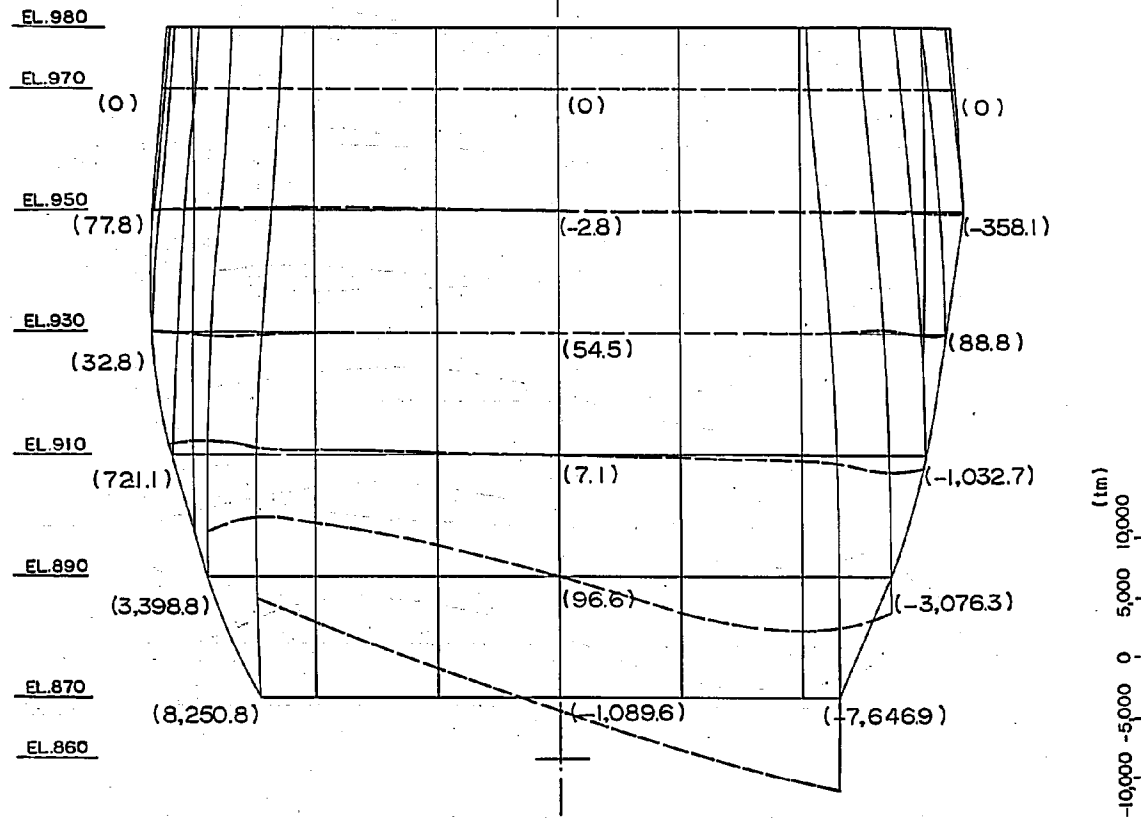
右岸



捩れモーメント図

左岸

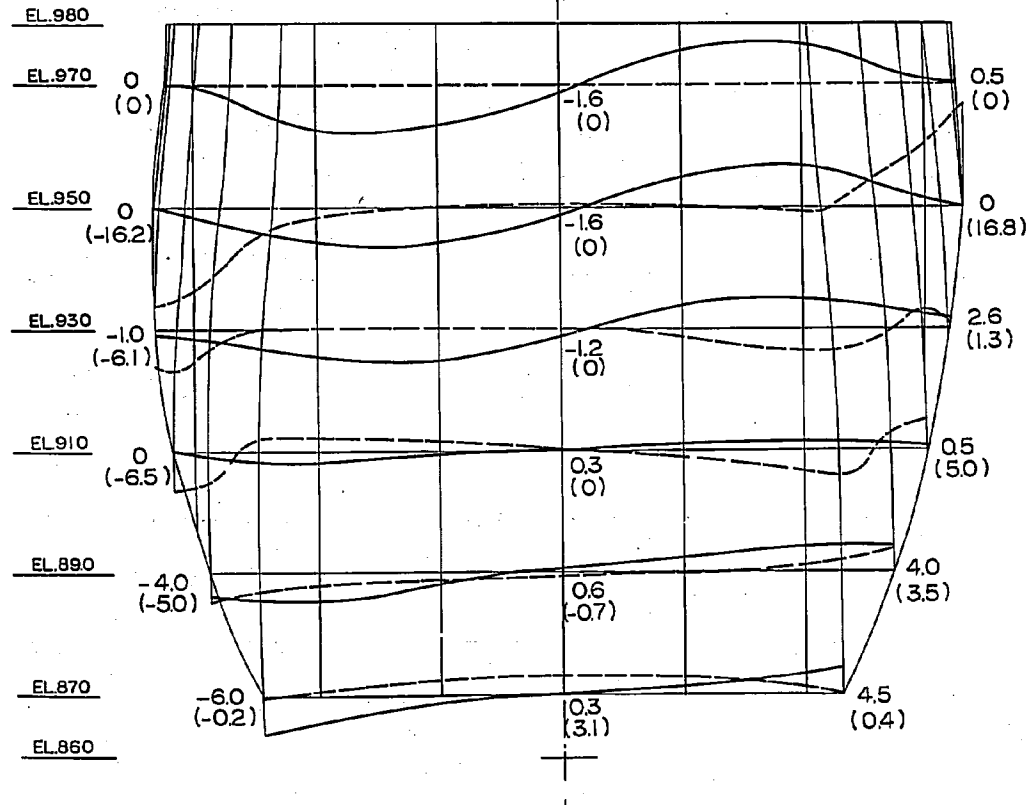
右岸



剪 断 应 力 图 (上流面)

左 岸

右 岸



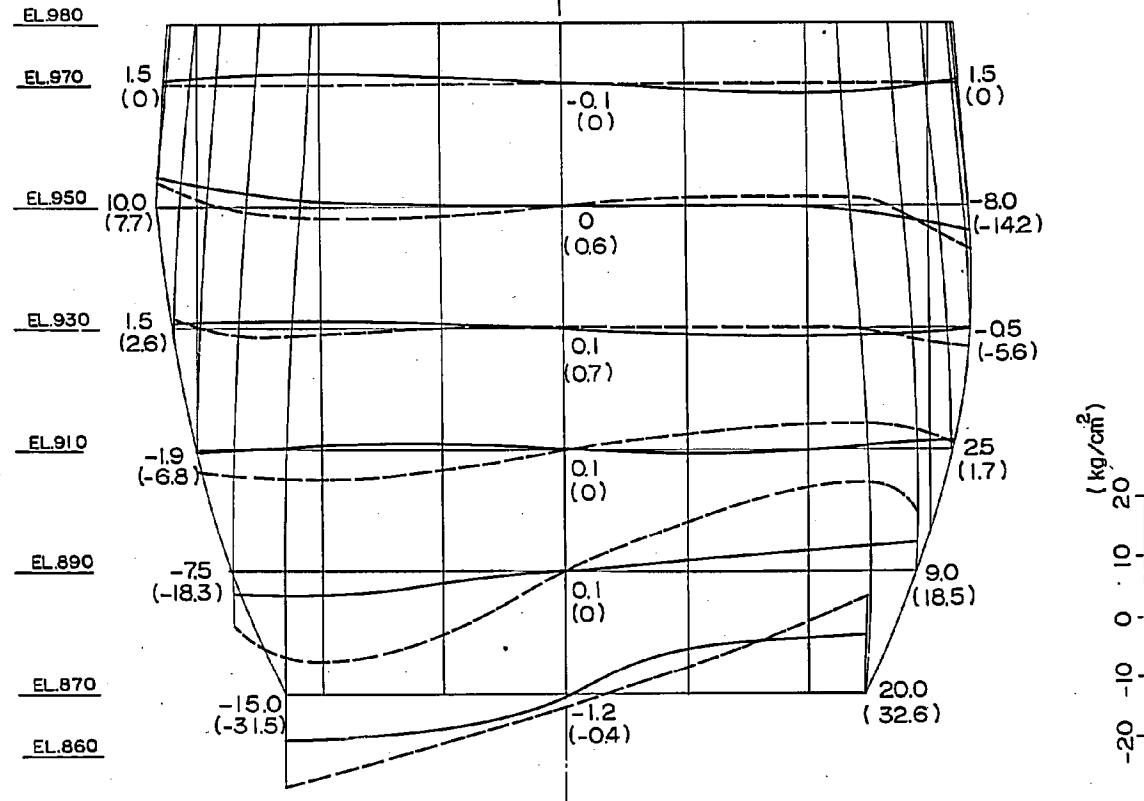
(kg/cm²)

20
10
0
-10
-20

剪 断 应 力 图 (下流面)

右 岸

左 岸



①

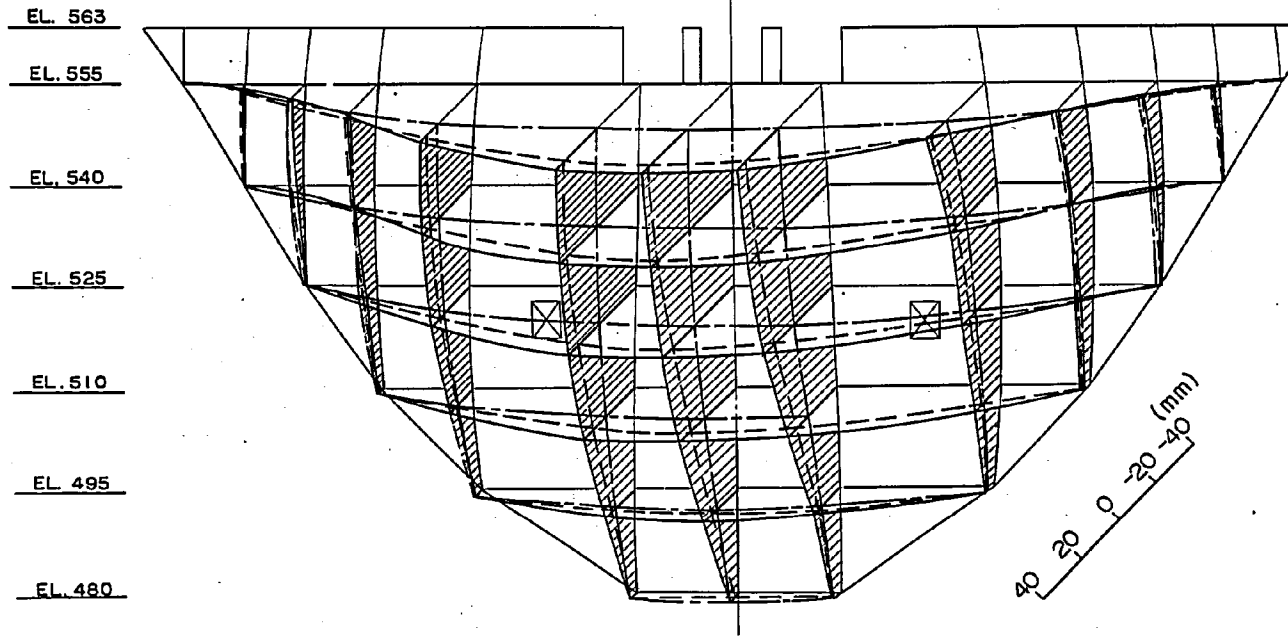
裾 花 ダ ム

②

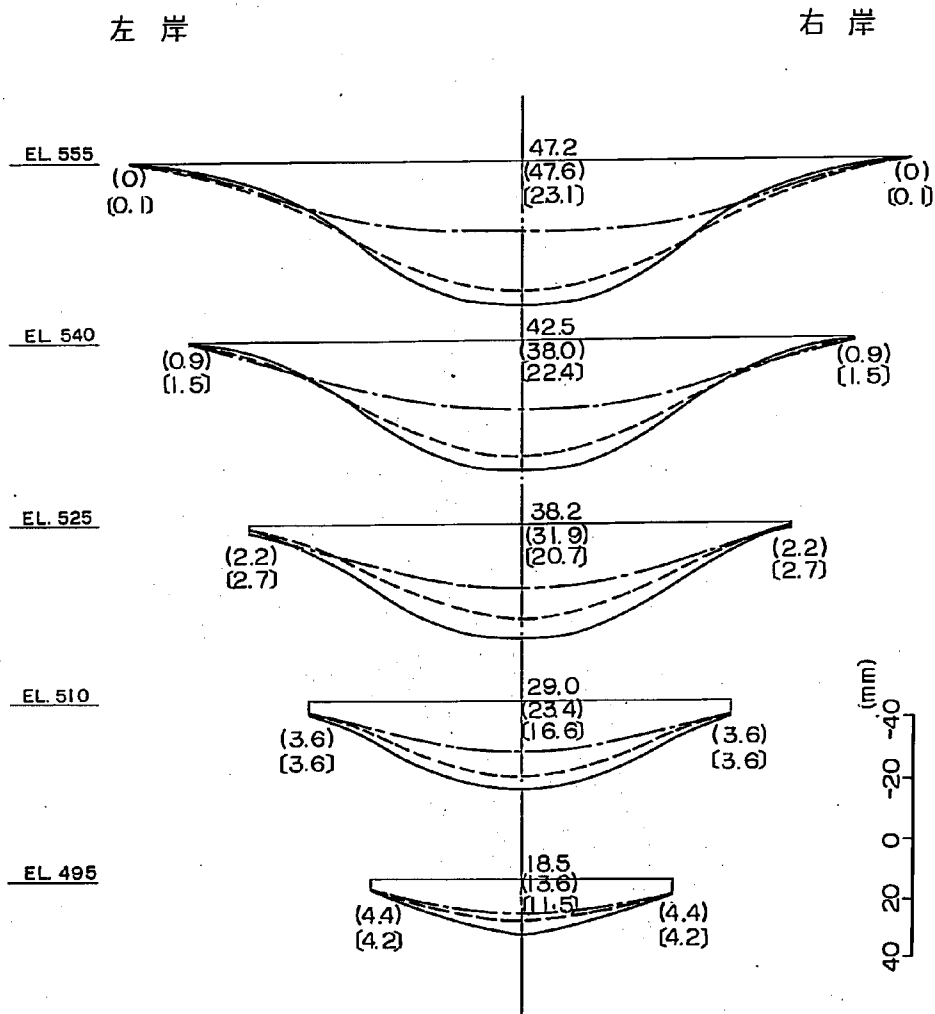
半径方向撓み図

左岸

右岸



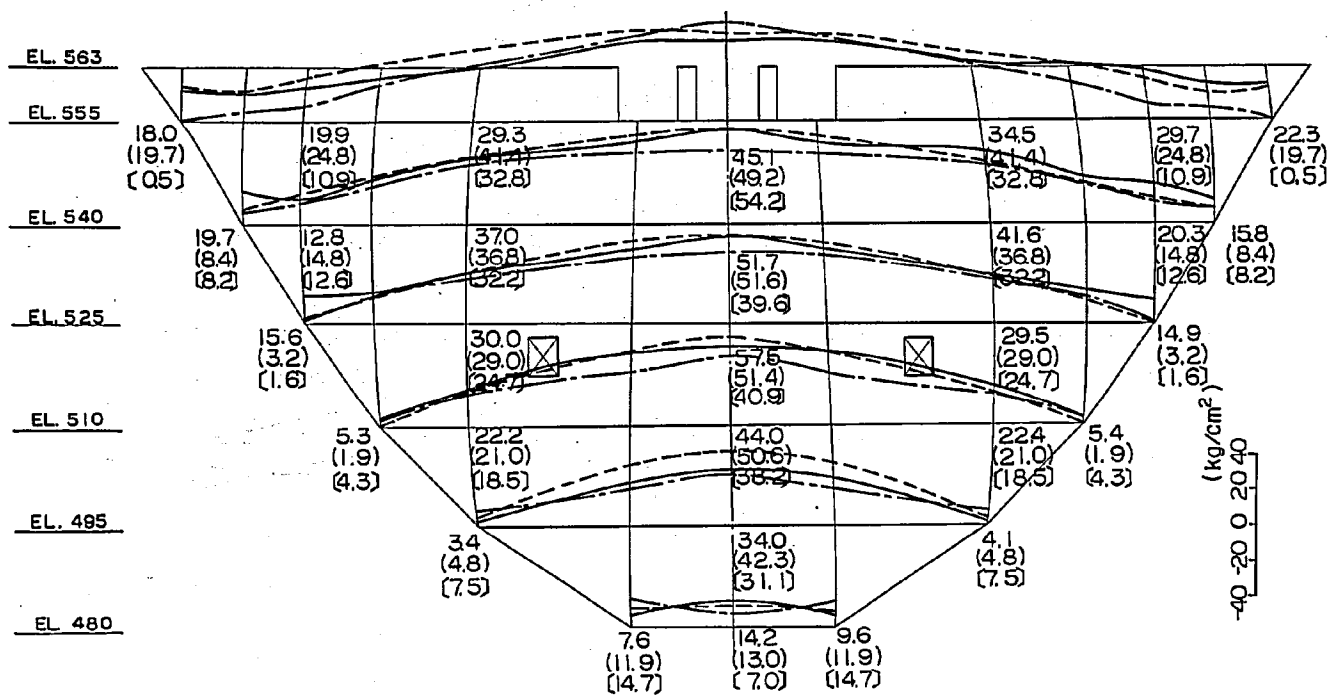
アーチ・
エレメント 半径方向撓み図



水平方向应力分布图（上流面）

左岸

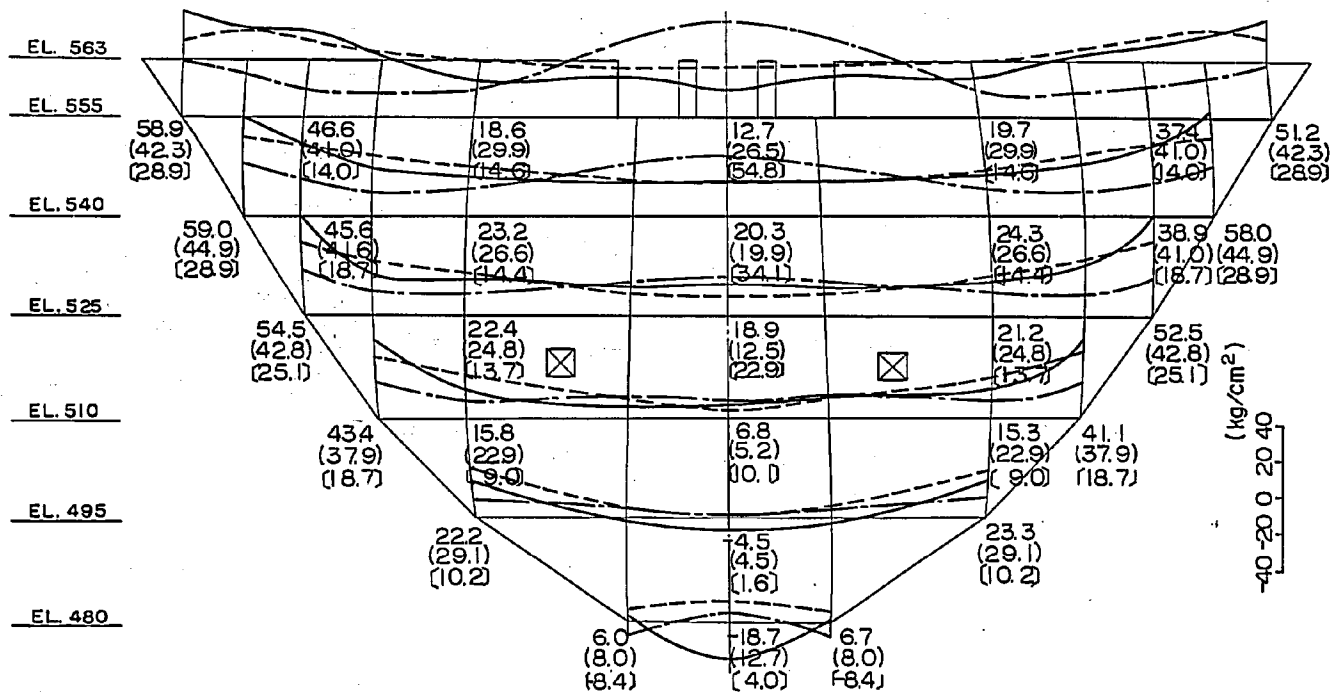
右岸



水平方向应力分布图 (下流面)

右岸

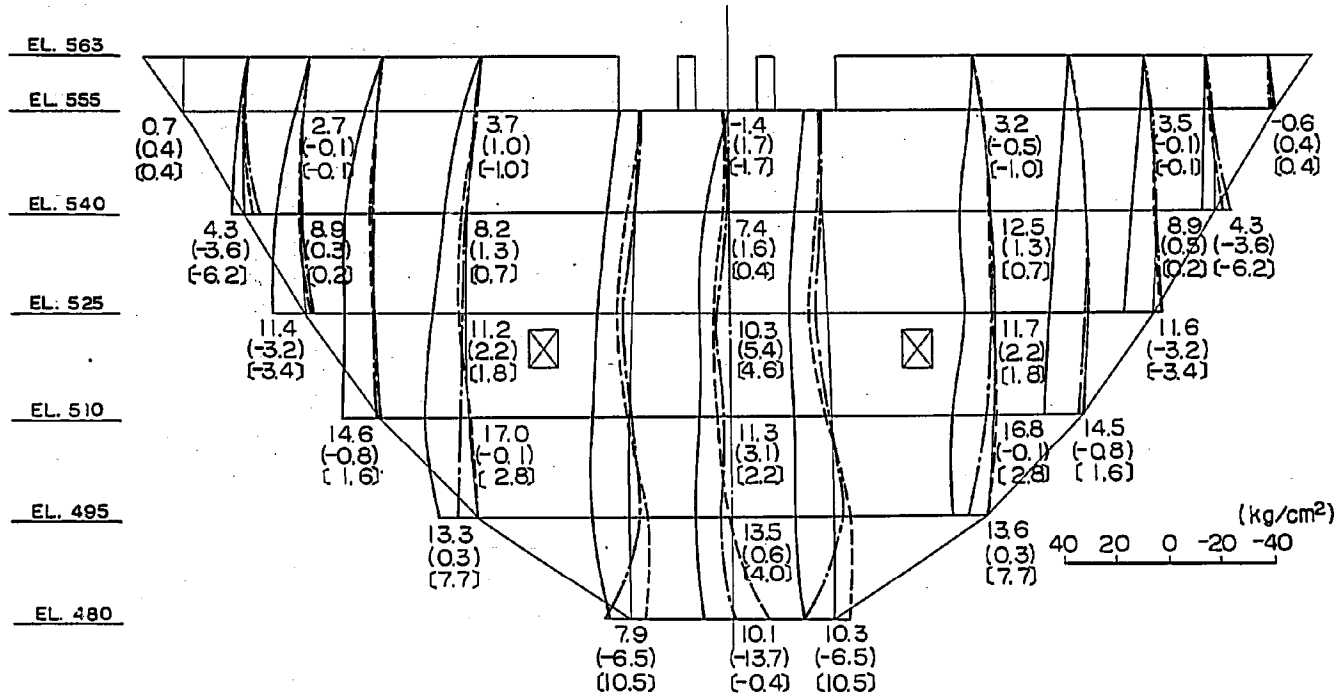
左岸



鉛直方向応力分布図（上流面）

左 岸

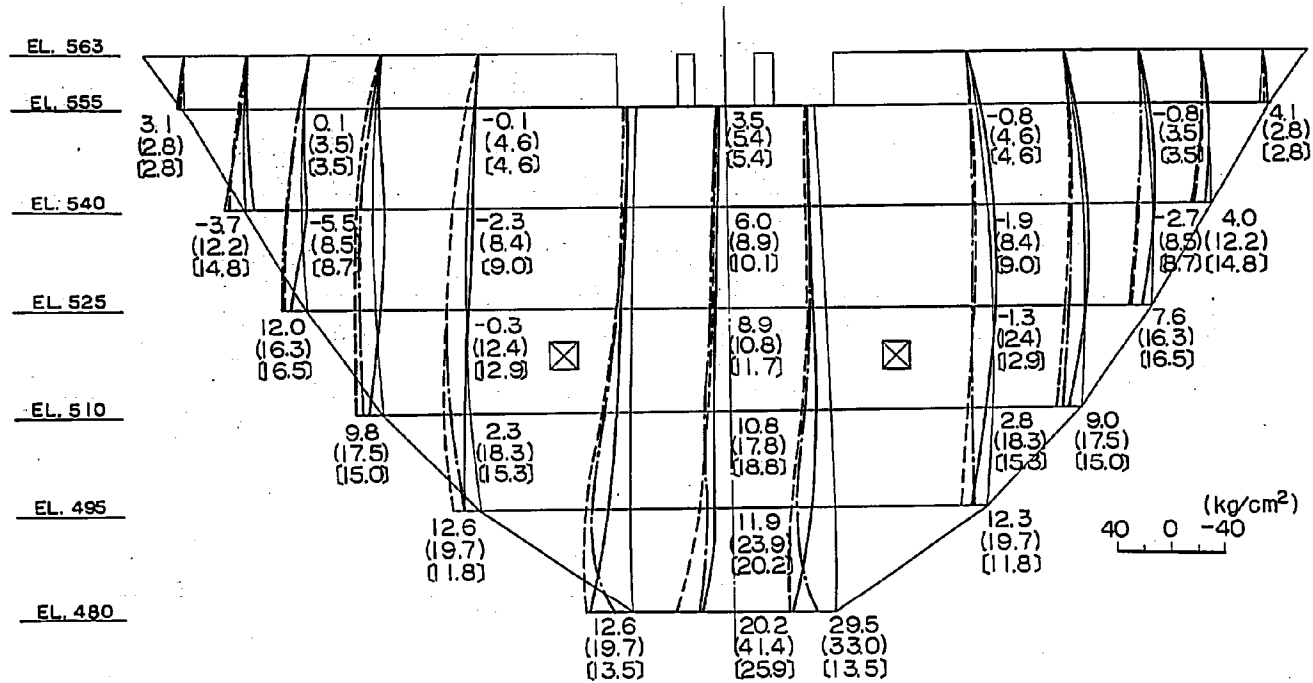
右 岸



鉛直方向応力分布図（下流面）

右岸

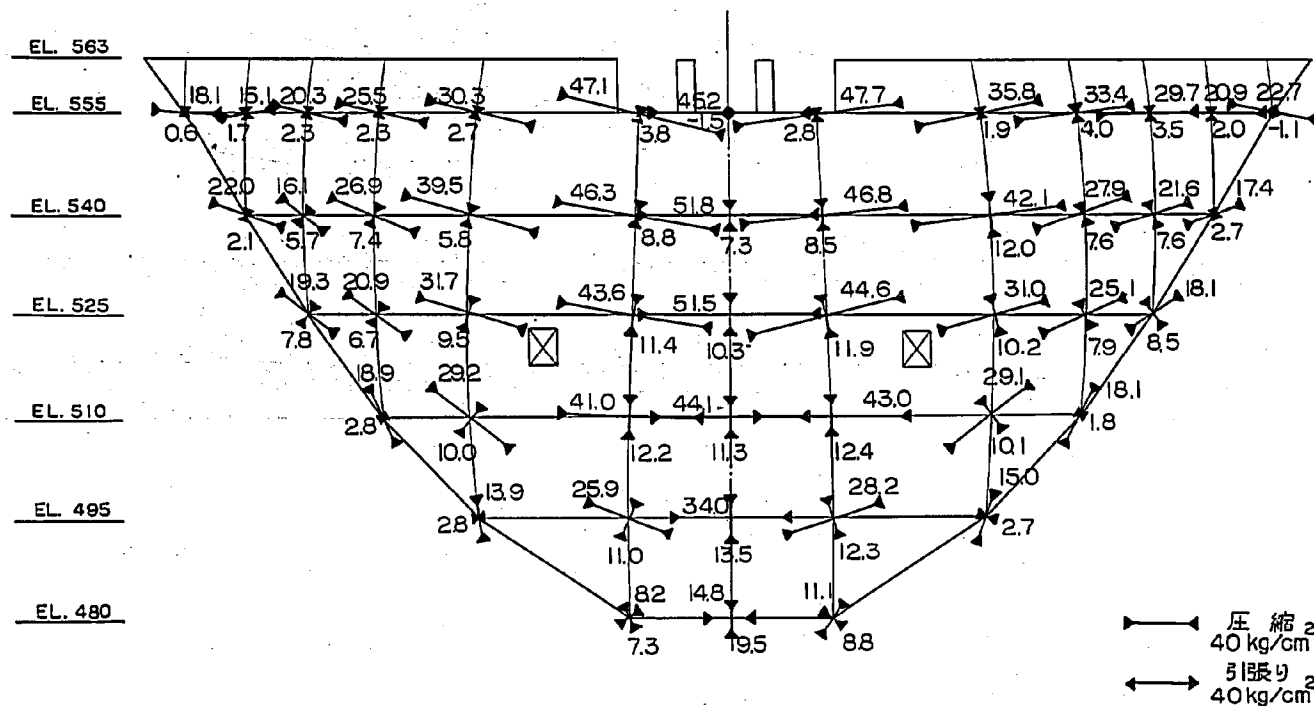
左岸



主 応 力 図 (上流面)
実 験 値

左 岸

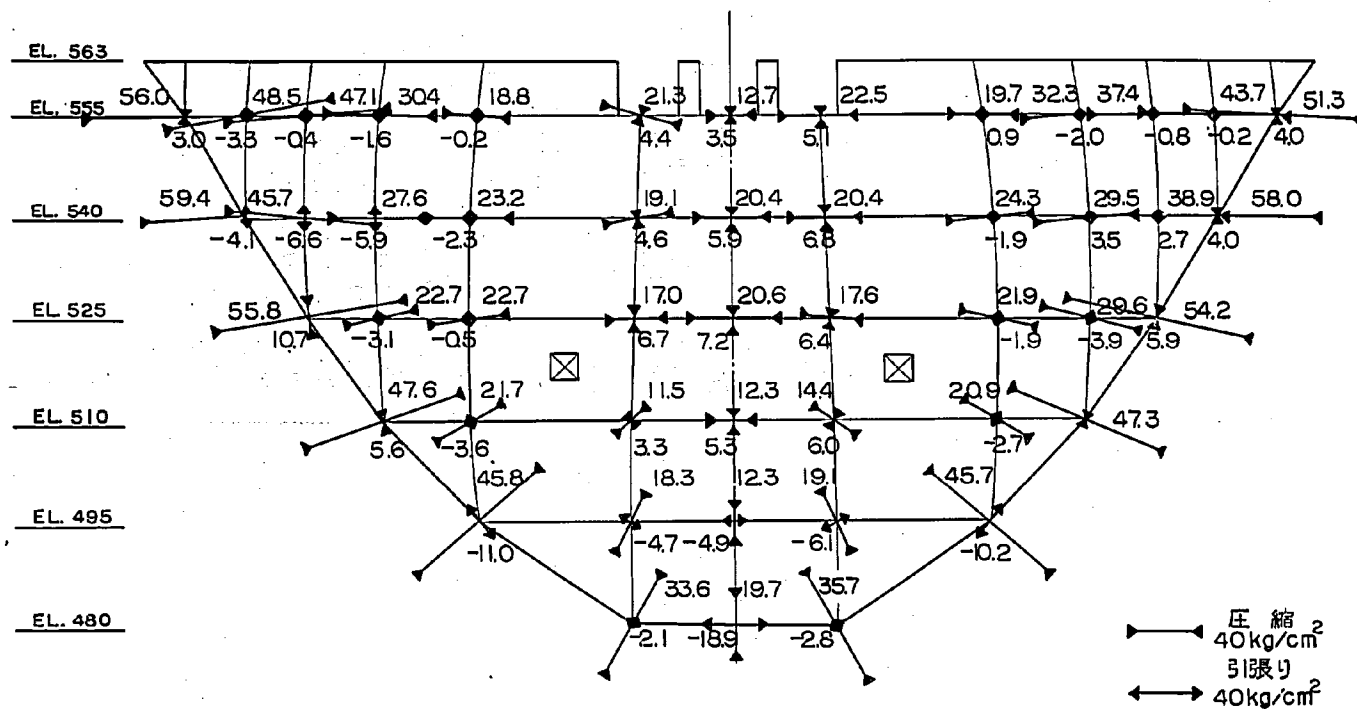
右 岸



主 応 力 図 (下流面)
実 験 値

右 岸

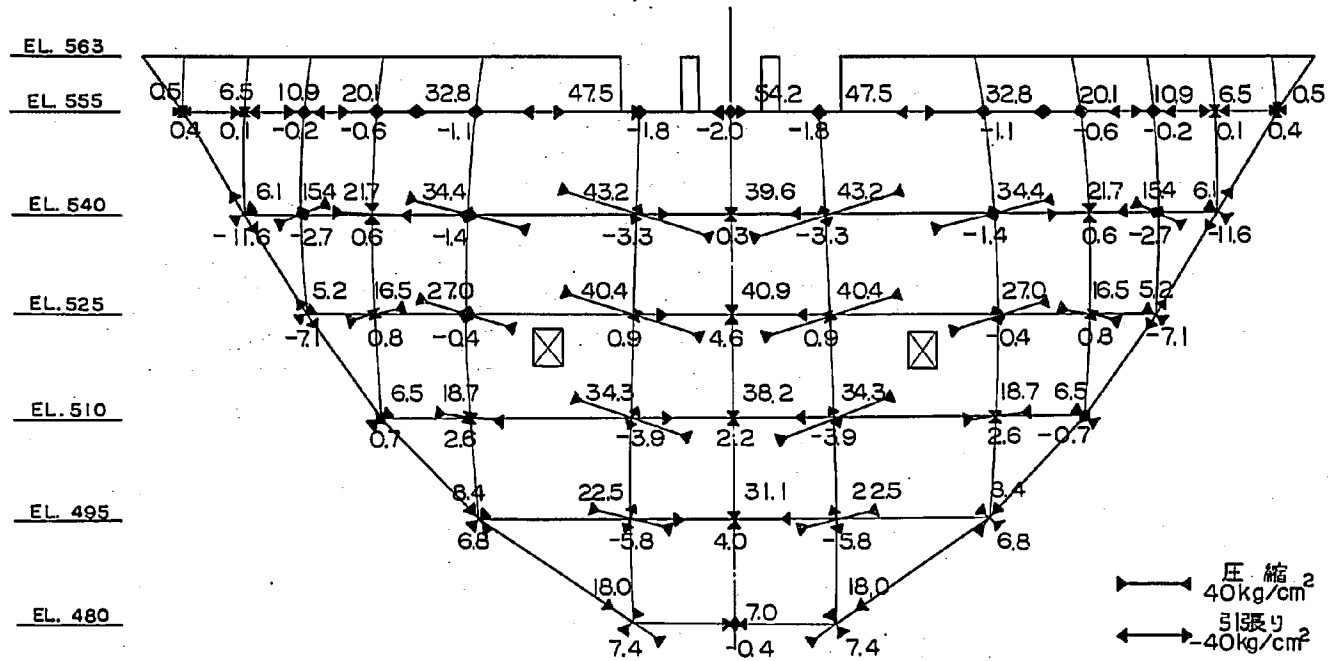
左 岸



主 応 力 図 (上流面)
計算値

左 岸

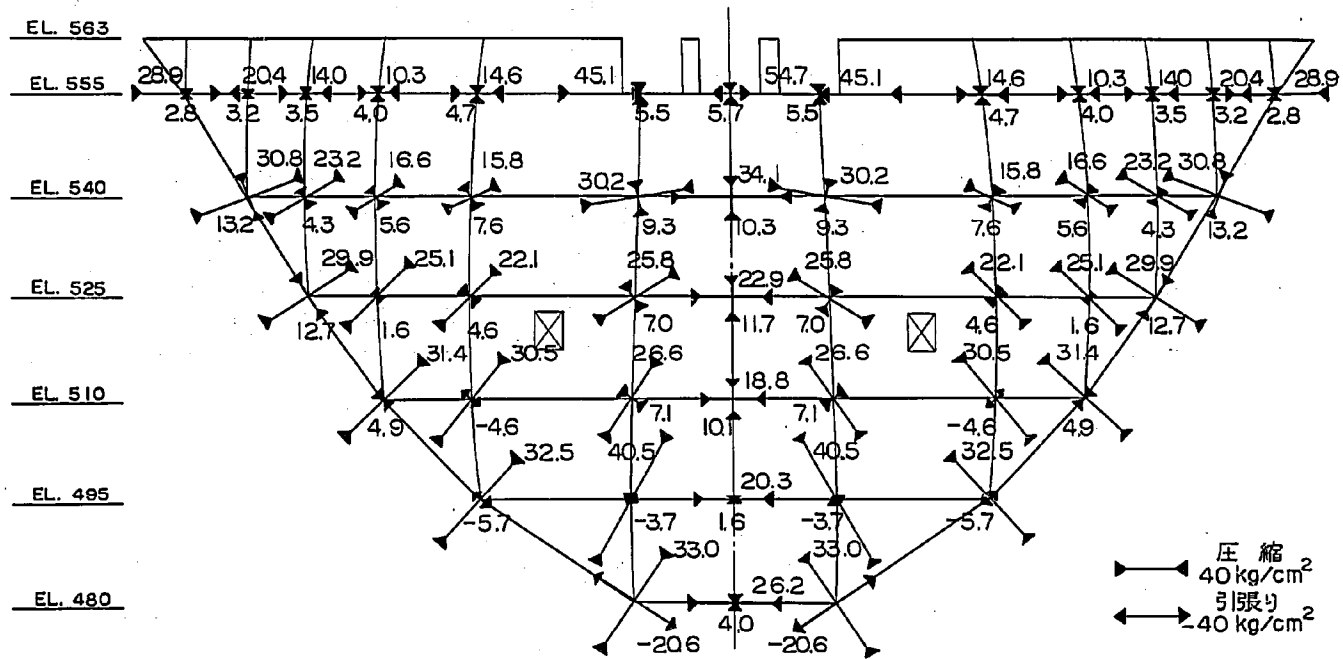
右 岸



主 應 力 図 (下流面)
計算値

右 岸

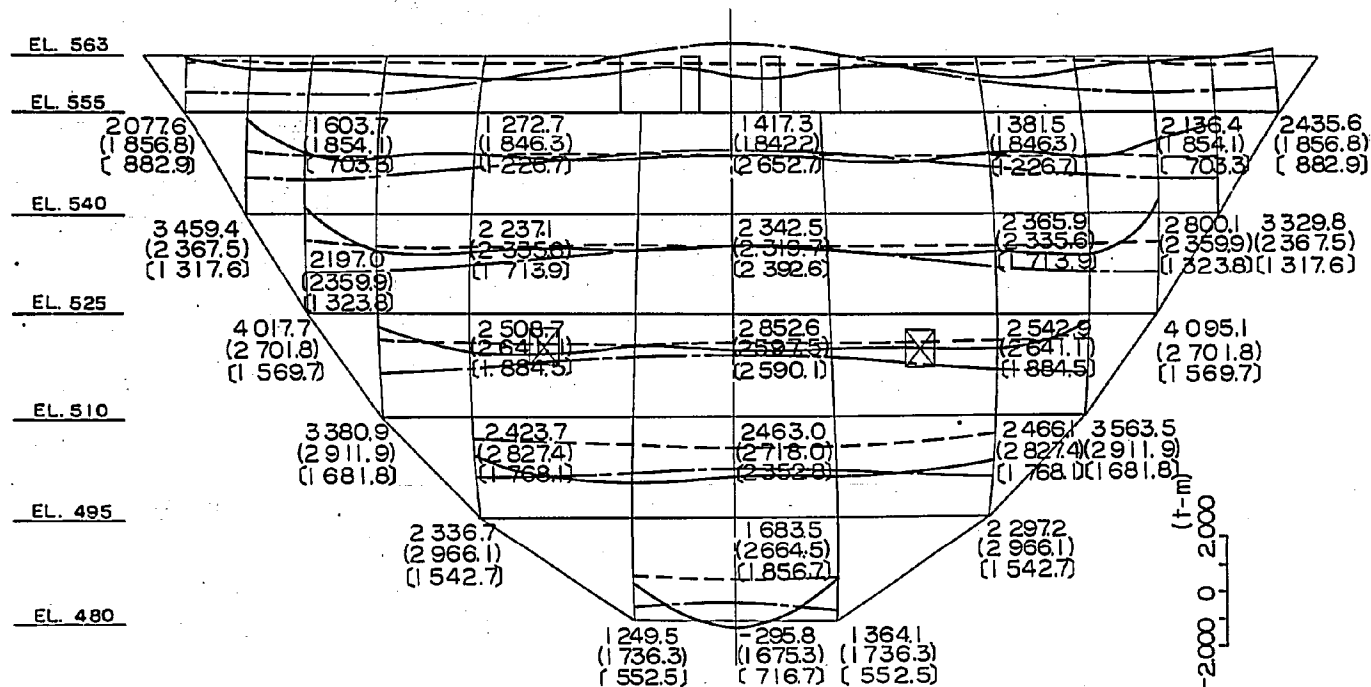
左 岸



アーチ・スラスト図

左岸

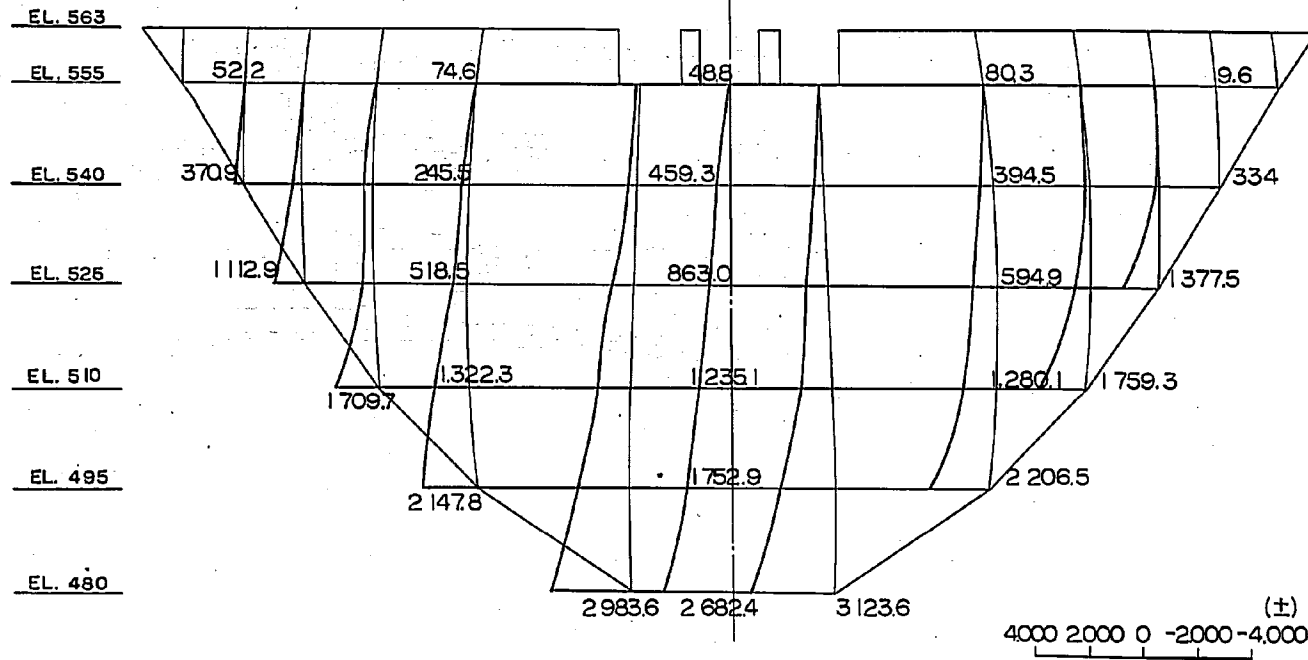
右岸



片持梁スラスト図

左岸

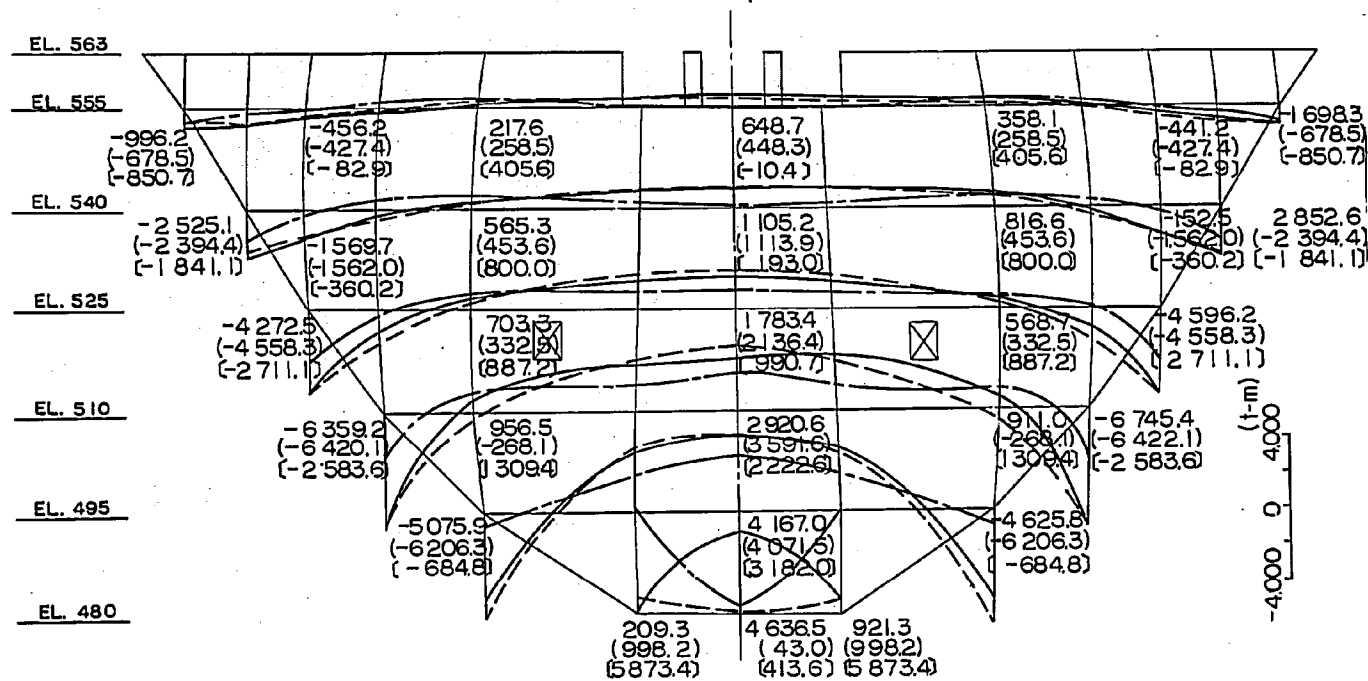
右岸



アーチ・モーメント分布図

左 岸

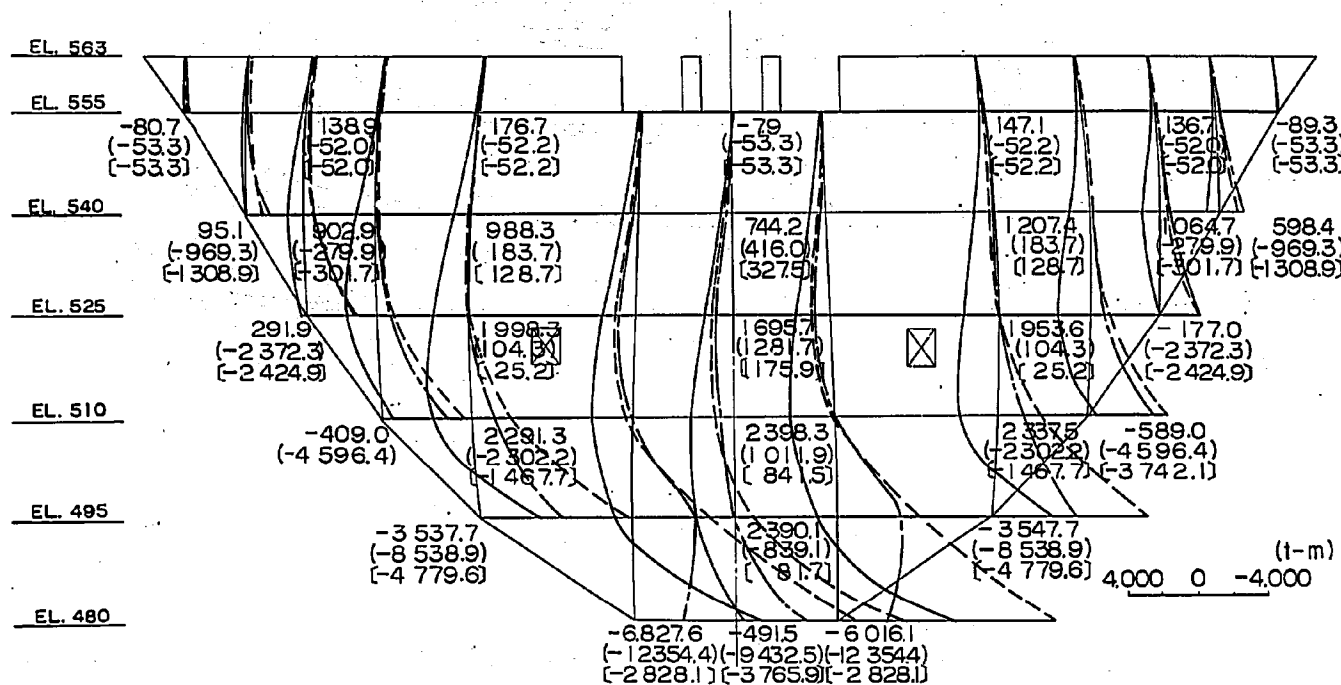
右 岸



片持梁モーメント分布図

左岸

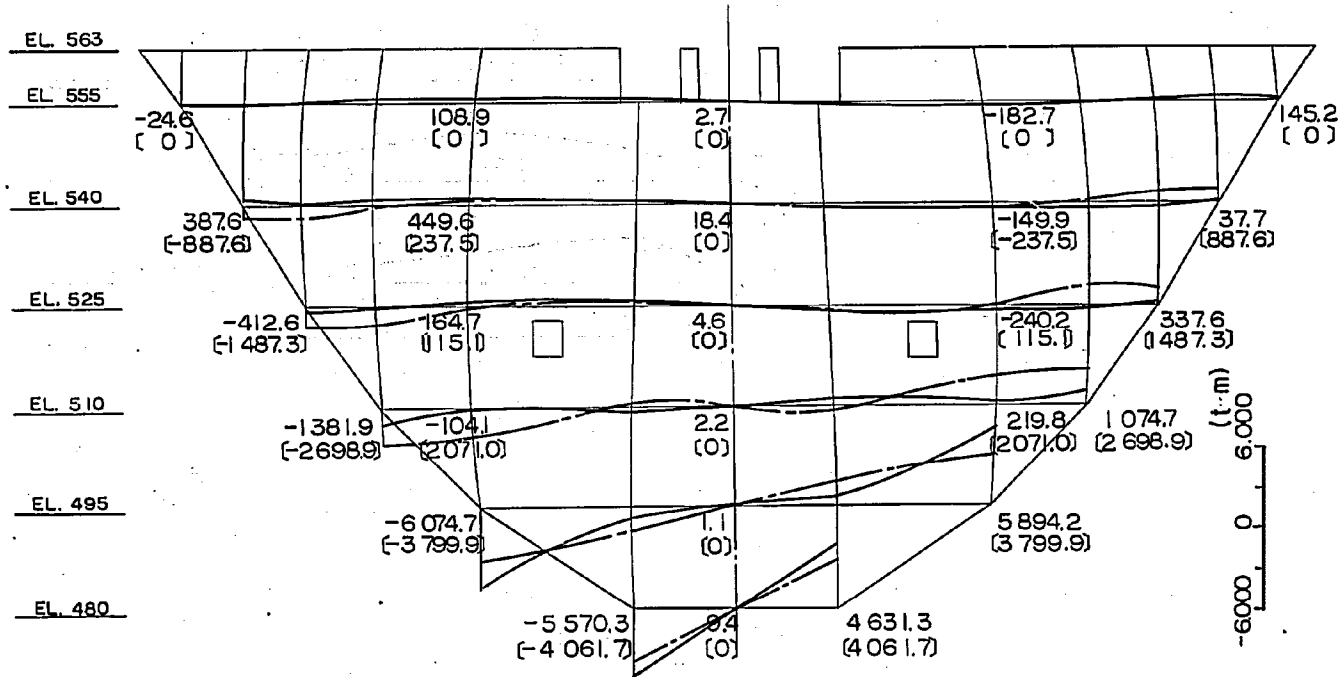
右岸



据れモーメント図

左岸

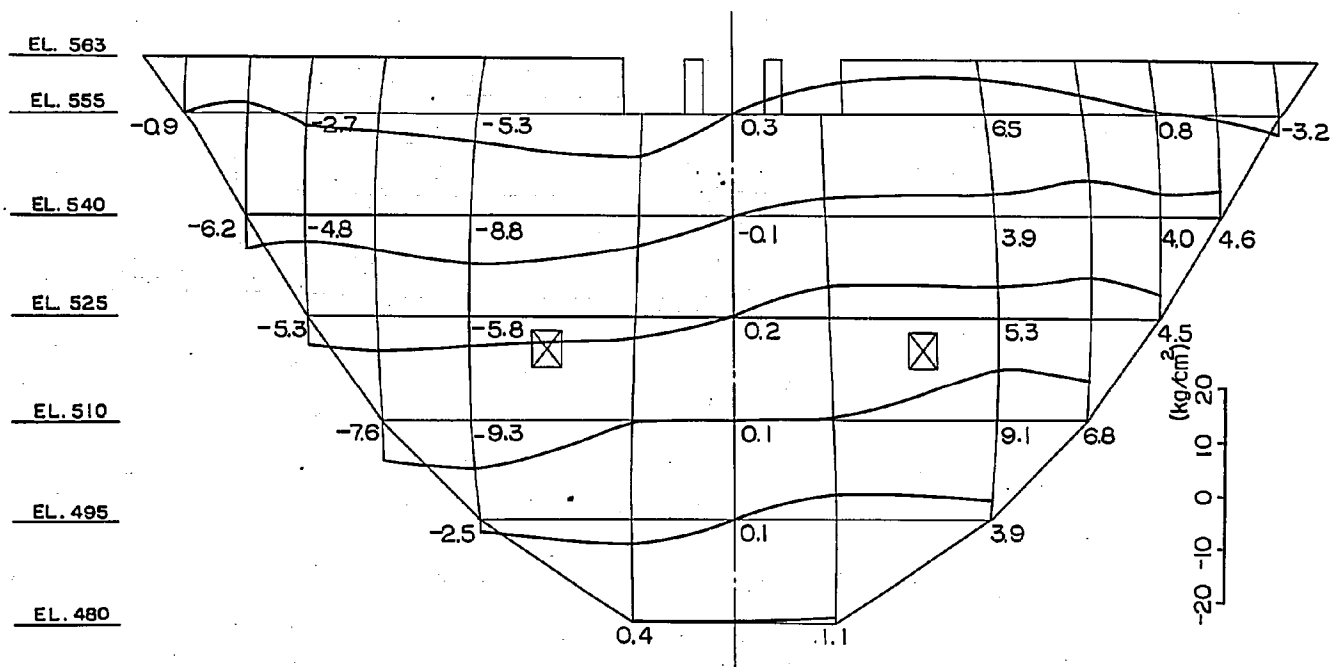
右岸



剪 断 应 力 图 （上流面）

左 岸

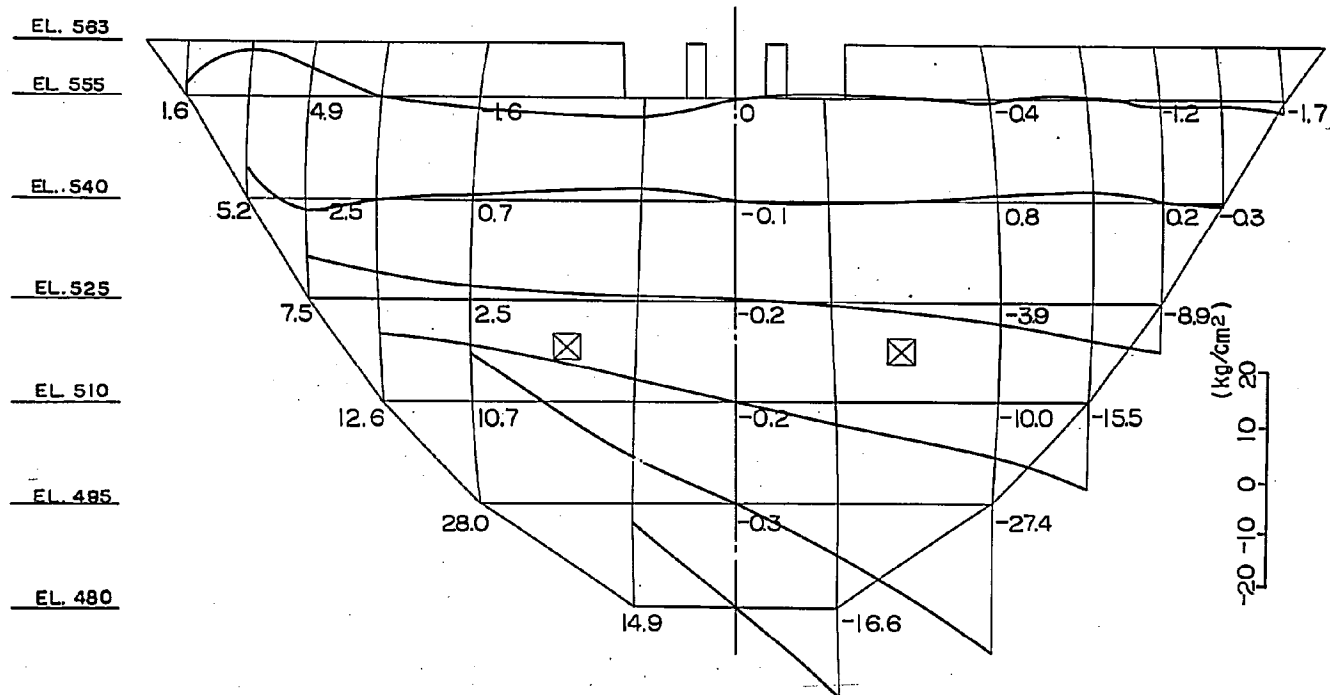
右 岸



剪断応力図（下流面）

左岸

右岸



C

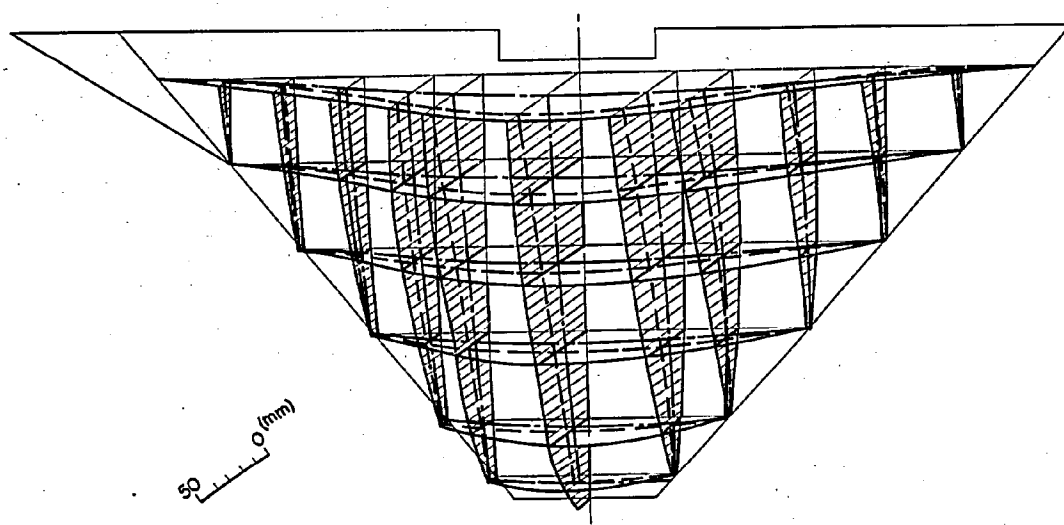
青 蓮 寺 ダ ム

C

半径方向撓み図

左岸

右岸



EL. 285

EL. 275

EL. 260

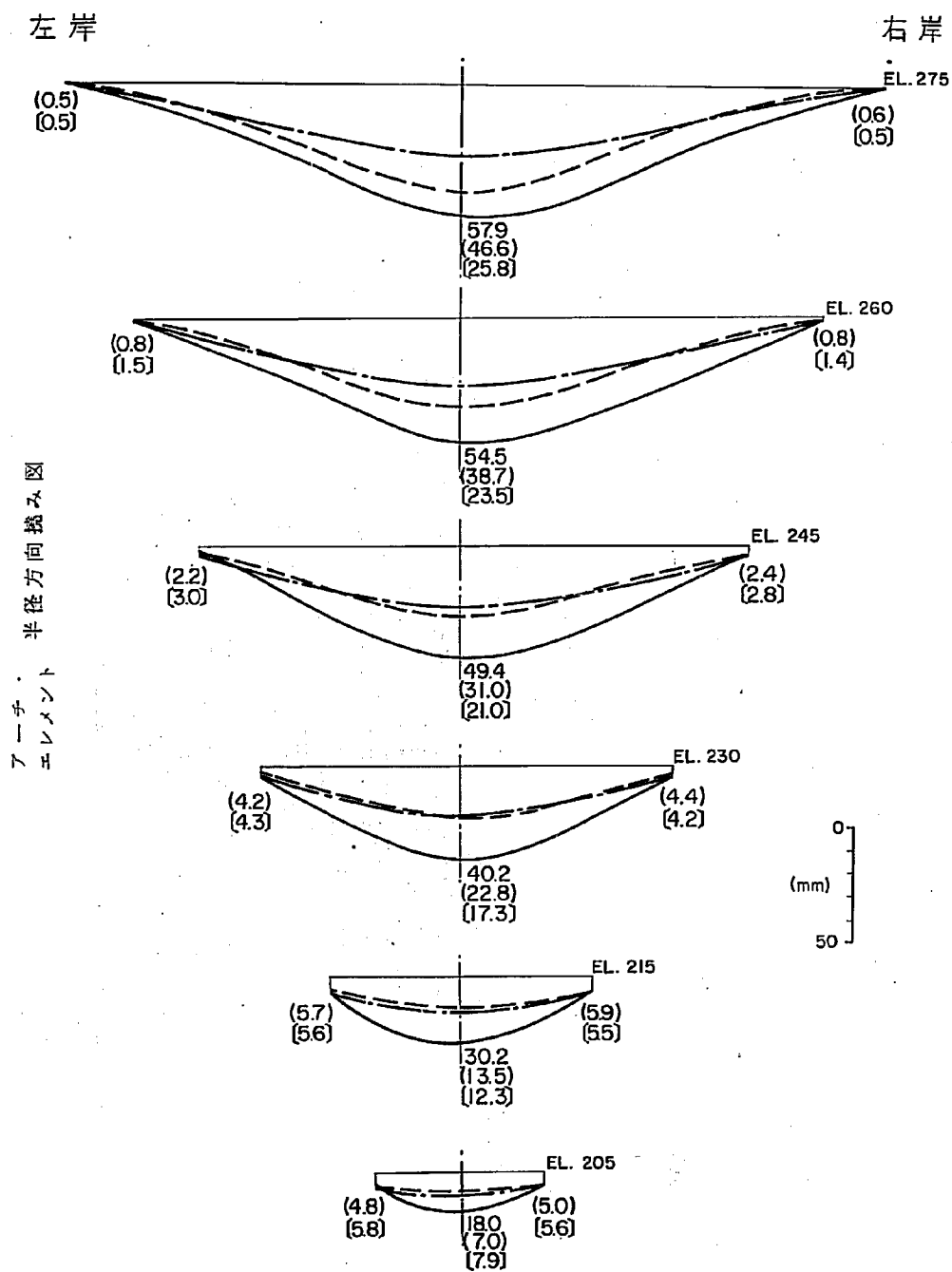
EL. 245

EL. 230

EL. 215

EL. 205

EL. 202

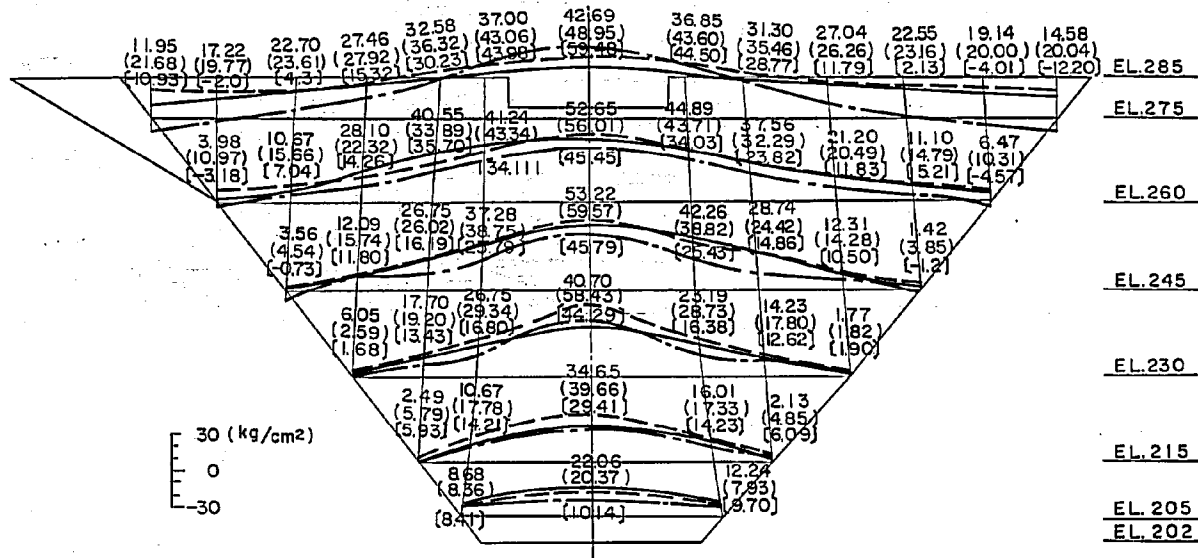


アーチ・半徑方向掘み図
エレメント

水平方向应力分布图（上流面）

左岸

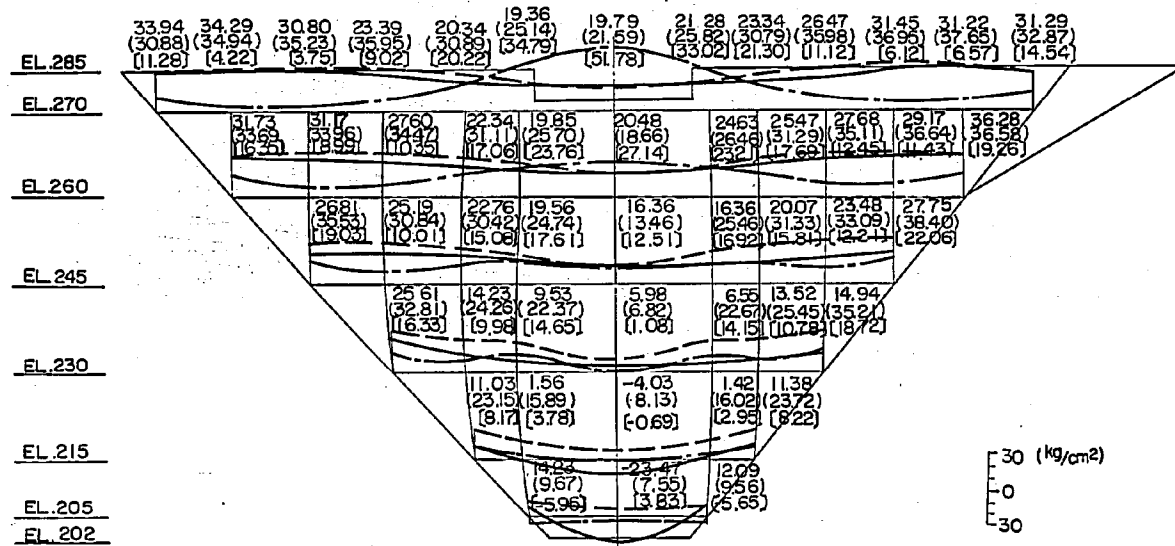
右岸



水平方向应力分布图 (下流面)

右岸

左岸

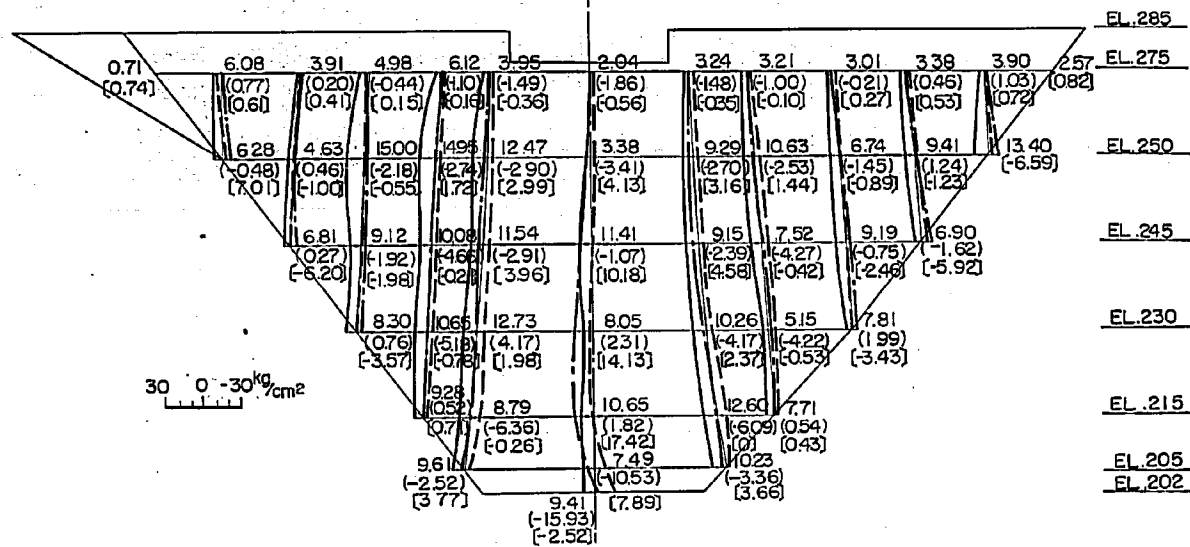


30 (kg/cm²)
0
-30

鉛直方向応力分布図（上流面）

左岸

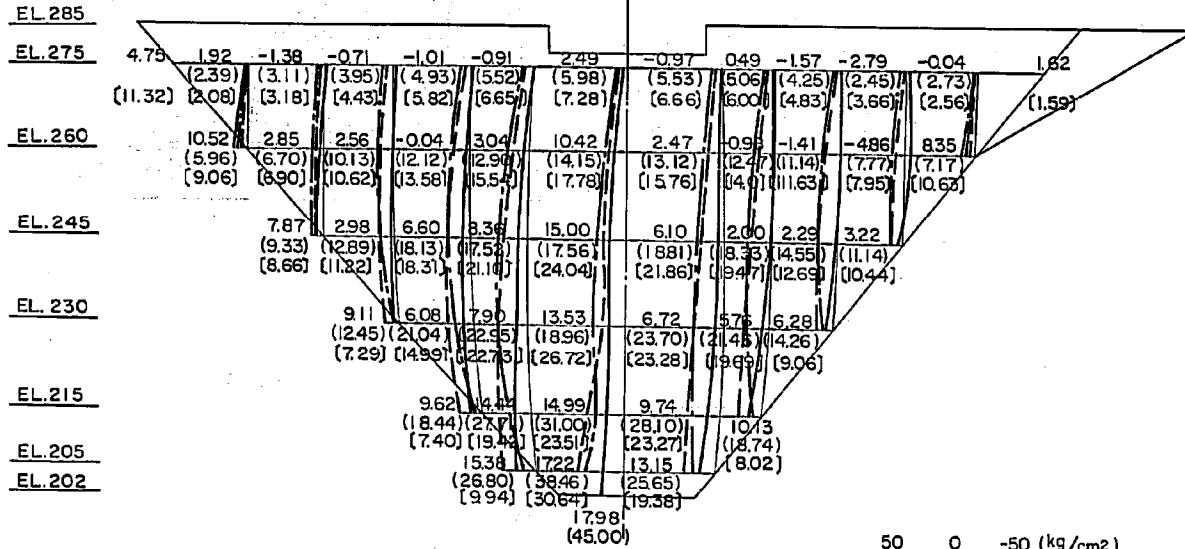
右岸



鉛直方向応力分布図（下流面）

右岸

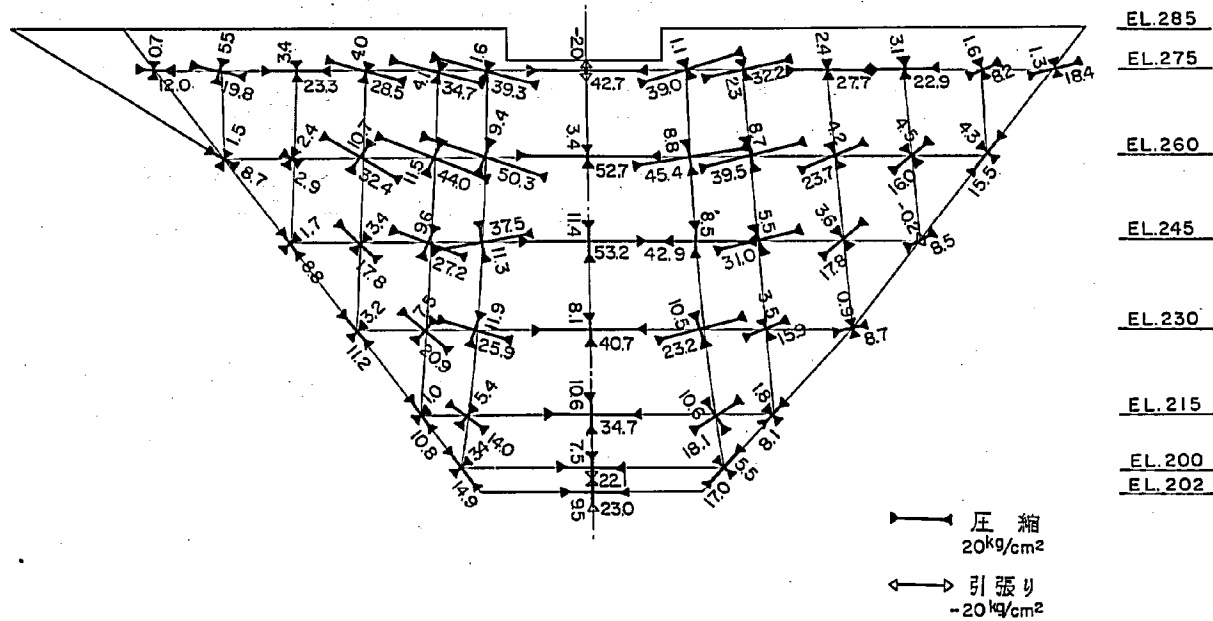
左岸



主 応 力 図 (上流面)
実 験 値

左 岸

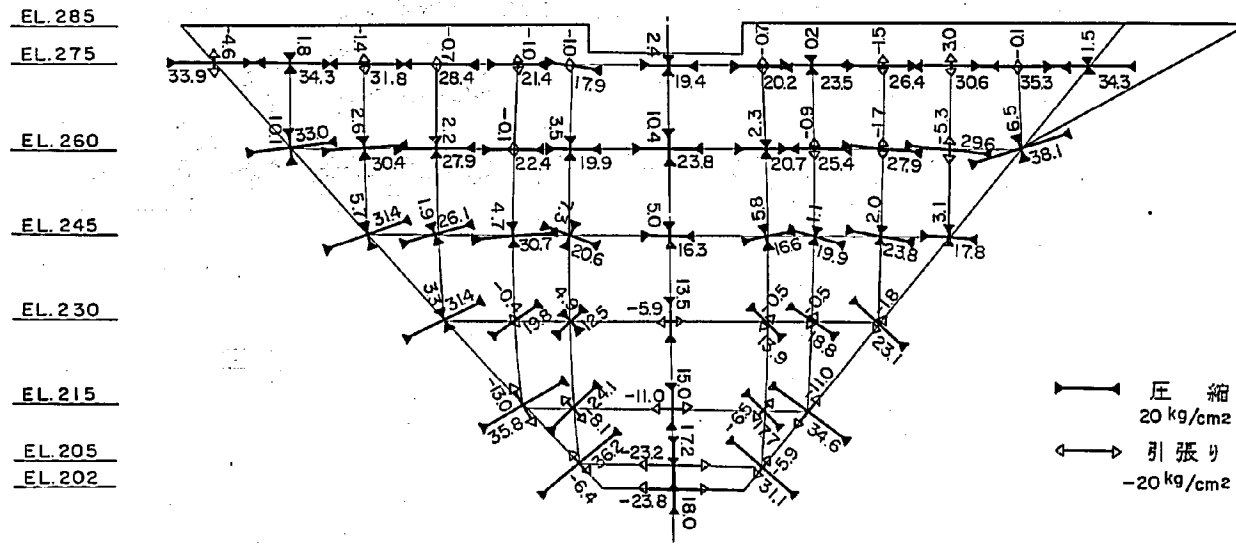
右 岸



主 応 力 図 (下 流 面)
実 験 値

右 岸

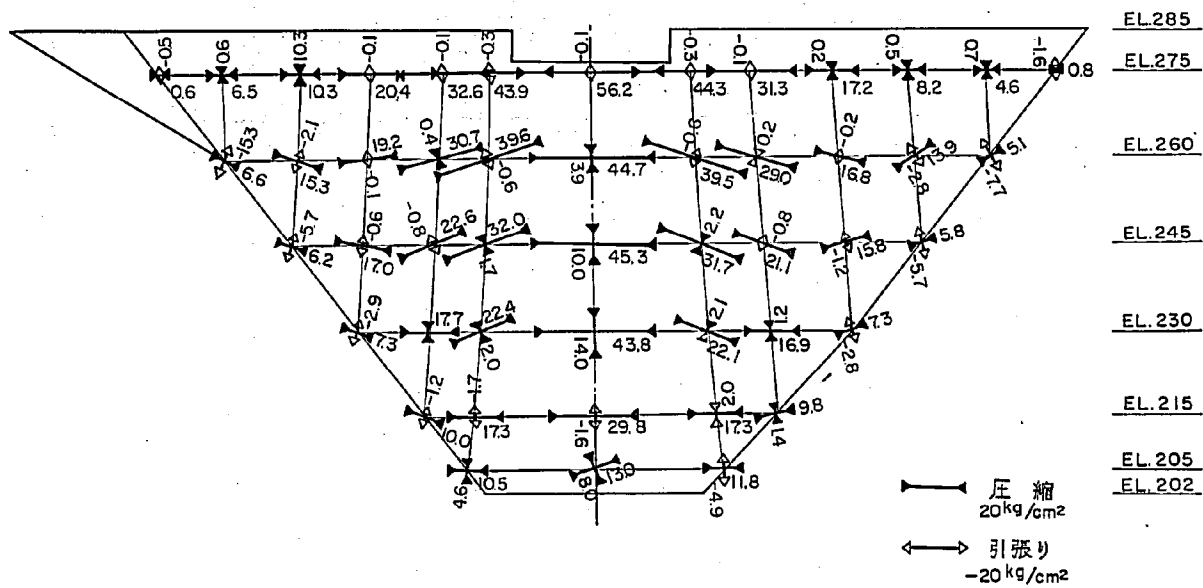
左 岸



主 応 力 図 (上流面)
計算値

左 岸

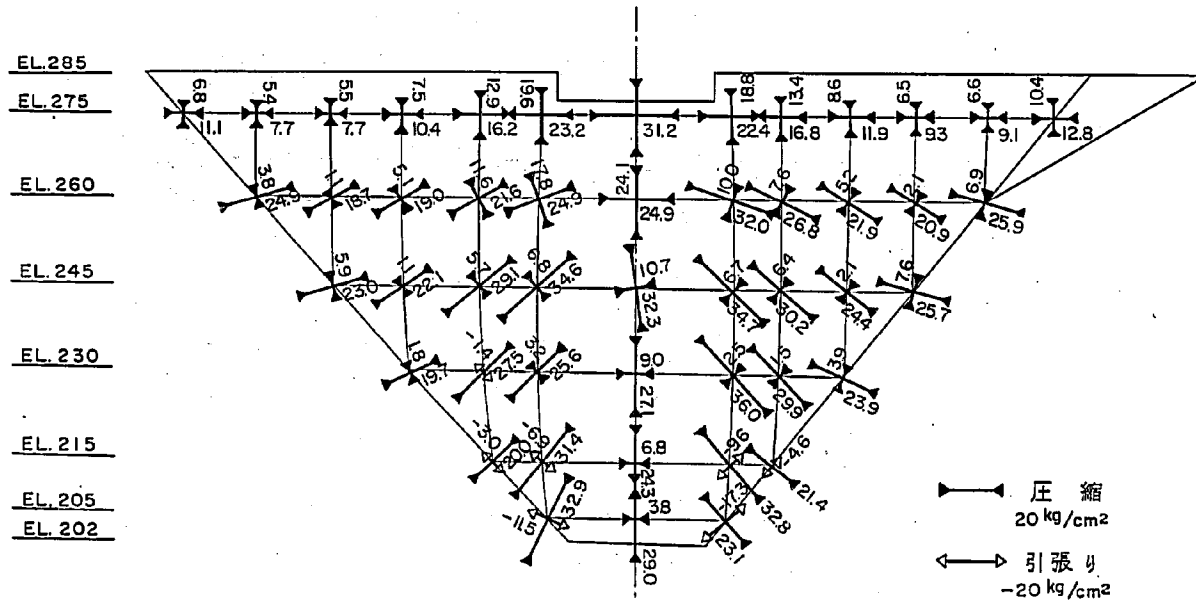
右 岸



主 応 力 図 (下流面)
計算値

右 岸

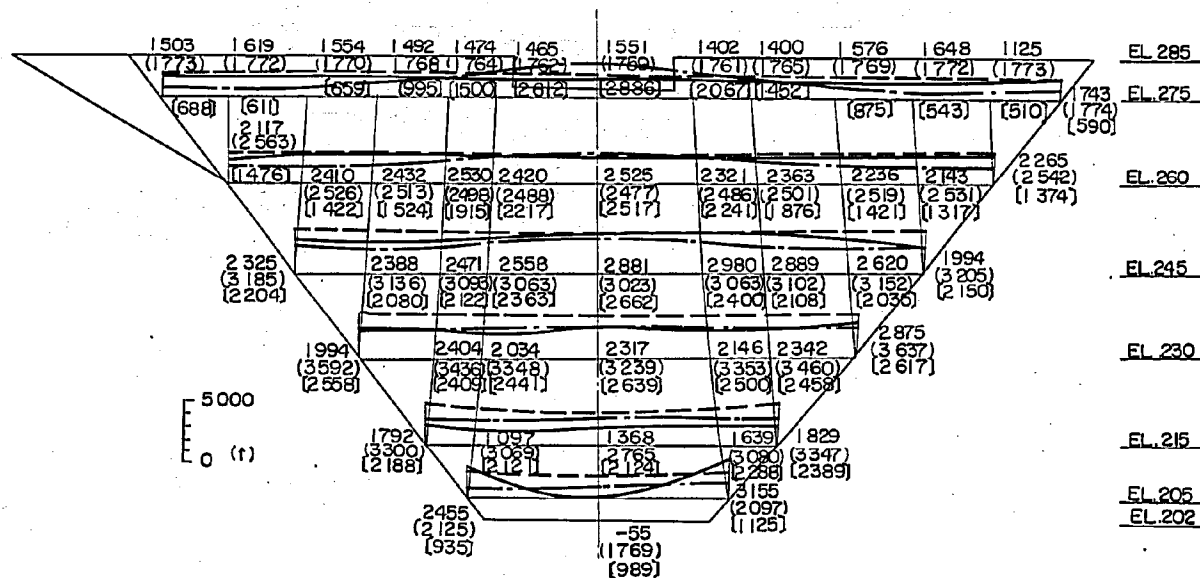
左 岸



アーチ・スラスト図

左岸

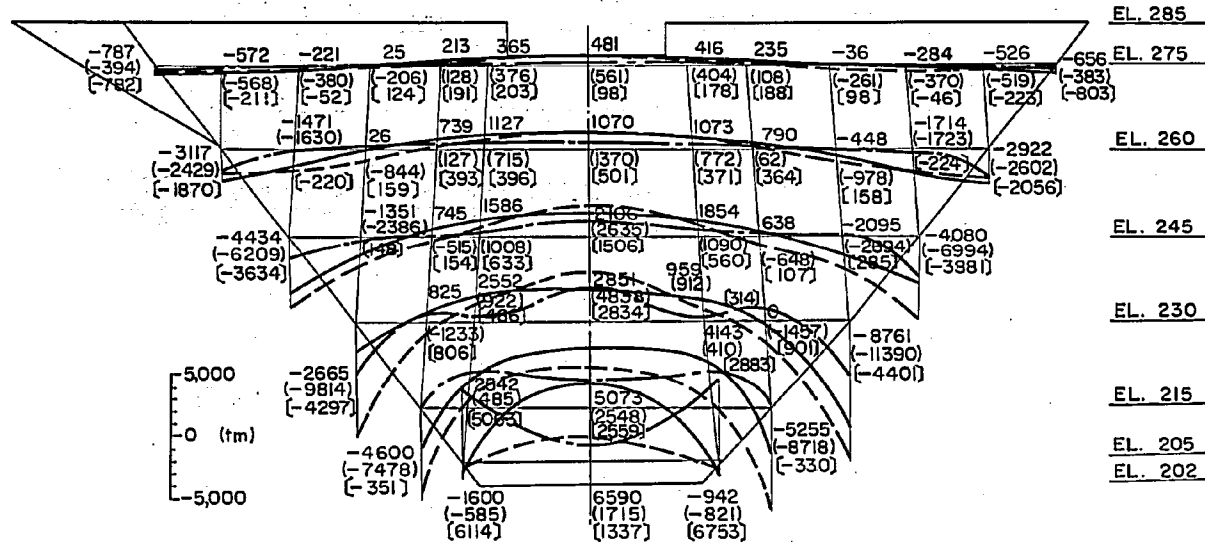
右岸



アーチ・モーメント分布図

左岸

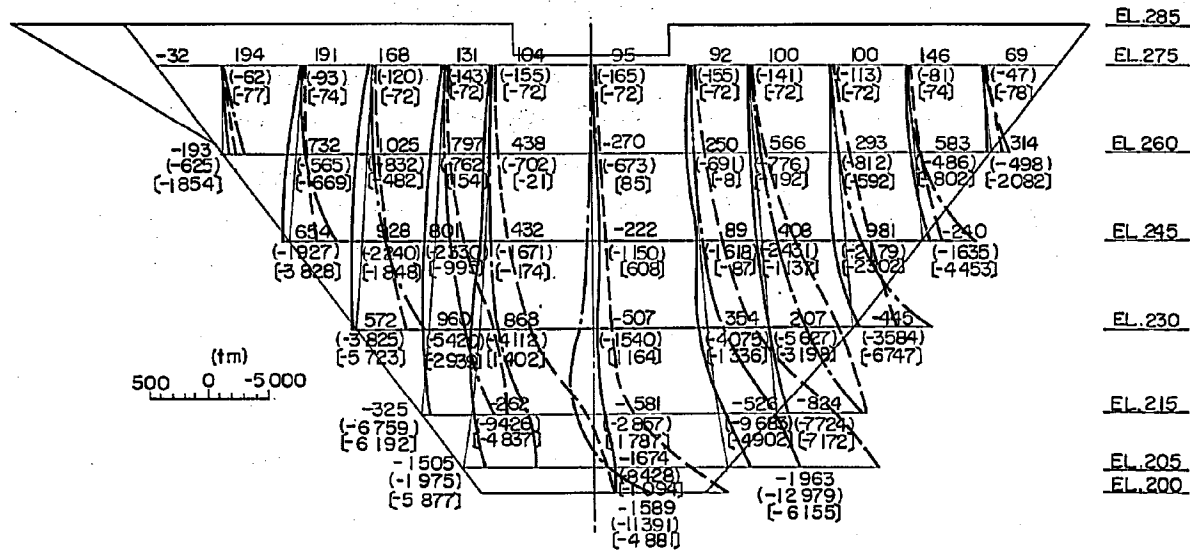
右岸



片持梁モーメント分布図

左岸

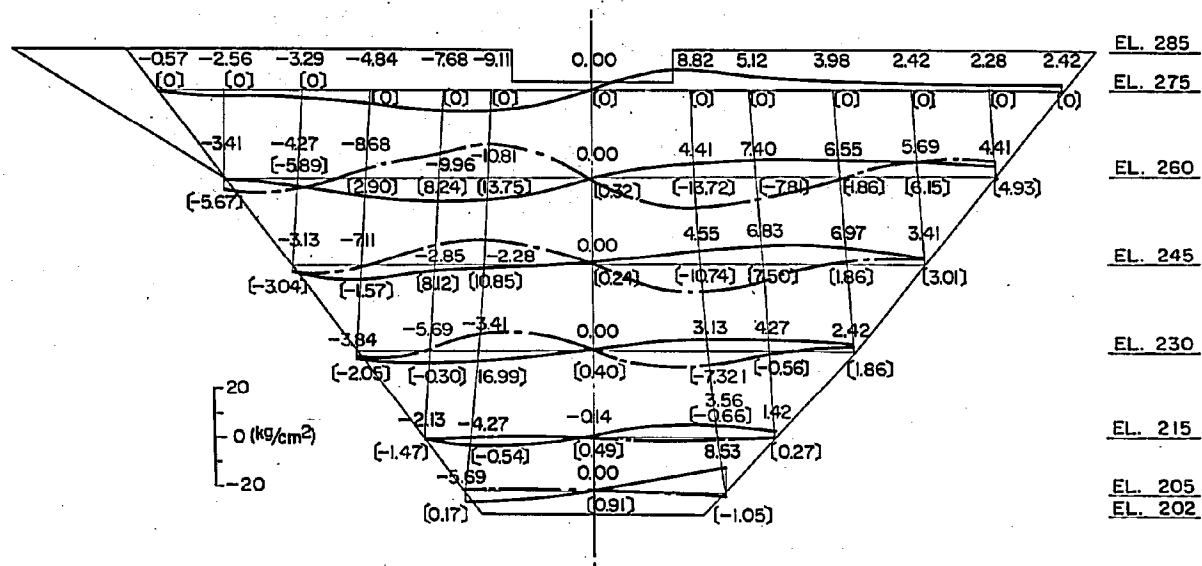
右岸



せん断応力図 (上流面)

左岸

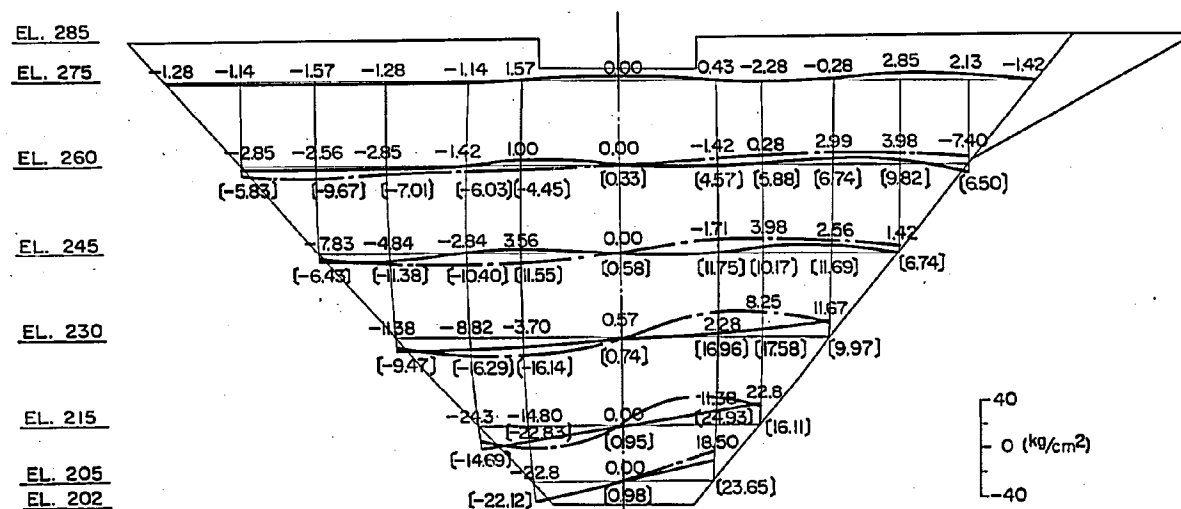
右岸



せん断応力図 (下流面)

右岸

左岸



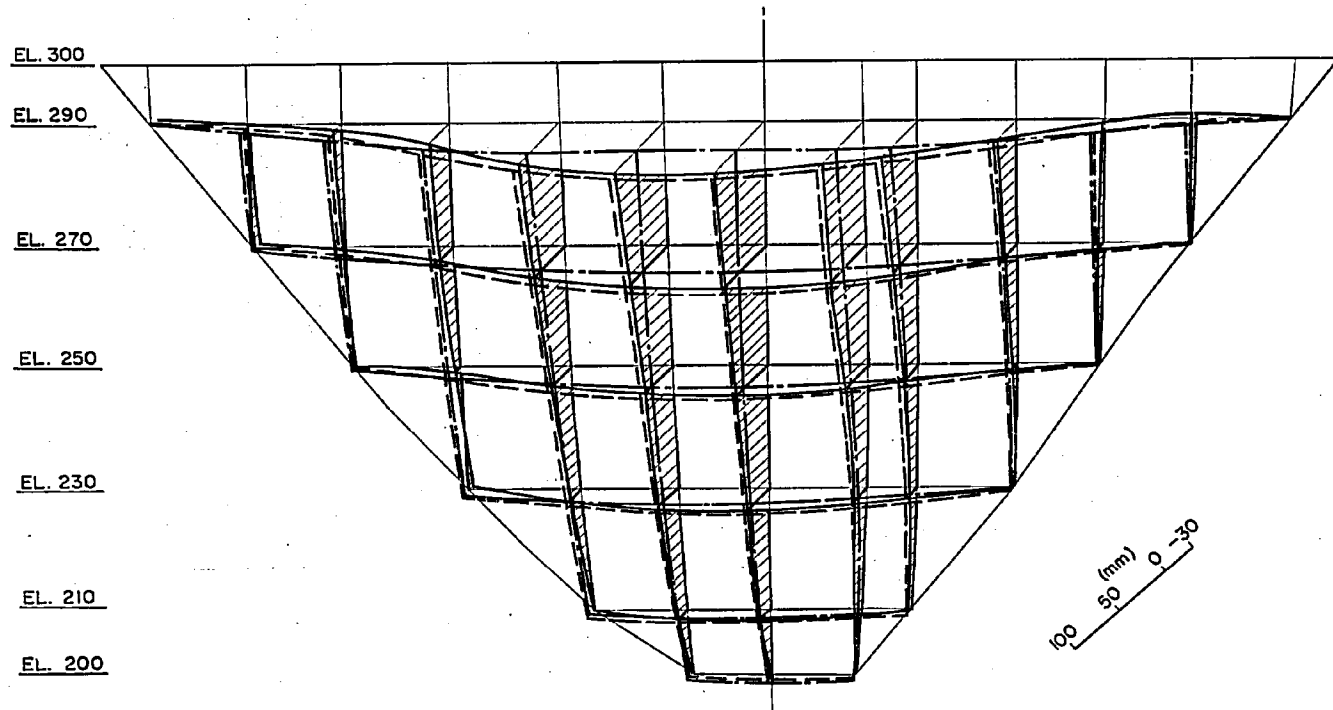
C 矢 作 ダ ム

C

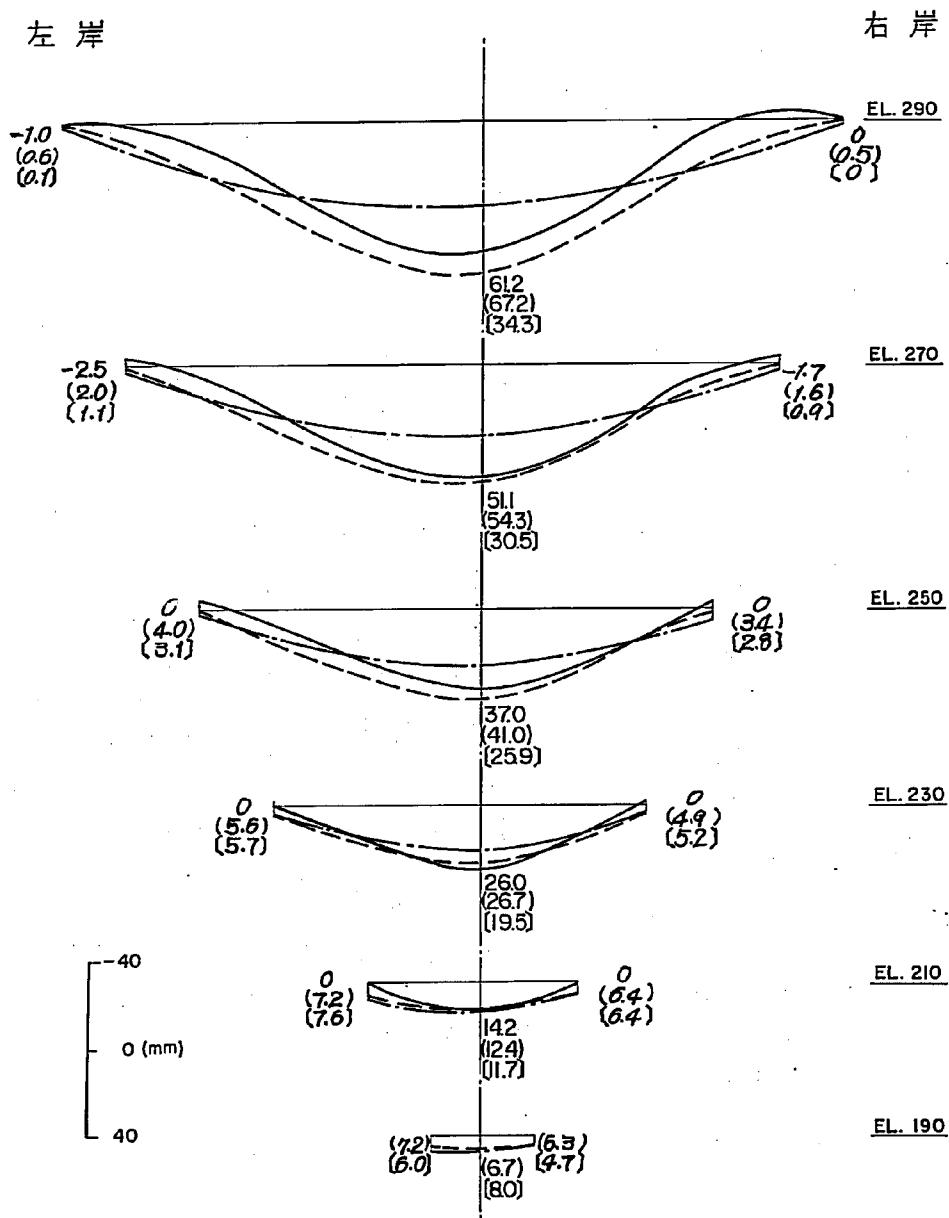
半径方向撓み図

右岸

左岸



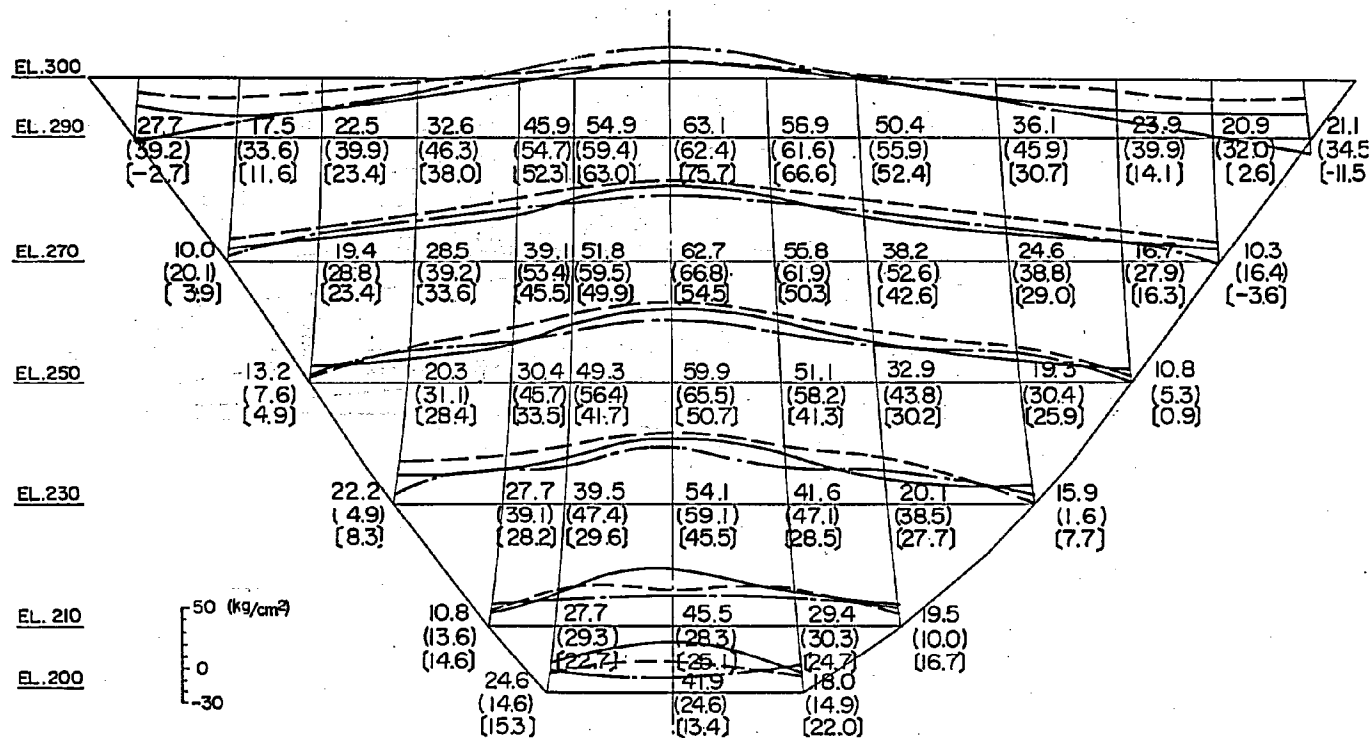
フーチ・半徑方向撓み図
エレメント



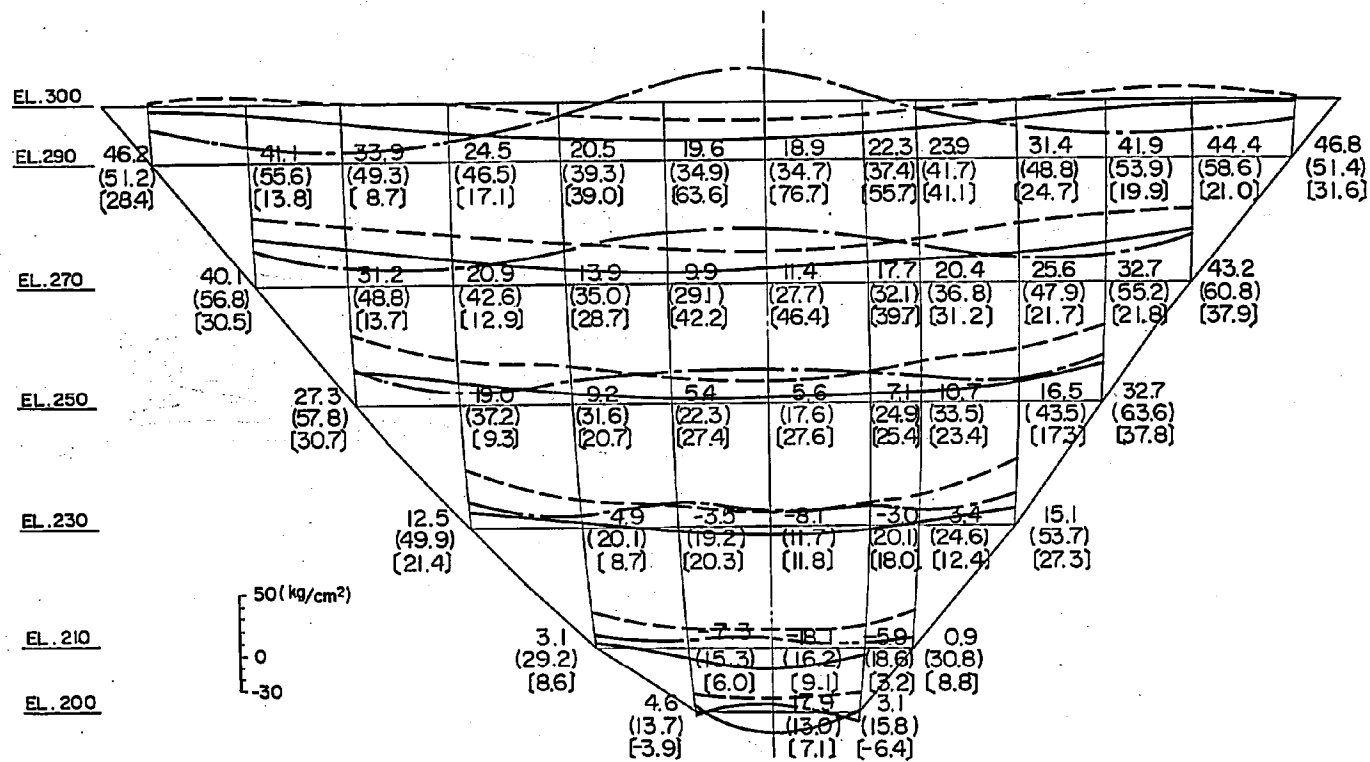
水平方向应力分布图（上流面）

左岸

右岸



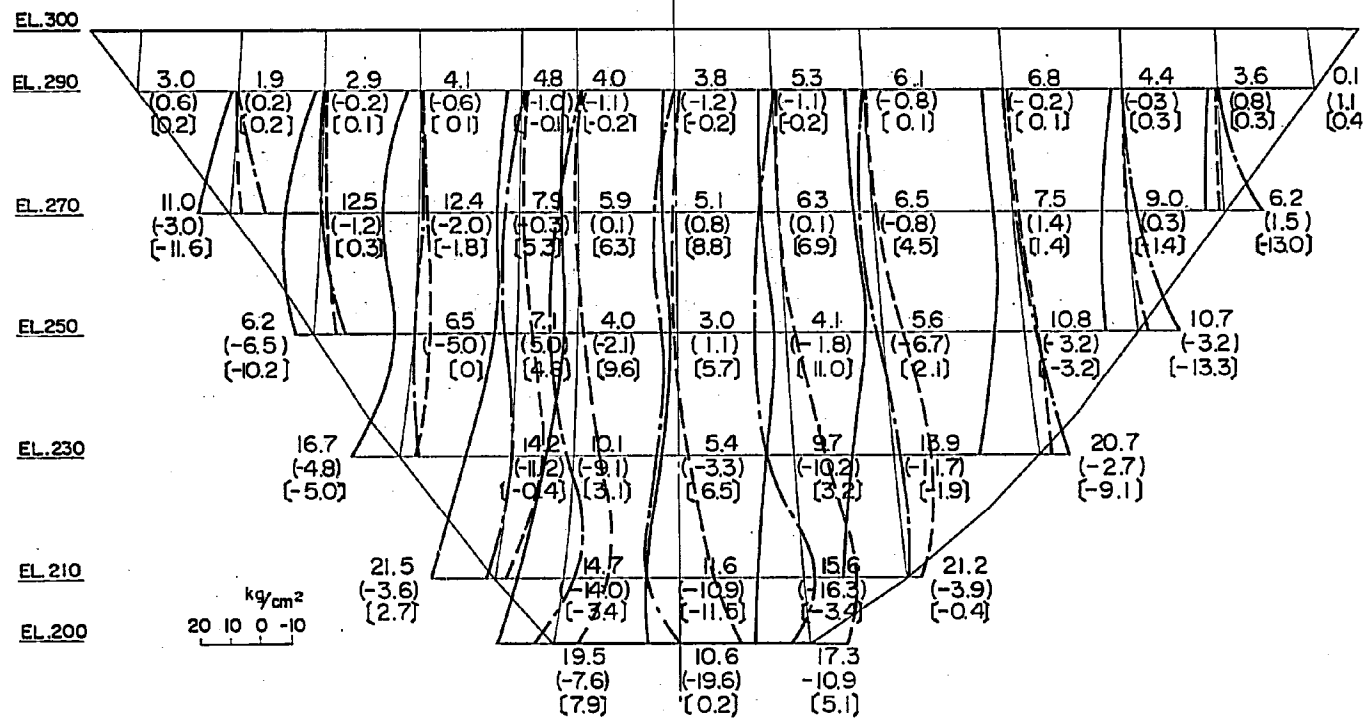
左岸



鉛直方向応力分布図（上流面）

左 岸

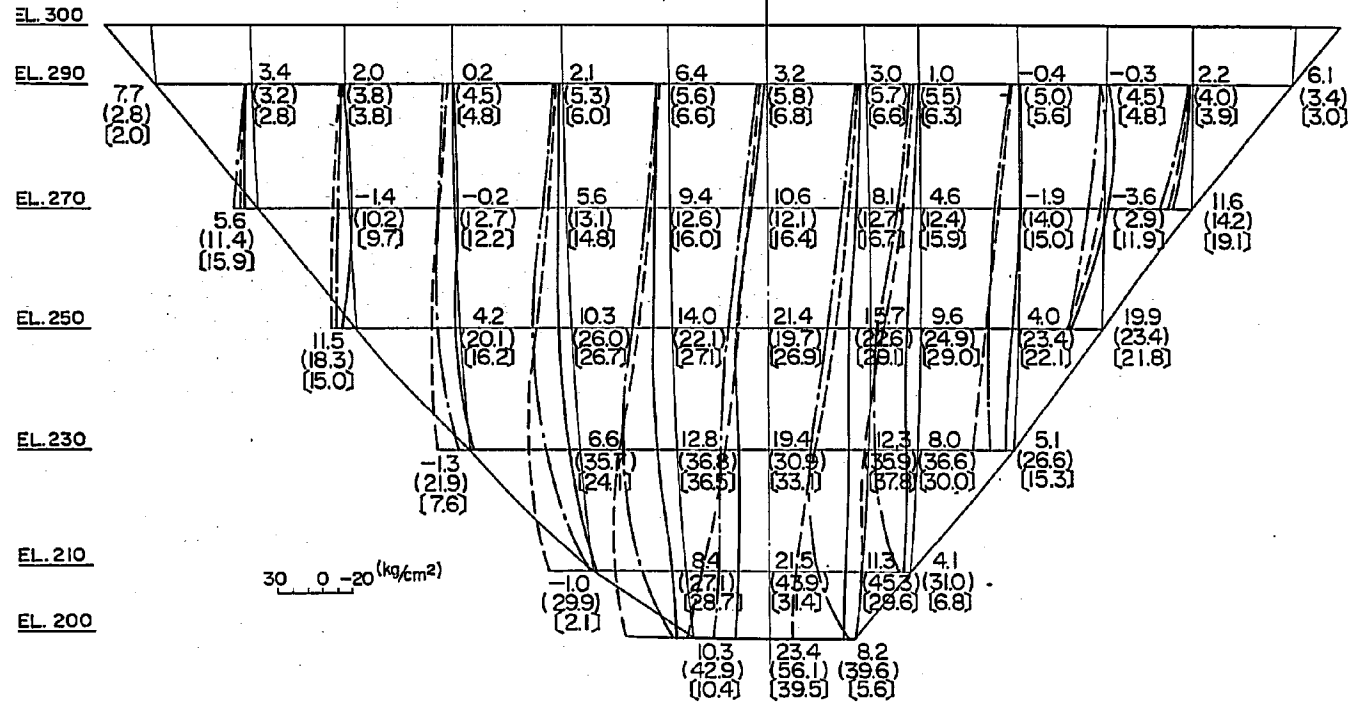
右 岸



鉛直方向応力分布図（下流面）

右岸

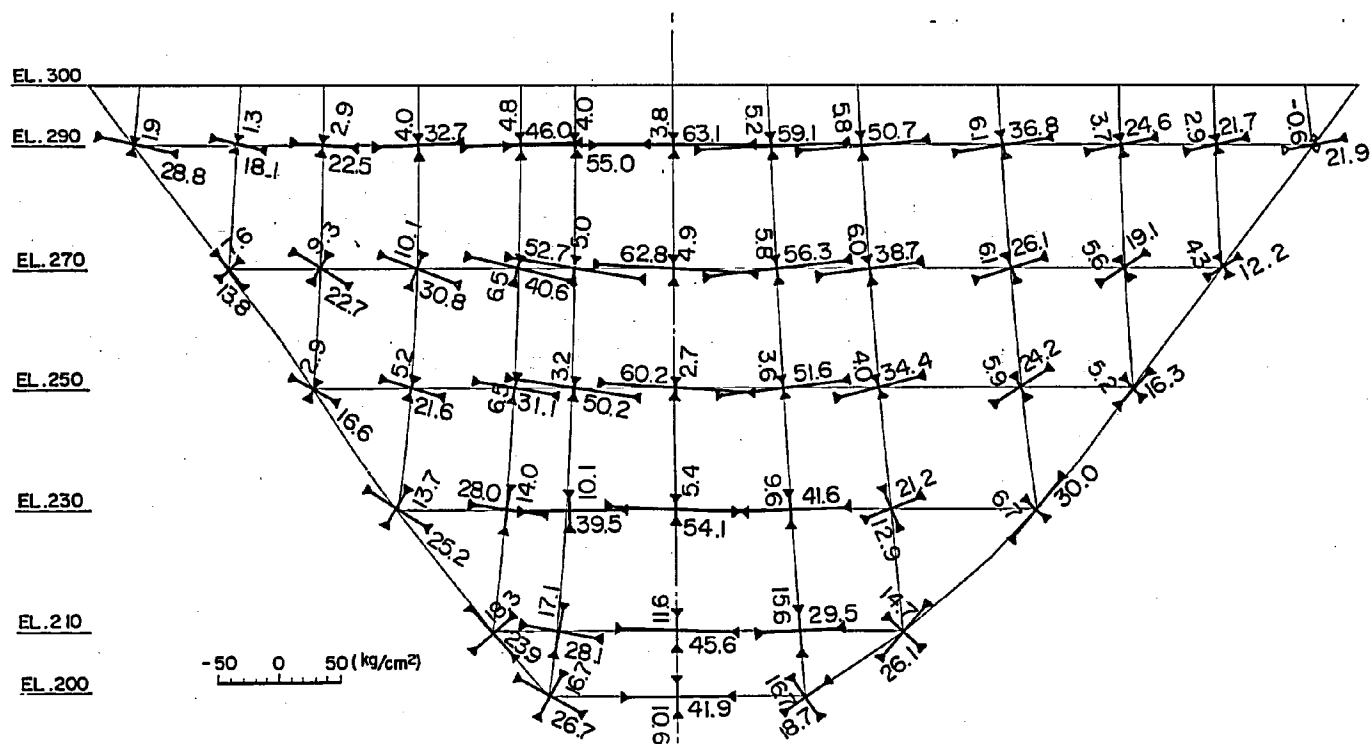
左岸



主 应 力 图 (上流面)
突 厥 值

左 岸

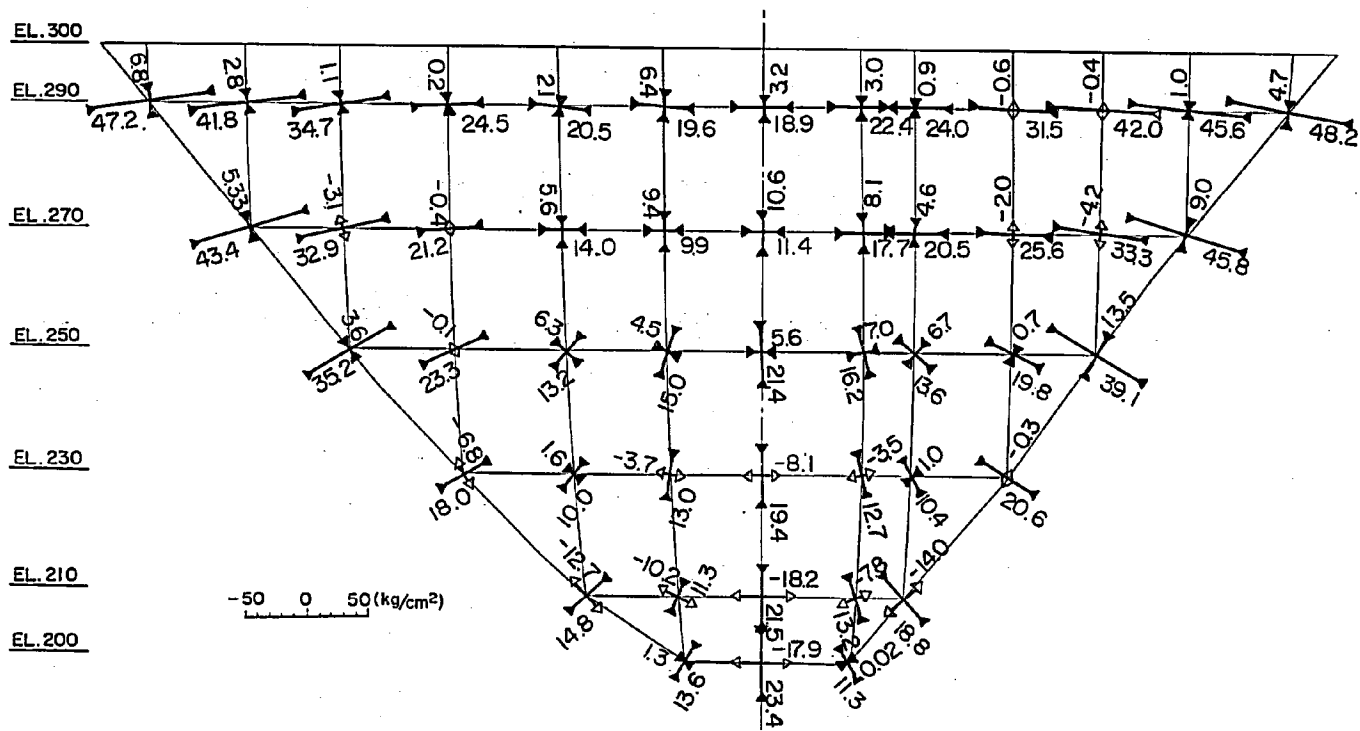
右 岸



主 应 力 图 (下 流 面)
实 验 值

右 岸

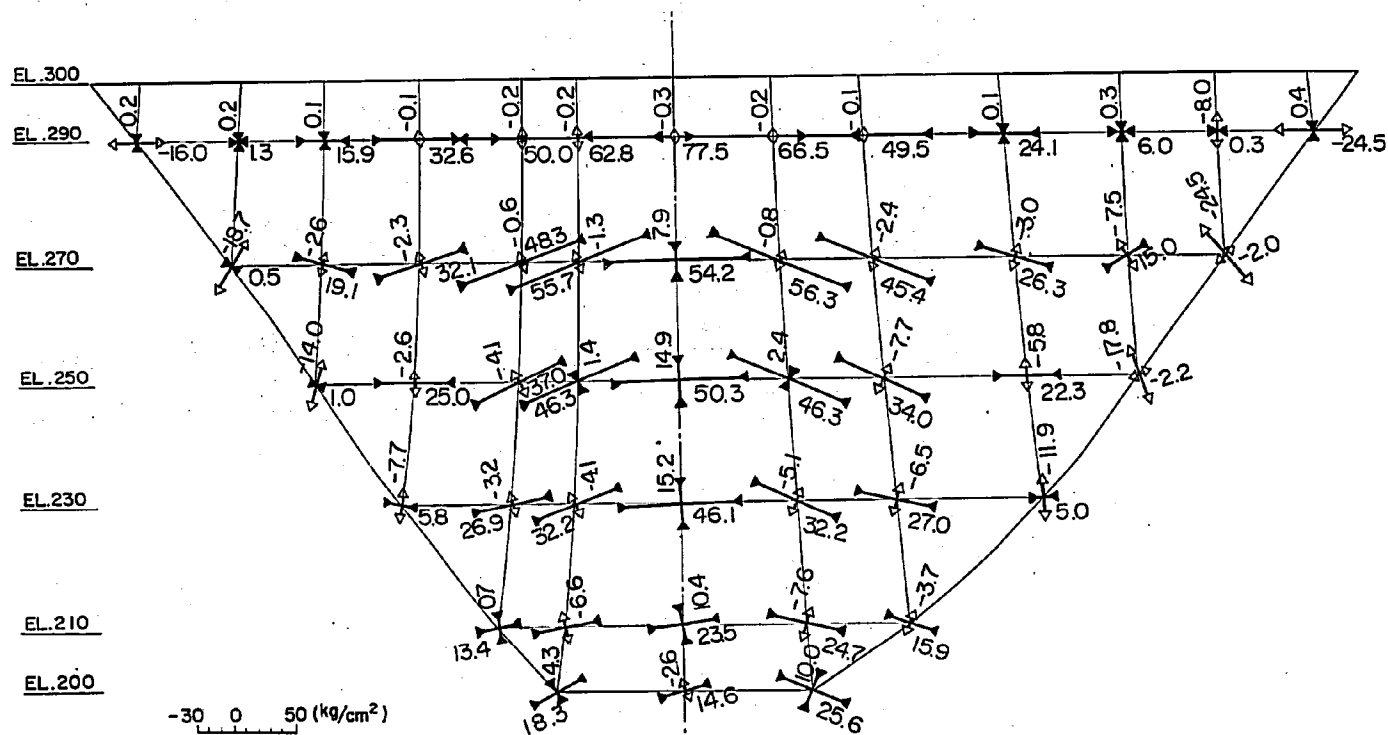
左 岸



主 應 力 圖 (上流面)
計 算 值

左 岸

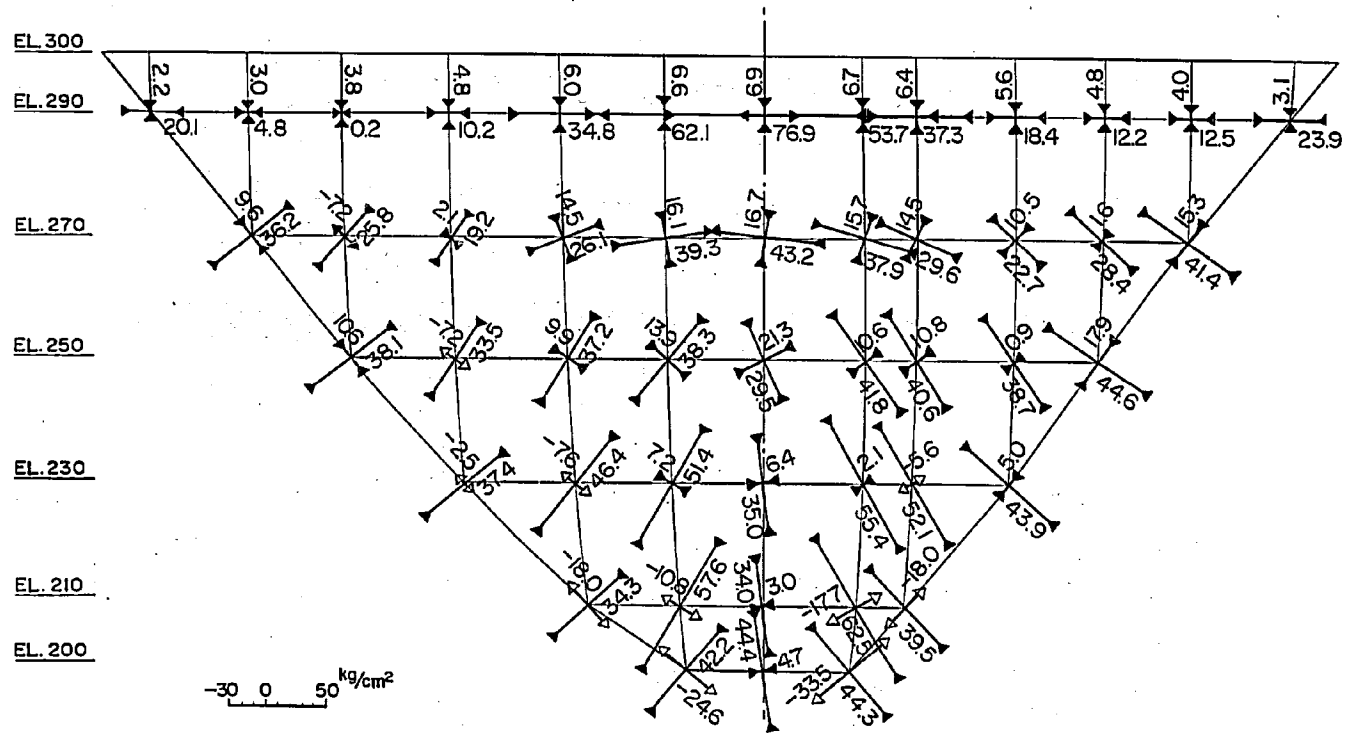
右 岸



主 應 力 圖 (下 流 面)
計 算 值

右 岸

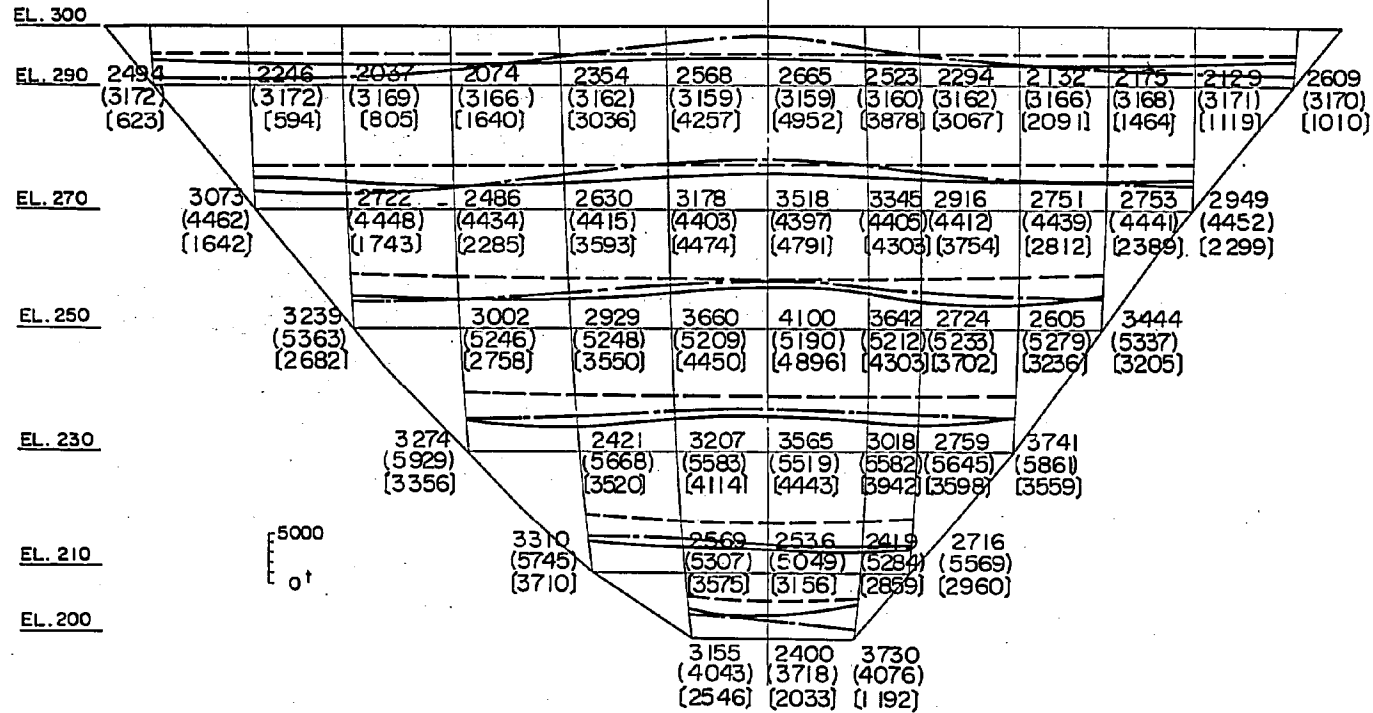
左 岸



アーチ・スラスト図

右岸

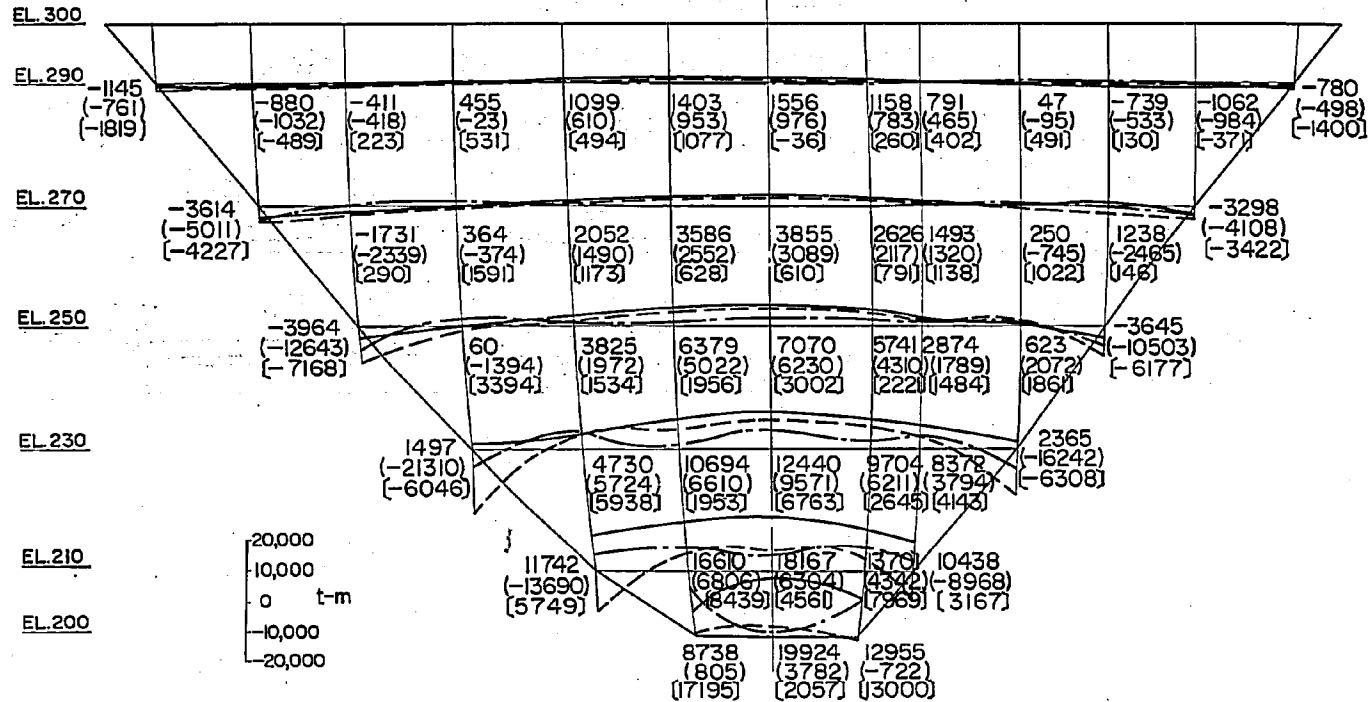
左岸



アーチ・モーメント分布図

右岸

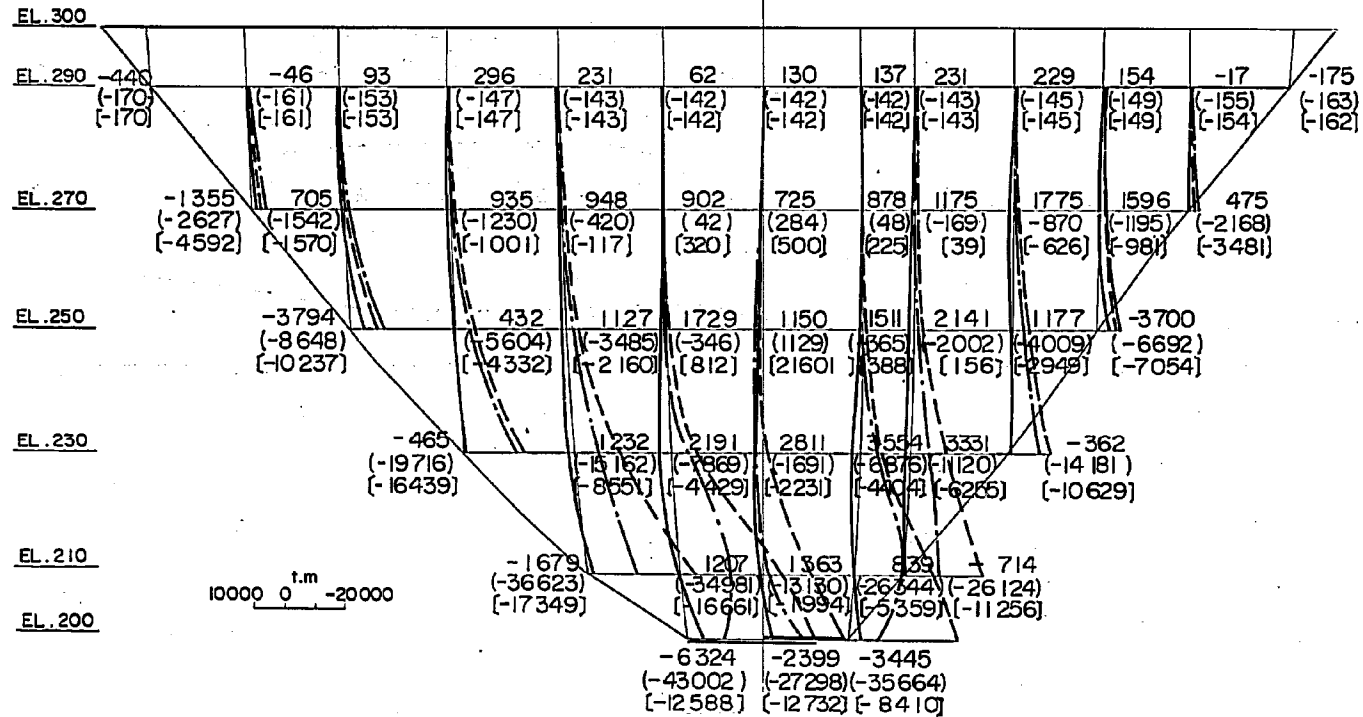
左岸



片持梁モーメント分布図

右岸

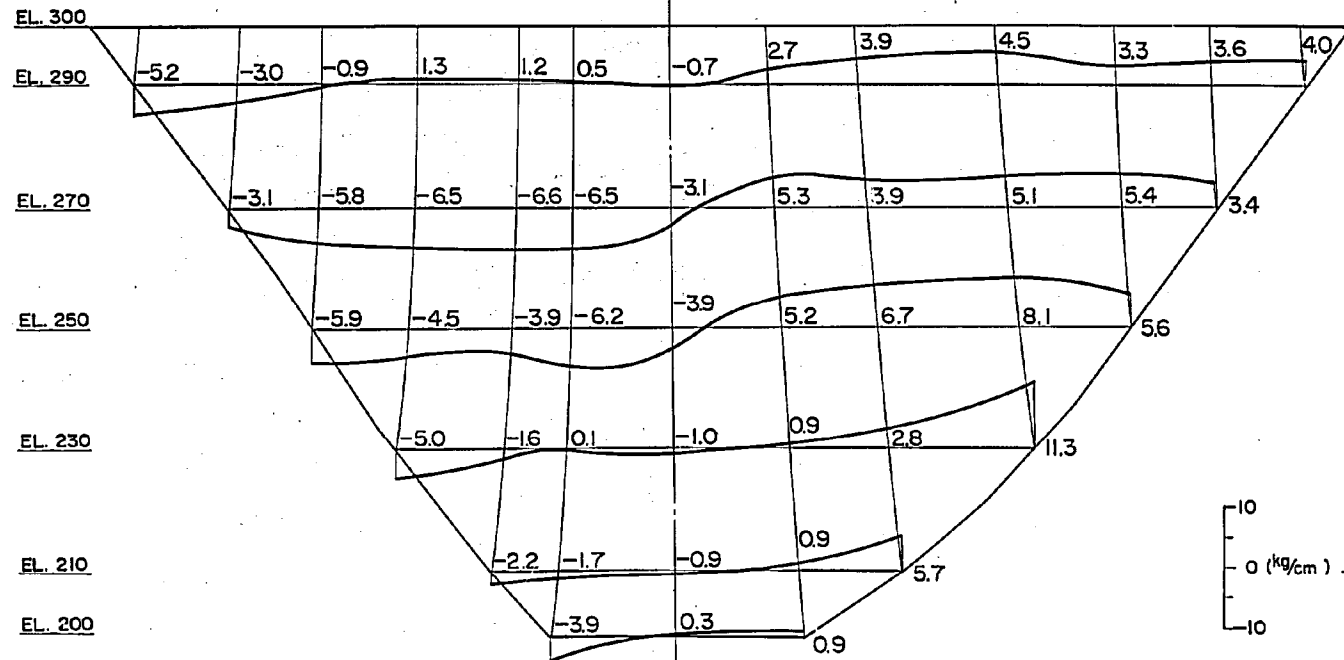
左岸



せん断応力図 (上流面)

右岸

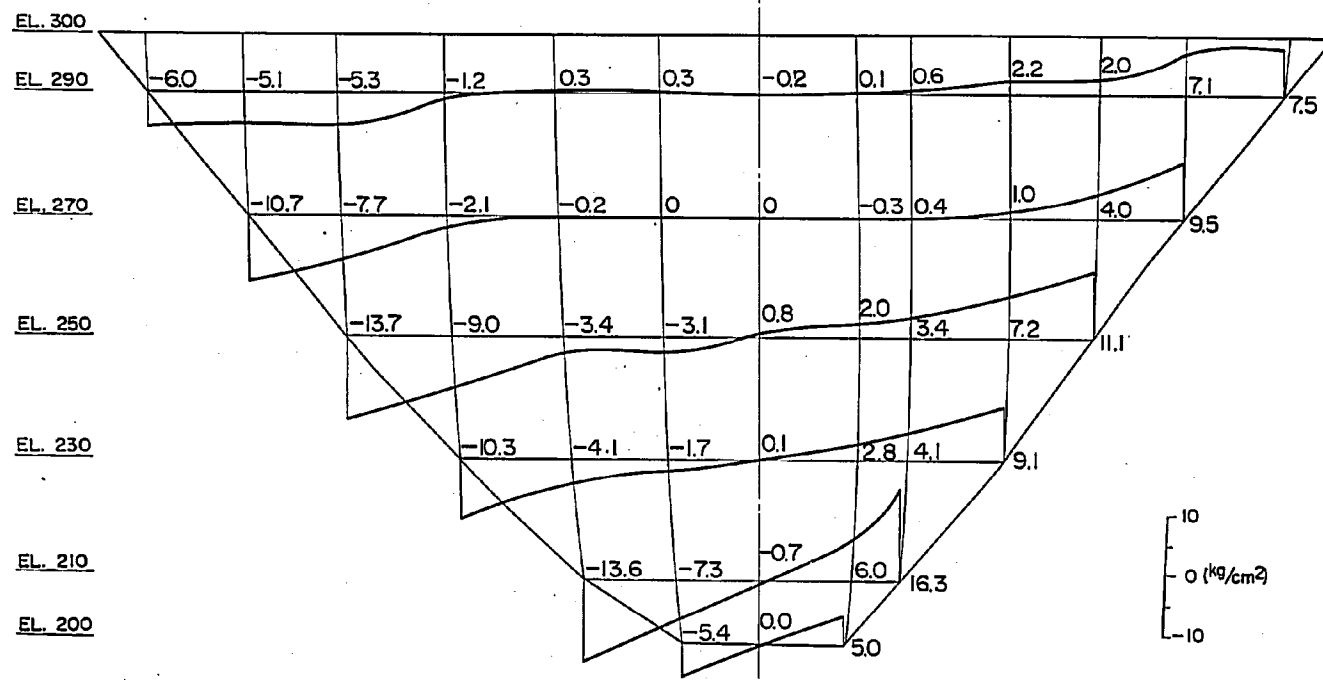
右岸



せん断応力図 (下流面)

右岸

左岸



C

豊 平 峡 ダ ム

C

半径方向撓み図

右岸

左岸

EL.477.5

EL.469

EL.455

EL.440

EL.425

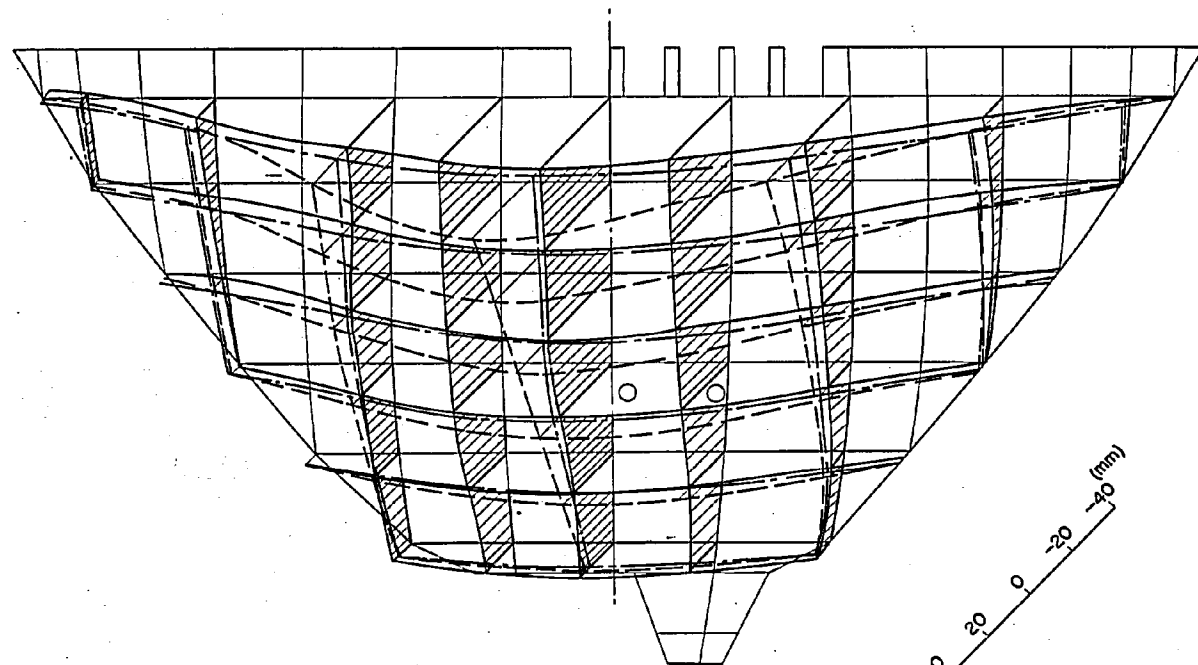
EL.410

EL.395

EL.390

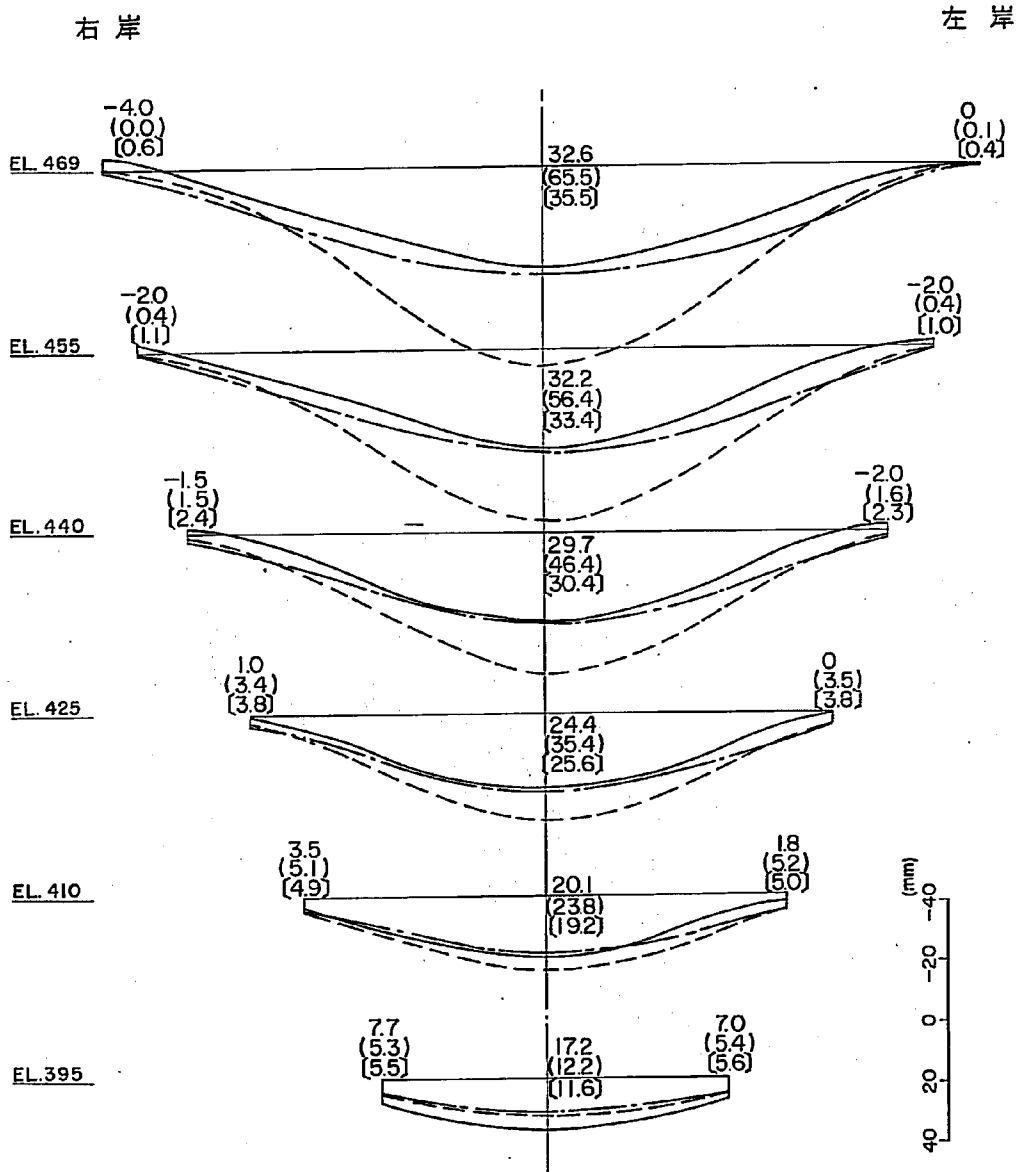
EL.380

EL.375



40 20 0 20 40 (mm)

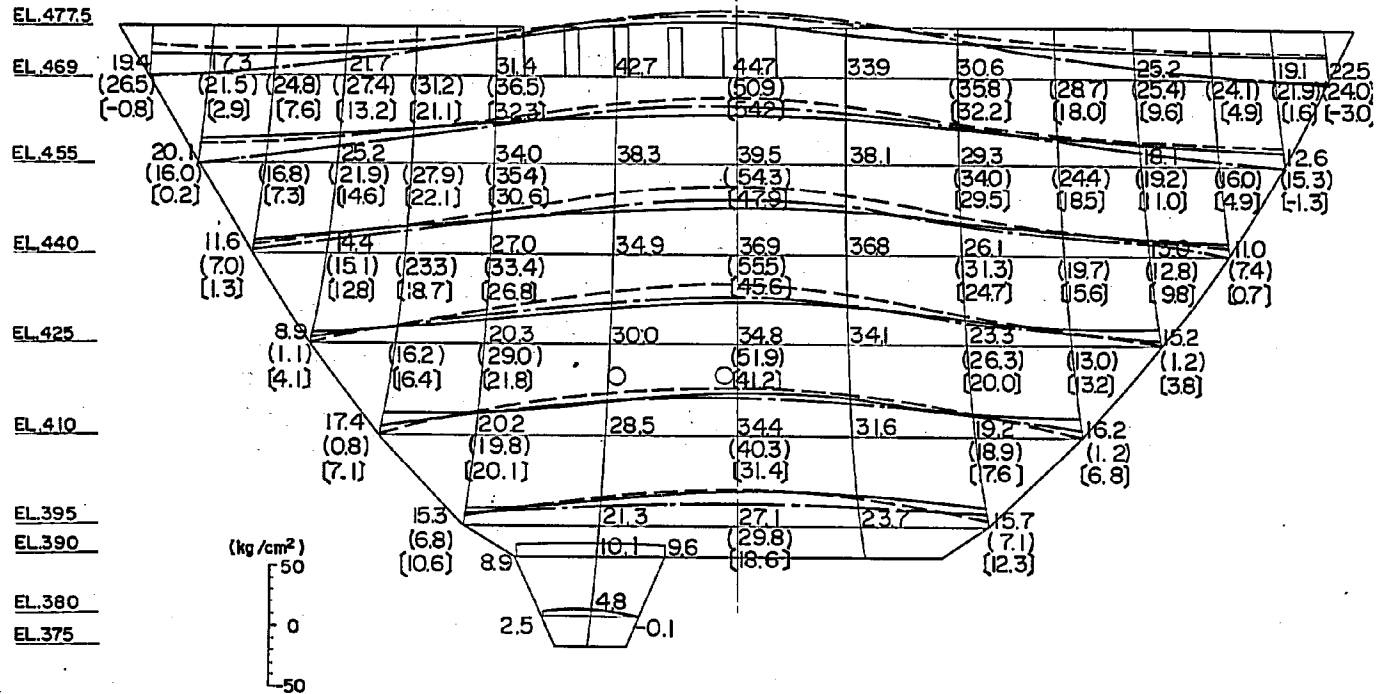
アーチ・
エレメント 半径方向撓み図



水平方向应力分布图（上流面）

左岸

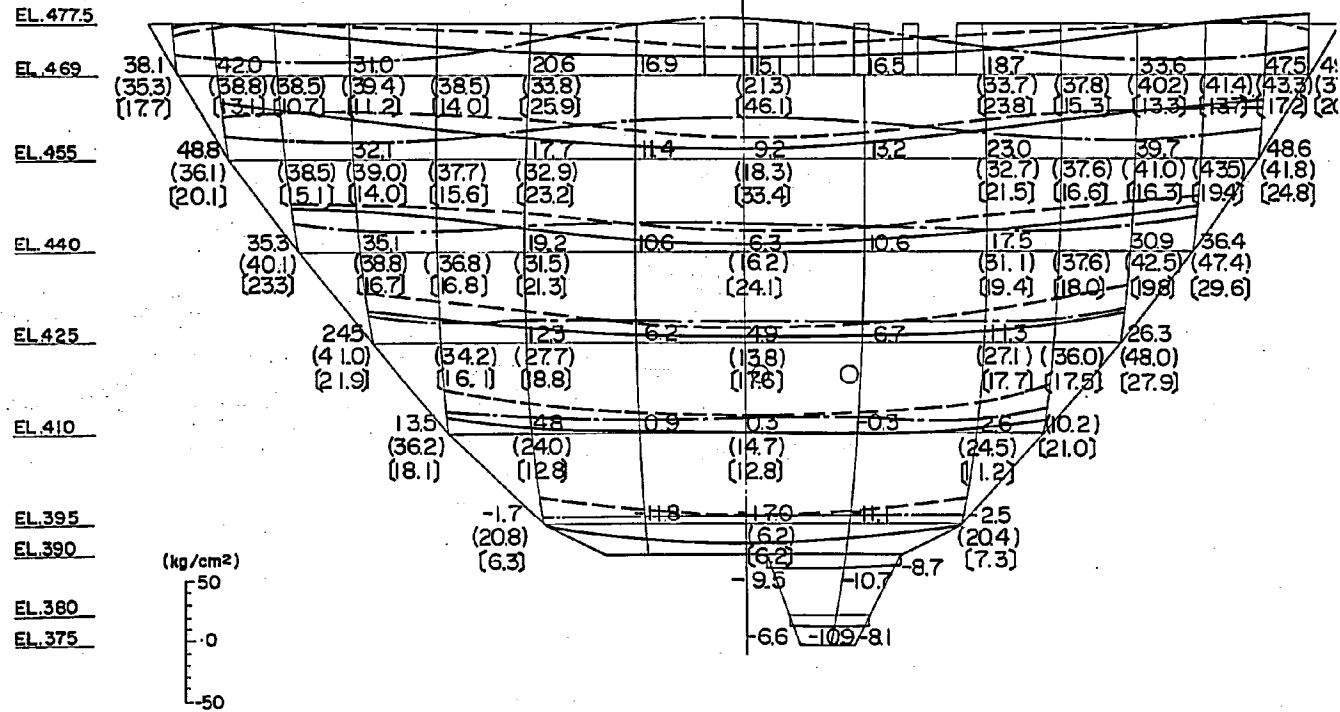
右岸



水平方向应力分布图（下流面）

右岸

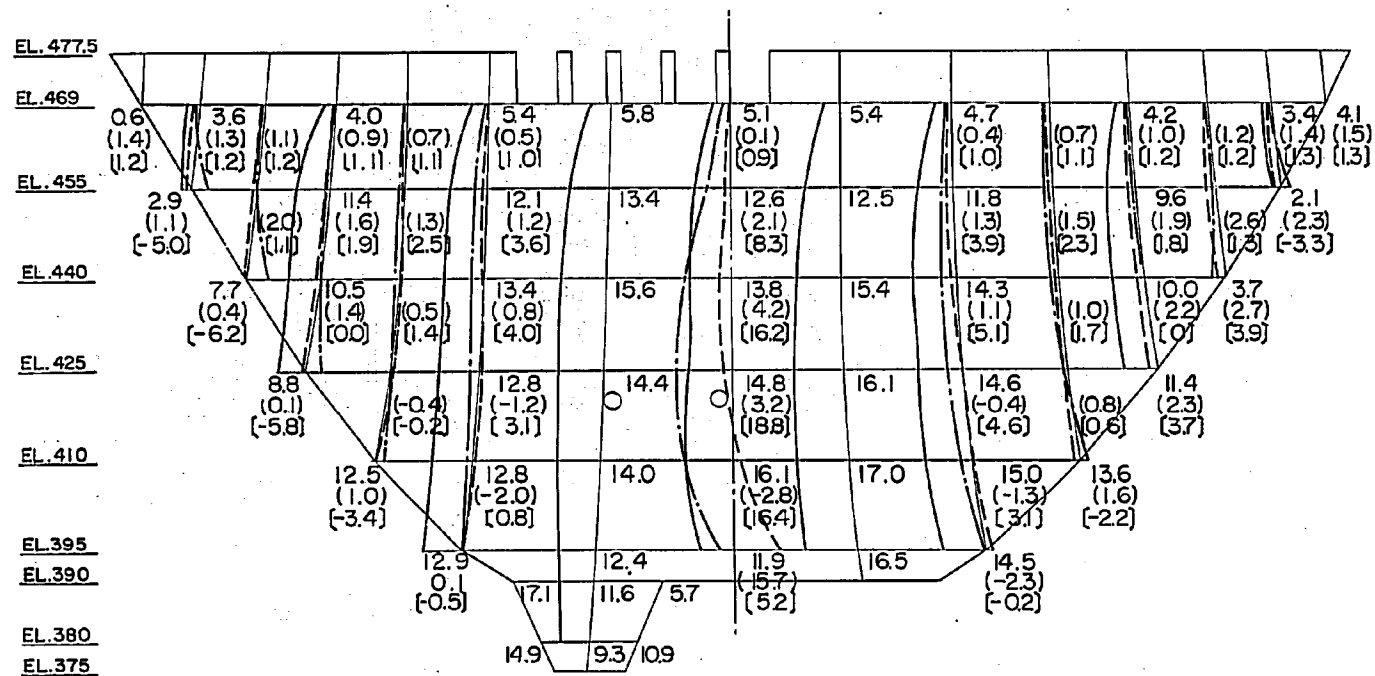
左岸



鉛直方向応力分布図（上流面）

左岸

右岸



20 10 0 -20 (kg/cm²)

鉛直方向応力分布図（下流面）

右岸

左岸

EL. 477.5

EL. 469

EL. 455

EL. 440

EL. 425

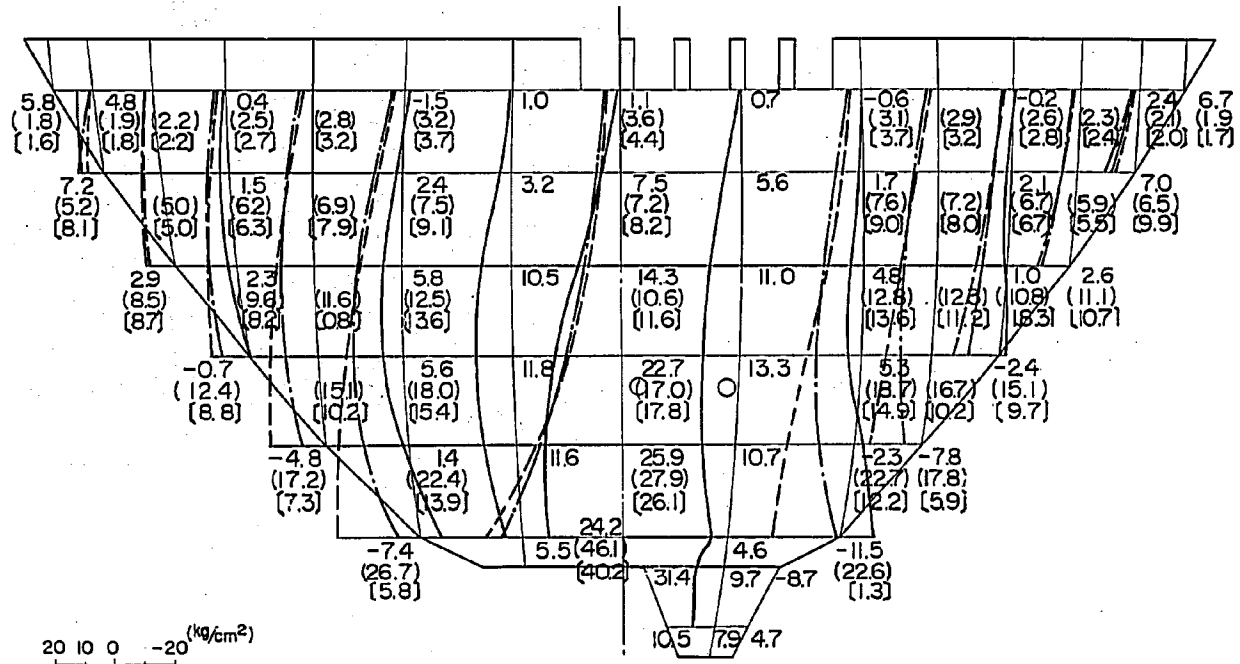
EL. 410

EL. 395

EL. 390

EL. 380

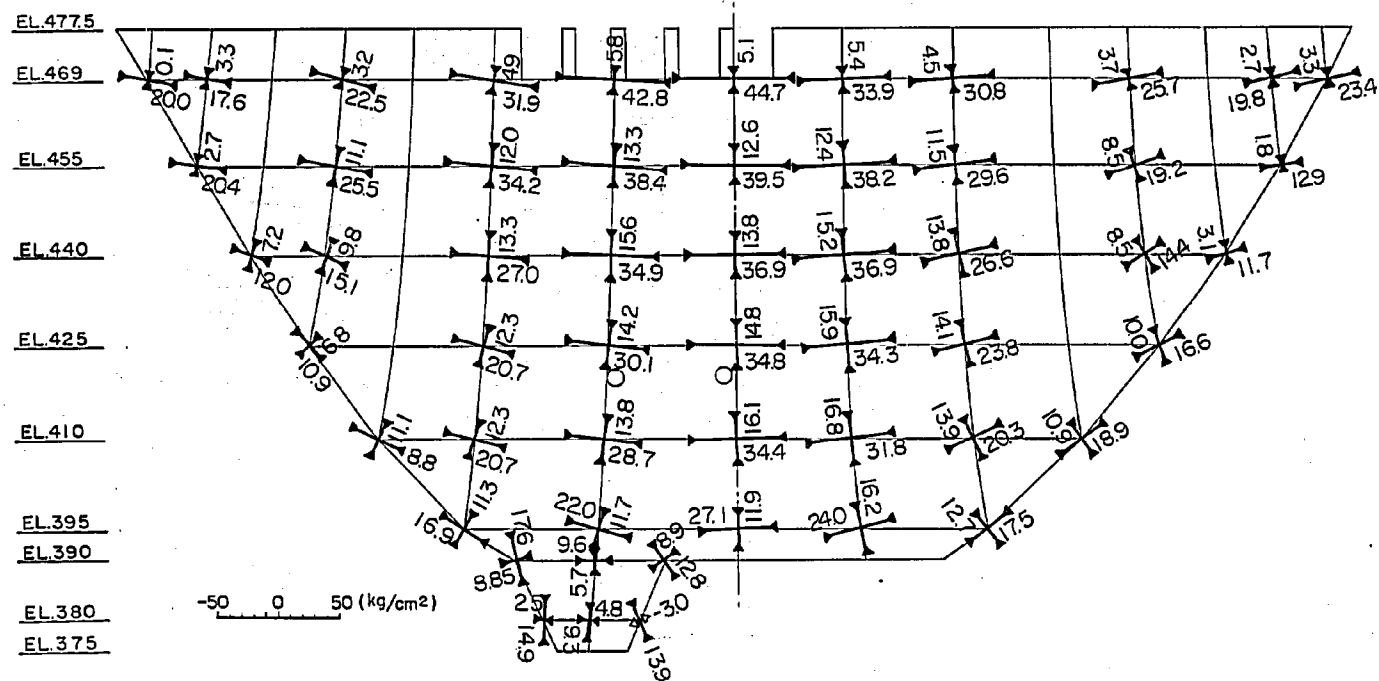
EL. 375



主 底 力 圖 (上流面)
実驗値

左 岸

右 岸



實驗值

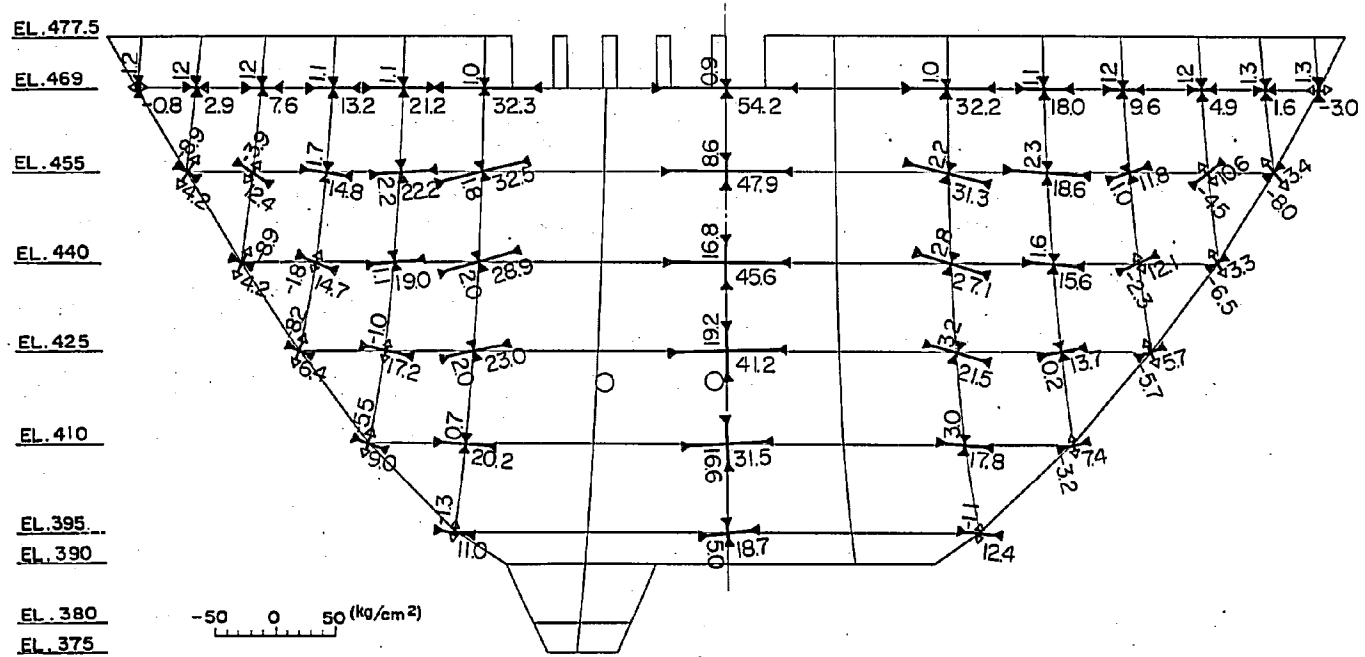
左岸



主 應 力 図 (上流面)
計 算 値

左 岸

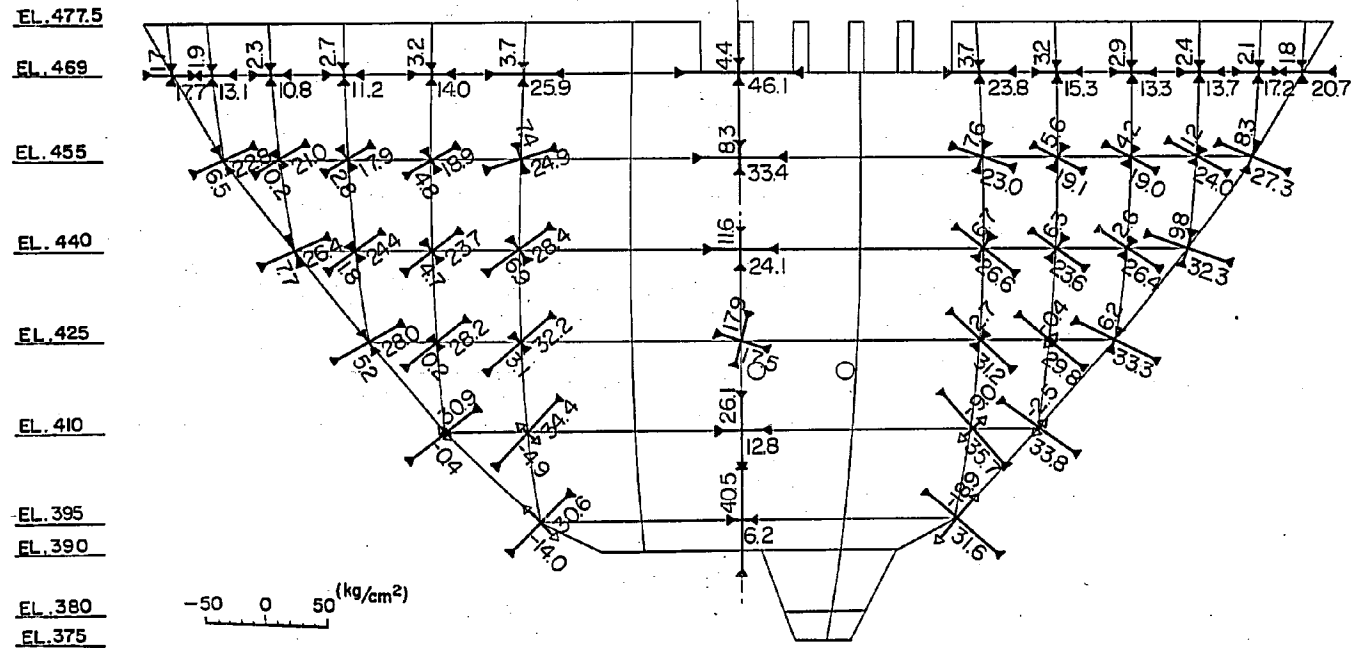
右 岸



主 應 力 圖 (下 流 面)
計 算 值

右 岸

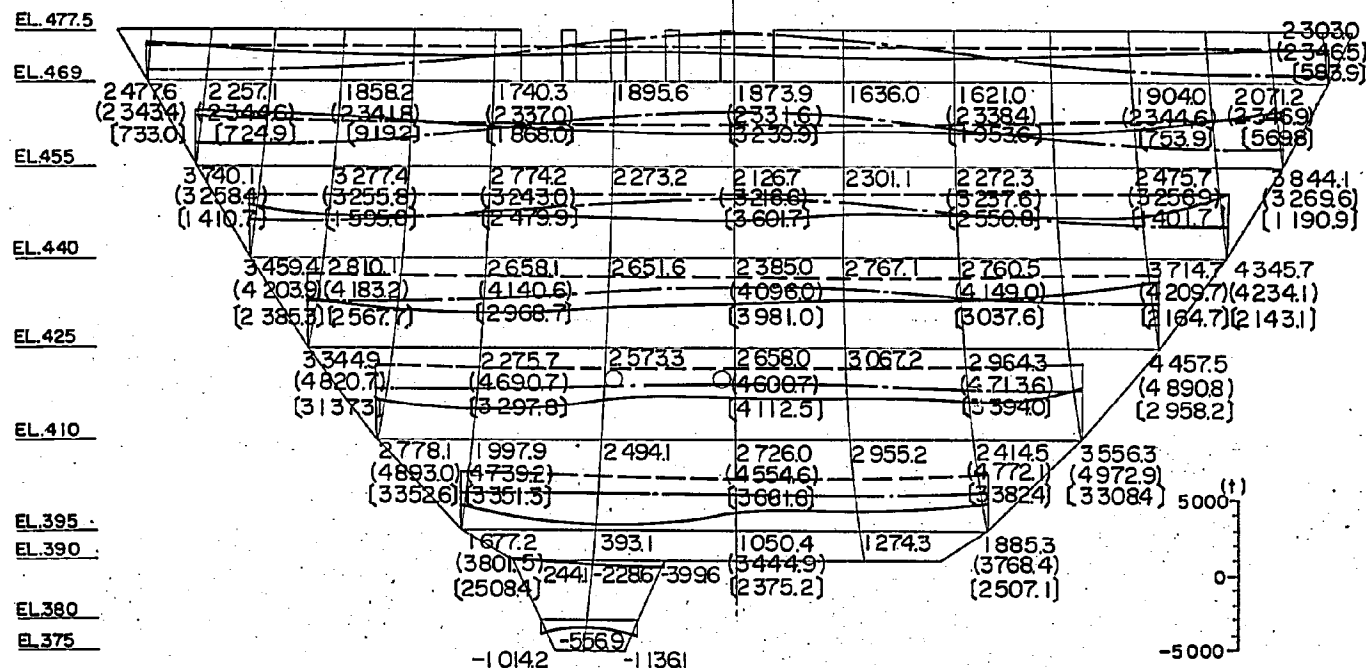
左 岸



アーチ・スラスト図

左岸

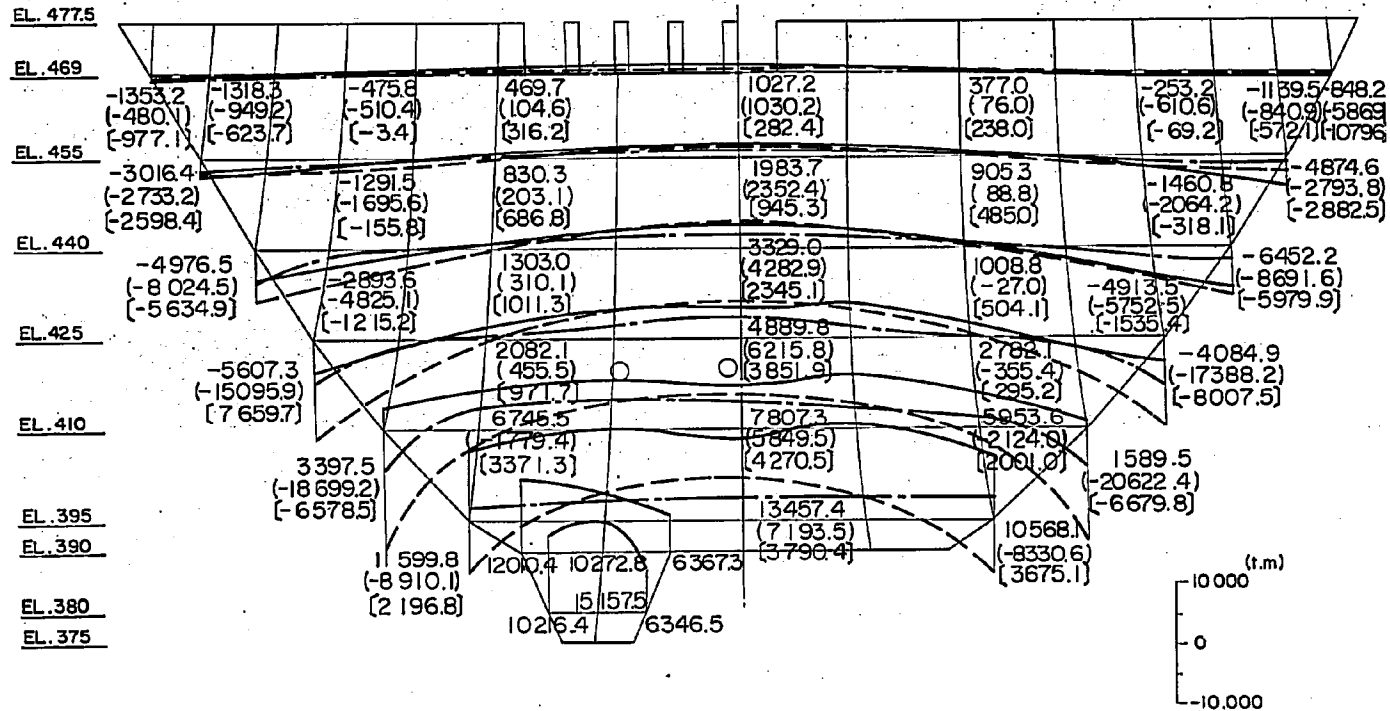
右岸



アーチ・モーメント分布図

左岸

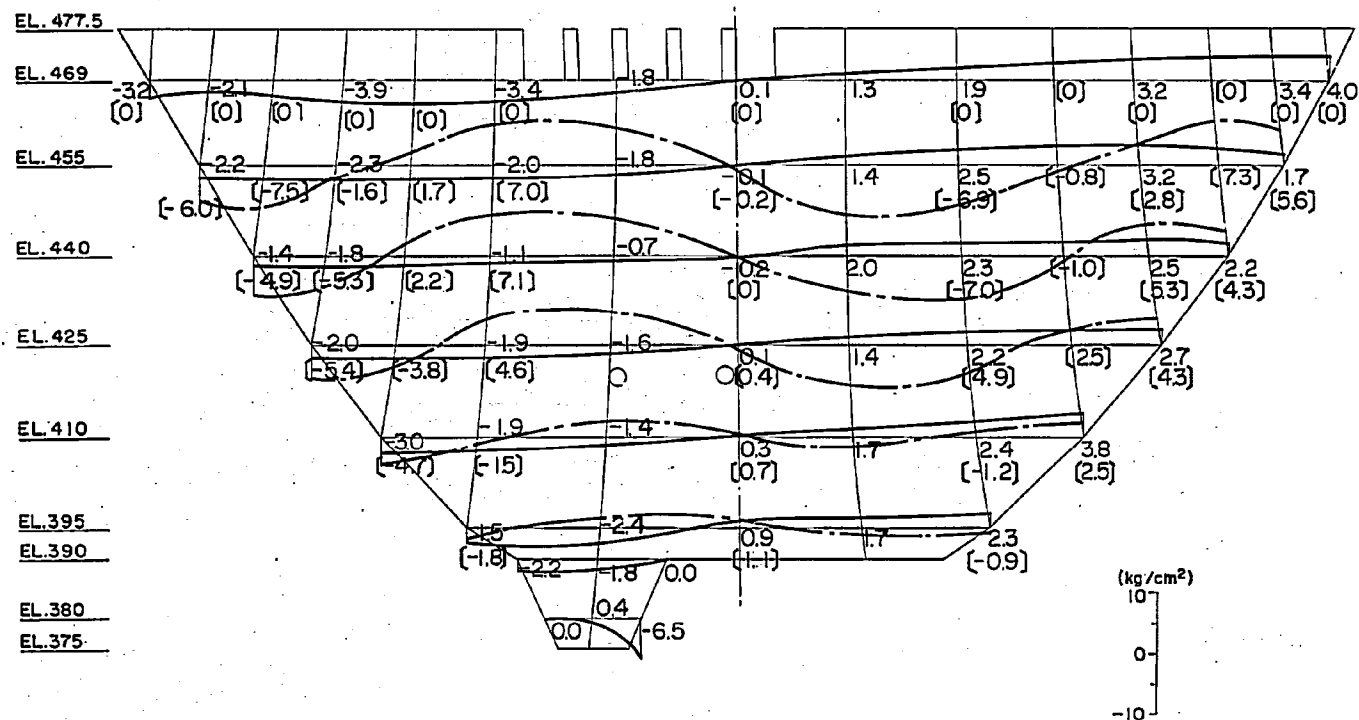
右岸



剪 断 应 力 图 (上 流 面)

左 岸

右 岸



剪 断 应 力 图 (下流面)

右 岸

左 岸

