



土木研究所資料

第 6 9 6 号

真名川ダム構造模型実験報告書

昭和 4 6 年 8 月

建設省土木研究所

真名川ダム構造模型実験報告書

(土木研究所資料 第696号)

要

旨

ダム部長	野島虎治
ダム構造研究室長	飯田隆一
ダム構造研究室主任研究員	柴田功
建設技官	上木征夫

この報告書は近畿地方建設局の依頼を受けて行った真名川ダム構造模型実験の結果をのべたものである。

模型は、石膏、珪藻土を使用し、縮尺1/190で製作した。載荷方法は22本の油圧ジャッキを使用し、ダム表面のたわみおよびひずみを測定した。その結果は(図1, 2, 3)のとおりである。

実験の結果から得られた結論は次のとおりである。

(1) 組み合わせ応力によるコンクリート所要強度の算定

① 第1主応力が圧縮、第2主応力が引張応力の場合

第6章6項の計算により $\sigma_{c1} = 57.0 \times 4 \times 1.15 \times 1 / 0.77 = 340 \text{ kg/cm}^2$

② 第1, 第2主応力が共に圧縮応力の場合

第6章6項の計算より $\sigma_{c1} = 68.5 \times 4 \times 1.15 \times 1 / 1.0286 = 304 \text{ kg/cm}^2$

$\sigma_{c1} = 68.5 \times 5 = 342.5 \text{ kg/cm}^2$ (σ_1 だけを考慮した場合)

したがってコンクリートの所要圧縮強度は 340 kg/cm^2 の強度が必要である。

(2) 下流面に発生している引張応力

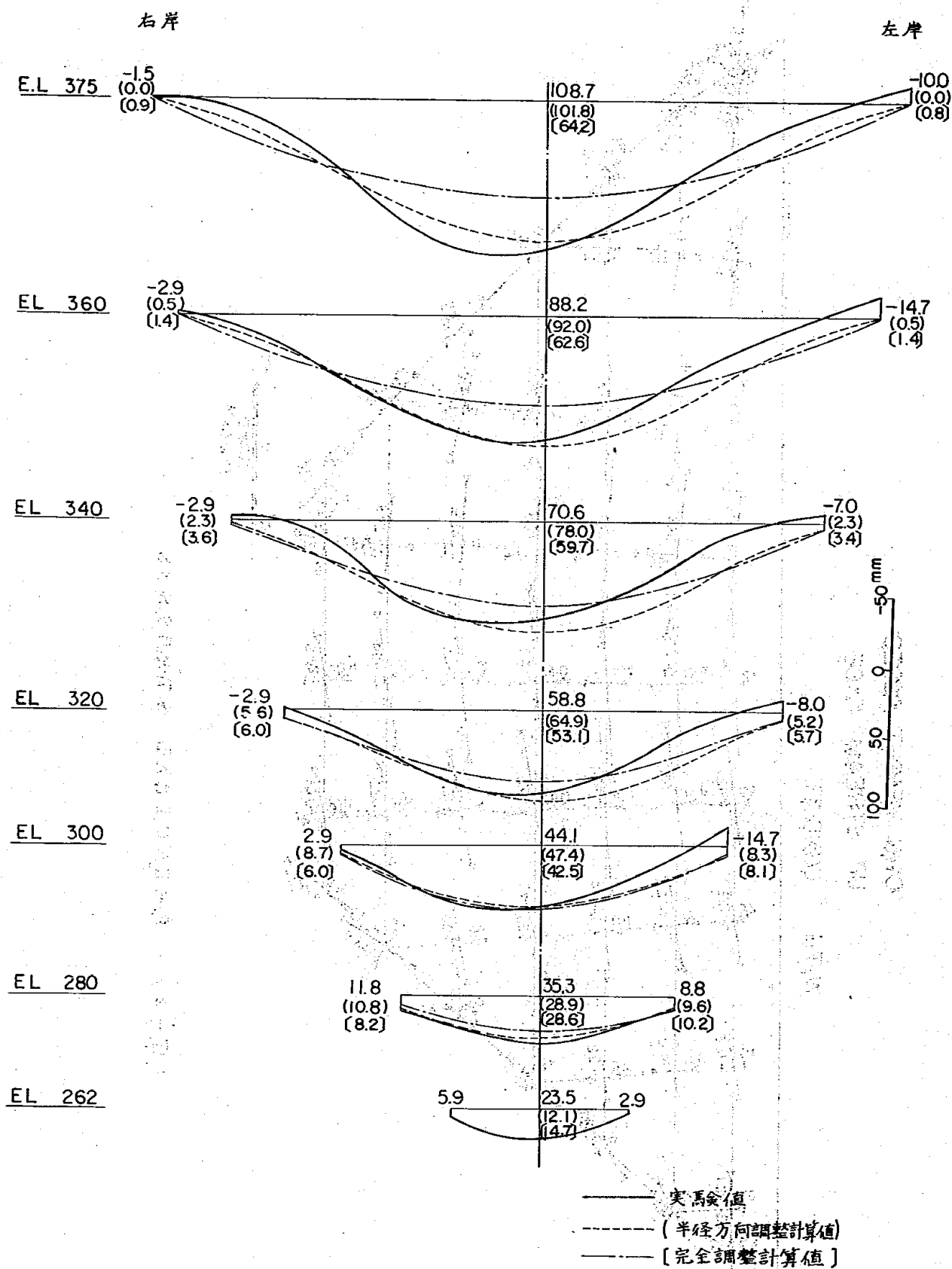
① 下流面 EL 262m アーチクラウン基礎に発生している水平な引張応力 -18.8 kg/cm^2 。

この引張応力については、クラックが発生しても二次的な安定が得られやすく、これまでの他ダムの実例からみて問題はないと考えられる。

② 下流面 EL 262m 左右岸アバットメントに発生している岩盤に平行な引張応力 $-9.9 \sim -10.1 \text{ kg/cm}^2$ 。

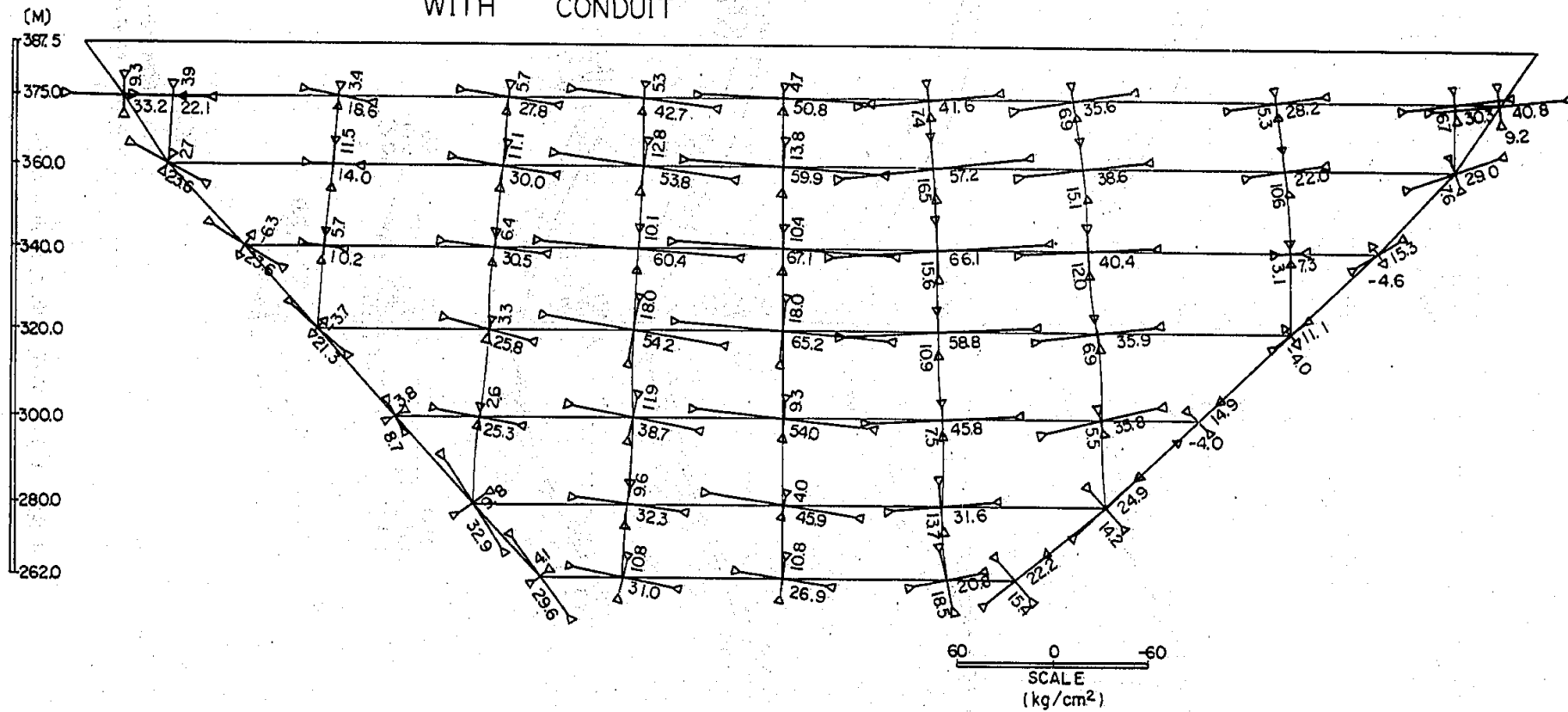
この引張応力については他ダムでもクラックは発生していないが、良質のコンクリートを打設し、養生クーリングを充分に行なうことが望ましい。

(3) 以上あげられる他には大きな問題はない。



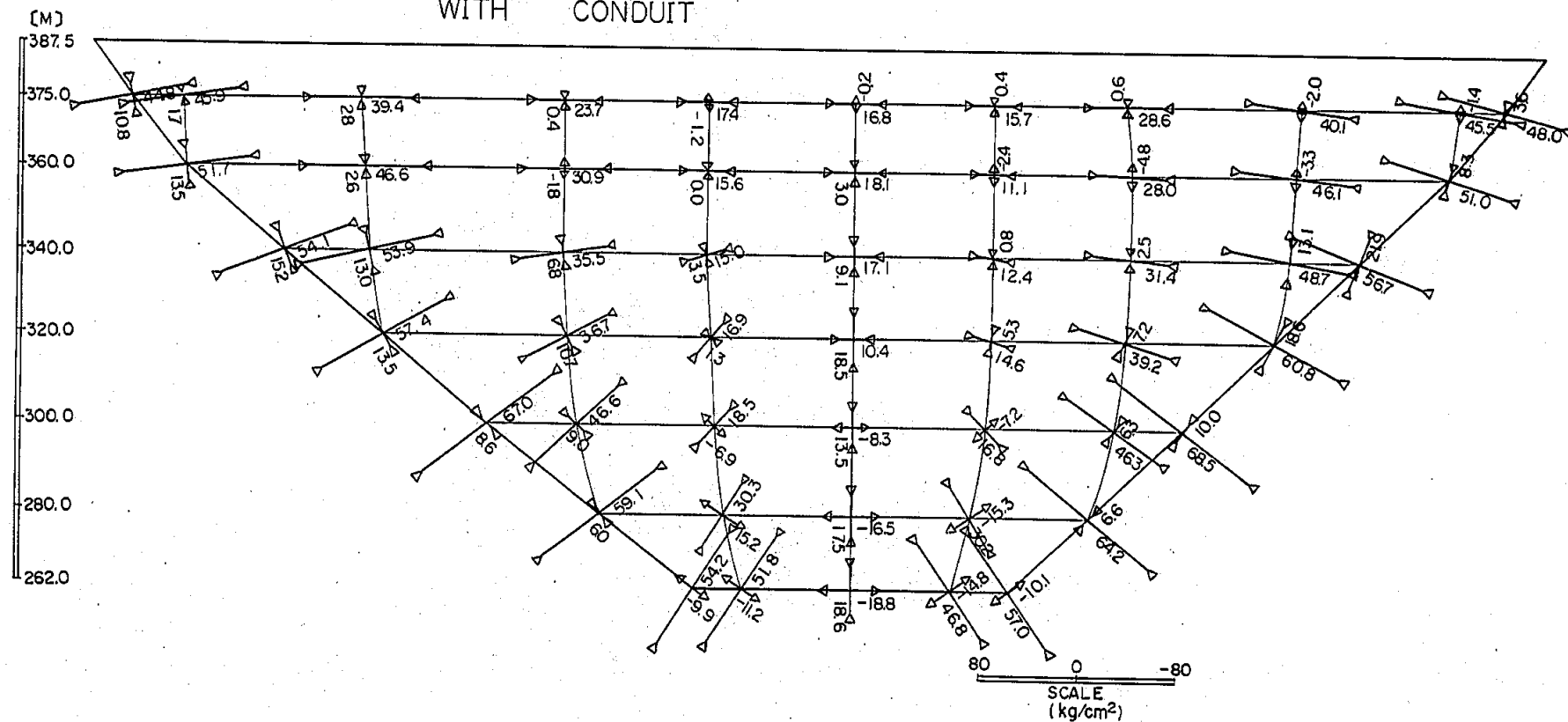
(図 - 1) 半径方向たわみ比較図

OWN WEIGHT ADDED
UP STREAM FACE
WITH CONDUIT



(图-2) PRINCIPAL STRESSES

OWN WEIGHT ADDED
DOWN STREAM FACE
WITH CONDUIT



(图-3) PRINCIPAL STRESSES

目 次

1. ダムの概要.....	1
1-1 真名川ダム諸元.....	1
1-2 地形, 地質.....	1
1-3 ダム形状の特徴.....	2
2. 実験の概要.....	6
2-1 実験の目的.....	6
2-2 実験の方法.....	6
2-3 相似律と模型材料.....	6
2-4 模型の製作.....	10
3. 載荷装置の計画と設計.....	14
3-1 概 要.....	14
3-2 ジャッキの層割, ブロック割計算.....	15
3-3 ジャッキの据付け位置の計算.....	21
3-4 ジャッキ取付台位置の計算.....	25
3-5 油圧ジャッキ及び接触ブロック(アタッチメント)の構造.....	27
4. 測 定.....	31
4-1 たわみの測定.....	31
4-2 ひずみの測定.....	31
4-3 実験の精度.....	32
5. 応力の算出.....	34
6. 実験結果と考察.....	37
6-1 たわみ.....	37
6-2 応 力.....	37
6-3 主応力.....	38
6-4 応力上の問題点.....	39
6-5 地震時の応力の推定.....	39
6-6 組合せ応力の検討.....	43
7. 結 論.....	45

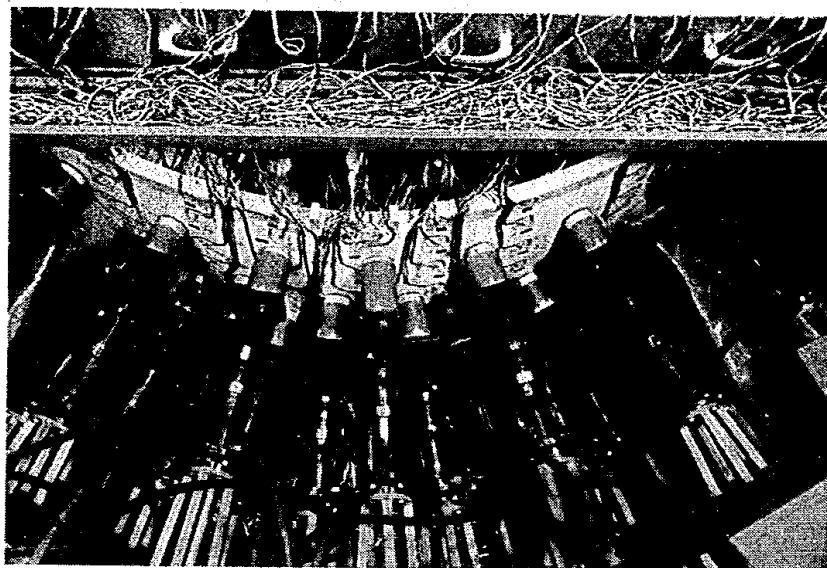


写真 - 1 測定時の上流面

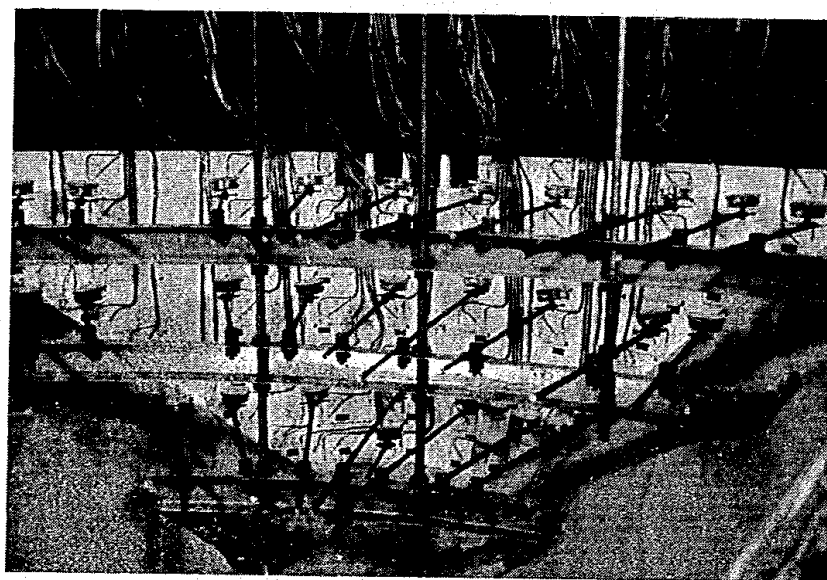


写真 - 2 測定時の下流面

1. ダムの概要

1-1 真名川ダム諸元

河川名	九頭竜川水系 真名川		
位置	福井県大野市下若生子		
地質	飛驒片麻岩		
形式	放物線アーチダム		
堤頂標高	EL387.5 m		
基礎岩盤標高	EL26.2 m		
堤頂長	350 m		
ダム体積	450,000 m ³		
ゲート	クレストテンターゲート	12 m × 7.2 m	4門
	放水管	4 m × 4 m	2門
流域面積	223.7 km ²		
湛水面積	3 km ²		
総貯水容量	115,000,000 m ³		
有効貯水量	95,000,000 m ³		
堆砂量	20,000,000 m ³		
治水容量	89,000,000 m ³		
かんがい容量	6,000,000 m ³		
最高貯水位	EL385 m		
堆砂位	EL331 m		

1-2 地形、地質

ダムサイトの地形は、ほぼV字型をなし、標高500～800mの山地からなり、この間を真名川が深く浸食して流れている。ダムサイトにおける河床標高は概ね270mである。両岸の山腹は平均40～50°の急峻な斜面をなし、特に河床から20～30mの高さまでの間は絶壁をなし、良好な岩の露頭がある。ダムサイトから上流は谷巾も広くなり左岸には広く崖錐が分布している。ダムサイトの上流約300mの右岸には大きな断層谷がある。

ダムサイトの基盤は主として飛驒片麻岩類より構成されている。大部分は強い変成作用を受け、いわゆる片麻岩となっているが、一部には石灰岩や輝緑岩がほぼ原石の状態に残っており、輝緑岩の周辺部には絹雲母岩のようになった部分もある。ダムサイトには規模の大き

な断層は存在しないが、破碎帯巾 20~50cm 程度の小規模の断層や巾 10 cm 以内のシームがかなり存在する。

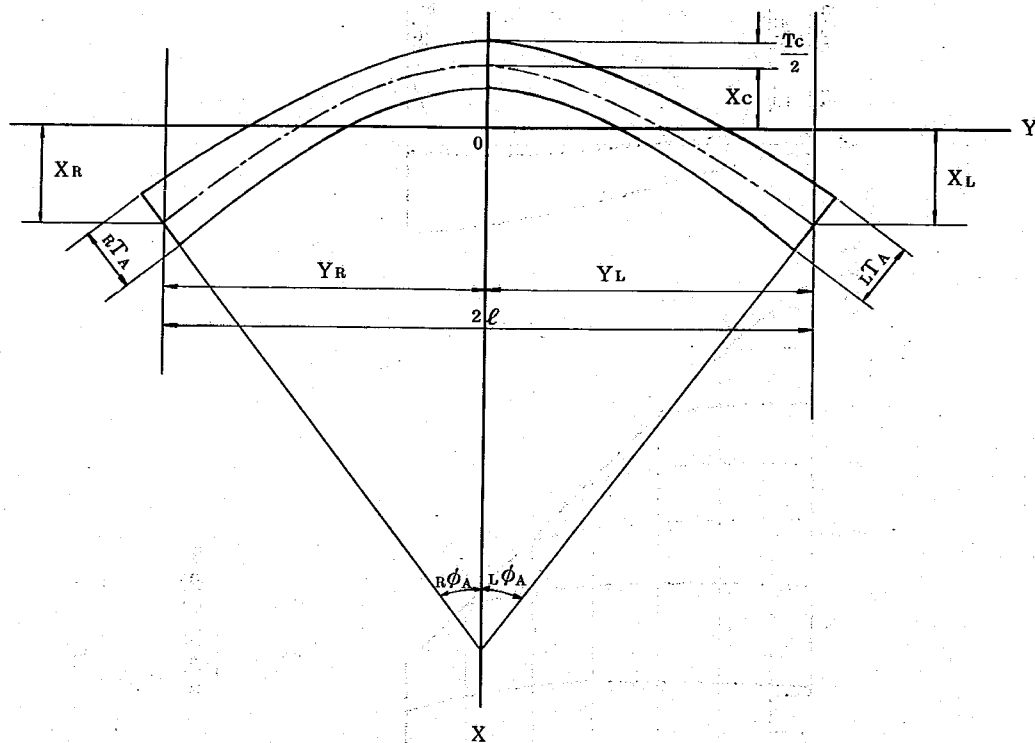
兩岸の山腹は全体的に岩盤が露出していて崖錐は局部的に薄いものがあるにすぎない。河床部では、ボーリングの結果をみてもダム軸付近には顕著な断層はない。コアの採取率は非常によく、コアの状態もよい。

1-3 ダム形状の特徴

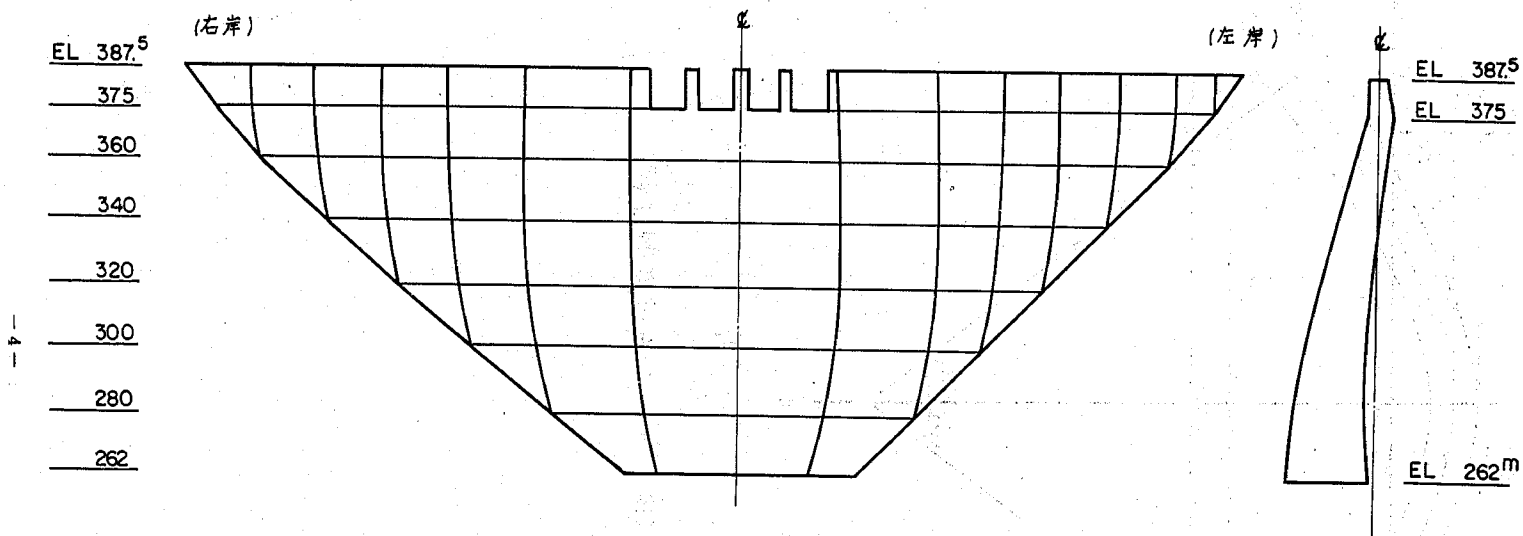
- 1) 放物線不等厚アーチダムのこれまでの設計例では、アーチクラウンから、アバットメントまでなめらかにダム厚が変化するように設計されているが、真名川ダムではダムの寸法が大きいのでアーチ中央部でアーチ中心角の $1/2$ だけ等厚部を設けてダムコンクリート量の節減を図ることにした。
- 2) 真名川ダムは貯水池操作上、洪水期には上部の約 50 m が空虚となるのでその耐震設計について特に配慮する必要がある。そのためダム形状をセルフクローズするよう下流側へのオーバーハングが大きいものに設計し、アーチダムの空虚時の安定上問題とされている上流向地震に対処することにした。
- 3) 下流面アバットメント沿いの引張応力を低減させるために側方片持梁中心線の上流側へのオーバーハングを小さくした。
- 4) ダム頂部に越流部を設けるが、クレストより上部の片持ばり形状は、クレストゲートとの関連を考慮に入れ上流面が鉛直になるようにした。

表 - 1 ダムの基本寸法

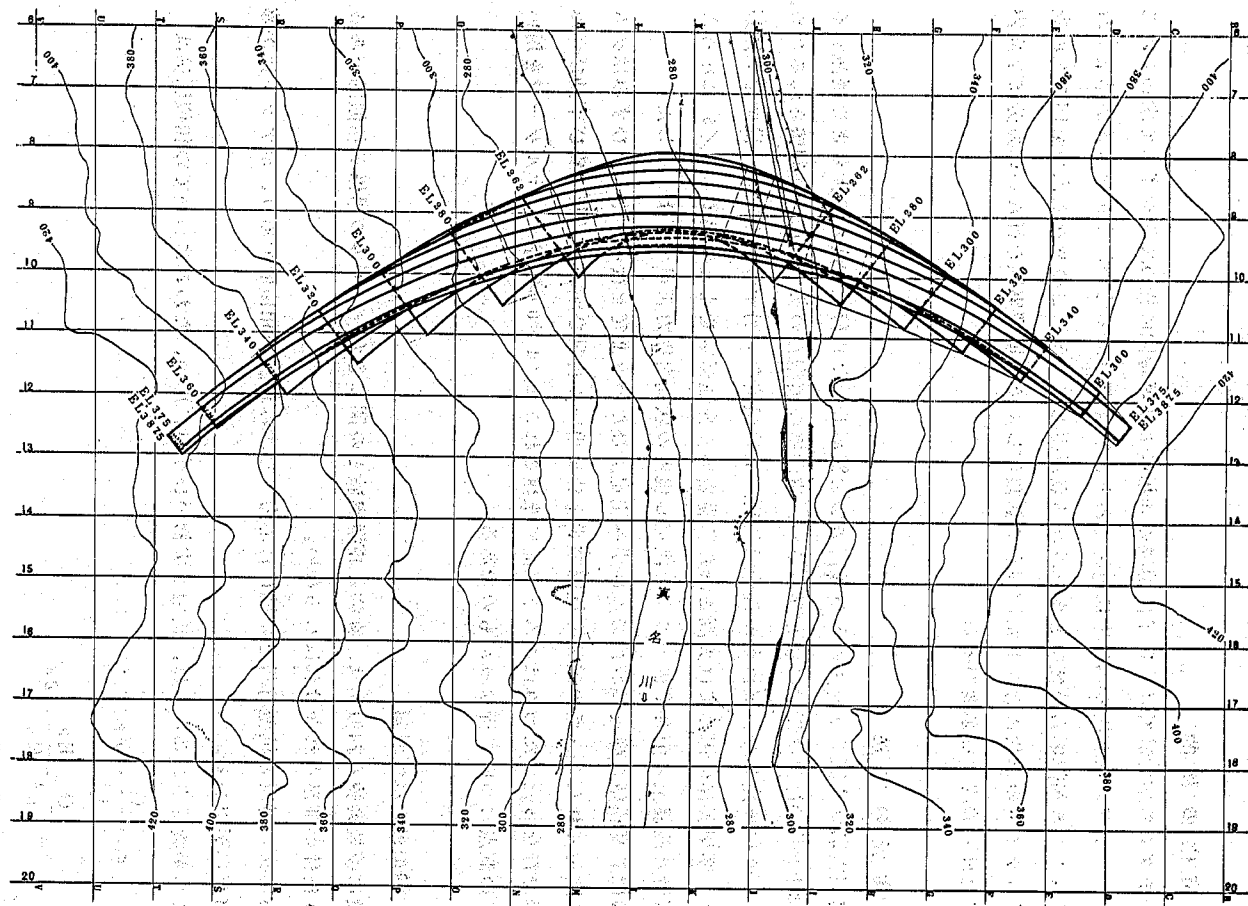
EL (m)	TG (m)	LTA (m)	RTA (m)	2ℓ (m)	Xc (m)	$L\phi_A$	$R\phi_A$
387.5	6.00	6.00	6.00	3215342	0.0000	38°-11'	40°-47'
375	7.99	7.99	7.99	3202691	0.9951	38°-11'	40°-48'
360	10.38	10.54	10.83	2980000	-2.644	37°-06'	40°-01'
340	13.56	14.82	16.98	2573667	-6.4407	36°-16'	39°-16'
320	16.75	19.26	22.38	2167333	-9.6898	28°-22'	38°-54'
300	19.93	23.71	26.40	1761000	-12.2117	36°-21'	38°-38'
280	23.12	28.15	29.74	1317583	-14.0065	36°-47'	38°-14'
262	25.98	32.88	32.74	855096	-15.0000	0°-00'	0°-00'



(図 - 4) ダム寸法図



(図 - 5) 真名川ダム下流面展開図



(図 - 6) 真名川ダム平面図

2. 模型実験の概要

2-1 実験の目的

アーチダムの応力計算は、電子計算機の利用により短時間に極めて労せずして求められる。しかしアーチダムは高次の不静定構造物であり、計算過程に多くの仮定を含み計算結果においてダムのある局部応力が実際と多少異なる点が生じてくる。この異なる点の解明のため実際のダムサイトの形状に合わせた模型を2個製作し、その模型実験を行ない応力分布を観察して安全性を確認する必要がある。

2-2 実験の方法

本模型実験は油圧ジャッキによる載荷方法を採用したため荷重強度 G の大きさを増減することにより模型の縮尺は任意の値を選べるが、実験室の模型台の大きさにより制限されるため、 $n=1/190$ に決定した。又模型の製作誤差及び実験誤差を究明するために同一模型を2基製作した。模型製作に際しては実測された基礎岩盤の弾性係数をもとに実物の $1/5$ になるように石膏と珪藻土の配合(表-2)を決定し現場の状況を極力再現するようにした。

実験は石膏模型の弾性領域内でのひずみ測定及びたわみ測定を行なうものでひずみはダム表面に貼付された53点の電気抵抗線ひずみ計を用いて自動ひずみ記録装置及び手動ひずみ測定器で行なった。たわみはダム下流面に設置された $1/100$ mm 目盛ダイヤルゲージを用いて各々の測点について行なったものである。

2-3 相似率と模型材料

一般に模型実験の相似率は、実物と模型実験との間に応力-ひずみの関係が相似的であるという条件が満足されなければならない。

既ち実物の材料と模型材料との間には応力-ひずみ曲線が相似形であり、ポアソン比が等しい事が必要である。

これらが満足されるならば、模型と実物のひずみ、応力、たわみについての相似関係は

$$\sigma_m = \frac{G}{n} \cdot \sigma_P$$

$$\delta_m = \frac{G}{n^2} \cdot \frac{E_P}{E_m} \cdot \delta_P$$

$$\epsilon_m = \frac{G}{n} \cdot \frac{E_P}{E_m} \cdot \epsilon_P \quad \text{と表わされる。}$$

ここに $\sigma_m, \delta_m, \epsilon_m, E_m$; それぞれ模型の応力、たわみ、ひずみ、弾性係数

$\sigma_P, \delta_P, \epsilon_P, E_P$; それぞれ実物の応力、たわみ、ひずみ、弾性係数

n : 模型の縮尺

G : 模型と実物の荷重強度の比

静的模型実験の材料としては、その力学的性質、加工法、実験の容易さなどで石膏と珪藻土の混合物が最もすぐれている。なぜならば土木研究所ダム構造研究室で行なった石膏の材料実験結果によると石膏と珪藻土の混合物はポアソン比、破壊強度と弾性係数の比及び圧縮強度と引張強度の比は、コンクリートのそれとほぼ同一であり、その弾性係数も $70,000 \text{ kg/cm}^2 \sim 7,000 \text{ kg/cm}^2$ まで配合を変えることにより自由に变化できる利点をもっていることが明らかになった。更にその応力-ひずみ曲線はコンクリートの曲線よりやや直線的であり実験の目的が弾性領域内の応力測定になるならば最もすぐれた材料であると言える。

本実験では実物との弾性係数の比を

- ① ダム本体は弾性係数が大きいので水と石膏の比で調整する。
- ② 岩盤は石膏に珪藻土を混合し、水と石膏の比を小さくして石膏と珪藻土の混合割合で調整する。

という方法をとった。

従って(図-7, 8, 9, 10)をもとに表-2の様な配合を定めた。

表-2 真名川ダム模型配合表

位 置	$E_p (\text{kg/cm}^2)$	$E_m (\text{kg/cm}^2)$	D/P	W/P	V/W	$V (m^3)$
本 体	250,000	50,000	0	0.70	1.50	0.392
岩 盤	70,000	14,000	0.57	2.10	1.27	1.500

ここに

D/P : 珪藻土と石膏の比

V/W : 体積と水量の比

W/P : 水と石膏との比

V : 打設体積

この際コンクリート材料試験用標準型枠 $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ の供試体を採取し、材料試験を行なった結果次表のようであった。

表-3 供試体測定結果

位 置	弾 性 係 数 (kg/cm^2)	目標弾性係数 (kg/cm^2)
本 体	57,000 ~ 64,000	50,000
岩 盤	16,200 ~ 17,000	14,000

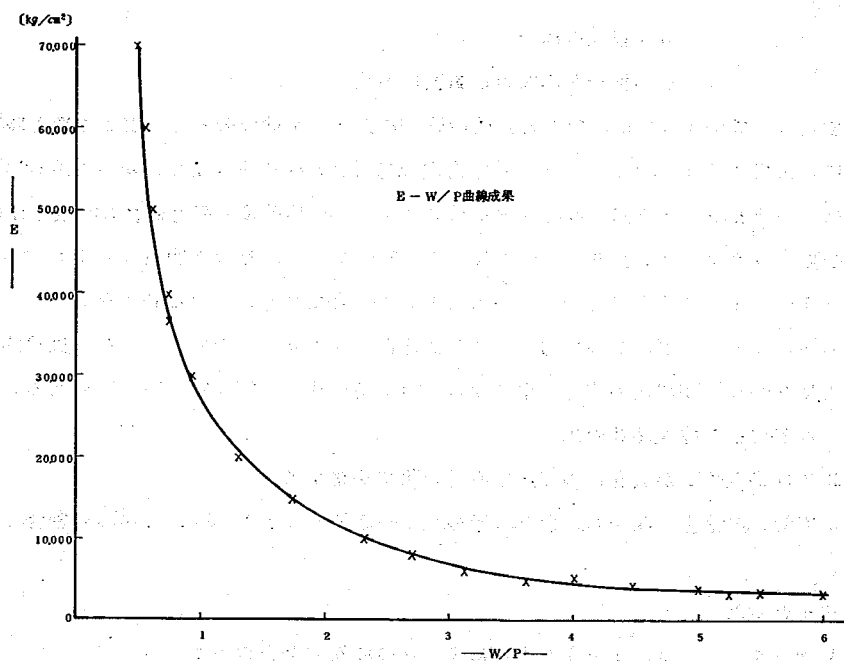


图 - 7 石膏材料試驗

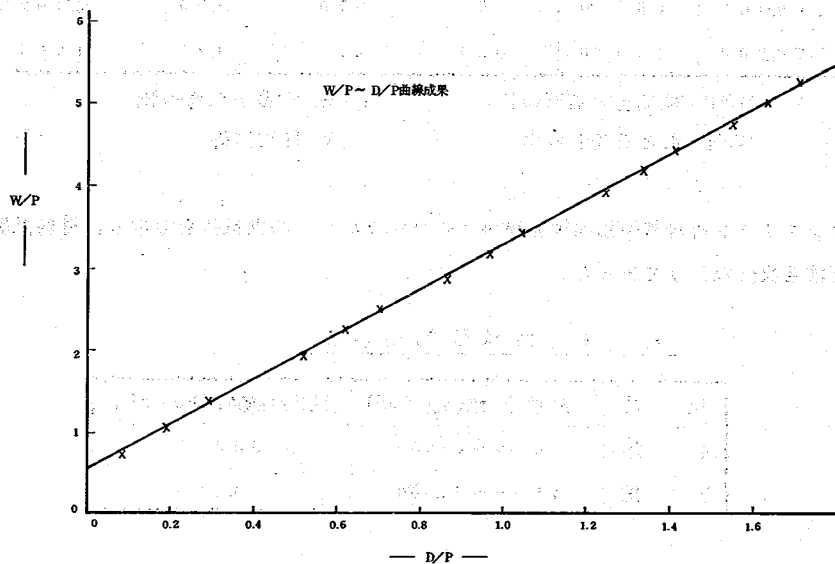


图 - 8 石膏材料試驗

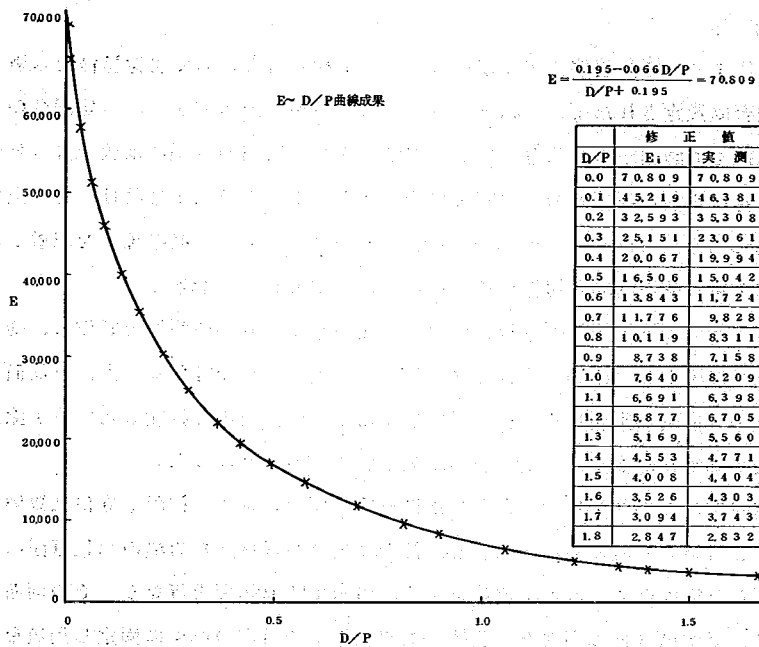


图 - 9 石膏材料试验

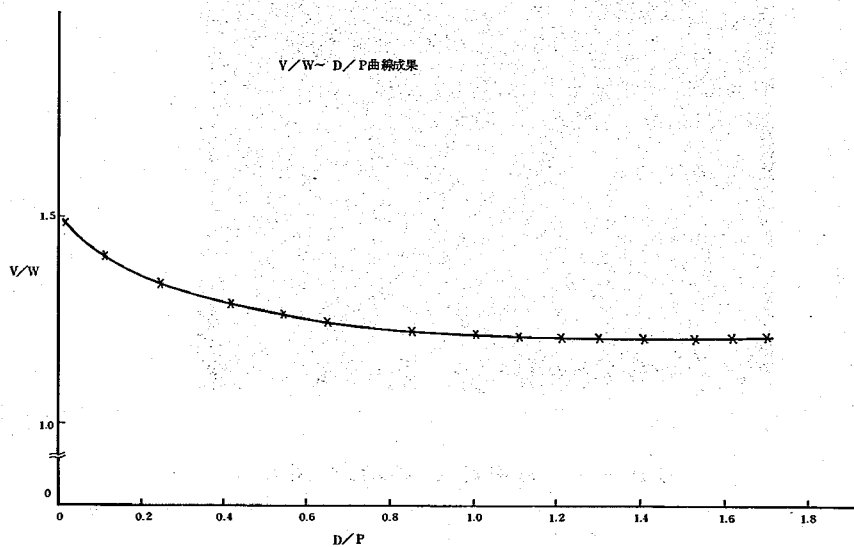


图 - 10 石膏材料试验

2-4 模型の製作

岩盤模型は高さ約10mの堅岩等高線及びダムアバット線をもとにして岩盤型枠を木製で製作し、予め模型台に設定されたx, y軸と一致せしめて模型台上に固定し、所定配合の石膏、珪藻土を打ち込んで製作する。岩盤部はその容積も大きく深部の乾燥には数ヶ月の日数を要するために石膏打設前に模型台の上に石膏で作ったダクト（通気孔）を設け、その上に温床用ヒーター（ナショナルDP11250, 100V用, 250W ビニール温床線）を配置し、打設後は常時電流を通し乾燥期間の短縮促進を行なった。（写真-3参照）

堤体模型は高さ10mごとの堤体上下流面座標値を使用して、木製の型枠を製作し、約3倍程度の余裕を見て打設する。乾燥が充分と思われたら、先に電算で行なった上、下流面の形状をベニヤ板でゲージ板を作製しそのゲージ板を使用して、余裕みて打設した堤体を除々に削り仕上り寸法 ± 0.1 mmの範囲に模型の製作誤差をおさえるようにした。

岩盤及び堤体模型をおよそ6ヶ月間乾燥させた後堤体模型をエポキシ樹脂（寺田工業製 Teradite 5156）を用いて岩盤模型に接着する。接着に先立ち堤体及び岩盤の両接着面に樹脂注入用の溝を刻んだ後両面にエポキシ樹脂を薄く塗布して表面処理を行なう。その両面が完全に乾燥した後、堤体模型を模型台上に設置した座標軸上の所定の位置に固定し周辺をペースト状の樹脂（Araldite D-CY-230）で気密にし、注入用ビニールパイプ（ $\phi 8$ mm）を通してエポキシ樹脂を注入した。

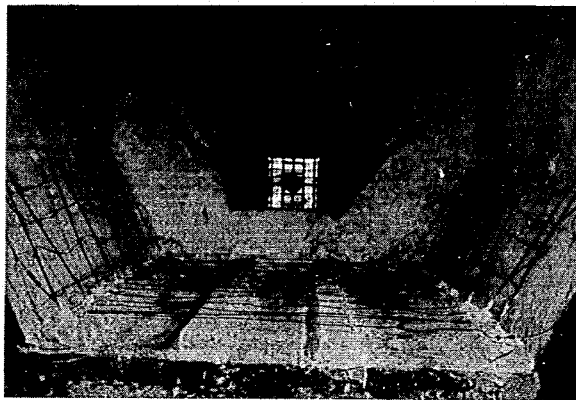


写真-3 温床線をはった模型台



写真 - 4 岩盤打設状況

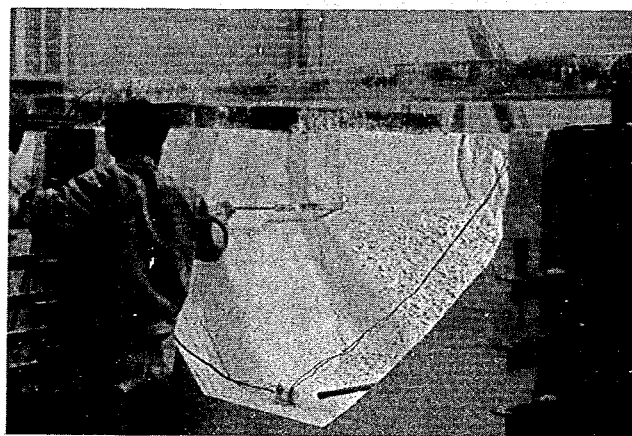


写真 - 5 岩盤整形

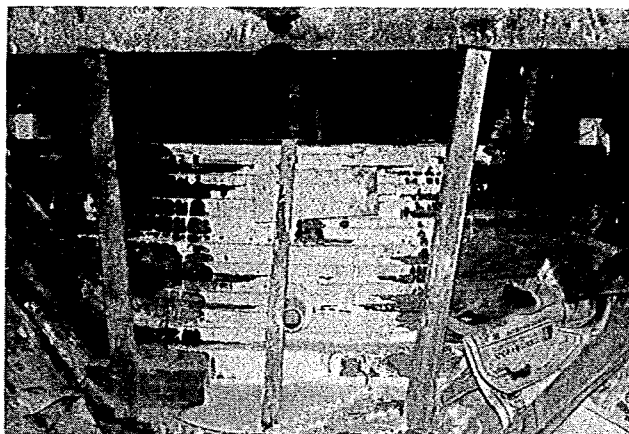


写真 - 6 本 体 型 枠

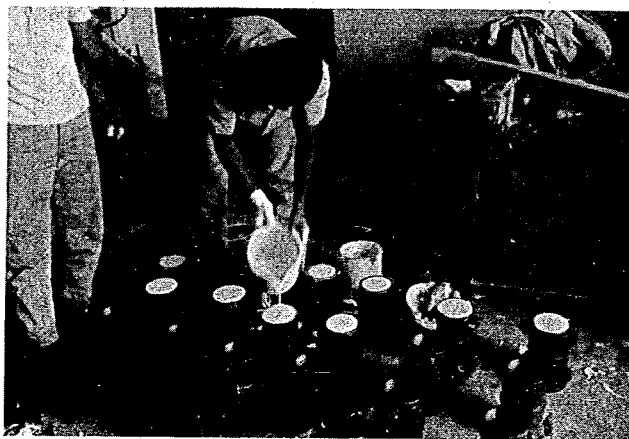


写真 - 7 石こうテストピース作成

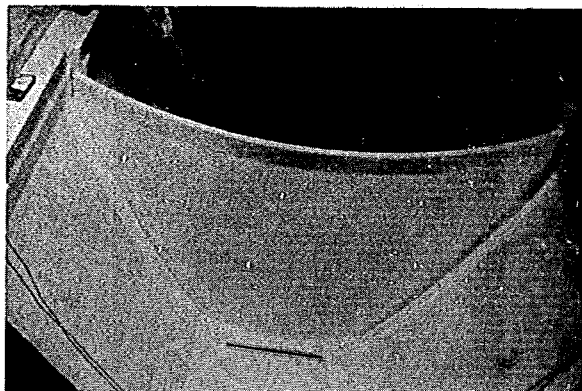


写真 - 8 本体上流面

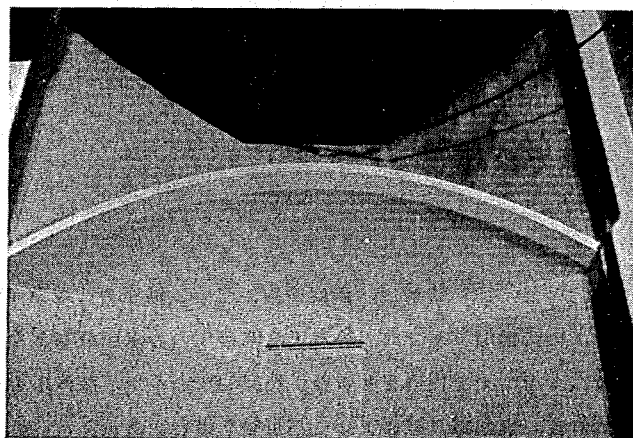


写真 - 9 本体下流面

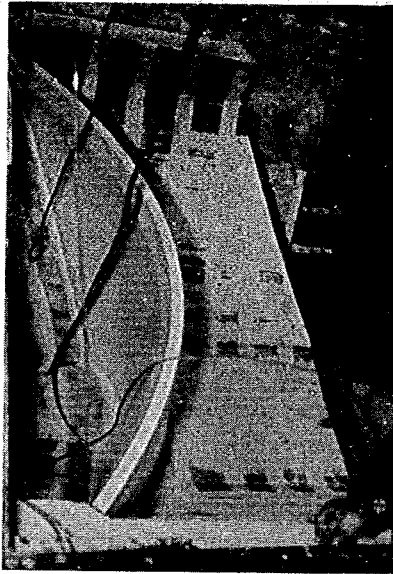


写真 - 1 0 岩盤と本体の接着

3. 載荷装置の計画と設計

3-1 概 要

ダムに作用する圧力は静水圧、堆砂圧、温度荷重、自重、揚圧力、地震時慣性力及び地震時動水圧があるが、構造模型実験では、静水圧、堆砂圧の静水圧分布となる。したがって模型に作用させる荷重も液体圧で作用させるのが理想的であるが、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不可能な場合がある。

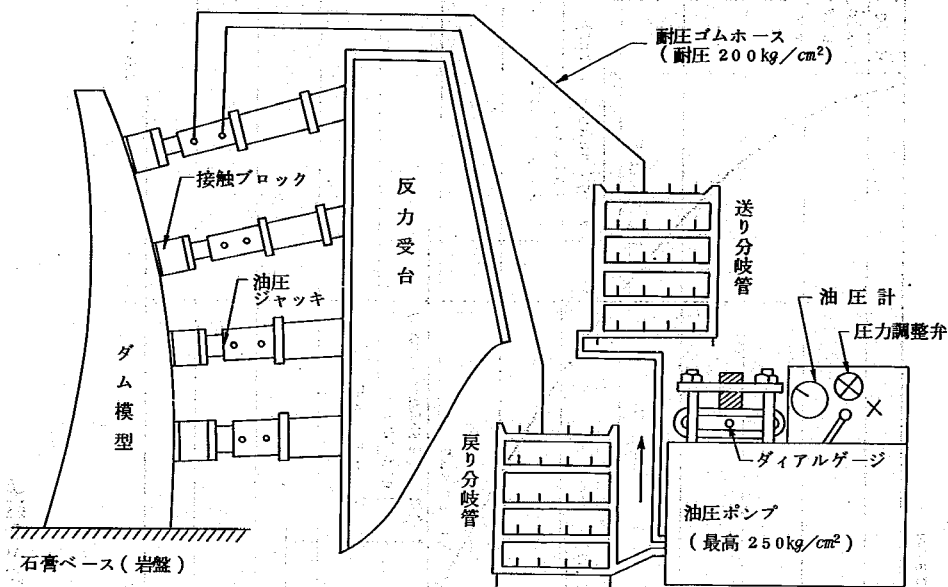
従来ダム構造研究室が行ってきた載荷方法には、

- 1) 水銀等の比重の大きな液体を作用させる方法
- 2) 油圧ジャッキによる載荷方法
- 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。

本実験では上記の 3) の載荷時に使用するゴムチューブの製作上、製作コストが非常に高

くなるという問題があるため、2)の方法を採用した。(図-11参照)



(図-11) 真名川ダム模型実験載荷装置

この載荷方法は、模型上流面に取り付けた反力受けフレームに22個の台座を溶接し、それに油圧ジャッキを取り付けて油圧ジャッキをポンプ操作により所定の圧力まで加圧する方法である。

3-2 ジャッキの層割、ブロック割計算について

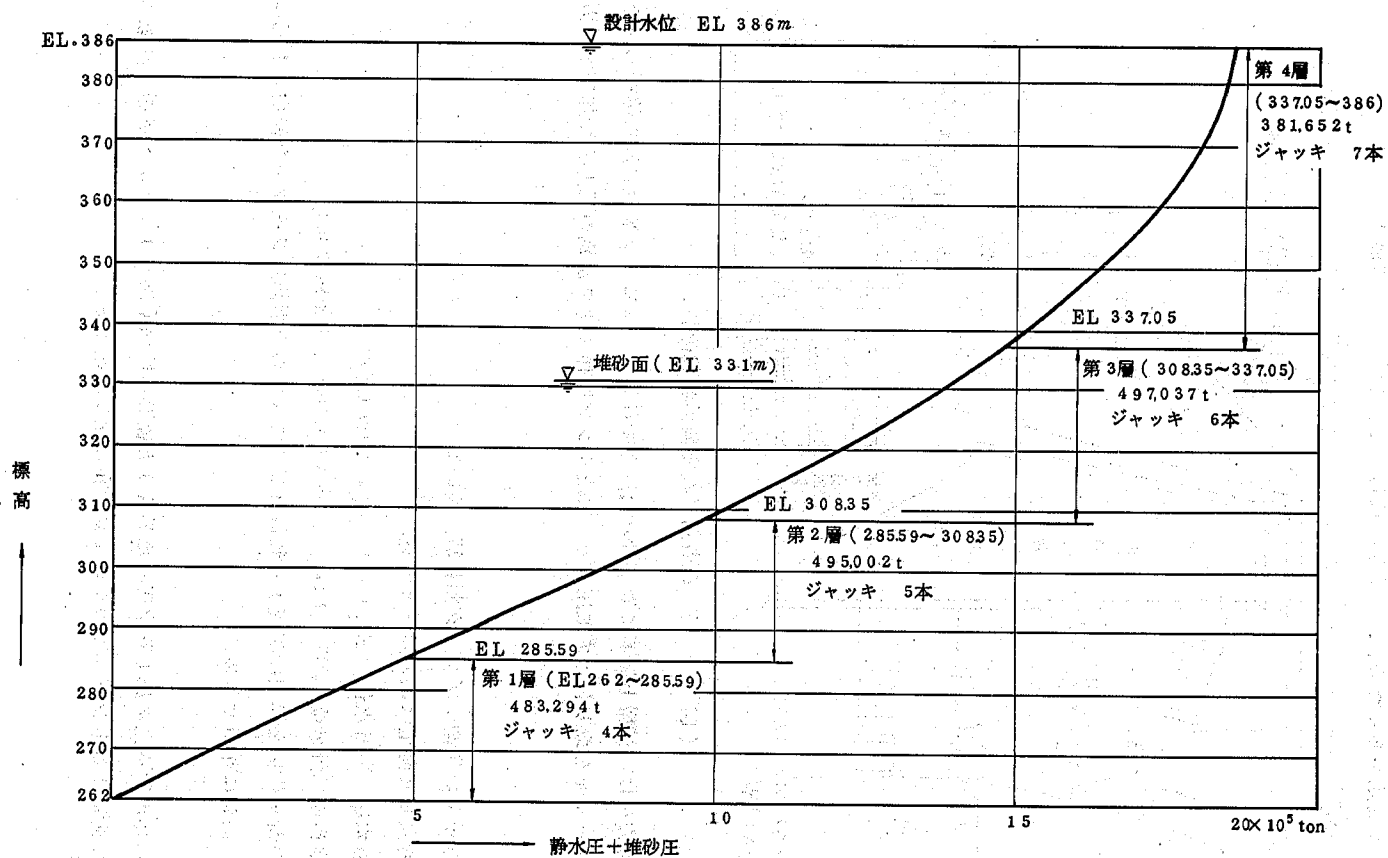
実験に考慮した荷重は次の通りとする。

- 1) 静水圧 設計水位 EL386m $\gamma_w = 1.0 \text{ t/m}^3$
- 2) 堆砂圧 堆砂位 EL331m $\gamma_s = 1.0 \text{ t/m}^3$ (土圧係数 0.6)

これらの荷重作用を模型に表現する装置として22本の小型油圧ジャッキを使用し上記2種の荷重を同時に作用せしめた。

層割計算

ダムに作用する全水圧(静水圧+堆砂圧)と標高の関係(図-12)から各層(4層に分割)に使用する全ジャッキの径の2乗の和の比に分割する。



(図-12) 静水圧, 堆砂圧と標高との関係

表 4

層	使用するジャッキの径	径の2乗	使用本数	②×③	ジャッキ補正係数	⑤×④	計
	①	②	③	④	⑤		
1	40 mm	16	4	64.00	0.95	60.800	60.800
2	37	13.69	2	27.38	〃	26.011	
〃	36	12.96	2	25.92	〃	24.624	
〃	35	12.25	1	12.25	〃	11.638	62.273
3	35	12.25	4	49.00	〃	46.550	
〃	29	8.41	2	16.82	〃	15.979	62.529
4	28	7.84	2	15.68	〃	14.896	
〃	27	7.29	2	14.58	〃	13.851	
〃	26	6.76	3	20.28	〃	19.266	48.013
計			22			233.615	

1層目 ※ 全水圧 1,856,985 t

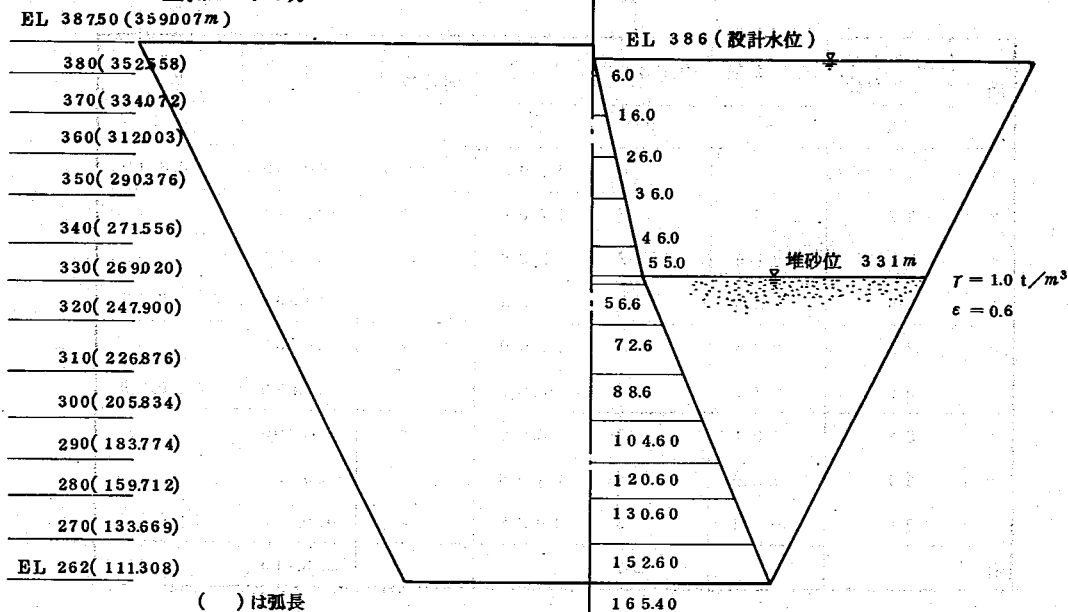
$$1,856,985 \times \frac{60.80}{233.615} = 483,294 \text{ t (EL262~285.59m)}$$

2層目 $1,856,985 \times \frac{62.273}{233.615} = 495,002 \text{ t (EL285.59~308.35m)}$

3層目 $1,856,985 \times \frac{62.529}{233.615} = 497,037 \text{ t (EL308.35~337.05m)}$

4層目 $1,856,985 \times \frac{48.013}{233.615} = 381,652 \text{ t (EL337.05~386.00m)}$

※ 全水圧の求め方



$$\text{水圧} \quad P = \int_{262}^{272} (165.40 - 1.60x)(111.308 + 27.951x) dx$$

但し (EL 262m ~ 272m までの全水圧)

(図 - 13) ダム展開図

(図 - 13) のようにダム展開図をかき各標高の水圧を求め、累加した荷重を示したのが (図 - 12) である。この図において前頁で計算した荷重をプロットすれば各層の標高が算出される。

ブロック割計算

層割計算ができれば次に左右岸の三角分布荷重を長さに換算する。換算した左右岸及び等圧部の長さを合計し、その長さを各ジャッキ 1 個の径の 2 乗の比に分割しジャッキ 1 本当りの断面を決定する。尚ジャッキの配置において下層には径の大きいジャッキを用いたのはもちろんであるが同じ層では反力受けの関係上、径の大きい方をアバット側に使用した。

こゝで 4 層目の計算例を示す。

[第 4 層目] EL 337.05 ~ 386m

H = 48.95m

使用するジャッキの径 $D = 28 \text{mm} (2 \text{本}), 27 \text{mm} (2 \text{本}), 26 \text{mm} (3 \text{本})$

左岸三角分布部

静水圧 $48.95 \times 1/2 \times 41.70 \times 48.95 \times 1/3 = 1,665.291 \text{ t}$

単位巾当り荷重 $\frac{Wh^2}{2} = \frac{48.95^2}{2} = 1,198.05 \text{ t/m}$

$\Delta \ell = \frac{1,665.291}{1,198.05} = 1.390 \text{ m} \quad (73.2 \text{ cm})$

() は模型寸法

右岸三角分布部

静水圧 $48.95 \times 1/2 \times 47.22 \times 48.95 \times 1/3 = 1,885.733 \text{ t}$

単位巾当り荷重 $\frac{Wh^2}{2} = \frac{48.95^2}{2} = 1,198.05 \text{ t/m}$

$\Delta \ell = \frac{1,885.733}{1,198.05} = 1.574 \text{ m} \quad (82.8 \text{ cm})$

$\therefore \ell = 1.390 + 1.574 + 2.8243 = 3.1207 \text{ m}$

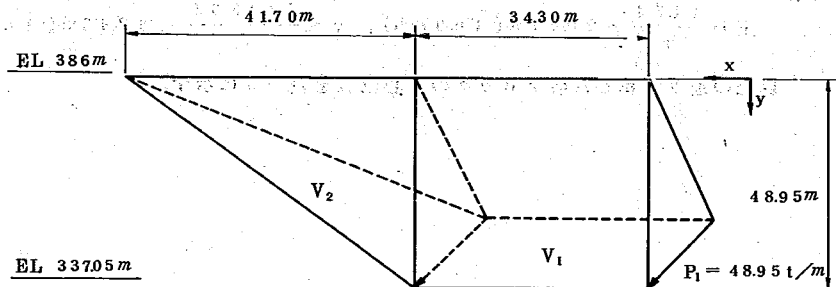
$\ell = 3.1207 \text{ m}$ をジャッキの径の 2 乗の比に分割する。

$D = 28 \text{ m/m}$ 2 本を左右岸アバットメント側, ブロックナンバー ⑮, ⑳ に使用する。(図-14 参照)

ジャッキの径	1 ブロックの長さ	ブロックナンバー
$D = 28 \text{ m/m}$ 2 本	$3.1207 \times \frac{14.90}{48.01} = 9.682 \div 2 = 4.841 \text{ m}$ (25.48 cm)	⑮, ⑳
$D = 27 \text{ m/m}$ 2 本	$3.1207 \times \frac{13.85}{48.01} = 9.003 \div 2 = 4.502 \text{ m}$ (23.69 cm)	⑰, ㉑
$D = 26 \text{ m/m}$ 3 本	$3.1207 \times \frac{19.27}{48.01} = 12.522 \div 3 = 4.174 \text{ m}$ (21.96 cm)	⑱, ㉒, ㉓

次に各ブロックの重心位置を計算する。

ブロックナンバー ㉑



$$V_1 = 48.95 \times 48.95 \times 1 / 2 \times 34.30 = 41,093.16 \text{ t}$$

$$V_2 = 1/2 \times 48.95 \times 48.95 \times 41.70 \times 1/3 = 16,652.91 \text{ t}$$

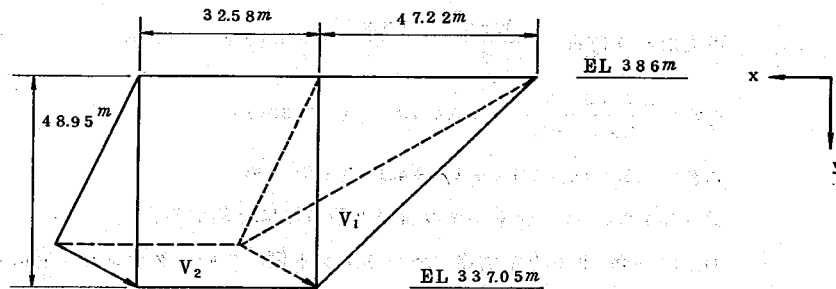
$$V = 57,746.07 \text{ t}$$

$$x = \frac{V_1 x_1 + V_2 x_2}{V} = \frac{41,093.16 \times 17.15 + 16,652.91 \times 44.72}{57,746.07} = 25.10 \text{ m} (13.21 \text{ cm})$$

$$y = \frac{V_1 y_1 + V_2 y_2}{V} = \frac{41,093.16 \times 32.65 + 16,652.91 \times 24.48}{57,746.07} = 30.28 \text{ m} (15.94 \text{ cm})$$

ブロックナンバー⑩

$$D = 28 \text{ m/m}$$



$$V_1 = 1/2 \times 48.95 \times 48.95 \times 1/3 \times 47.22 = 18,857.33 \text{ t}$$

$$V_2 = 48.95 \times 32.58 \times 48.95 \times 1/2 = 39,032.51 \text{ t}$$

$$V = 57,889.84 \text{ t}$$

$$x = \frac{18,857.33 \times 35.42 + 39,032.51 \times 63.51}{57,889.84} = 54.36 \text{ m} (26.81 \text{ cm})$$

$$y = \frac{18,857.33 \times 24.48 + 39,032.51 \times 32.63}{57,889.84} = 29.98 \text{ m} (15.78 \text{ cm})$$

ブロックナンバー⑪ ⑫

$$D = 27 \text{ m/m}$$

$$x = \frac{45.01}{2} = 22.50 \text{ m} (11.85 \text{ cm}), \quad y = \frac{2 \times 48.95}{3} = 32.63 \text{ m} (17.17 \text{ cm})$$

ブロックナンバー⑬ ⑭ ⑮

$$D = 26 \text{ m/m}$$

$$x = \frac{41.74}{2} = 20.87 \text{ m} (10.98 \text{ cm}), \quad y = \frac{2 \times 48.95}{3} = 32.63 \text{ m} (17.17 \text{ cm})$$

以上の通り計算した各ブロックの重心位置を表-5に示す。

表-5 ジャッキ中心位置表

単位(m) ()は模型寸法

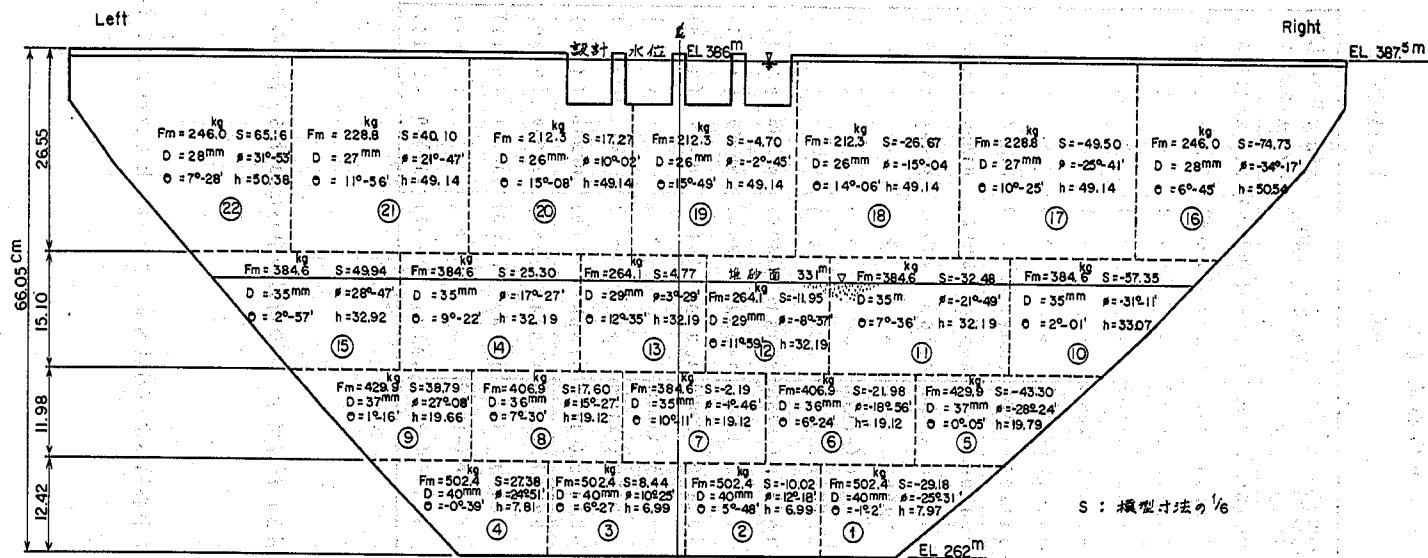
層	Block number	juck dia	Dam Centerよりの 距離 右岸⊖ 左岸⊕	底面よりの距離	天端よりの距離 (ダム天端387.5m)
EL 386 m 4	22	28m/m	123.802m(65.16cm)	95.718m(50.38cm)	31.782m(16.73cm)
	21	27	76.193 (40.10)	93.367 (49.14)	34.133 (17.96)
	20	26	32.815 (17.27)	◇ (◇)	◇ (◇)
	19	26	-8.927 (-4.70)	◇ (◇)	◇ (◇)
	18	26	-50.669 (-26.67)	◇ (◇)	◇ (◇)
	17	27	-94.047 (-49.50)	◇ (◇)	◇ (◇)
EL 337.05	16	28	-14.1996(-7.474)	96.027 (50.54)	31.473 (16.56)
EL 337.05 3	15	35	94.890 (49.94)	62.556 (32.92)	64.994 (34.21)
	14	35	48.065 (25.30)	61.169 (32.19)	66.331 (34.91)
	13	29	9.060 (4.77)	◇ (◇)	◇ (◇)
	12	29	-22.710 (-11.95)	◇ (◇)	◇ (◇)
	11	35	-61.715 (-32.48)	◇ (◇)	◇ (◇)
EL 308.35	10	35	-108.972 (-57.35)	62.834 (33.07)	64.666 (34.04)
EL 308.35 2	9	37	73.702 (38.79)	37.352 (19.66)	90.148 (47.45)
	8	36	33.450 (17.60)	36.339 (19.13)	91.161 (47.98)
	7	35	-4.156 (-2.19)	◇ (◇)	◇ (◇)
	6	36	-41.762 (-21.98)	◇ (◇)	◇ (◇)
EL 285.59	5	37	-82.272 (-43.30)	37.598 (19.79)	89.902 (47.32)
EL 285.59 1	4	40	52.027 (27.38)	14.834 (7.81)	112.666 (59.30)
	3	◇	16.034 (8.44)	13.289 (6.99)	114.211 (60.11)
	2	◇	-19.050 (-10.03)	◇ (◇)	◇ (◇)
EL 262	1	◇	-55.440 (-29.18)	15.141 (7.97)	112.359 (59.14)

3-3 油圧ジャッキ据付け位置の計算

油圧ジャッキは(図-14)のごとく分割された各ブロックの荷重の中心における上流面の法線
 線の方に据え付けることとした。

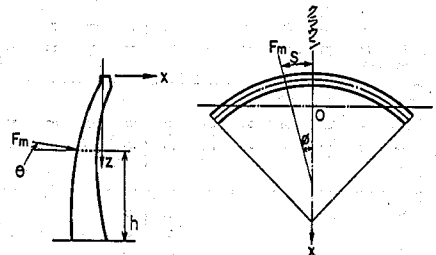
(1) 水平面上の座標と角度

設計に用いた放物線アーチのアーチ中心線および弧長Sは、次式のごとく表わすことができる。

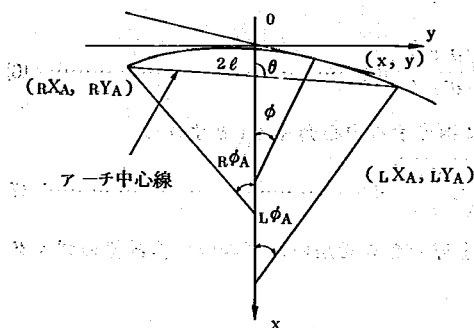


- F_m : 相似模型におけるジャッキの出力 (kg)
 D : ジャッキの内径 (mm)
 θ : ジャッキの水平面に対する角度
 S : ジャッキ作用中心線のクラウンよりの弧長 (cm 左岸側を正)
 ϕ : ジャッキ作用方向の X 軸となす角度 (X 軸より反時計方向を正)
 h : ジャッキ作用中心点のダム底よりの高さ (cm)

①~②: ジャッキ番号



(図 - 1 4)



$$X = R \int_0^\phi \cos^{-3} \phi \sin \phi \, d\phi \dots\dots (1)$$

$$Y = R \int_0^\phi \cos^{-2} \phi \, d\phi \dots\dots (2)$$

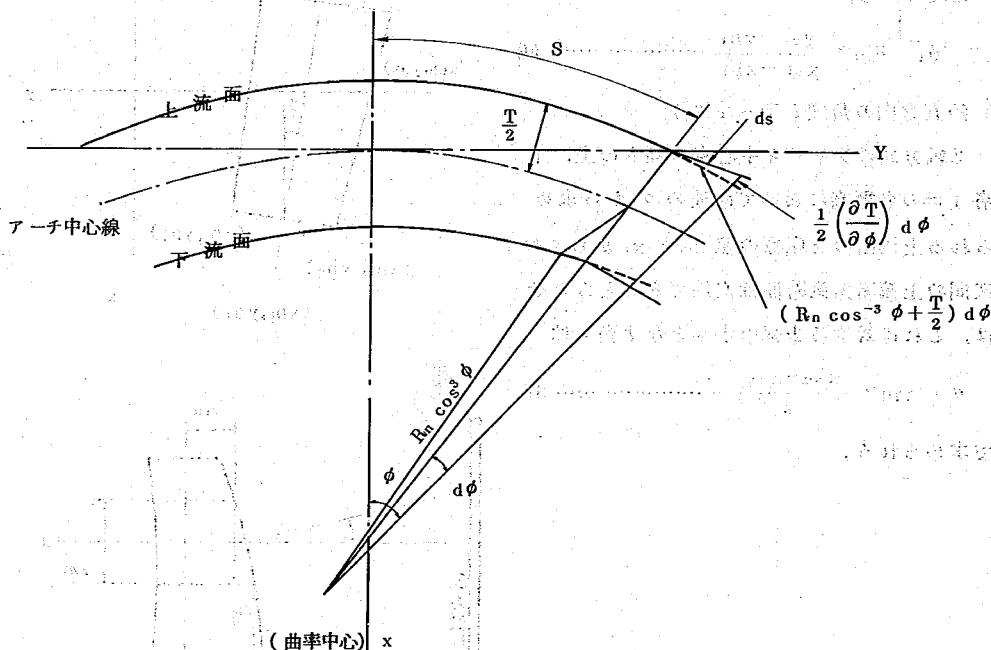
また,

$$S = \int_0^\phi \cos^{-3} \phi \, d\phi \dots\dots (3)$$

$$R = \frac{2\ell}{\left\{ \int_{R\phi_A}^{L\phi_A} \cos^{-2} \phi \, d\phi \right\}^2 + \left\{ \int_{R\phi_A}^{L\phi_A} \sin \phi \cos^{-3} \phi \, d\phi \right\}^2}^{1/2} \dots\dots (4)$$

真名川ダムではアーチ中央部でアーチ中心角の $1/2$ を等厚部にし、残りのアーチアバットメントまでを $\sec \phi$ に比例する不等厚を採用した。その関係は次式で示される。

$$T = \frac{1}{\text{vers}(\phi_A - \phi_A)} \left[T_0 - T_A \cos(\phi_A - \phi_A) + (T_A - T_0) \frac{\cos(\phi_A - \phi_A)}{\cos(\phi - \phi_A)} \right] \dots (5)$$



(図 - 15)

上流面の弧長は

$$S = \int_0^\phi \sqrt{\left(Ri \cos^{-3} \varphi + \frac{T}{2}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi}\right)^2} d\varphi \quad (6)$$

したがって i 番目のジャッキの上流面弧長 S_i に相当する中心角を φ_i とすれば

$$S_i = \int_0^{\varphi_i} \sqrt{\left(Ri \cos^{-3} \varphi + \frac{T}{2}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi}\right)^2} d\varphi \quad (7)$$

実際の計算では、プログラムが不完全なため、上述の各式を用いたダムの型枠計算のプログラムを適用することにした。

すなわち、試算によってジャッキ中心の微小なブロックを見出し、上下流の4ヶの隅の座標が求められる。これらで囲まれる形を四角形とみなせば、あるジャッキ中心点の座標 (x_{ui}, y_{ui}) は、

$$x_{ui} = x_{uj} + \frac{S_u - S_j}{L_u} (x_{uj} - x_{uh}) \quad (8)$$

$$y_{ui} = y_{uj} + \frac{S_u - S_j}{L_u} (y_{uj} - y_{uh}) \quad (9)$$

同様の計算により

下流側座標 (x_{Di}, y_{Di}) が求められる。

これから、

$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{y_{ui} - y_{Di}}{x_{ui} - x_{Di}} \quad (10)$$

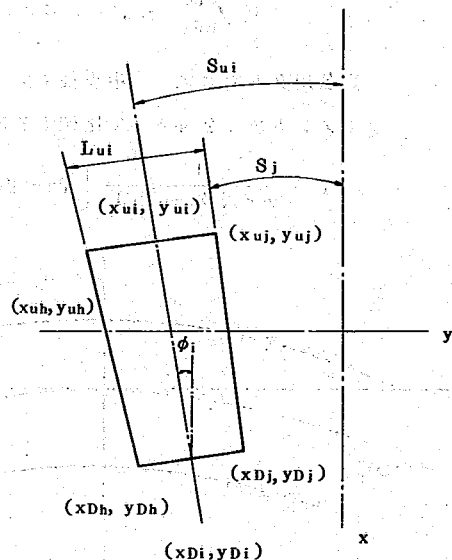
(2) 鉛直方向の角度 (図-17)

Z軸方向のジャッキ中心点の高さの上、下各1mの各標高において前述の ϕ_i から求められる上流面のx座標の値 x_m と x_n からこの区間の上流面鉛直断面は直線であるとみなせば、これに対する法線の水平となす角 α は

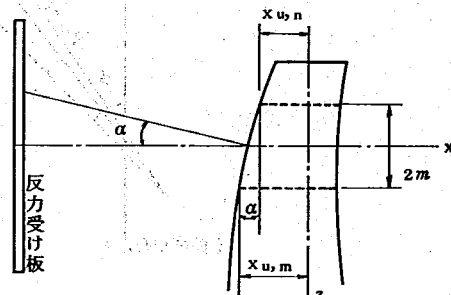
$$\alpha = \tan^{-1} \frac{x_{um} - x_{un}}{2} \quad (11)$$

で求められる。

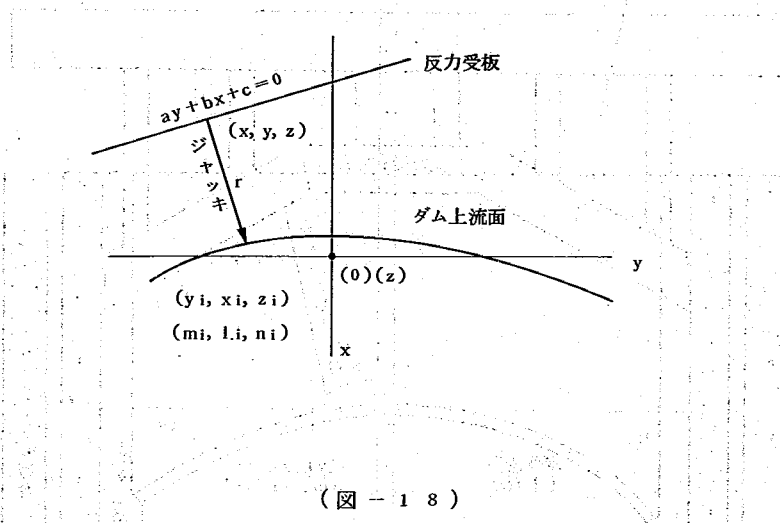
(図-16)



(図-17)



3-4 ジャッキ载荷点法線と反力受交点の求め方(図-18)



反力受板は鉛直にセットした平面とすると Z 軸に平行な平面となり次式で示される。

$$ay + bx + c = 0 \quad \left(x = -\frac{a}{b}y - \frac{c}{b} \right)$$

ダム上流面の任意点の座標を y_i, x_i, z_i

その法線の方法余弦を m_i, l_i, n_i とすると

法線が平面と交わる点の座標 y_q, x_q, z_q は

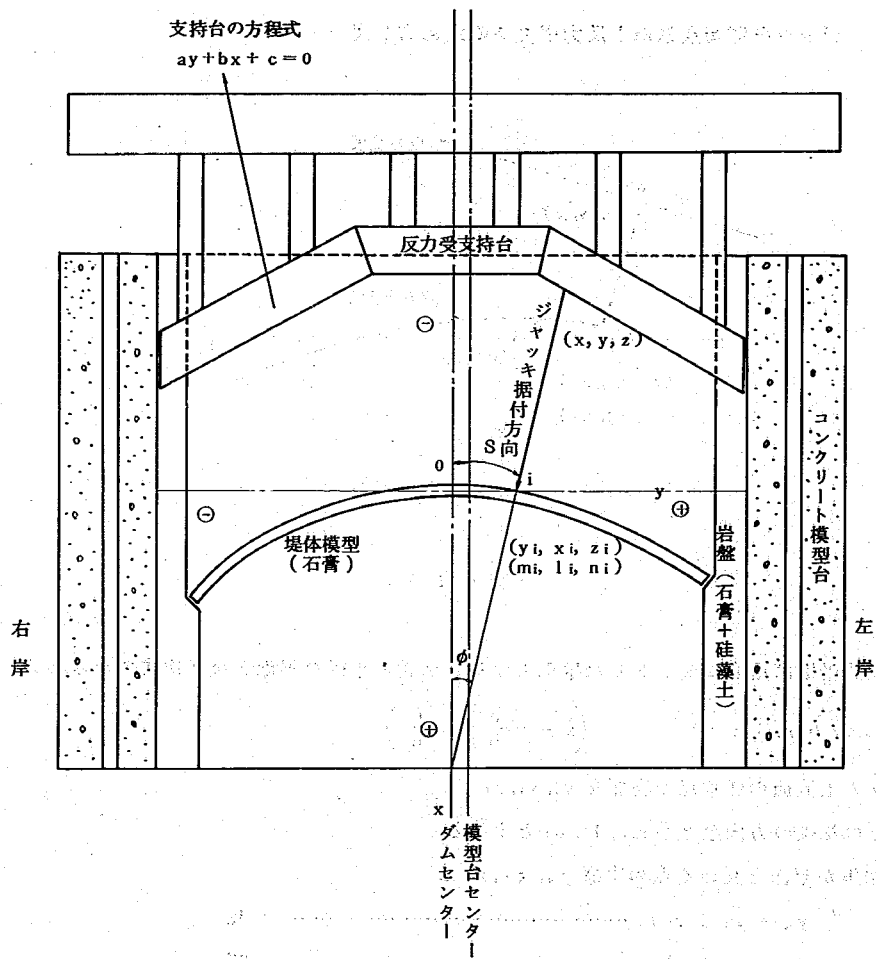
$$y_q = y_i + r m_i \quad (12)$$

$$x_q = x_i + r l_i \quad (13)$$

$$z_q = z_i + r n_i \quad (14) \text{ ただし } r \text{ は } i \text{ 点より } q \text{ 点までの距離}$$

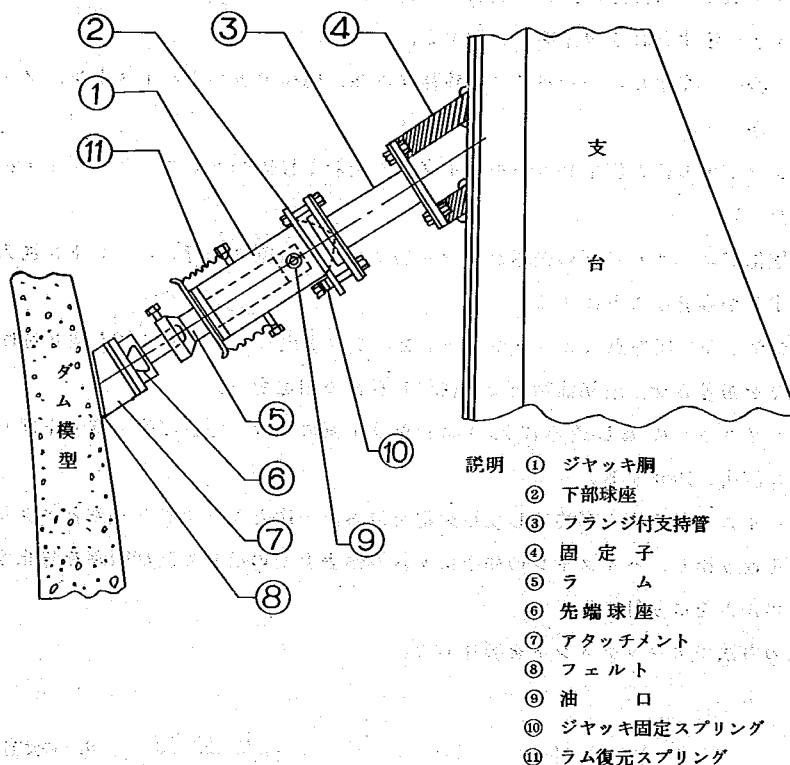
従って $a(y_i + r m_i) + b(x_i + r l_i) + c = 0$

$$\therefore r = \frac{(a y_i + b x_i + c)}{(a m_i + b l_i)} \quad (15)$$



(図-19) 模型配置平面図

3-5 油圧ジャッキ及び接触ブロック（アタッチメント）の構造



(図-20) ジャッキ構造図

油圧発生装置である油圧ポンプの最大圧力は、 $250\text{kg}/\text{cm}^2$ で高圧性特殊ポンプである。圧力調整は同一圧力を長時間継続させるための調整装置であり、手動調整で $0\sim 250\text{kg}/\text{cm}^2$ までの圧力を調整することが可能である。油圧タンクはポンプ及び調整装置から送油されるものがタンクに蓄圧され、一定の圧力を配管によって各ジャッキに伝達される。配管は油圧タンクと各ジャッキを結び、内径6%, 外径10%の $200\text{kg}/\text{cm}^2$ の高圧ゴムホースを使用した。

荷重の大きさは油圧を一定におさえ、ジャッキのシリンダー面積を変化させて、各ブロックの重心に加圧するようにした。

油圧ポンプでジャッキに圧力が伝わるが、ジャッキで直接ダム表面に加圧することは、偏荷重による応力集中を起し適当でない。そこで(図-20, 21)に示すように接触ブロック(アタッチメント)を介して加圧した。

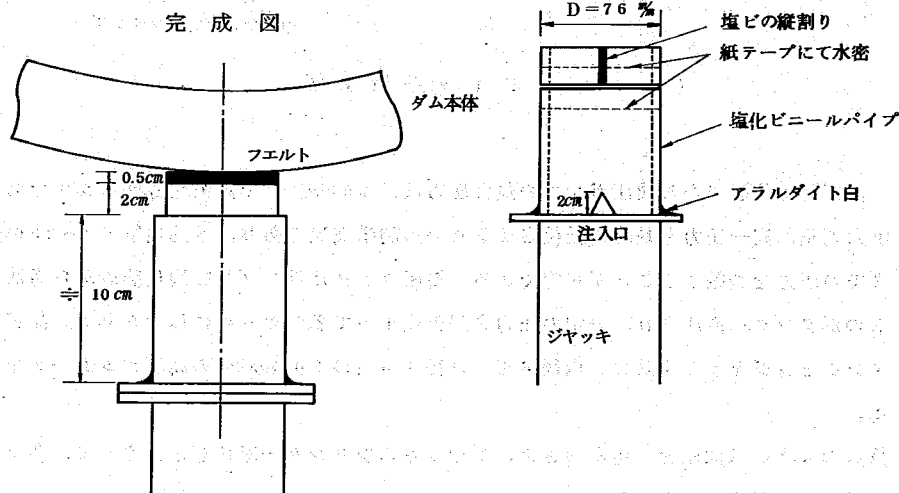
アタッチメント製作について

ジャッキに伝わった荷重は、ダム表面に直角に加圧されることが一番大切なことである。

(図-21)に示すとおり製作準備を示すと、

- 1) 材 料 塩化ビニールパイプ(外径76%, 内径66%)ハイストン, フェルト
- 2) 順 序
 - ① ジャッキの頭と塩化ビニールパイプとの接着(接着剤としてアラルダイト白を使用した。)
 - ② 塩化ビニールパイプの先端を2cm程切り離し、縦割りをを行いハイストン注入後取りはずしが容易なようにする。
 - ③ ジャッキ加圧地点にビニールシートをはり、塩化ビニールパイプを取り付けたジャッキを密着させ、最初油粘土で水密化し石膏で固定する。
 - ④ ハイストンの流し込み注入口はジャッキ側にあけ、縁は石膏で盛り上げハイストンの流出を防止する。
 - ⑤ ハイストンの注入が終了したら硬化を待ち、一体となったジャッキとアタッチメントを取り出し、ハイストンの先端にダム本体表面とのなじみ及び衝撃を防止するためフェルトをはり付けた。

以上の方法でアタッチメントを製作した。



(図-21) アタッチメント製作

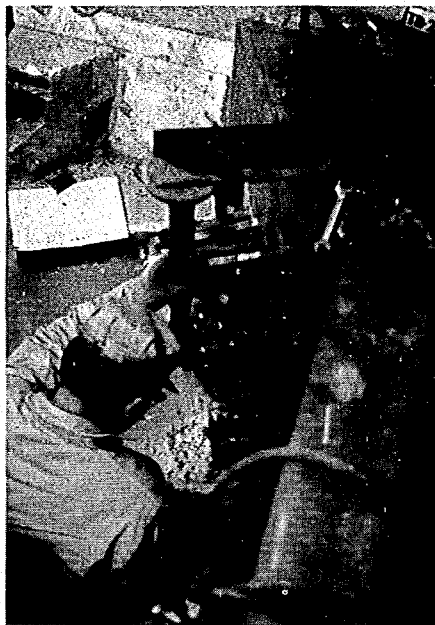


写真 1 1 ジャッキ取付台熔接

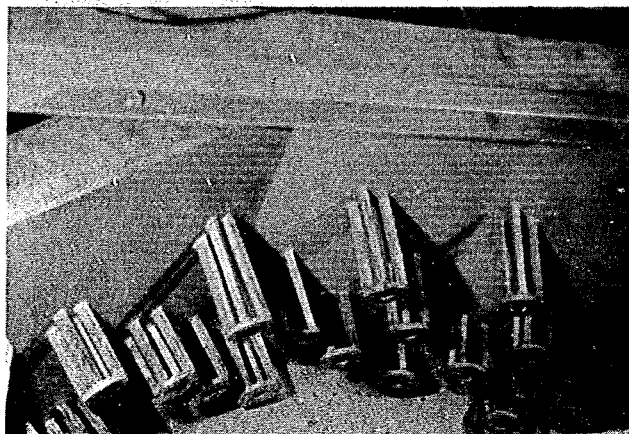


写真 1 2 ジャッキ取付台

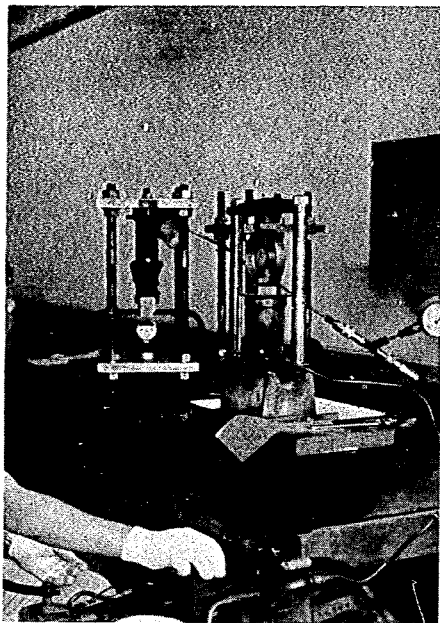


写真 1 3 ジャッキ検定

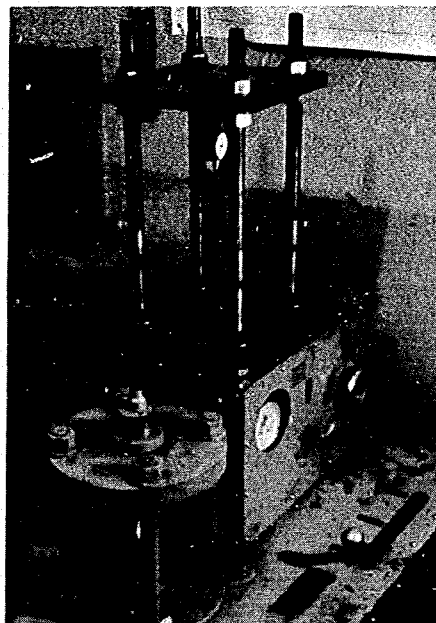


写真 1 4 ポ ン プ

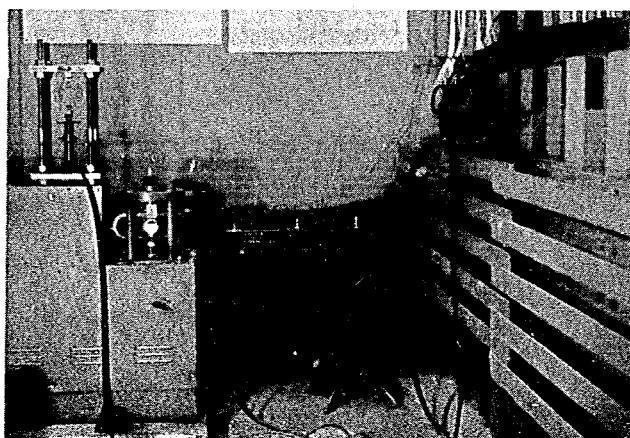


写真 1 5 ポンプ～分岐管～反力受

4. 測 定

測定はひずみとたわみを同時に測った。ジャッキの内圧力を除々に 40 kg/cm^2 まで上げていく。その状態で5分間のならし時間を置きひずみとたわみを測定する。次に除々に荷重を除いた状態にもっていき5分間そのまゝにしたあとひずみとたわみを測った。これにより載荷時から除荷時の測定値を差し引いて、その点のひずみとたわみが求められる。

4-1 たわみの測定

たわみの測定は半径方向のみについて行った。測定は堤体模型の下流側に鉄製のフレームを組み、これに $1/100 \text{ mm}$ 目盛のダイヤルゲージを取り付けゲージの先端を応力解析点(53ヶ所)に接触せしめて肉眼で読みとった。 $1/100 \text{ mm}$ 目盛ダイヤルゲージを使用した理由は過去の測定において最大たわみが $50/100 \text{ mm}$ 程度であったので使用した。

またアバットメント部は、たわみ量が少く $1/1000 \text{ mm}$ のダイヤルゲージを使用すべきであるが、動きが微妙で $1/100 \text{ mm}$ より測定値が安定しないので $1/100 \text{ mm}$ ダイヤルゲージを使用したものである。

4-2 ひずみの測定

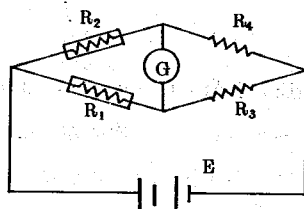
ひずみの測定は、模型表面に接着した電気抵抗線ひずみ計を使用して行ったが、ひずみ計は K-10-B3-11 (ゲージ長 10 mm 3軸 45° 90° 直交)。接着剤としてゲージセメント BG-11 を採用した。模型は恒温、恒湿装置を備えた実験室で行い、測定中は温度 20°C 、湿度 60% を維持するよう努力した。実験は上下流面約 360 成分をデジタル型多点ひずみ記録装置を用いて行った。

デジタル型多点ひずみ記録装置について

ダム の構造模型実験では数百点に及ぶひずみを短時間に測定する必要がある。模型材料としては石膏、珪藻土を用いているが、石膏はかなり弾性的な挙動をするが、ある程度クリープする性質がある。このためできるだけ短時間に測定を行いたい。従来の実験では手動測定器を用い、測定時には10人以上の人員が動員されていた。

しかも測定の精度を上げるために数10回の測定を行い、平均値をとるようにしていたので、データー整理もかなりの労力を要した。以上の経験から測定の自動化を行うために、測定値を電子計算機の入力として使用し得るテープで出力し、入力を経ずしてデーター整理を電子計算機で行なうようにした。このため測定の平均値標準偏差棄却検定等の計算がほとんど人力をかけることなく行ない得るようになり、著しい労力の節減となった。

デジタル型多点歪測定器の基本原理はホイートストンブリッジの原理を応用したものである。



- R_1 : ひずみ計
- R_2 : 補償用ひずみ計
- R_3 : 可変抵抗
- R_4 : 固定抵抗
- E : 電池
- G : 電流計

(図-22)

(図-22)において

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \dots\dots\dots (\text{un loading}), \quad \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_2} = \frac{R_3 + \Delta R_3}{R_4} (\text{loading})$$

$$\therefore \frac{\Delta R_1}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_4}$$

従来はひずみゲージの抵抗 R_1 の切替えをスイッチで行っていたが、スイッチの接触抵抗が出て測定精度が落ち、さらに電流の安定もよくなかった。測定精度の向上、測定時間の短縮をはかるため経費は高むが、各ゲージにホイートストンブリッジを組み、スイッチによって電池 E を入れかえ各ゲージの抵抗を測定できるようにした。これにより測定精度の向上、測定時間の短縮をはかることができるようになった。

4-3 実験の精度

実験の過程として、除々にジャッキ内圧力を上昇させ、たわみを測定したところジャッキ内油圧が 4.0 kg/cm^2 上昇したとき、模型各部のたわみが従来行なわれてきた模型実験のたわみ測定値の平均的な大きさを増してきたので、これを常時ジャッキ内圧力として実験を行った。

実験値におよぼす誤差としては、① ゲージ誤差 ② 載荷装置、の二つが比較的大きいと考えられる。このうち①のゲージ誤差については、ゲージ固有のものであり、同一ゲージで同一載荷状態において測定された値でも通常 $\pm 5 \times 10^{-6} \text{ cm}$ 程度の誤差がみられる。②による誤差はジャッキ据付け位置、ジャッキの friction loss、油圧ポンプの操作上の誤差等が原因と思われるが、ゲージを新規に貼替えて行った状態でも $\pm 10 \times 10^{-6} \text{ cm}$ 程度示される。したがって測定に際しては総じて $\pm 15.0 \times 10^{-6} \text{ cm}$ 程度の誤差が考えられる。

この測定誤差を実物の応力に換算すると、

$$\frac{\epsilon_P}{\epsilon_m} = \frac{G}{n} \cdot \frac{E_P}{E_m} \dots\dots\dots (1)$$

$$P = \frac{V_P G}{n^3 A} \dots\dots\dots (2)$$

ここで V_P : ダム上流面に作用する圧力

A : ジャッキシリンダー面積

G : 荷重強度

n : ダム模型縮尺

P : ジャッキ内油圧 (Kg/cm^2)

(2)式に $40 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ を代入すると, 荷重強度 $G = 28.53$ となる。

$$\sigma_P = \frac{n}{G} \cdot \sigma_m = \frac{n}{G} \cdot \epsilon_m \cdot E_m = \frac{190}{28.53} \times 15 \times 10^{-6} \times 58000 \div 5.8 \text{ Kg}/\text{cm}^2$$

ここで σ_P : 実物の応力

σ_m : 模型の応力

ϵ_m : 模型のひずみ

E_m : 模型の弾性係数

となり, 本実験ではこの程度の精度をもつことになるが, 実験に際してはいずれも50回行った測定値をもとに, 平均値標準偏差棄却検定を行ったデータを使用しており, 誤差の範囲はさらに小さくなると思われる。

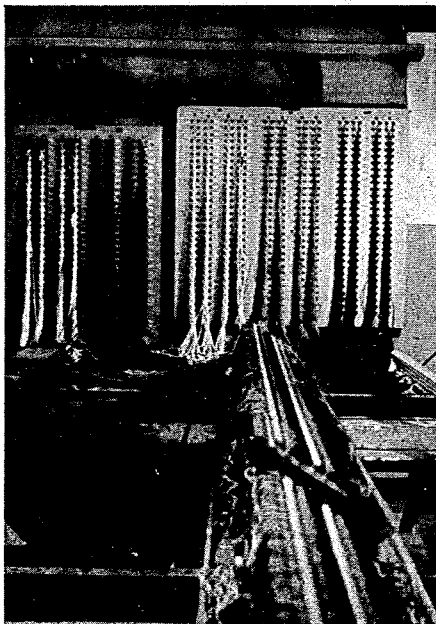


写真16 絡板

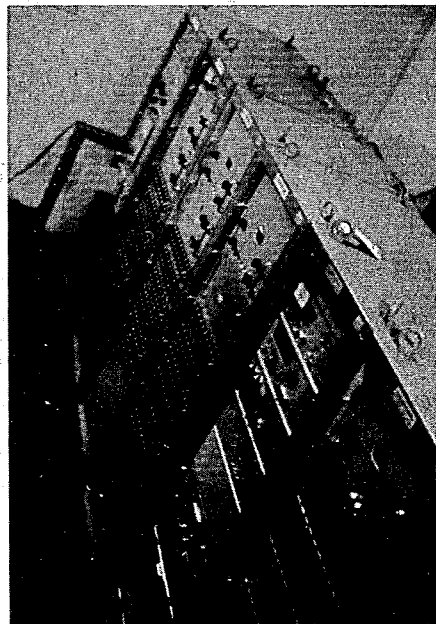


写真17 デジタルひずみ測定器

5. 応力の算出

測定ひずみの整理された値から応力計算を行うのであるが、三方向ひずみからブックスの法則により、次の様な式が導き出される。

ここで、 $\epsilon_h, \epsilon_v, \epsilon_d$: それぞれ模型実験で測定された水平、鉛直、斜め方向のひずみ。

n, E_m, μ, P : それぞれ模型の縮尺、弾性係数、ポアソン比、ダム表面に作用する圧力。

$\sigma_H, \sigma_v, \tau_{HV}$: それぞれ模型の水平応力、鉛直応力、せん断応力

$\sigma_{HP}, \sigma_{VP}, \tau_{HVP}, G$: それぞれ実物の水平応力、鉛直応力、せん断応力及び荷重強度。

とすれば、ある測点の鉛直方向ひずみおよび水平方向ひずみによる応力は

$$\epsilon_v = \frac{1}{E_m} \{ \sigma_v - \mu (\sigma_h + P) \}$$

$$\epsilon_h = \frac{1}{E_m} \{ \sigma_h - \mu (\sigma_v + P) \} \quad \text{の関係より}$$

$$\epsilon_v + \mu \epsilon_h = \frac{1}{E_m} \{ \sigma_v (1 - \mu)^2 - \mu (1 - \mu) P \}$$

$$\left. \begin{aligned} \therefore \sigma_v &= \frac{E_m}{1 - \mu^2} (\epsilon_v + \mu \epsilon_h) + \frac{\mu}{1 - \mu} P \\ \sigma_h &= \frac{E_m}{1 - \mu^2} (\epsilon_h + \mu \epsilon_v) + \frac{\mu}{1 - \mu} P \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

又、(図-23)により

$$\sigma_D = \sigma_H \cos^2 \theta + \sigma_v \sin^2 \theta + 2 \tau_{HV} \sin \theta \cdot \cos \theta$$

$$\sigma_{D'} = \sigma_H \sin^2 \theta + \sigma_v \cos^2 \theta - 2 \tau_{HV} \sin \theta \cdot \cos \theta$$

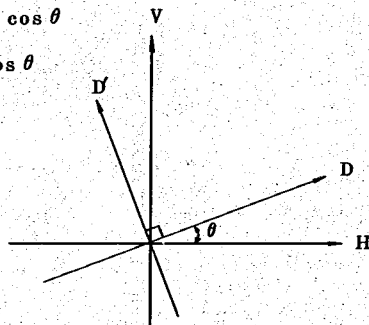
$\theta = 45^\circ$ とすると

$$\sigma_D + \sigma_{D'} = \sigma_H + \sigma_v$$

$$\sigma_D - \sigma_{D'} = 2 \tau_{HV} \quad \text{従って}$$

$$\tau_{HV} = \frac{1}{2} \{ 2 \sigma_D - (\sigma_H + \sigma_v) \}$$

$$\sigma_D = \frac{E_m}{1 - \mu^2} (\epsilon_D + \mu \epsilon_{D'}) + \frac{\mu}{1 - \mu} P \quad \text{であるから}$$



(図-23)

$$\left. \begin{aligned} \tau_{HV} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{E_m}{(1-\mu^2)} [2\epsilon_D(1-\mu) + 2\mu(\epsilon_h + \epsilon_v) - (\epsilon_h + \epsilon_v) - \mu(\epsilon_h + \epsilon_v)] \\ &= \frac{E_m}{2(1-\mu^2)} [2\epsilon_D(1-\mu) - (1-\mu)(\epsilon_h + \epsilon_v)] \\ &= \frac{E_m}{2(1+\mu)} [2\epsilon_D - (\epsilon_h + \epsilon_v)] \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

(1), (2), 式はいずれも模型の応力であるから, これから実物の応力を求めると,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{HP} &= \frac{n}{G} \cdot \frac{E_m}{1-\mu^2} (\epsilon_h + \mu\epsilon_v) + P \frac{\mu}{1-\mu} \\ \sigma_{VP} &= \frac{n}{G} \cdot \frac{E_m}{1-\mu^2} (\epsilon_v + \mu\epsilon_h) + P \frac{\mu}{1-\mu} \\ \tau_{HVP} &= \frac{n}{G} \cdot \frac{E_m}{2(1+\mu)} [2\epsilon_D - (\epsilon_h + \epsilon_v)] \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

次に主応力を求める。応力の変換則から H 軸より θ なる角の方向の応力は

$$\sigma = \sigma_H \cdot \cos^2 \theta + \sigma_V \cdot \sin^2 \theta + 2\tau_{HV} \sin \theta \cdot \cos \theta$$

$$= \sigma_H \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos 2\theta) + \sigma_V \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos 2\theta) + \tau_{HV} \cdot \sin 2\theta$$

$$= \frac{1}{2} (\sigma_H + \sigma_V) + \frac{1}{2} (\sigma_H - \sigma_V) \cos 2\theta + \tau_{HV} \sin 2\theta$$

$$\tau_{DD'} = \sigma_H \sin \theta \cdot \cos \theta + \sigma_V \sin \theta \cdot \cos \theta + \tau_{HV} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \theta} = -(\sigma_H - \sigma_V) \sin 2\theta + 2\tau_{HV} \cos 2\theta = 0$$

$$2\tau_{HV} = (\sigma_H - \sigma_V) \frac{\sin 2\theta}{\cos 2\theta}, \quad \tan 2\theta = \frac{2\tau_{HV}}{\sigma_H - \sigma_V}$$

$$\therefore \theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\tau_{HV}}{\sigma_H - \sigma_V} \dots (4)$$

$$1 + \tan^2 2\theta = 1 + \left(\frac{2\tau_{HV}}{\sigma_H - \sigma_V} \right)^2 = \frac{(\sigma_H - \sigma_V)^2 + 4\tau_{HV}^2}{(\sigma_H - \sigma_V)^2}$$

$$1 + \tan^2 2\theta = 1 + \frac{\sin^2 2\theta}{\cos^2 2\theta} = \frac{1}{\cos^2 2\theta}$$

$$\therefore \cos 2\theta = \pm \frac{(\sigma_H - \sigma_V)}{\sqrt{(\sigma_H - \sigma_V)^2 + 4\tau_{HV}^2}}, \quad \sin 2\theta = \pm \frac{2\tau_{HV}}{\sqrt{(\sigma_H - \sigma_V)^2 + 4\tau_{HV}^2}}$$

$$\cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta = 2 \cos^2 \theta - 1 = 1 - 2 \sin^2 \theta$$

$$\therefore \cos^2 \theta = \frac{1}{2} (1 + \cos 2\theta), \quad \sin^2 \theta = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\theta)$$

$$\begin{aligned} \therefore \sigma &= \frac{1}{2} (\sigma_H + \sigma_V) \pm \frac{1}{2} \frac{(\sigma_H - \sigma_V)^2 + 4\tau_{HV}^2}{\sqrt{(\sigma_H - \sigma_V)^2 + 4\tau_{HV}^2}} \\ &= \frac{1}{2} (\sigma_H + \sigma_V) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_H - \sigma_V)^2 + 4\tau_{HV}^2} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

従つてまとめると、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2} (\sigma_H + \sigma_V) + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_H - \sigma_V)^2 + 4\tau_{HV}^2} \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2} (\sigma_H + \sigma_V) - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_H - \sigma_V)^2 + 4\tau_{HV}^2} \\ \theta &= \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\tau_{HV}}{\sigma_H - \sigma_V} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

三つの応力、 σ_{HP} 、 σ_{VP} 、 τ_{HVP} が決まれば、これから断面応力を求める。模型実験から測定された応力は、ダムの表面応力であるから、これを断面応力に換算して次の諸力を求める。

アーチ応力

$$\text{スラスト} \quad H_a = \frac{T}{2} (\sigma_{Hu} + \sigma_{Hd}) \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{モーメント} \quad M_a = \frac{T^2}{12} (\sigma_{Hu} - \sigma_{Hd}) \dots\dots\dots (8)$$

片持梁応力

$$\text{スラスト} \quad H_c = \frac{Ac}{T} (\sigma_{vu}(T - lg) + \sigma_{vd} \cdot lg) \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{モーメント} \quad M_c = \frac{I}{T} (\sigma_{vu} - \sigma_{vd}) \dots\dots\dots (10)$$

接線方向せん断力

$$V = \frac{Ac}{T} (\tau_{Hvu}(T - lg) + \tau_{Hvd} \cdot lg) \dots\dots\dots (11)$$

捩れモーメント

$$M_T = \frac{I_c}{T} (\tau_{Hvu} - \tau_{Hvd}) \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 δ_m : 測定点でのたわみの測定値、 δ_p : 測定点でのたわみの計算値、 G : 荷重強度、 E_p : 片持梁の弾性係数、 E_m : 土の弾性係数、 n : ひずみ比、 T : 測定点でのダムの厚さ、 A_c : 測定点での片持梁の面積、 I_c : 測定点での片持梁の断面二次モーメント、 l_g : 測定点での片持梁の上流面から重心までの距離

また、たわみの測定値から実物の変位換算係数を求めるには、外荷重のみを対象とすると、

$$\frac{\delta_m}{\delta_p} = \frac{G}{n^2} \cdot \frac{E_p}{E_m} \quad \text{から} \quad \delta_p = \frac{n^2}{G} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot \delta_m \quad (13)$$

ここに、ひずみ比 0.65、荷重強度 $G = 28.53$ 、 $E_m = 58,000 \text{ kg/cm}^2$ であるから

$$\delta_p = \frac{190^2}{28.53} \cdot \frac{58,000}{250,000} \cdot \delta_m = 294 \delta_m \text{ (mm)}$$

これにより測定したたわみを乗し、実物のたわみを図にしたのが (図-25, 26) である。

6. 実験結果と考察

設計々算過程で、最終的に決定されたタイプについて、コンジットがある場合とない場合の模型実験による応力およびたわみの測定を行った結果では、コンジット有無についての差異は認められなかった。したがって以下では、コンジット穿孔後 (施工形状) の実験値をもとに計算値との比較検討を行う。

6-1 たわみ (図-25, 26 参照)

実験値は半径方向調整計算値の分布形状に似ているが、左岸においては計算値より小さい値を示している。また上部標高アバットメント付近では、上流側にたわむ傾向がある。この原因は真名川ダムの谷形状であると思われる。一般にV字形の谷の場合上部標高アバットメントは、上流側にたわみ、U字型の谷の場合下流側にたわむ傾向がみられる。真名川ダムでは前者に相当する。最大値は共にトップアーチクラウンに見られ、実験値で108.7mm 計算値 (半径方向調整計算) では、101.8mm である。

6-2 応力

これまでに土木研究所をはじめ、その他の機関によって多くの実験が行われてきたが、半径方向調整計算によって求めた応力値に比較して、つぎにあげる差異が判明した。

- 1) 上流面クラウンカンティレバー基礎の鉛直応力は計算値に比較して、実験値の方は $20 \sim 30 \text{ Kg/cm}^2$ 圧縮側に移行する。
- 2) 下流面アーチクラウン下部標高の水平応力が計算値に比較して、実験値の方は $10 \sim 30 \text{ Kg/cm}^2$ 引張側に移行する。
- 3) 下流面両サイドカンティレバー基礎の鉛直応力が、計算値に比較して実験値の方は $10 \sim 20 \text{ Kg/cm}^2$ 引張側に移行する。

以上を真名川ダムについて照合してみると次のようになる。(図45~48)

- 1) の鉛直応力については 24.1 Kg/cm^2 圧縮側に移行している。
- 2) の水平応力については 18.5 Kg/cm^2 引張側に移行している。
- 3) の鉛直応力については $14.9 \sim 18.8 \text{ Kg/cm}^2$ 引張側に移行している。

6-3 主 応 力 (図27, 28, 29, 30, 49, 50)

実験値は

- 1) 全体的な主応力分布状態は、左右岸ともほぼ均等な値を示し、主応力の流れの方向もかなりはっきり示されている。
 - 2) 上流面における最大圧縮応力は、EL340m アーチクラウンに出ている 67.1 Kg/cm^2 であり、他の標高もアーチクラウン沿いが大きく水平応力で $27 \sim 67 \text{ Kg/cm}^2$ を示している。
 - 3) 下流面における最大圧縮応力は、EL300m 左岸アバットメントの 68.5 Kg/cm^2 で各標高ともアバットメントの方が大きく、全体的に左岸の方がやゝ大きい値を示している。
 - 4) 上流面における最大引張応力は、EL340m 左岸アバットメントの -6.3 Kg/cm^2 で、EL320~340m 標高の左右岸とも引張応力は示されている。
 - 5) 下流面における最大引張応力は、EL262m アーチクラウンの -18.8 Kg/cm^2 である。上流面主応力の完全調整計算値と比較してみると、クラウンキャンティレバーでは、全体的に実験値の方が小さい値を示しているが、アバットメントでは実験値の方が大きくなっている。又完全調整計算値で示されているアバットメントに直角な引張応力は、 $10 \sim 20 \text{ Kg/cm}^2$ 圧縮側に移行しすべて圧縮応力となっている。
- 下流面主応力の圧縮応力を実験値と完全調整計算値について比較してみると、実験値がアバットメントで、上部標高(EL375~360m)でやゝ大きく、クラウンでは計算値の方が大きい値を示している。
- 又下部標高(EL300~280m) アーチクラウン沿い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 20 Kg/cm^2 引張側に移行し、引張応力となっている。

6-4 応力上の問題点

実験により主応力値が算出されたが、注目すべき値は次のとおりである。

1) 圧縮応力

上流面 EL 340m アーチクラウンに発生している $6.7.1 \text{ Kg/cm}^2$

下流面 EL 300m 左岸アバットメントに発生している $6.8.5 \text{ Kg/cm}^2$

2) 引張応力

上流面 EL 340m 右岸アバットメントに発生している -6.3 Kg/cm^2

下流面 EL 262m アーチクラウンに発生している $-1.8.8 \text{ Kg/cm}^2$

下流面 EL 262m 左岸アバットメントに発生している $-1.0.1 \text{ Kg/cm}^2$

1)の圧縮応力については、他のアーチダムに比較して大きなものではないので、富配合のコンクリートを使用すれば問題はない。

2)の引張応力については、いずれもかなり大きな値なので注意する必要がある。一般にアーチダムの引張応力により、クラックが生ずる場合には、二次的な安定が得られクラックがそれ以上伸びない場合と、際限なく伸びる場合の2つのケースがある。下流面下部標高アーチクラウン付近に水平な引張応力により発生する場合は前者に相当し、クラックはある程度の深さに達すると、それ以上伸びずに有効アーチが働き、二次的な安定が得られるものと考えられる。

アバットメント沿いに発生する引張応力によるクラックは後者に相当し、下流側表面に傾斜アーチ状に発生するものと予想される。他ダムの応力解析および模型実験の結果でもこの種の引張応力があり、それに起因するクラック発生は報告はないが、この部分にたいしては特に良質のコンクリートを打込むとともに養生、クーリングを充分に行うことが望ましい。

6-5 地震時の応力の推定

模型実験では、最高水位での水圧および堆砂圧を対象とし、後で自重を加算した。つまり実験では、

常時満水時水圧 + 動水圧 + 堆砂圧 + 自重

を考慮するが設計計算では、

常時満水時水圧 + 動水圧 + 堆砂圧 + 自重 + 地震時慣性力

として計算されるため、この計算値を用いて実験値を補正し、応力を推定してみた。

この方法は、完全調整計算におけるアーチスラスト、アーチモーメント、カンティレバースラスト、カンティレバーモーメントについて、常時および地震時の比を求め、これらの比率が実験値にも成立するものとして上、下流面水平および鉛直方向地震時応力を求めたものである。

表-6 各種荷重時における応力の比較

a. 上流面水平応力

単位 (Kg/cm²)

位 置	E L	完全調整計算		実験値 (常時応力)	アーチ スラスト の比率	アーチ モーメント の比率	実験値による 地震時応力 (推定)
		常時応力	地震時応力				
ク ラ ウ ン	375	kg/cm ² 7 6.7	kg/cm ² 5 6.6	kg/cm ² 5 0.6	0.68	2.26	kg/cm ² 6 1.4
	360	68.6	56.0	59.7	0.74	1.43	58.5
	340	67.4	63.4	66.9	0.87	1.18	65.8
	320	65.1	66.4	64.8	0.98	1.11	66.9
	300	56.1	59.9	53.5	1.04	1.11	57.9
	280	41.8	45.9	44.9	1.07	1.13	49.8
右 岸 アバットメント	375	-5.7	3.7	40.4	0.99	0.42	29.1
	360	2.1	9.3	26.7	0.94	0.47	23.4
	340	2.6	5.2	9.6	0.95	0.82	16.0
	320	7.2	6.5	5.5	1.01	1.05	9.0
	300	10.5	10.3	10.9	1.06	1.11	3.8
	280	14.8	15.5	20.2	1.07	1.16	17.0
左 岸 アバットメント	375	-2.4	6.8	33.2	0.95	0.41	41.1
	360	5.3	12.8	18.8	0.92	0.48	30.6
	340	4.8	7.2	14.9	0.94	0.84	11.6
	320	6.8	5.9	9.8	1.01	1.05	4.7
	300	9.0	8.6	4.6	1.05	1.10	10.6
	280	11.6	12.0	16.6	1.07	1.13	20.9

※ アーチスラスト、アーチモーメントの比率とは、 $\frac{\text{地震時}}{\text{常時}}$ である。

① 水平応力について

上流面での圧縮応力の最大は、EL 320m アーチクラウンの 66.9Kg/cm² で引張応力は示されていない。

下流面での圧縮応力の最大は、EL 320m 右岸アバットメントの 52.7Kg/cm²、引張応力の最大は、EL 280m アーチクラウンの -19.5Kg/cm² である。

いずれの値も地震時におけるコンクリートの許容応力の 3.0% 割り増しを考慮すると安全側にあると言える。

b) 下流面水平応力

位 置	E L	完 全 調 整 計 算		実 験 値 (常時応力)	アーチ スラスト の 比 率	アーチ モーメント の 比 率	実験値による 地震時応力 (推定)
		常時応力	地震時応力				
ク ラ ウ ン	375	71.4 kg/cm^2	44.7 kg/cm^2	16.8 kg/cm^2	0.68	2.26	-15.2 kg/cm^2
	360	53.6	34.5	18.1	0.74	1.43	-0.9
	340	36.1	26.6	17.1	0.87	1.18	7.2
	320	23.3	20.2	10.4	0.98	1.11	6.7
	300	12.4	11.4	-8.3	1.04	1.11	-10.8
	280	3.2	2.2	-16.5	1.07	1.13	-19.5
右 岸 アバットメント	375	27.2	17.7	45.0	0.99	0.42	33.9
	360	33.9	24.3	47.1	0.94	0.47	36.9
	340	44.5	39.5	52.0	0.95	0.82	47.0
	320	43.4	44.4	51.5	1.01	1.05	52.7
	300	39.7	42.7	46.6	1.06	1.11	50.1
	280	24.9	27.2	40.8	1.07	1.16	44.4
左 岸 アバットメント	375	30.9	20.3	43.6	0.95	0.41	42.4
	360	41.6	30.1	51.0	0.92	0.48	42.1
	340	54.4	48.7	48.8	0.94	0.84	43.8
	320	52.0	53.3	46.2	1.01	1.05	47.3
	300	43.8	47.0	45.0	1.05	1.10	48.3
	280	25.7	27.9	39.5	1.07	1.13	43.2

※ アーチスラスト，アーチモーメントの比率とは， $\frac{\text{地震時}}{\text{常時}}$ である。

c) 上流面鉛直応力

位 置	E L	完 全 調 整 計 算		実 験 値 (常時応力)	アーチ スラスト の 比 率	アーチ モーメント の 比 率	実験値による 地震時応力 (推定)
		常時応力	地震時応力				
ク ラ ウ ン	375	$\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 1.4	$\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 0.4	$\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 4.8	0.68	2.26	$\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 0.6
	360	4.7	3.2	14.0	0.74	1.43	0.4
	340	15.0	20.3	10.6	0.87	1.18	0.1
	320	17.7	25.3	18.4	0.98	1.11	0.7
	300	15.6	21.6	9.8	1.04	1.11	0.8
	280	3.1	5.7	5.0	1.07	1.13	0
右 岸 アバットメント	375	1.4	1.1	9.6	0.99	0.42	0.3
	360	-11.7	-3.5	9.9	0.94	0.47	0.9
	340	-11.8	-0.4	1.1	0.95	0.82	0.8
	320	-8.1	2.0	1.6	1.01	1.05	1.3
	300	-8.0	-0.4	11.0	1.06	1.11	1.2
	280	-2.8	1.2	19.0	1.07	1.16	2.8
左 岸 アバットメント	375	1.4	1.0	9.3	0.95	0.41	0.9
	360	-13.2	-4.6	7.6	0.92	0.48	1.3
	340	-14.1	-2.1	2.3	0.94	0.84	0.8
	320	-10.9	-0.1	7.9	1.01	1.05	1.1
	300	-9.9	-2.1	7.7	1.05	1.10	1.6
	280	-3.5	-0.6	26.2	1.07	1.13	2.2

※ アーチスラスト, アーチモーメントの比率とは, $\frac{\text{地震時}}{\text{常 時}}$ である。

② 鉛直応力について

上流面での圧縮応力の最大は, EL 280m 右岸アバットメントの $2.8\text{Kg}/\text{cm}^2$ で, 引張応力は認められない。

下流面での圧縮応力の最大は, EL 300m アーチクラウンの $3.3\text{Kg}/\text{cm}^2$ で, 引張応力は認められない。

d) 下流面鉛直応力

位 置	E L	完 全 調 整 計 算		実 験 値 (常時応力)	アーチ スラスト の 比 率	アーチ モーメント の 比 率	実験値による 地震時応力 (推定)
		常時応力	地震時応力				
ク ラ ウ ン	375	kg/cm^2 3.8	kg/cm^2 4.8	kg/cm^2 -0.2	0.68	2.26	kg/cm^2 0.5
	360	7.0	6.9	3.0	0.74	1.43	1.2
	340	4.6	-3.5	9.1	0.87	1.18	1.8
	320	9.2	-1.3	18.5	0.98	1.11	2.4
	300	18.0	9.4	13.4	1.04	1.11	3.3
	280	36.9	32.1	17.5	1.07	1.13	2.9
右 岸 アバットメント	375	3.8	4.0	12.0	0.99	0.42	0.7
	360	22.4	13.4	14.3	0.94	0.47	1.2
	340	27.1	14.6	20.5	0.95	0.82	1.8
	320	28.4	17.0	24.7	1.01	1.05	1.8
	300	33.9	24.9	30.7	1.06	1.11	2.5
	280	35.0	29.4	25.7	1.07	1.16	2.7
左 岸 アバットメント	375	3.8	4.1	6.7	0.95	0.41	1.2
	360	24.3	1.5	12.2	0.92	0.48	1.5
	340	31.0	17.7	26.6	0.94	0.84	1.3
	320	33.1	20.9	27.9	1.01	1.05	1.4
	300	37.5	28.3	31.9	1.05	1.10	2.3
	280	36.9	31.2	30.0	1.07	1.13	2.2

6-6 組合せ応力の検討

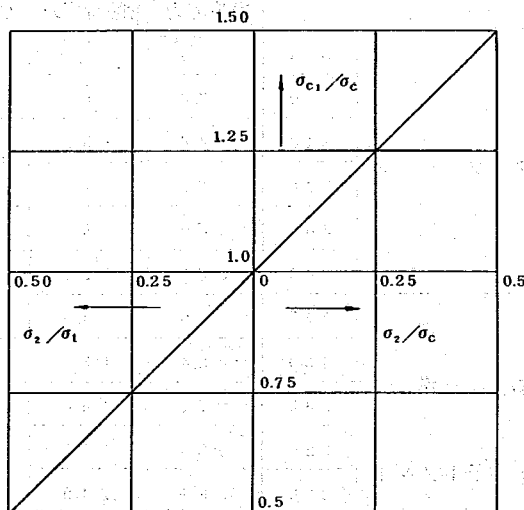
実際のコンクリート構造物においては、その応力状態は単純応力状態であることは、きわめて特殊な状態であって、一般には組合せ応力状態である。アーチダムではかなり大きな引張応力が発生するので、組合せ応力状態を考えると好ましくない応力状態となる。したがってこの組合せ応力の状態が、アーチダムの強度を著しく左右するので「ダム設計基準第4章アーチダム」では、この強度の変化を検討するように規定している。

アーチダムコンクリートの配合強度は、(許容応力度)×(安全率)×(割増係数)÷(修正係数)で求められるが、ここで修正係数とはダムの表面に生じる主応力の状態を検討して

次のようにして求める。

ダムの下流面の強度は、表面に垂直な方向の応力がなく ($\sigma_3 = 0$)、二次元的応力状態であるので (図-24) を参考として求めることができる。しかし上流面においては表面に垂直な応力 σ_3 は水圧に等しく、二次元的応力状態として修正係数を求めることには問題があるが、さいわい真名川ダムの上流面に発生する引張応力はきわめて小さいので、所要強度を左右するとは考えられないので検討を省略することができる。したがってダムの下流面について検討すればよい。

σ_1 はすべて圧縮応力であり、 σ_2 が共に圧縮応力のときは σ_2 と一軸圧縮強度 σ_c との比 (σ_2/σ_c)。 σ_2 が引張応力のときは、 σ_2 と一軸引張強度 σ_t との比 (σ_2/σ_t) から図-24 によって修正係数 σ_{c1}/σ_c が求められる。これから前述の (許容応力度) $\times$ (安全率) $\times$ (割増係数) $\div$ (修正係数) によって最大圧縮強度 σ_1 の方向の所要圧縮強度 σ_{c1} が算出できる。



- σ_1, σ_2 : 主応力 (σ_1 は圧縮応力とする)
- σ_c : 一軸圧縮強度
- σ_t : 一軸引張強度 (σ_c の $1/8 \sim 1/12$)
- σ_{c1} : 最大圧縮応力 σ_1 の方向の圧縮強度

(図-24) コンクリートの応力-強度曲線図

こゝで、真名川ダム模型実験の結果、

問題になっている下流面 EL262m アーチクラウンに発生している $-1.8.8 \text{ Kg/cm}^2$ 、又下流面 EL262m 左岸アバットメントに発生している $-1.0.1 \text{ Kg/cm}^2$ の2箇所について組合せ応力状態における圧縮強度の減少を検討してみる。

但し、 $\sigma_c = 35.0 \text{ Kg/cm}^2$ 、 $\sigma_t = -4.3.8 \text{ Kg/cm}^2$ (σ_c の $1/8$)、 $n=4$ 割増係数 1.1.5 とする。

下流面 EL 262m アーチクラウン、 $\sigma_1 = 18.6 \text{ Kg/cm}^2$ 、 $\sigma_2 = -1.8.8 \text{ Kg/cm}^2$

$$\sigma_2/\sigma_t = -1.8.8/-4.3.8 = 0.43 \quad \sigma_{c1}/\sigma_c = 0.57$$

$$\sigma_{c1} = 18.6 \times 4 \times 1.1.5 \times 1/0.57 = 15.0 \text{ Kg/cm}^2$$

下流面 EL 262m 左岸アバットメント、 $\sigma_1 = 5.7.0 \text{ Kg/cm}^2$ 、 $\sigma_2 = -1.0.1 \text{ Kg/cm}^2$

$$\sigma_2/\sigma_t = -1.0.1/-4.3.8 = 0.23 \quad \sigma_{c1}/\sigma_c = 0.77$$

$$\sigma_{c1} = 5.7.0 \times 4 \times 1.1.5 \times 1/0.77 = 3.4.0 \text{ Kg/cm}^2$$

次に、下流面 EL 300m 左岸アバットメント $\sigma_1 = 68.5 \text{ Kg/cm}^2$ 、 $\sigma_2 = 1.0.0 \text{ Kg/cm}^2$

$$\sigma_2/\sigma_c = 10.0/350 = 0.0286 \quad \sigma_{c1}/\sigma_c = 1.0286$$

$$\sigma_{c1} = 68.5 \times 4 \times 1.15 \times 1/1.0286 = 30.4 \text{ kg/cm}^2$$

σ_1 だけ考慮した場合

$$\sigma_{c1} = 68.5 \times 5 = 342.5 \text{ kg/cm}^2$$

以上計算した結果、組合せ応力による修正圧縮強度は配合強度(σ_c)を下まわり、設計強度を低く定めうることに安全といえる。

7. 結 論

- 1) 構造模型実験により真名川ダムの施工形状に対し、設計計算による応力分布を検証した。その結果は設計時に推定したとおり大きな問題はない。
- 2) 第6章6項より真名川ダムのコンクリートの強度は、 340 kg/cm^2 を目標とすることが望ましい。
- 3) 下流面下部標高アパットメントの引張応力については、特に良質のコンクリートを打設し養生、クーリングを充分に行う。
- 4) 下流面下部標高アーチクラウンの引張応力については大きな問題はないと思われるが、慎重に施工することが望ましい。

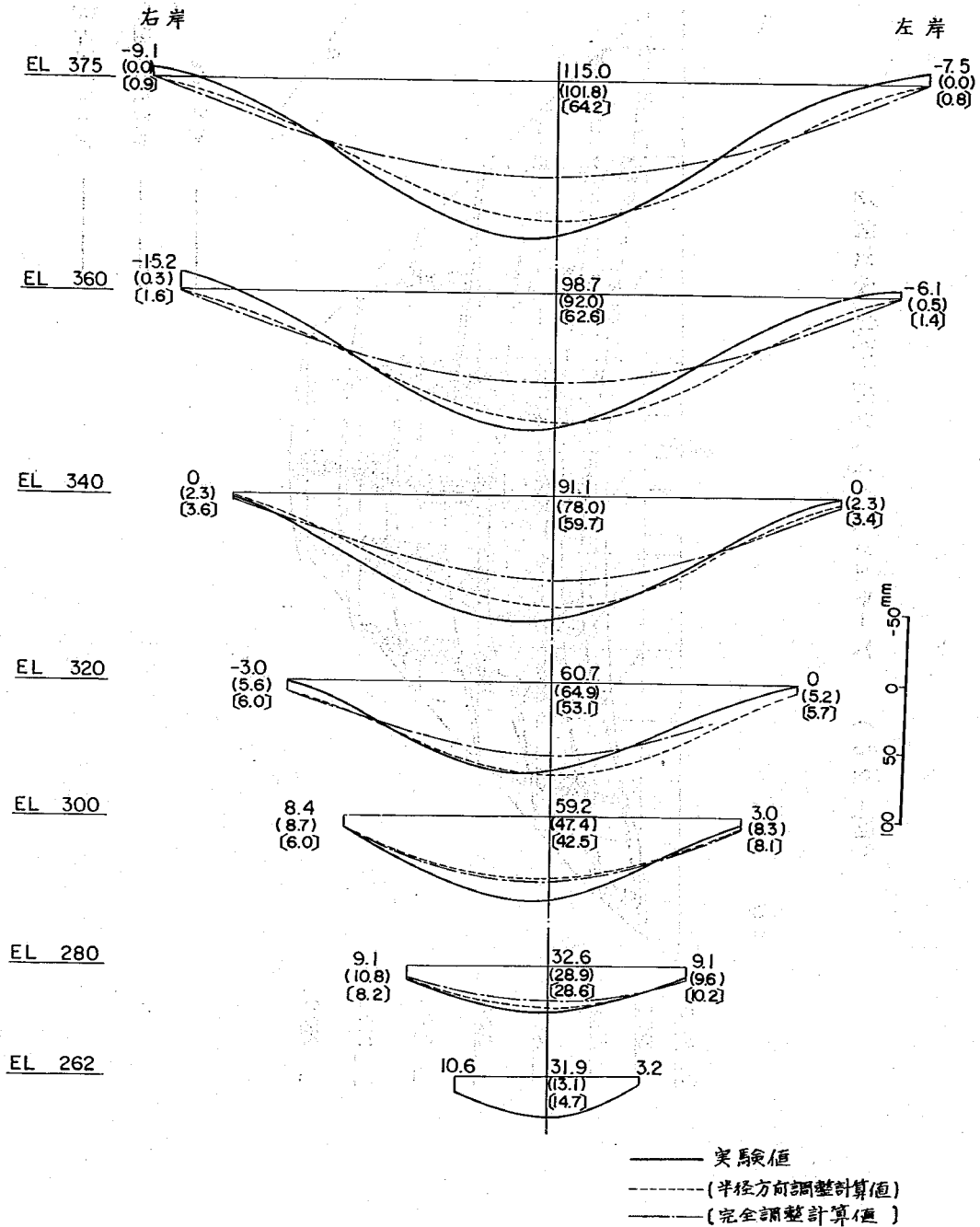
参 考 文 献

- | | | |
|------------|-------|----------------------------|
| 土木研究所資料 | № 559 | 「真名川アーチダムの構造設計」 |
| 〃 | № 609 | 「アーチダム構造設計と模型実験の関連」 |
| 建設省土木研究所報告 | 100号 | 「組合せ応力状態におけるコンクリートの強度について」 |
| 日本大ダム会議 | | 「ダム設計基準」 1969年11月 |

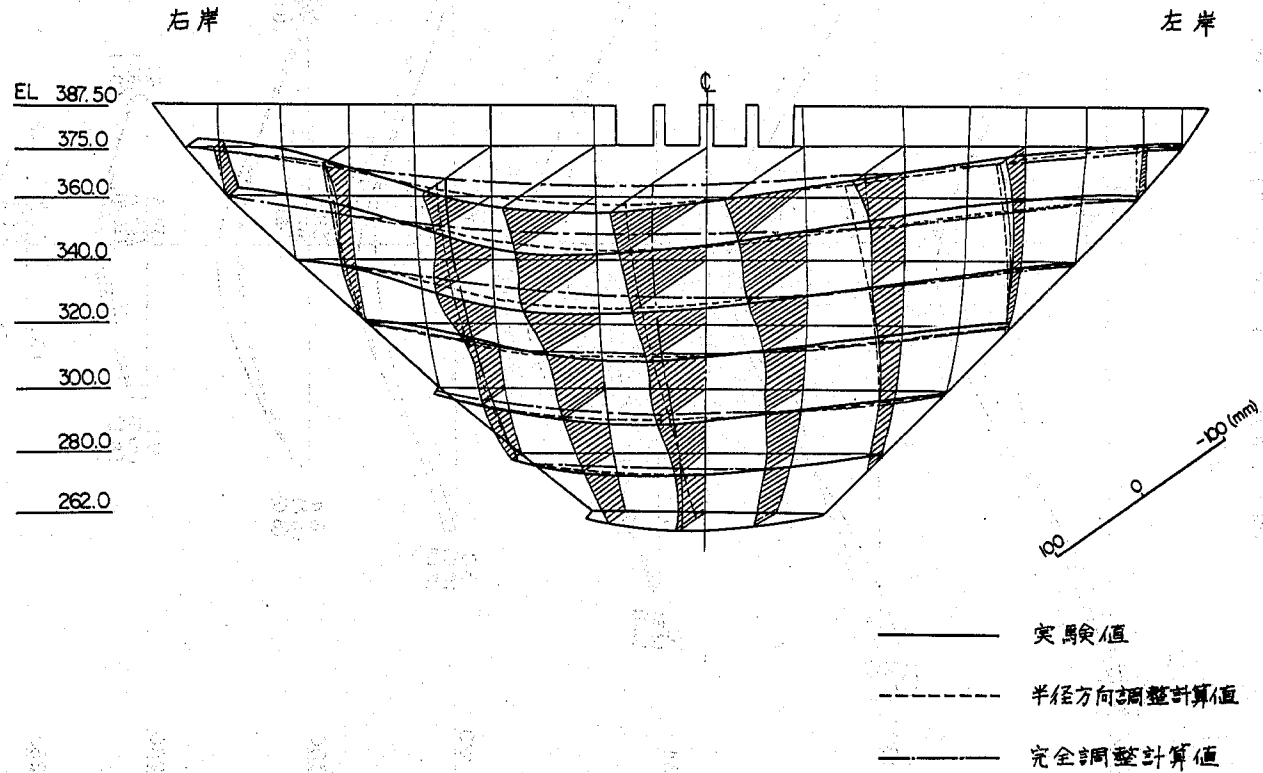
図 面 目 次 with coudint

図 2 5	半径方向撓み曲	4 9
2 6	アーチエレメント, 半径方向たわみ比較図	5 0
2 7	主応力図 上流面 (自重なし)	5 1
2 8	" 下流面 (")	5 2
2 9	" 上流面 (自重加算)	5 3
3 0	" 下流面 (")	5 4
3 1	水平応力 上流面	5 5
3 2	" 下流面	5 6
3 3	鉛直応力 上流面 (自重なし)	5 7
3 4	" 下流面 (")	5 8
3 5	" 上流面 (自重加算)	5 9
3 6	" 下流面 (")	6 0
3 7	剪断応力 上流面	6 1
3 8	" 下流面	6 2
3 9	アーチスラスト	6 3
4 0	アーチモーメント	6 4
4 1	カンティレバーモーメント	6 5
4 2	パーティカルモーメント	6 6
4 3	タンゼンシャルシャー	6 7
4 4	ねじれモーメント	6 8
4 5	水平応力比較図 上流面	6 9
4 6	" 下流面	7 0
4 7	鉛直方向応力比較図 上流面	7 1
4 8	" 下流面	7 2
4 9	主応力図上流面完全調整計算値	7 3
5 0	" 下流面完全調整計算値	7 4
5 1	アーチスラスト比較図	7 5
5 2	アーチモーメント比較図	7 6

(図-25) 半径方向撓み図



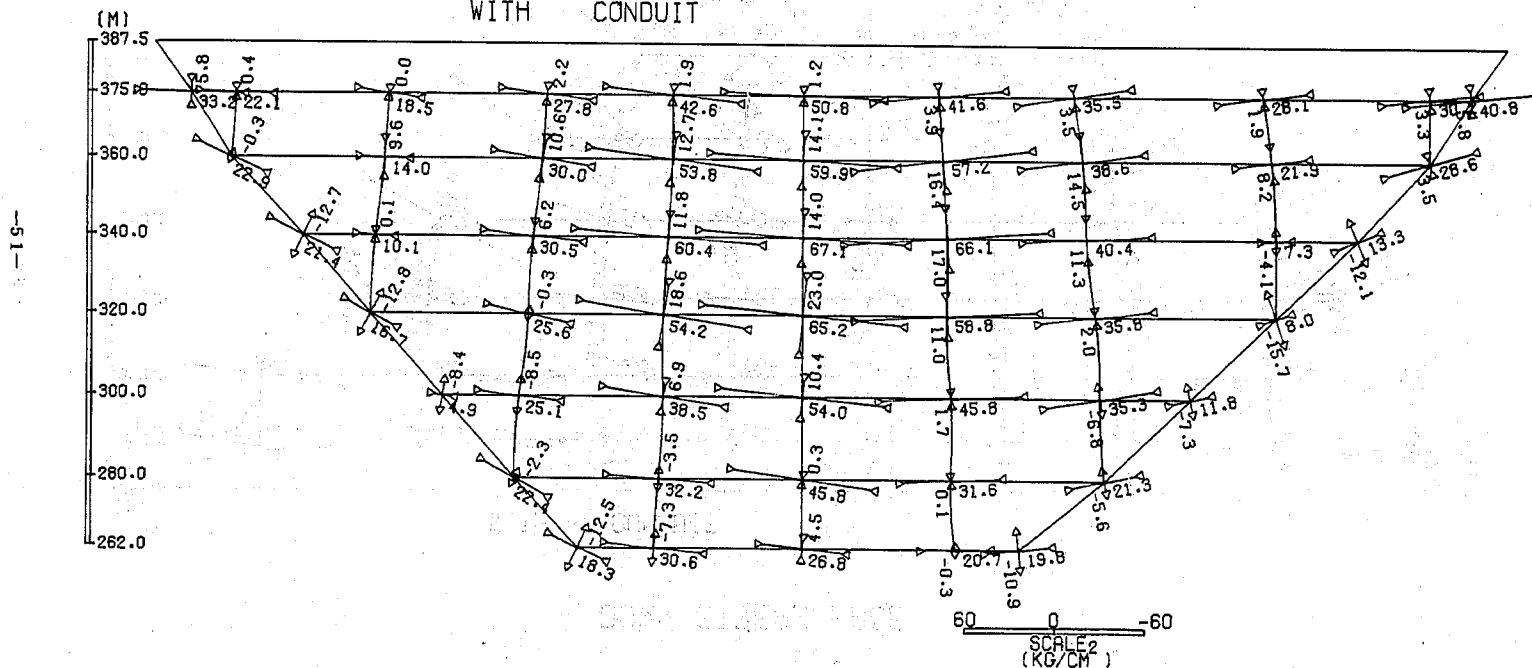
(図-26) アーチエレメント, 半径方向撓み比較図



(☒-27) PRINCIPAL STRESSES

UP STREAM FACE

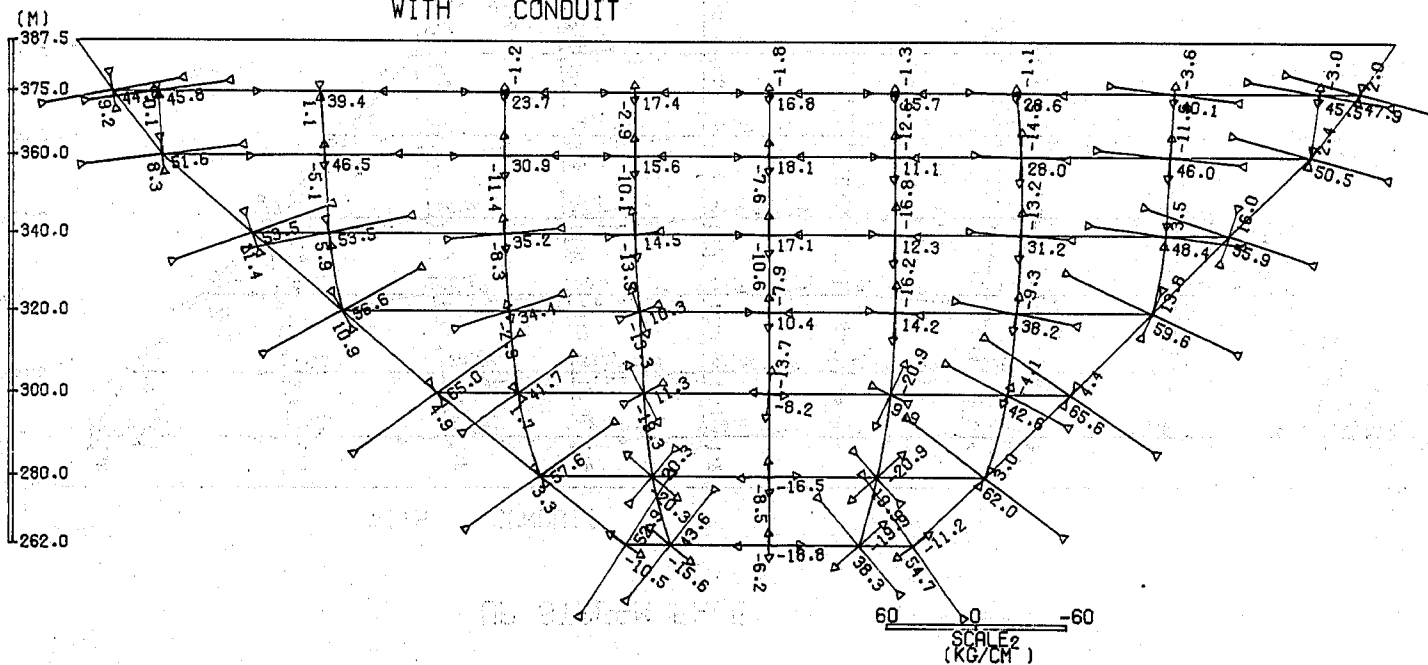
WITH CONDUIT



(图-28) PRINCIPAL STRESSES

DOWN STREAM FACE

WITH CONDUIT

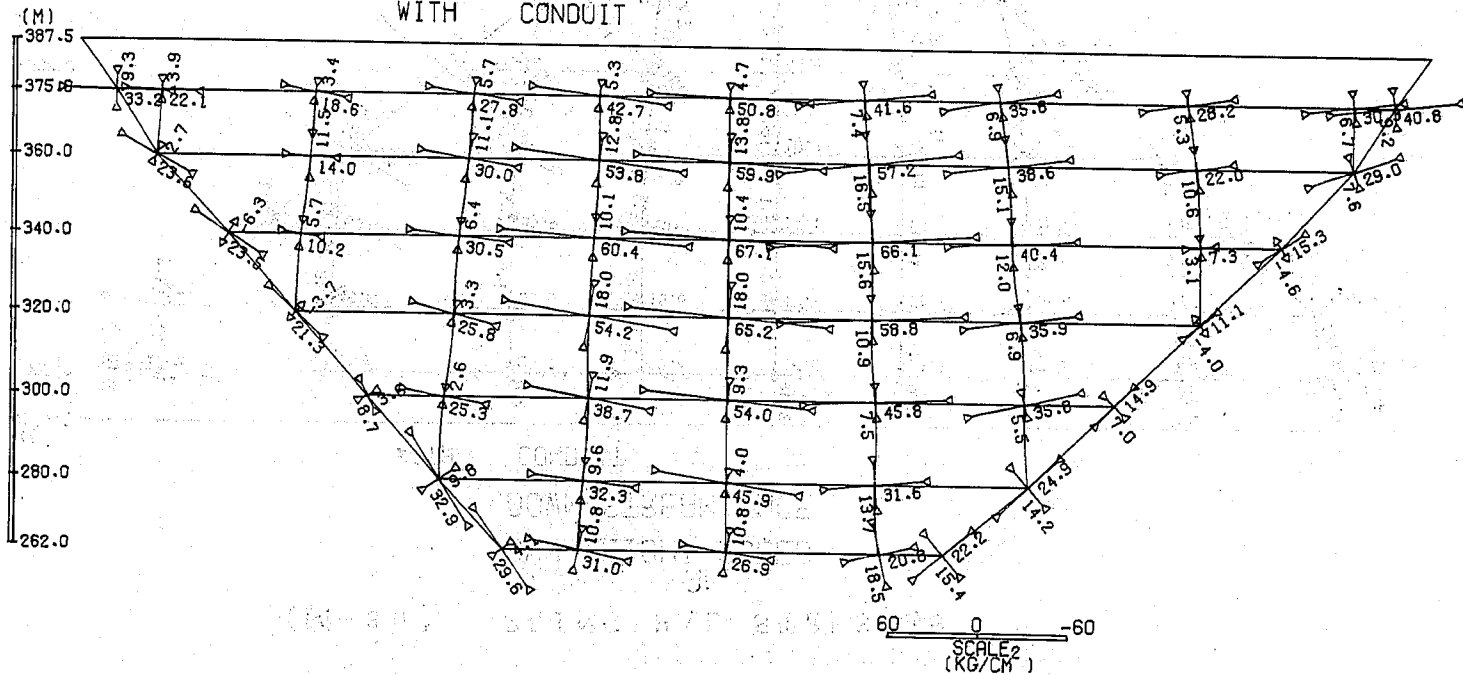


(图-29) PRINCIPAL STRESSES

OWN WEIGHT ADDED
UP STREAM FACE

WITH CONDUIT

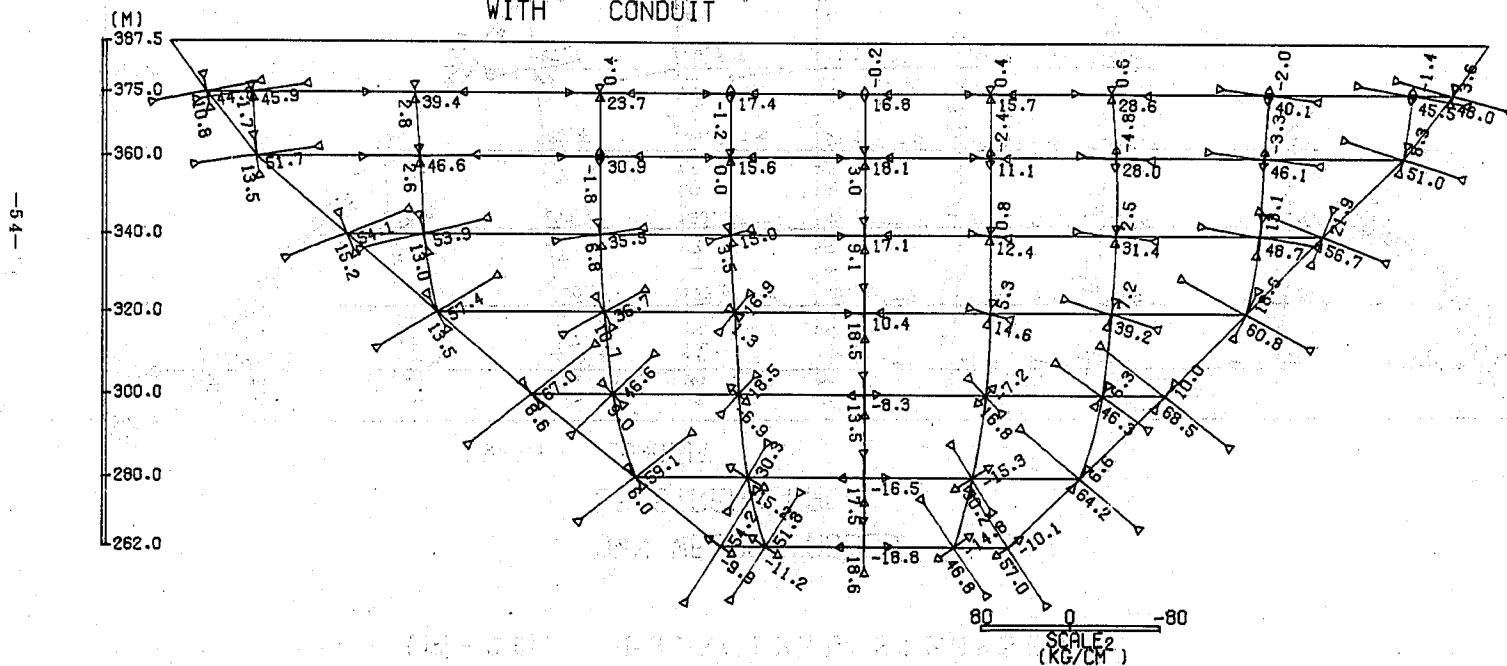
-53-



(图-30) PRINCIPAL STRESSES

OWN WEIGHT ADDED
DOWN STREAM FACE

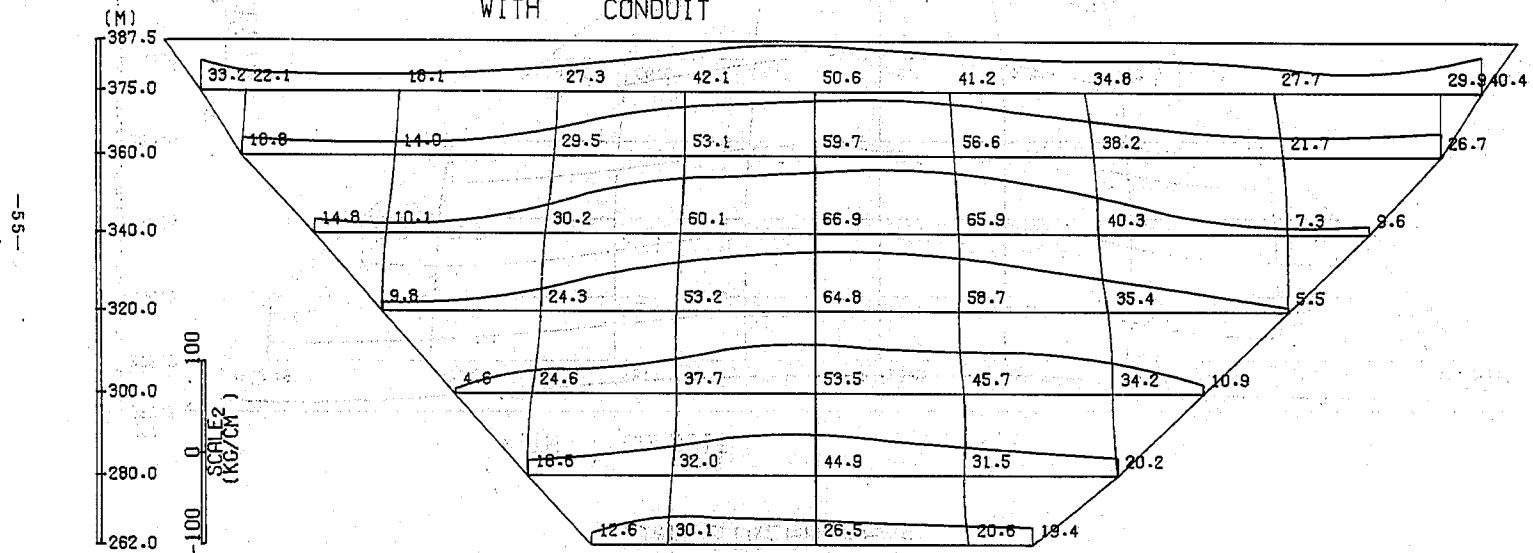
WITH CONDUIT



(图-31) HORIZONTAL STRESSES

UP STREAM FACE

WITH CONDUIT

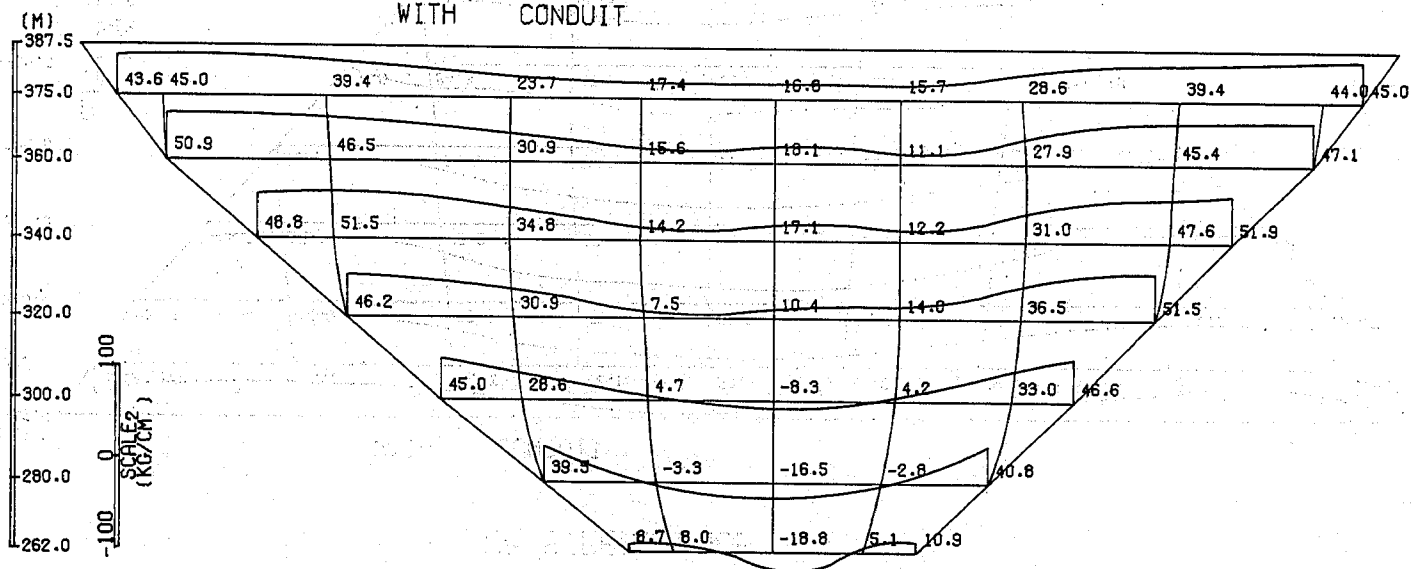


(图-32) HORIZONTAL STRESSES

(图-32) HORIZONTAL STRESSES

DOWN-STREAM FACE

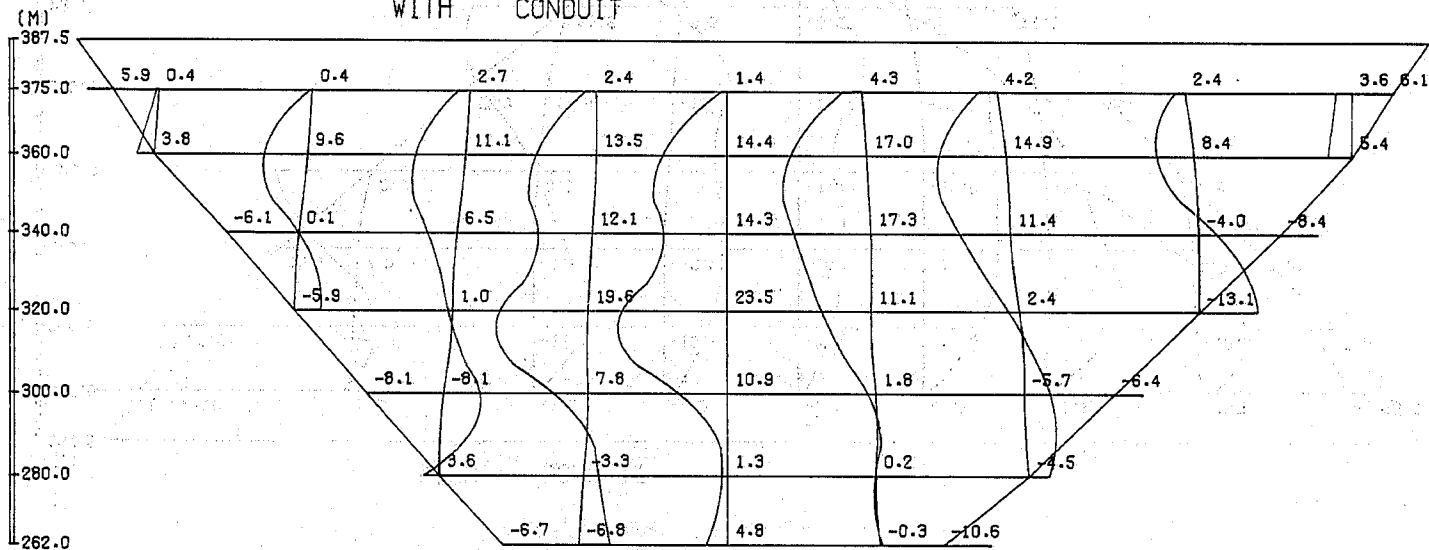
WITH CONDUIT



(图-33) VERTICAL STRESSES

UP STREAM FACE

WITH CONDUIT

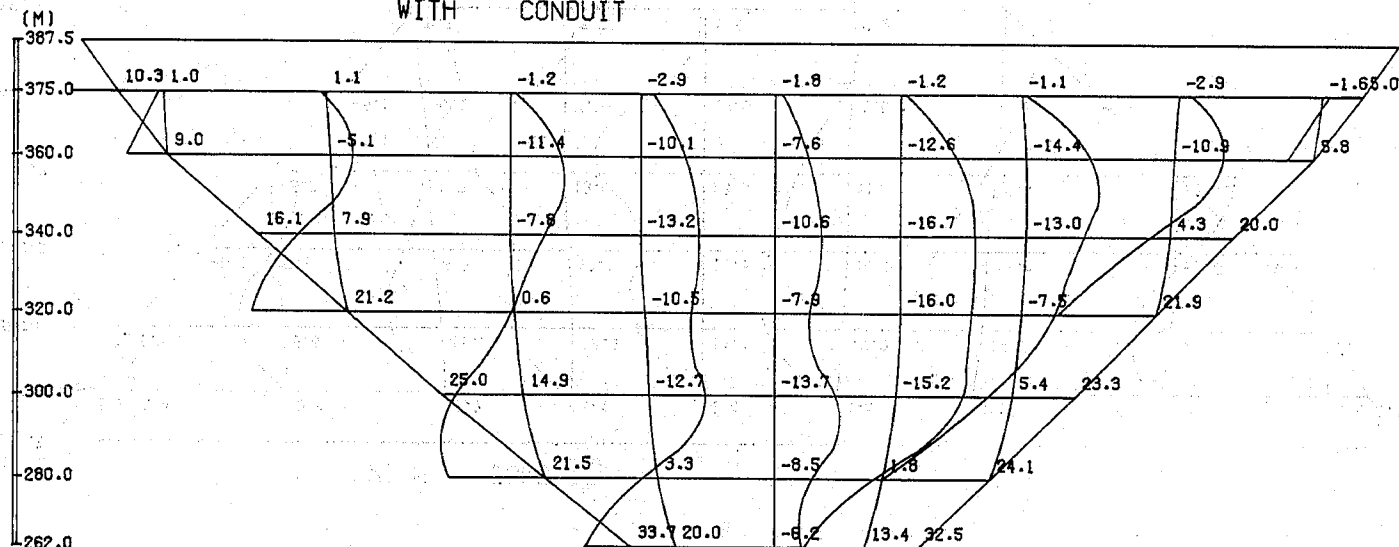


20 0 -20
SCALE₂
(KG/CM²)

(☒-34) VERTICAL STRESSES

DOWN STREAM FACE

WITH CONDUIT

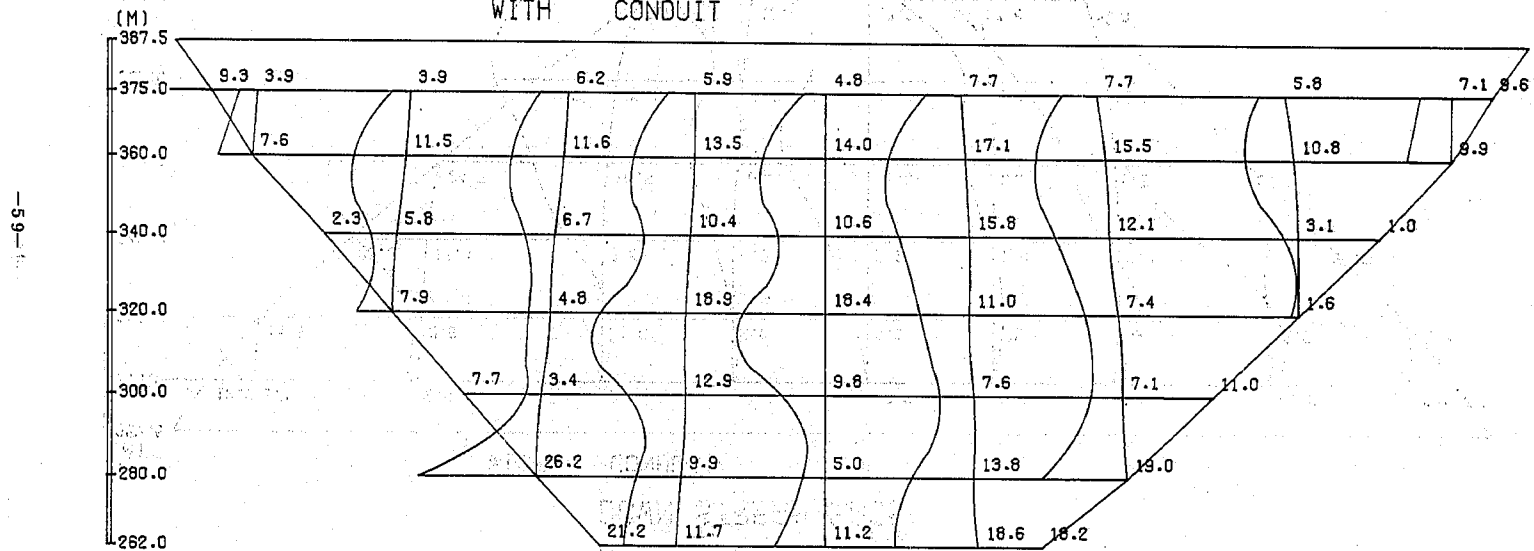


20 0 -20
SCALE
(KG/CM²)

(☒-35) VERTICAL STRESSES

OWN WEIGHT ADDED
UP STREAM FACE

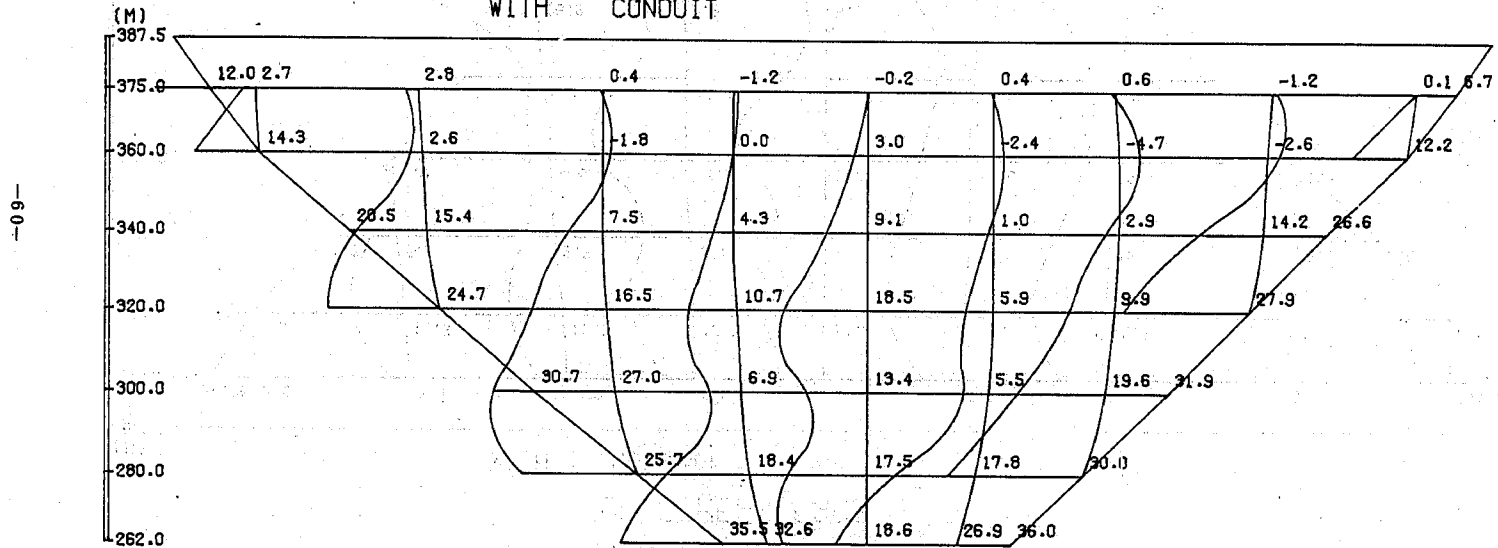
WITH CONDUIT



(图-36) VERTICAL STRESSES

OWN WEIGHT ADDED
DOWN STREAM FACE

WITH CONDUIT



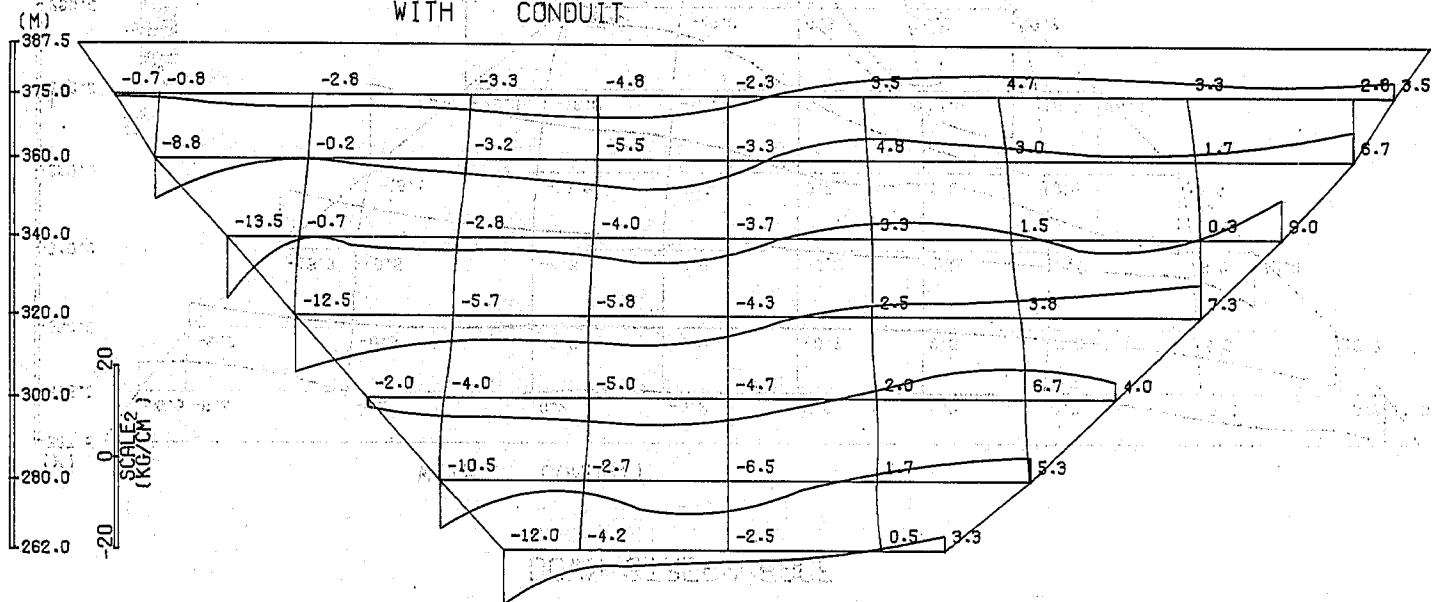
20 0 -20
SCALE 2
(KG/CM)

(图-37) SHEARING STRESSES

UP STREAM FACE

WITH CONDUIT

-19-

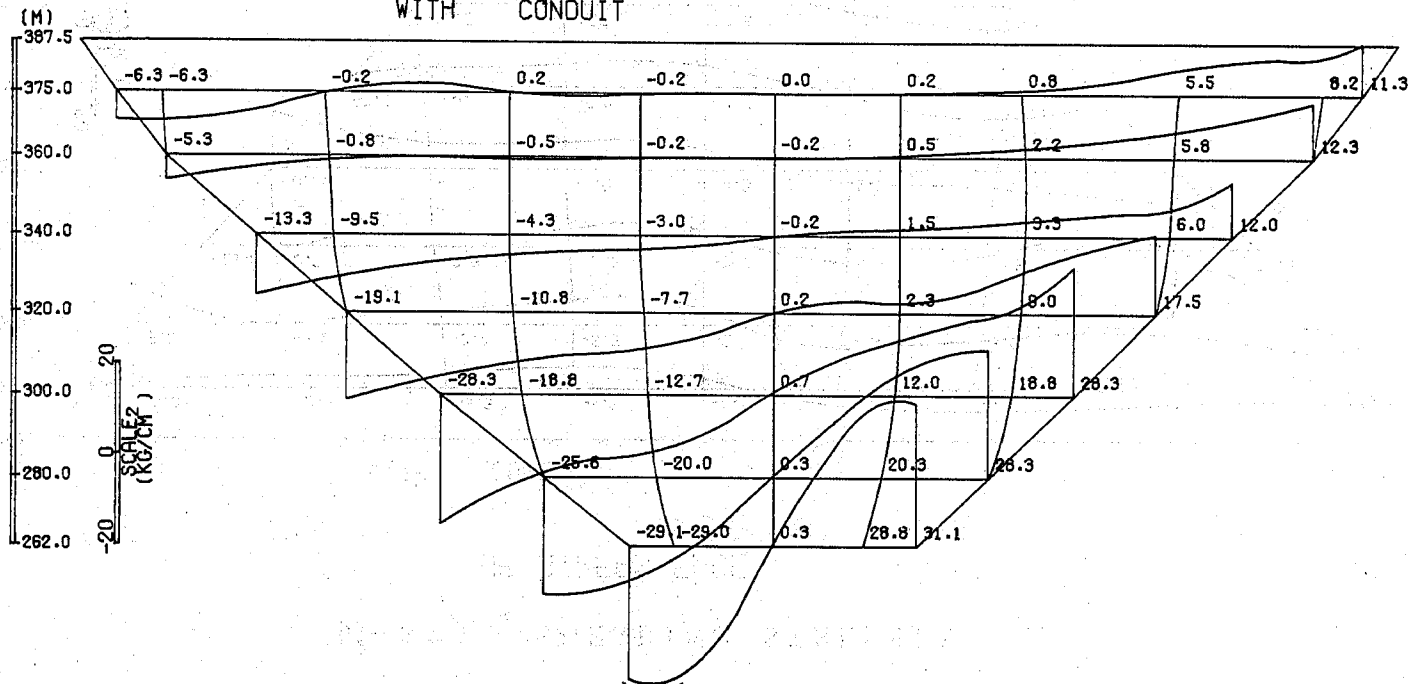


(图-38) SHEARING STRESSES

(图-38) SHEARING STRESSES

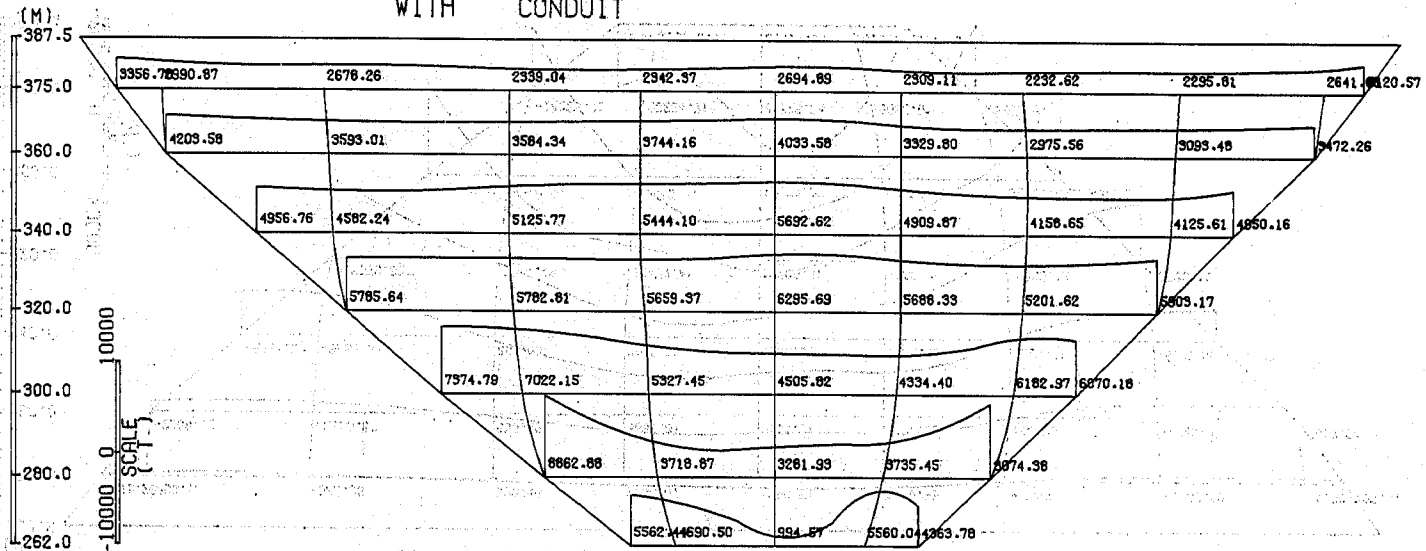
DOWN STREAM FACE

WITH CONDUIT



(圖-39) ARCH THRUST

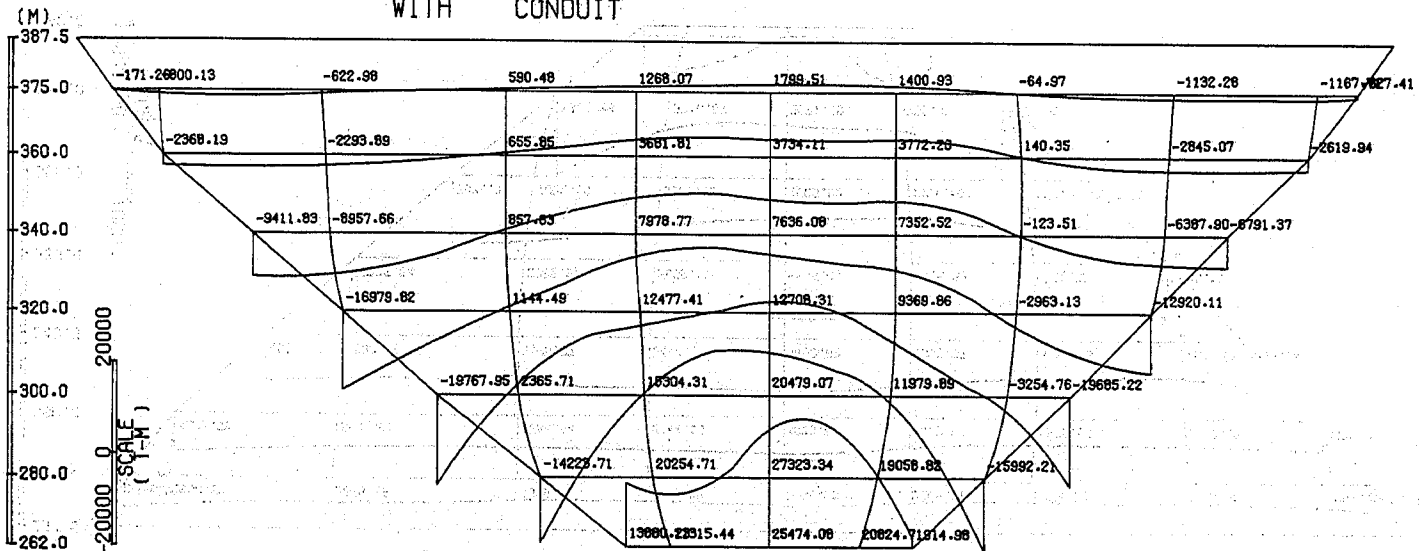
WITH CONDUIT



(☒-40) ARCH MOMENT

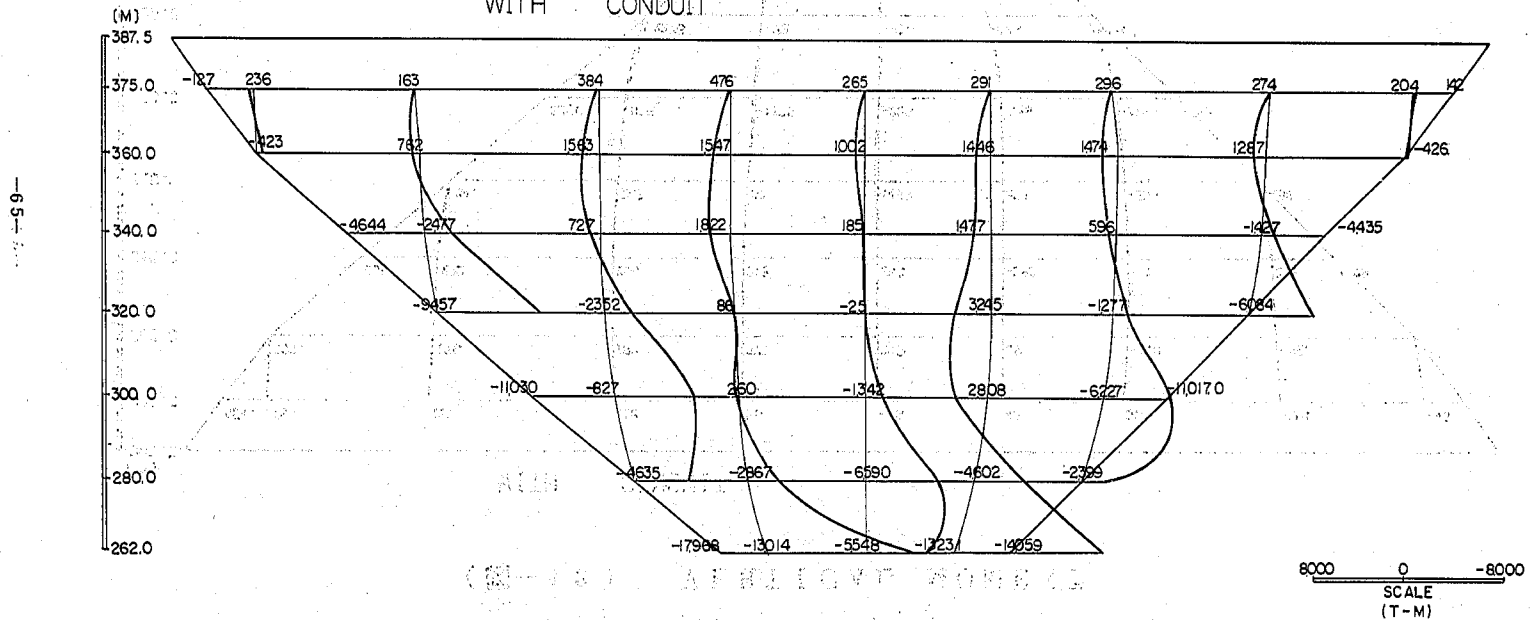
WITH CONDUIT

-64-



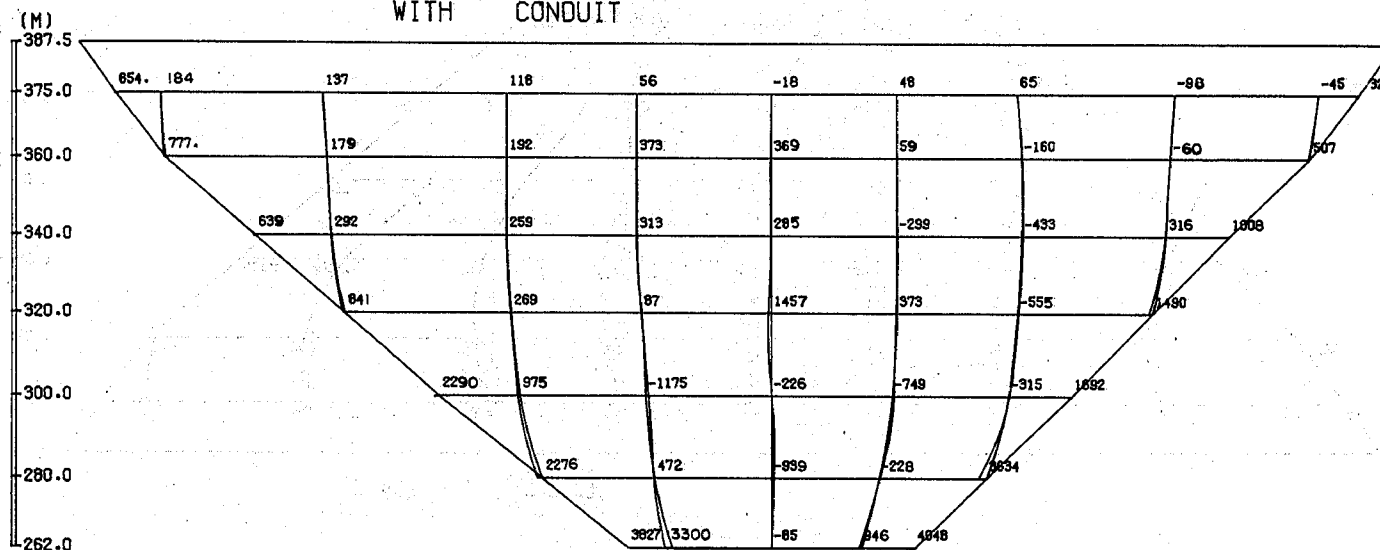
(图-41) CANTILEVER MOMENT

WITH CONDUIT



(☒-42) VERTICAL MOMENT

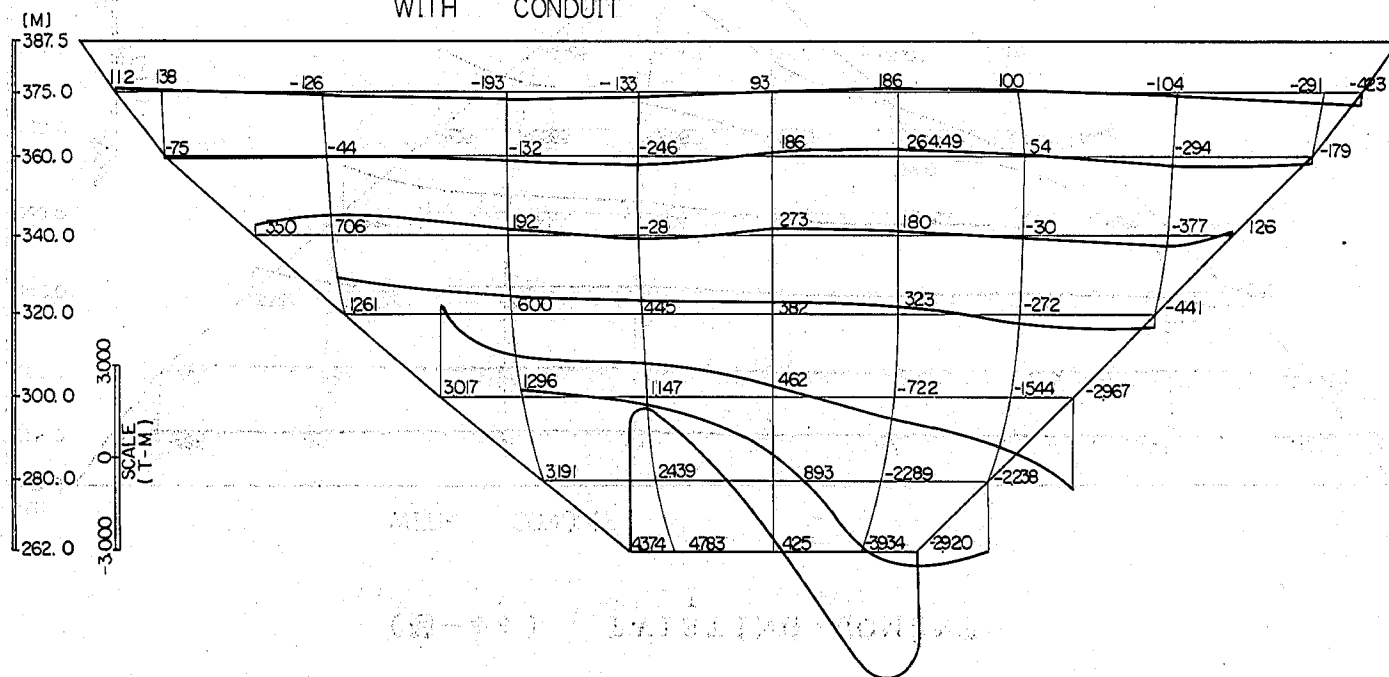
WITH CONDUIT



40000 0 -40000
SCALE

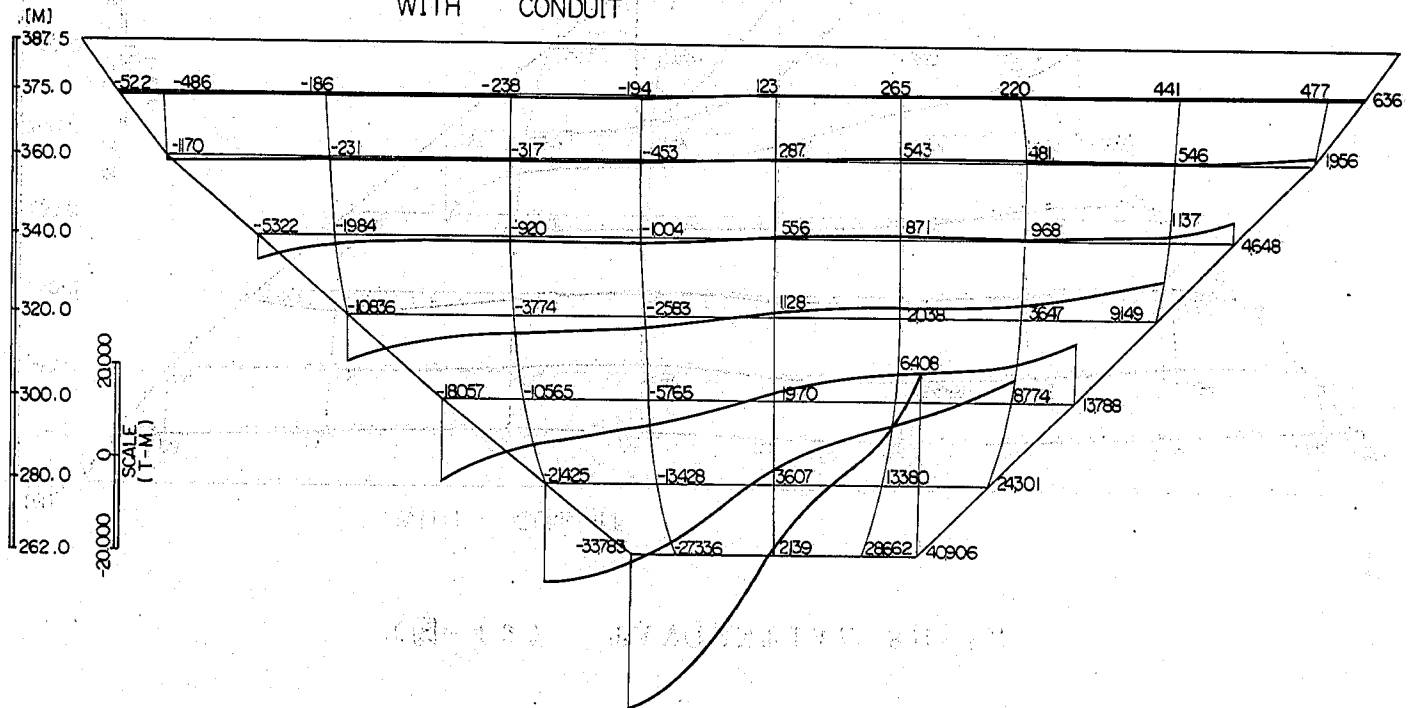
(图-43) TANGENTIAL SHEAR

WITH CONDUIT

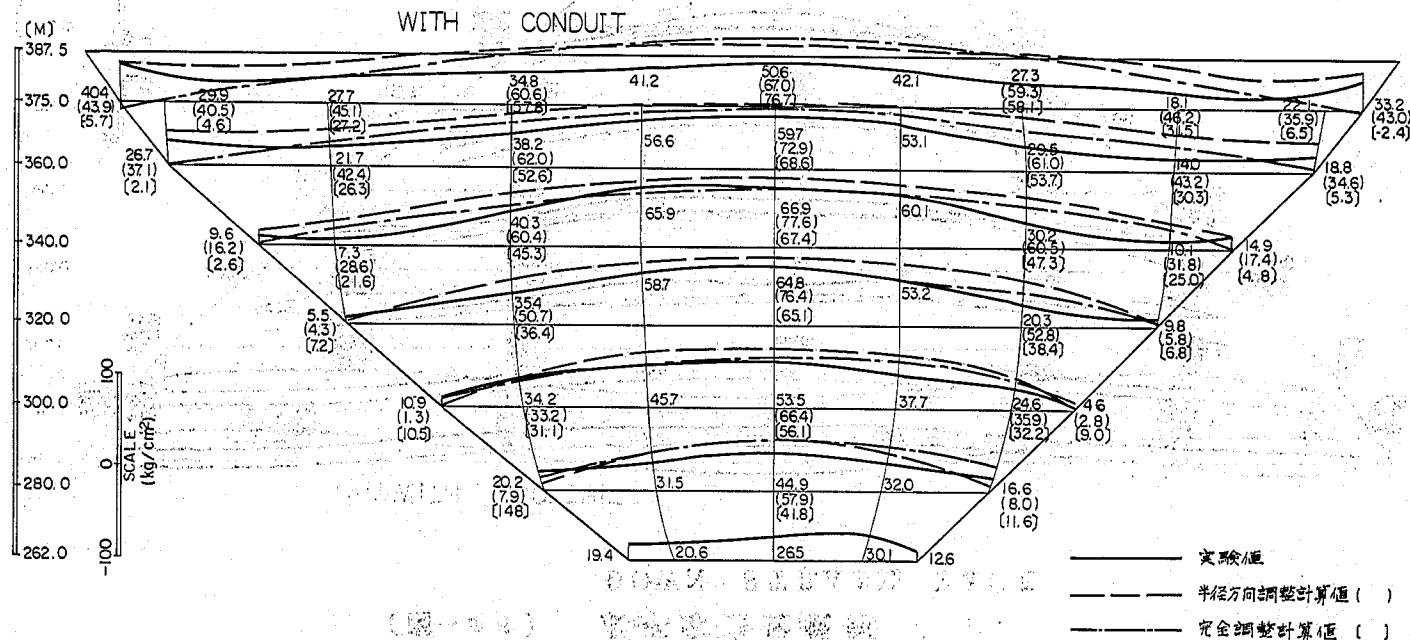


(圖-44) TWISTING MOMENT

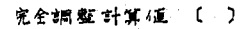
WITH CONDUIT



(圖-45) 水平応力比較図
UP STREAM FACE

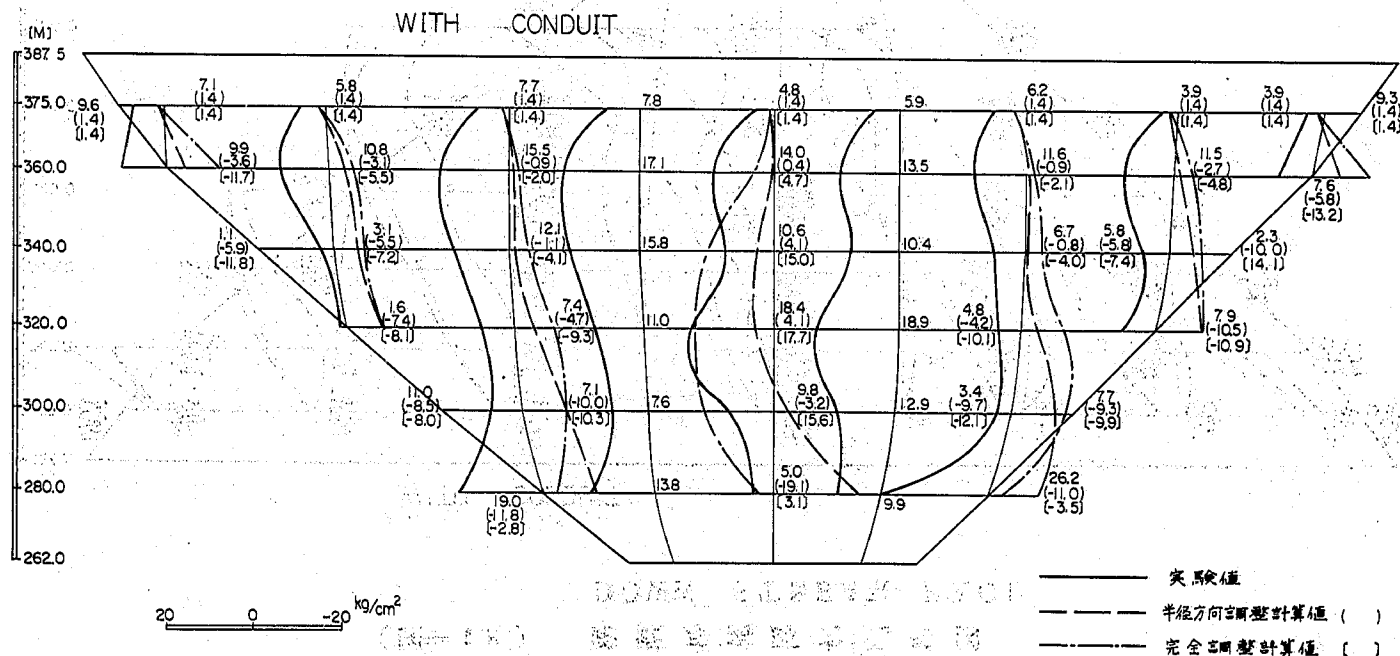


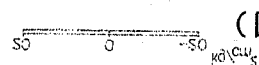
DOWN STRAAM FACE



(圖-47) 鉛直方向応力比較図

UP STREAM FACE

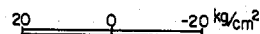
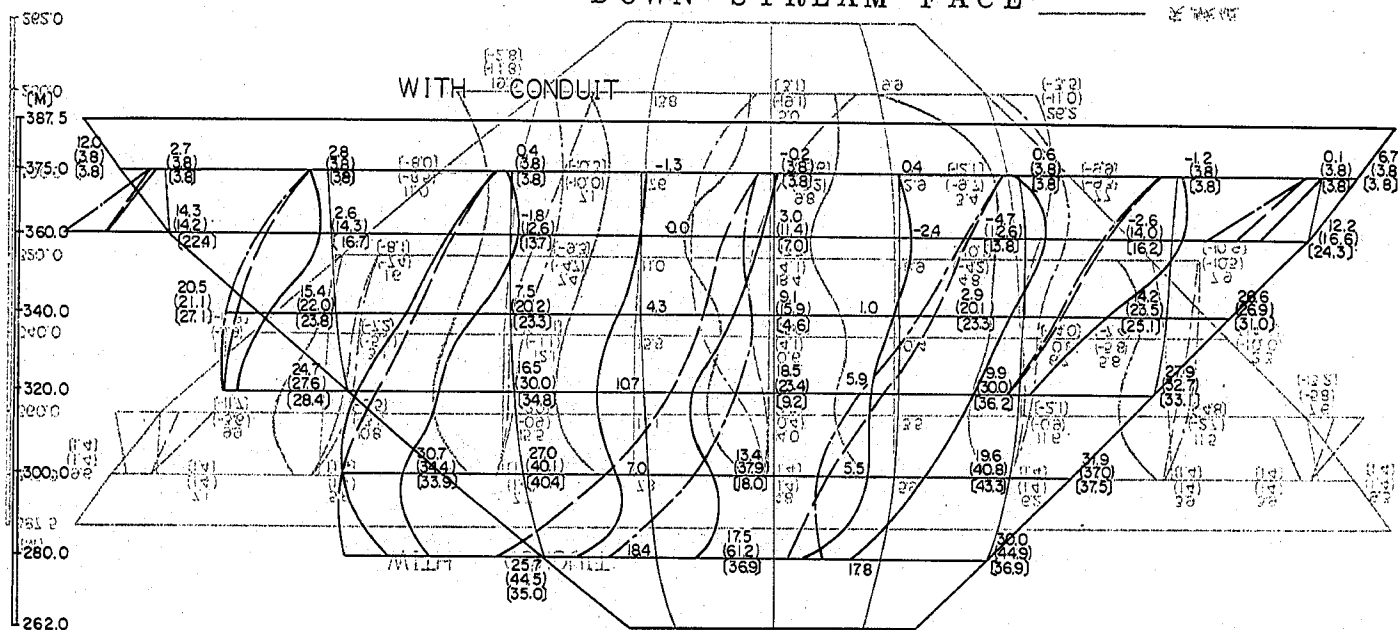




(圖-4.8) 鉛直方向応力比較図

DOWN STREAM FACE

----- 鉛直方向調整計算値 ()
 ----- 完全調整計算値 ()
 ----- 実験値



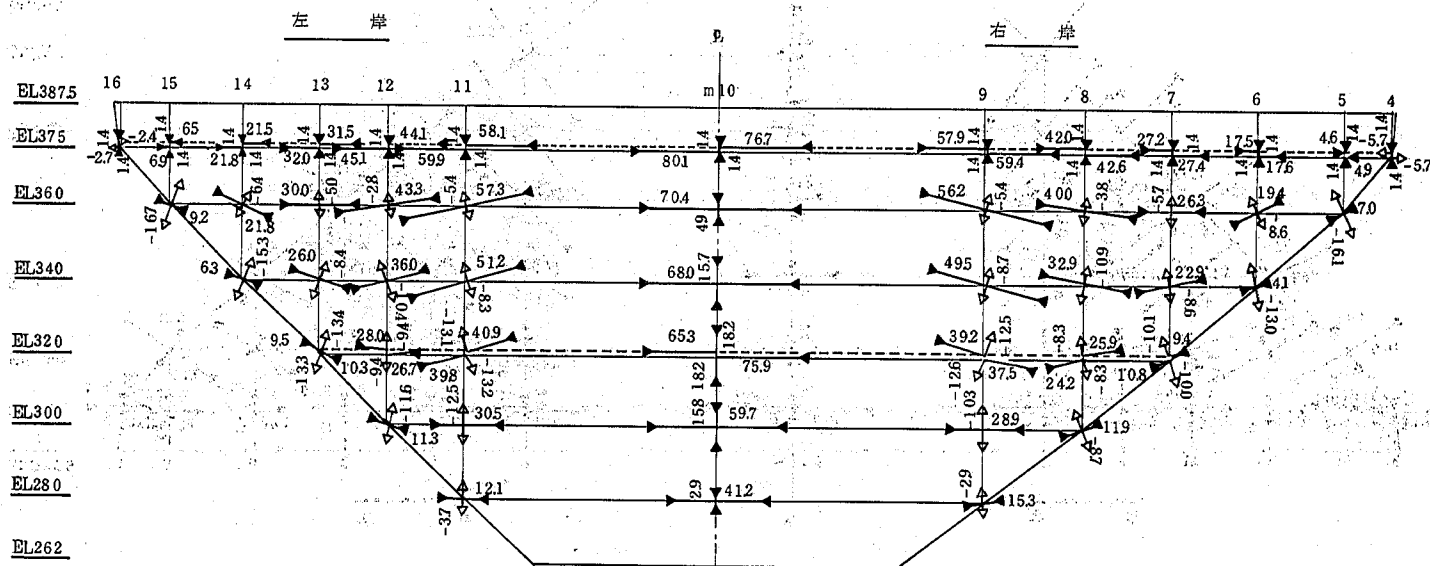
(圖-4.9) 鉛直方向応力比較図

UP STREAM FACE

----- 実験値
 ----- 半径方向調整計算値 ()
 ----- 完全調整計算値 ()

(図-49) 真名川ダム完全調整計算による上流面主応力 (WL=386m)

($k=0.0$, $T=0.0$)



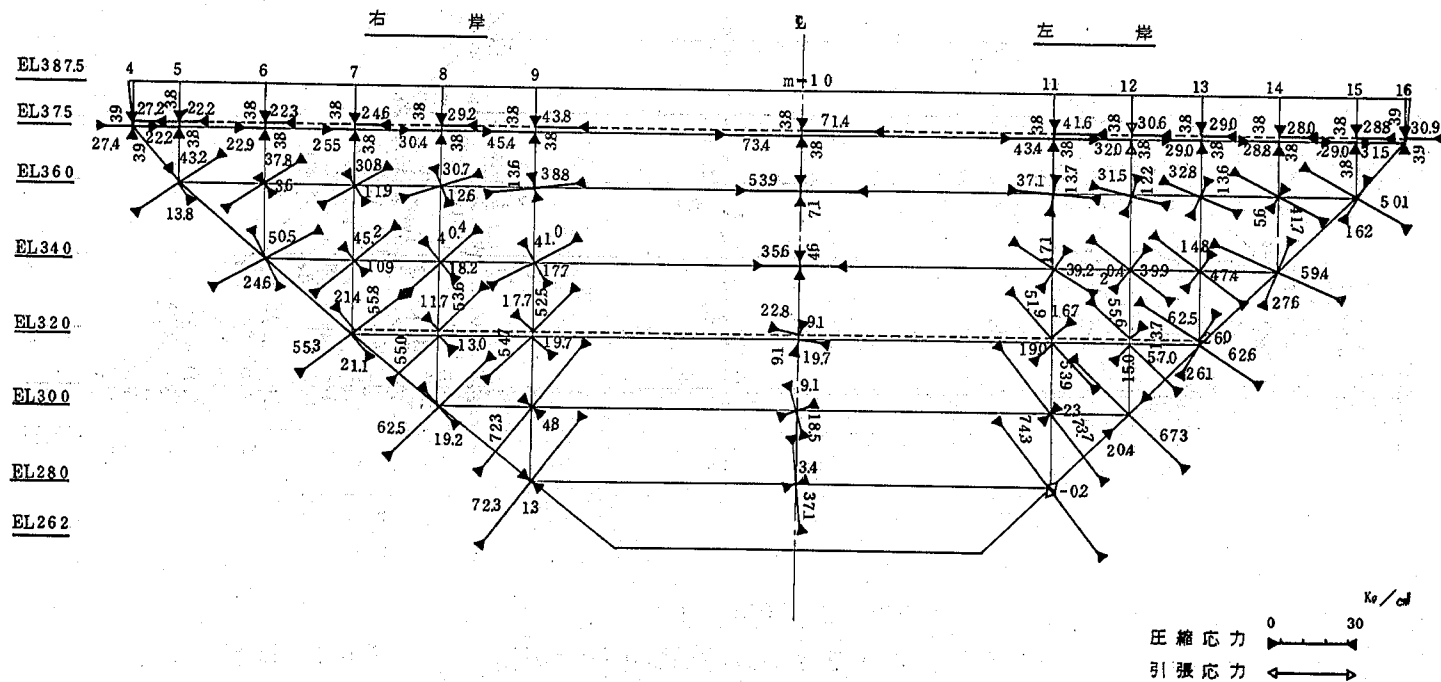
0 30 kg/cm^2

圧縮応力

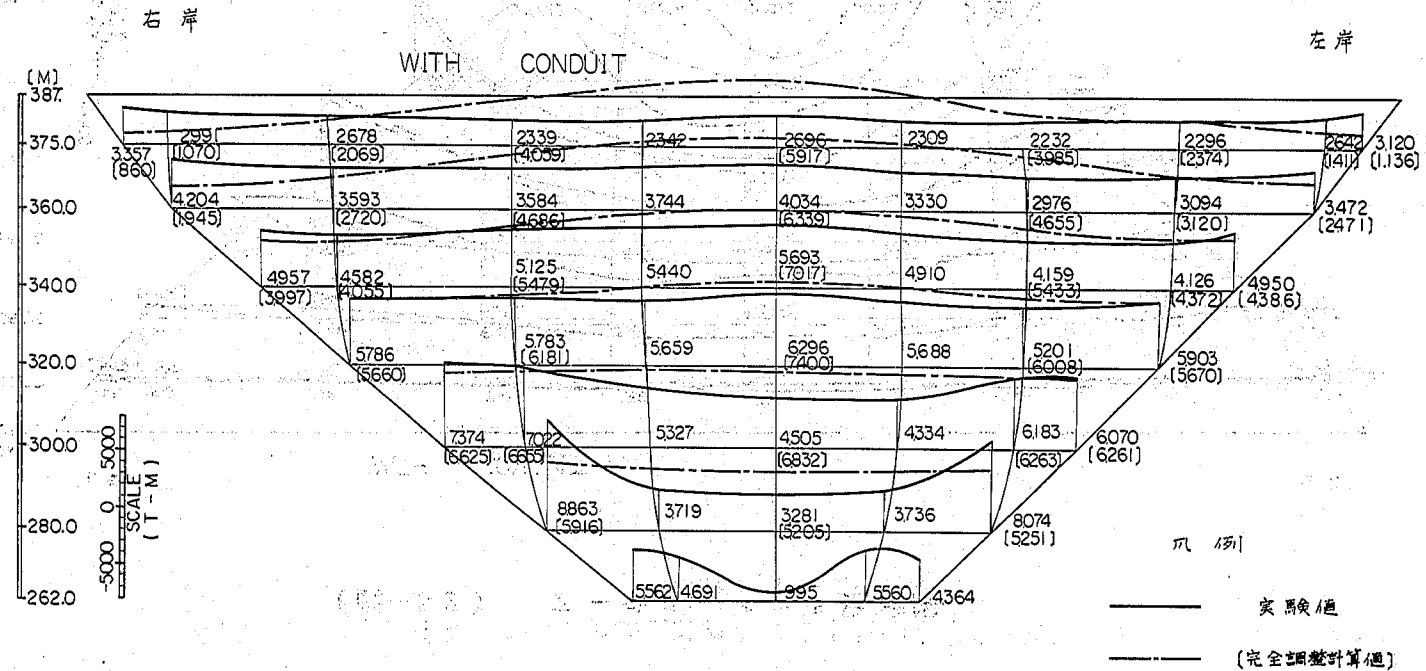
引張応力

(図-50) 真名川ダム完全調整計算による下流面主応力 (WL=386m)

($k=0.0$, $T=0.0$)



(図-51) アーチスラスト比較図



(図-52) アーチモーメント比較図

