

黒部川第四ダムの基盤内の排水設備について

野 瀬 正 儀^{*}

1. まえがき

ダム地点の地形並びに地質条件は、水力の開発段階が進行するにつれて困難化し、ダムの安全性に対する基礎岩盤の占める割合は、次第にその比重を増して来ている。

黒四ダムにおいても、ダムの安全性は、直接基礎岩盤の強さに依存していると考えられ、取分けその抵抗力は、浸透流の分布状態によつて大きく左右されるので、基盤内の透水並びに排水設備の問題を、極めて重要視している。

しかしながら、現実にはその規模、配置等の具体的な問題に関して、吾々の利用し得る定量的な資料に極めて乏しい現状なので、この兩者について電気相似法 (electrical analogy) にもとづく実験的な方法による研究を行つた。本文では、この実験の概要と、結果については後者の排水設備に関する問題のみを取りあげて記述する。

2 基本的な仮定並びに電気相似法の原理

この種の問題に対する電気相似法の応用は、今日では全く確立されている。しかしながら、自由水面、即ち浸潤面が存在する3次元模型による実験例は、模型自体の複雑性並びに3次元浸潤面の形成が非常に困難なために、その前例がないと同時に、岩盤に対する斯様な取扱いも、全く初めての新しい試みである。

本実験では、電媒質に寒天を用いることによつてこの問題を解決し、下記の基本的な仮定に立脚して実施した。

基本的な仮定

A). 岩盤内の浸透水は、ダルシーの法則に従うものと仮定する。

B). 岩盤の透水に対する性質は、巨視的に見て、与えられた限界内において等方等質なものとして仮定する。

^{*} 関西電力 K・K・取締役兼同社黒部川第四水力発電所建設事務所長

電気相似法という言葉は、ダルシーの法則に従う浸透流と、オームの法則に従う電流との間に、基本的な数式 (Laplace's equation) の類似性があることを指しているものであつて、その類似性は次の2式を直接比較しても容易に了解することができる。

いま、浸透水の流量を q 、透水係数を k 、断面積を a 、動水勾配を i とすると、ダルシーの法則は

$$q = k \cdot a \cdot i = k \cdot a \cdot h / L \text{----- (1)}$$

他方、電流を I 、電位差を E 、抵抗を R とすると、オームの法則は、

$$I = E / R = K \cdot A \cdot E / L \text{----- (2)}$$

$$\text{ここへ } R = L / K \cdot A$$

となる故、両式は相似である。

よつて

$$KE / I = k \cdot h / q$$

$$\therefore q = I \cdot k \cdot h / K \cdot E \text{----- (3)}$$

従つて、原型における浸透量 Q は、模型の縮尺を $1:n$ とすると、

$$Q = I \cdot k \cdot h \cdot n^2 / K \cdot E \text{----- (4)}$$

となる。

ここに、 K は模型に用いた電媒質の比伝導度であり、 k は原型の透水係数である。

3 実験装置

Fig - 1 に、その電氣的構成図を示す。ポテンシャル源として、可聴周波数発振器と、増巾器を用いた。これは電極の分極作用をできるだけ少くするためと、より高い測定精度を得るためである。

模型上の全ての極を夫々必要なポテンシャルにセットしたり、模型の中の等ポテンシャル線を追跡したりするために、ホイートストーン・ブリッジを用いる。或る電圧の等ポテンシャル線を追跡したい場合には、先ずホイートストーン・ブリッジ・レジスタンス上の所定の位置に、タップをセットする。そして、プローブを模型の中で動かし、スピーカから音が出ない点を求めて追跡する。所定の等ポテンシャル線からプローブが外れると、模型の中を流れている電流が出力側の増巾器に流れ込み、スピーカから音を発生する。逆にプローブを固定し、タップを移動させて、ホイートストーン・ブリッジ・レジスタンス上の音の出ない点

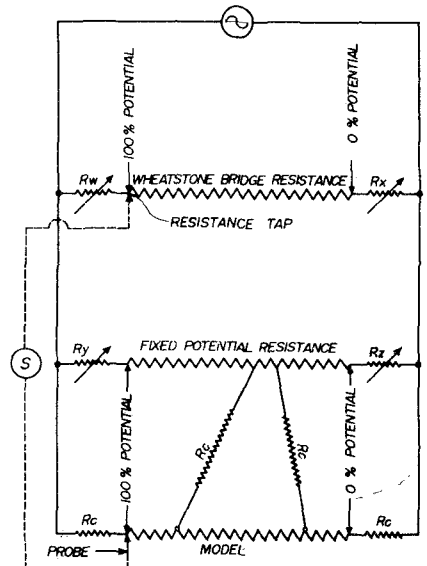


FIG-1 DIAGRAM OF ELECTRICAL SET-UP

を求めることによつて、模型の中の任意の点のポテンシャルを測定することができる。

電流の測定には、普通の交流電流計を使用した。この電流計は、高い周波数を持つ電流を正確に読み取ることができない。このため、模型の電流を測る場合には、スイッチを切り換えて、変圧器を通した60サイクルの電流を模型に流す様にした。図中に R_c と書かれた抵抗は、電流計の A.C. インピーダンスと等しい値を持つ固定抵抗である。この固定抵抗は、電流を測る必要がある箇所に予め挿入しておく。そして、電流を測る時に電流計と入れ換えて、常に回路全体の抵抗値を一定に保つ様にした。

Photo - 1 に、測定装置の全景を示す。右側の測定盤は、上述の電流測定のために必要な固定抵抗 R_c を、100回線内蔵している。ロータリー・スイッチを切り換えることによつて、所要の回路の電流を順次読みとることができる。

Fig - 2 に、3次元模型の見取図を示す。模型は、硬質塩化ビニール板で作つた容器に納められ、左右岸

別々に作製された。これは上下流方向には、原型にて500mに相当する範囲、それに直交する方向には、本来の地下水流の影響を取り入れるために必要とする範囲（右岸～1,750m、左岸～1,164m）、そして鉛直方向には、最深部において、満水位より下

方々78mに相当する範囲をとり入れた幾何学的に相似な、縮尺 1:1000 の模型である。

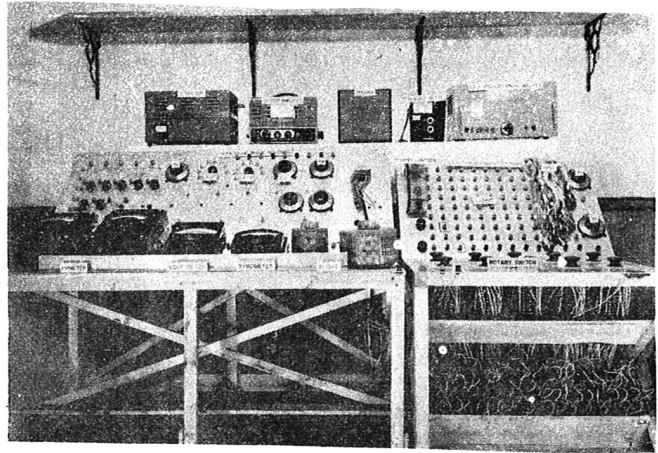


PHOTO - 1 MEASURING EQUIPMENT

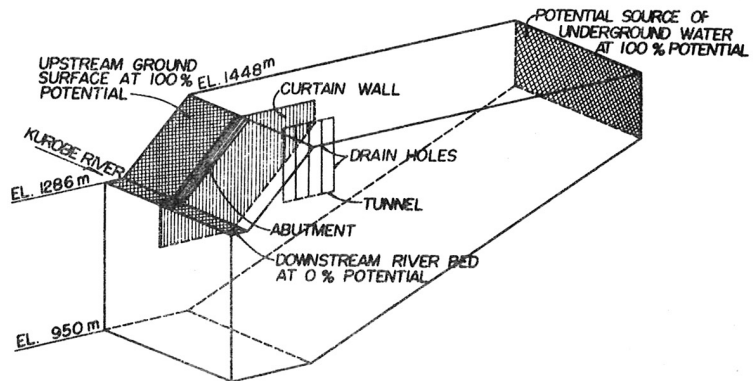


FIG-2 SKETCH OF THREE-DIMENSIONAL MODEL

模型の電媒質には、食塩水に溶解して凝固させた寒天を用いた。その比伝導度 K は、食塩量を加減

することによつて適宜調整することが可能であり、ルジオン・テストの結果から得られた原型の透水係数 k の比に応じて、上中下3段階に区分した。Table - 1 にその値を示す。

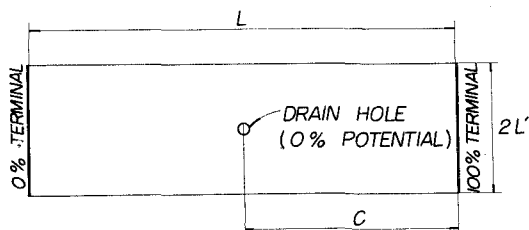
TABLE - 1

E L. (m)	k (cm/sec)	K ($1/\Omega \cdot \text{cm}$)
1448 - 1300	4.5×10^{-5}	3.50×10^{-3}
1300 - 1150	3.0×10^{-5}	2.33×10^{-3}
1150 - 950	1.5×10^{-5}	1.17×10^{-3}

4 2次元模型による予備的研究

3次元模型による本格的な実験に先立つて、
アイデアルな2次元模型による予備実験を行った。

Fig - 3 にその模型を示す。絶縁物で作つた容器の中に食塩水を入れ、極板として銅板、ドレーンホールとして白金線を使用した。



r ; RADIUS OF DRAIN HOLE

FIG - 3

尚、この結果は、後日理論解^{*}によつて確かめられ、更に一般的に表示するために、現在検討中である。

A 1. ドレーン・ホールの直径と間隔

Fig - 4 に、直径56 mmと75 mmのドレーンホールが、両極の中央に夫々1、2、3、4、6、12、20本づつ流れに直交して配列された場合の結果を図示する。縦軸に、ドレーン・ホールの本数及びそれに対応する間隔をとり、横軸には流

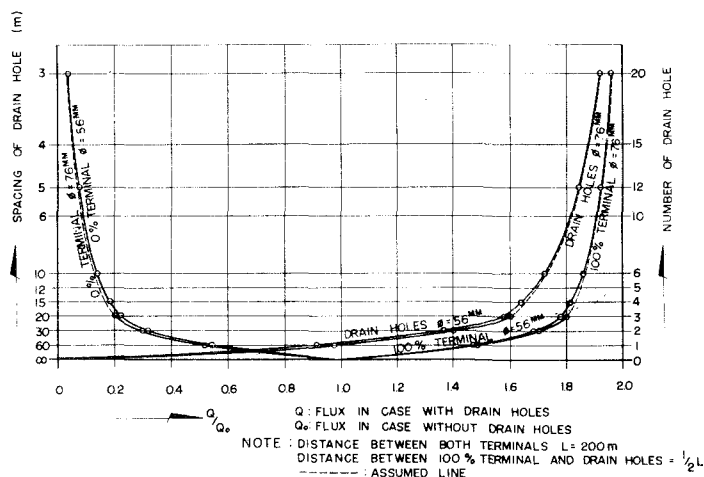


FIG-4 RELATION BETWEEN SPACING OF DRAIN HOLE AND Q/Q_0 .

* これは、この実験のために東京大学嶋助教によつて新しく誘導されたものである。

量を無次元化して与えた。ドレーン・ホールの本数が増加するにつれて、100%ターミナル及びドレーンホールを通過する流量は2に、0%ターミナルに入る流量は0に漸近する。

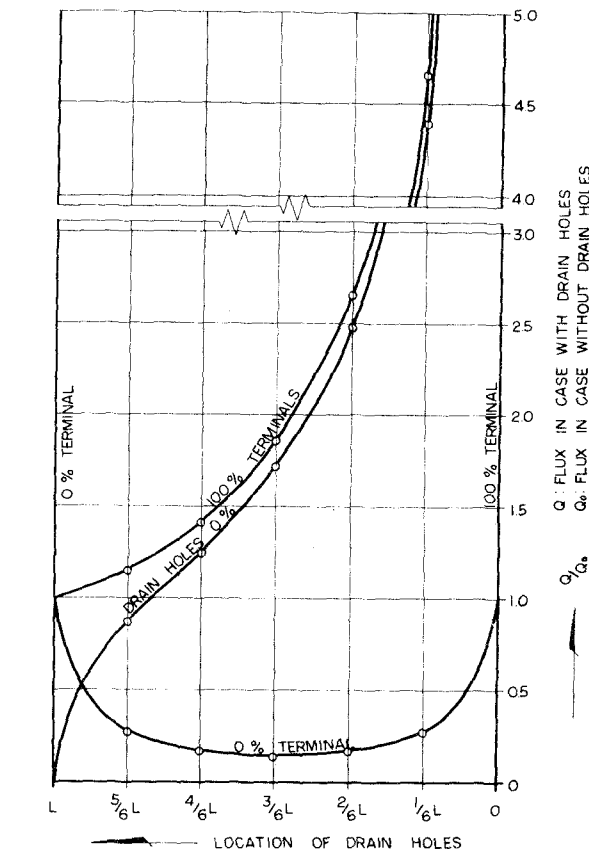
この図から、ドレーン・ホールの間隔には、実用的に有効な限度があり、10~20m附近にそれを求めることができる。更に、ドレーン・ホールの直径の寸法的な効果は、間隔によるそれに比べて、2次的であることも容易に了解される。

B1. ドレーン・ホールの位置

Fig - 5 に、直径56mmのドレーンホールを両極間の6等分線上に、各々別個に間隔10mで配置した場合の結果を图示する。縦軸に流量を、無次元化してとり、横軸にドレーン・ホールの位置をとつた。

ドレーンホールの位置が、0%ターミナルと一致する場合は、ドレーン・ホールがない場合と全く同じ状態であり、その位置が100%ターミナルに移動するにつれて、100%ターミナル及びドレーン・ホールを通過する流量は、次第に増加し、遂に無限大に達する。他方、0%ターミナルを通過する流量は、ドレーン・ホールの位置が両局間の中央にある場合に最も少なく

夫々両極に向かうにつれて対称の形で増加し、極限において、ドレーン・ホールがない場合の



NOTE: DISTANCE BETWEEN BOTH TERMINALS = 200 m
SPACING OF DRAIN HOLE = 10 m
DIA OF DRAIN HOLE = 56 mm

FIG-5 RELATION BETWEEN LOCATION OF DRAIN HOLE AND Q/Q_0 .

Fig - 6 に、上述の夫々の場合のポテンシャル勾配を示す。対称の位置にあるドレーン・ホールの0%側のポテンシャル勾配が全く一致していることは、Fig-5の結果から容易に立証し得る。

Fig-5,6 から、ドレーン・ホールの位置に関して、次に述べる様な原則論が成立する。即

ち、重力ダムにおける如き、安定性に関して揚圧力が支配的な要素である様な水埋構造物に、ドレーン・ホールを設けて、揚圧力を軽減することに目的を置く様な場合にはできるだけ水源に近い位置を選んだ方が有利であり、他方、地山の問題とする部分の安全性を確保するために、その部分の地下水位を下げることに目的をおく様な場合には、その部分及至その直前に設けて、無用な水を大量に水源から引出すことを避けた方が賢明である如く、夫々の目的に応じた適切な位置が存在することに留意する必要がある。

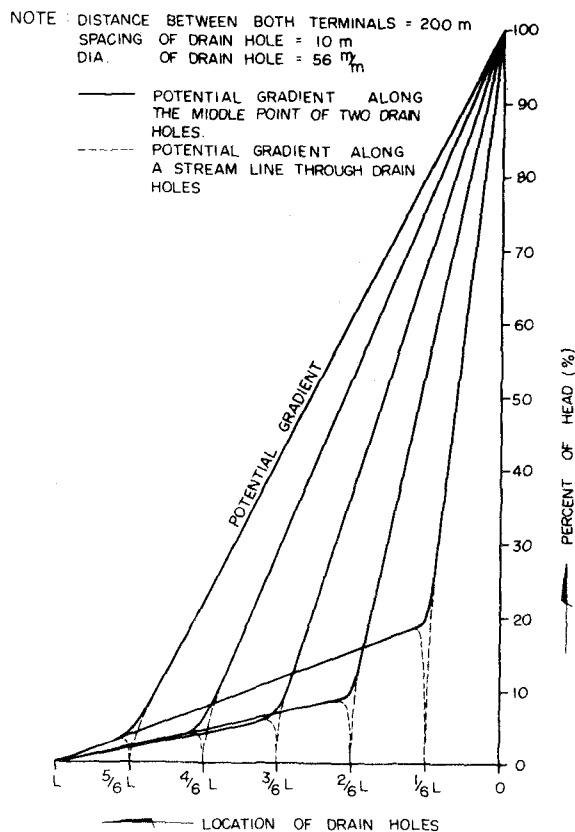


FIG - 6 VARIATION OF POTENTIAL GRADIENT FOLLOWING AFTER LOCATION OF DRAIN HOLES

5. 3次元模型による研究

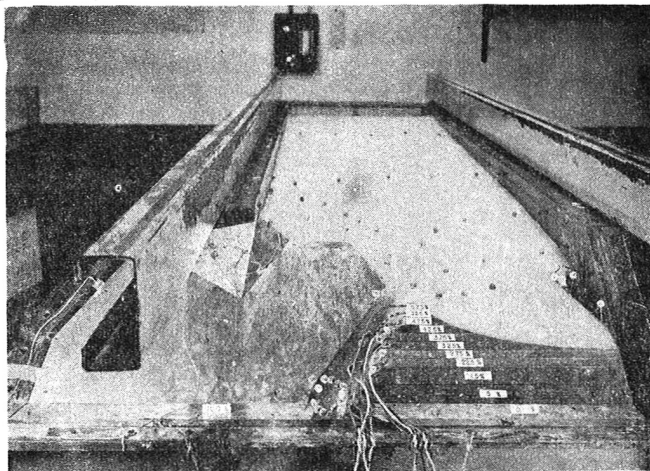
魚四ダムの排水設備は、ダムから伝わる荷重を受持つ基盤内の浸潤面を低下させて、その耐荷力を増し、構造物全体の総合安全率を向上させることに、その主目的を置いた。従つて、その主体は、問題となる部分の下部に設けられた一連のグループと、それに附加して設けられたカーテン・ウォール沿いのグループとからなる。これは、勿論前節の2次元模倣結果からの産物であり、そのまま3次元酌にあてはめて模倣された。

3次元模型に組込んだドレーン・ホールは、設置箇所によつて、原型にて5及至10 mに相当する間隔に予め大量に配置し、実験の進行につれて不必要だと判明した部分を、順次間引いて行つた。その結果、附図ⅡA-41~43に示す如き配列を得た。間隔が15及至20 mである部分は、その部分を通過する流線密度が低いために、それ以上に本数を増しても全体としての流れに殆んど変化を与えない部分、及至その殆んどが浸潤面から上に出る部分である。又、河床部分にドレーン・ホールが配置されていない理由は、この部分に設けられたドレーン・ホールは、浸潤面を低下させることに殆んど貢献しないという実験的な検証と、アーチダムにおけるこの種の、揚圧力を軽減することに目的を置くドレ

ーン・ホールの必要性は、重力ダムにおける程重要な問題でないという考えによる。従つて、この部分には、不取敢、圧力観測用のピエゾメーター・ホールを配置するだけに止めた。

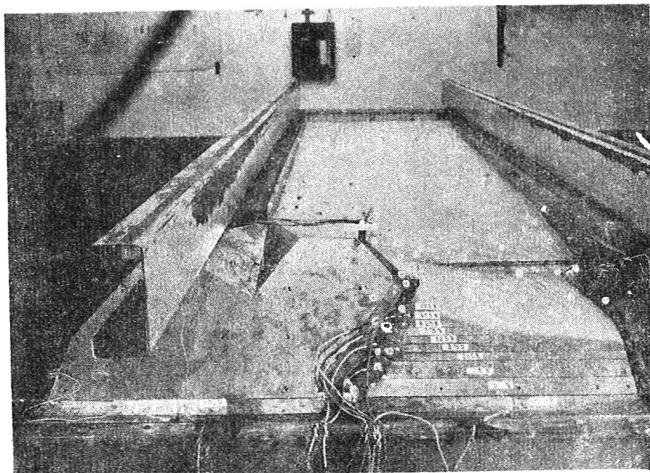
以上の如く、ドレーン・ホール問題は、前節の2次元的研究に出發して、3次元的に立証することによつて、その間隔、配置等に関する具体的な解答を得た。この結果は、あくまでも均質な媒質を対象にして得られたものであるため、勿論現実には、地質構造に応じて部分的に修正する必要を生ずるものと考えられる。従つて、附図ⅡA-42~43に示すドレーン・ホールの配置は、その題名にもある如く、骨子を示すものであり、施工に対する指針となるものであることは、いうまでもない。

Photo ~2, 3, 4に右岸に関する夫々の条件に対する実験写真をしめす。模型は、実験の都合上、右岸から見て河身を含む鉛直面を鏡の面と考えた場合の鏡像として作製したので、一見左岸の如く見えるが、実は右岸である。左側に、貯水位に相当する100φポテンシヤルを与えるための極板を配置し、地山の地形をできるだけ忠実に再現する様に配慮されている。中央に見える凹みは、ダムのアバットの掘込みを現わしている。右側の層状に配列されている極板は、地山の法面に浸出水がある部分に、その標高に相当するポテンシヤルを強制的に与えて、相似条件を満足させるために必要な極板及び、下流河床の水面に相当する0φポテンシヤルを与えるための極板である。白



RIGHT BANK

PHOTO-2 GENERAL VIEW IN CASE WITHOUT CURTAIN WALL & DRAIN HOLES



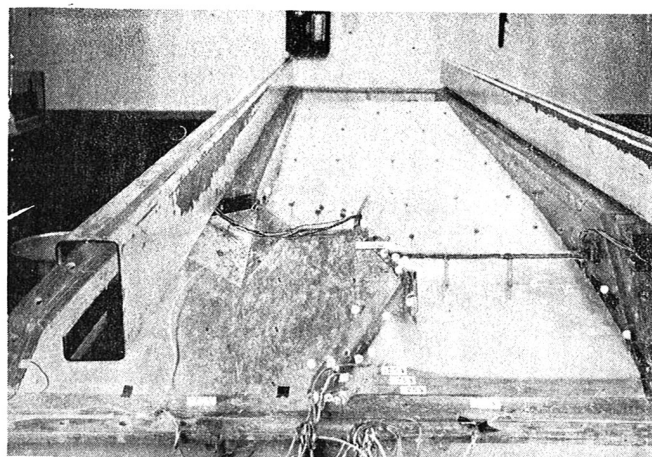
RIGHT BANK

PHOTO-3 GENERAL VIEW IN CASE WITH CURTAIN WALL ONLY

く見える寒天の表面が、
夫々の条件に対して得ら
れた浸潤面の高さを現わ
している。写真では見え
ないが、向う側に、Fig-
2に示す如き本来の地下
水流の影響を取り入れる
ために必要な極板が、配
置されている。

Photo～2、3、4から
基盤内の浸潤面を低下さ
せるに際して、ドレーン。

ホールの果す役割は甚だ
重要であり、且有効な手
段であることが容易に了解される。



RIGHT BANK
PHOTO-4 GENERAL VIEW IN CASE WITH CURTAIN
WALL & ALL DRAIN HOLES

この3次元模型による実験では、この他に、夫々の条件に対する基盤内のポテンシャル分布を測定し
た。それは予め寒天中に設けられた鉛直の小孔に沿って、先端以外を絶縁した細長いプロブを挿し込ん
で、測ることができる。この結果から、基盤内の三次元的なポテンシャル分布を知り得、再には基盤の
安定計算を行う場合に必要の間隙水圧の分布も、それから作図によつて求めることができる。

6. 原型との対比並びに現場への応用

原型との対比ということになると、2節
に述べた基本的な仮定の真偽という問題に
帰着する。これに対して、次に挙げる事実
から、岩盤に対する斯様な取扱いの可能性
が存在することを立証したい。

Fig 7に示すルジオン・テストの結果、
即ち、同一箇所に対して2通りの圧力を用
いて得られた圧力と流量の間に、ほぼ直
線関係が成立すると見做し得るという事実
及び、Fig 8に示す中間水位に対する右
岸の浸潤と原型との間に、80%の相似性
があり、特定の箇所に集中して得られた原

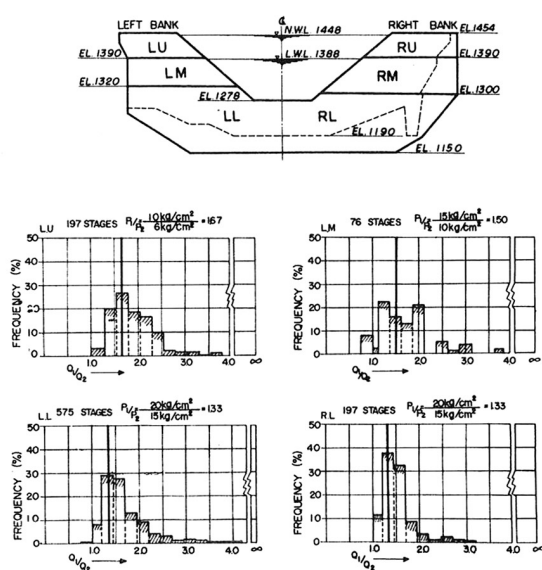
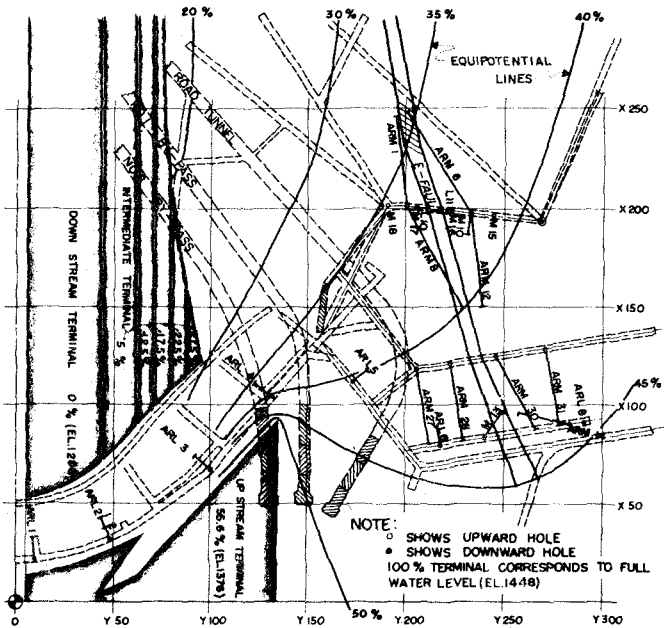


FIG-7 RELATION BETWEEN TEST PRESSURE AND FLUX

因の推定し得る50%以下の4つの値を除くと、90%にも達する相似性が得られている事実から、基盤の構造線の方角性を無視した斯様な取扱いの可能性が実証される。

基盤内の排水設備の本格的な施工は、現在丁度その緒についたところである。施工に際しては、実験的研究の結果得られた最も有効な箇所から順次着手し、その結果を、附図B-5¹～5³に示す一連のピエゾメーター・ホールの観測値で掌握しながら、有効で且つ、経済的な設備を得るべく努めたいと、考えている。

以 上

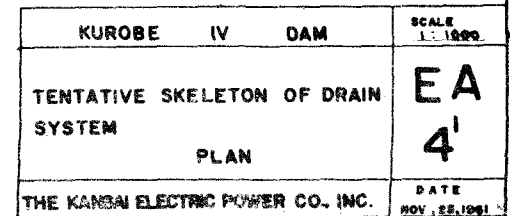


NO.	PROTOTYPE (%)	MODEL (%)	PROTOTYPE MODEL (%)	NO.	PROTOTYPE (%)	MODEL (%)	PROTOTYPE MODEL (%)
ARL -1	36.9	60.0	61.6	ARM -12	66.9	68.0	98.4
-2-1	69.7	49.4	141.0	-13	67.3	76.2	88.4
-2-2	65.2	—	—	-14	73.4	76.1	96.5
-3	72.5	82.5	116.0	-15	81.2	86.6	121.8
-4	48.2	66.6	72.5	-16	29.2	64.1	45.6
-5	57.1	66.6	86.0	-17	28.5	62.0	46.0
-6	66.9	75.4	88.8	-18	29.9	68.6	43.6
-8	46.0	78.8	58.3	-27	63.9	74.7	85.6
-10	29.2	82.6	45.0	-28	63.4	75.4	84.2
-11	46.6	64.0	72.8	-30	72.0	76.1	94.7
ARM -1	44.2	59.5	74.4	-31	79.1	76.8	102.8
-6	55.6	62.0	89.8				
-8	30.9	65.1	47.5		MEAN	VALUE	80.3
-10	42.1	66.6	63.2				

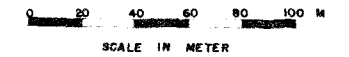
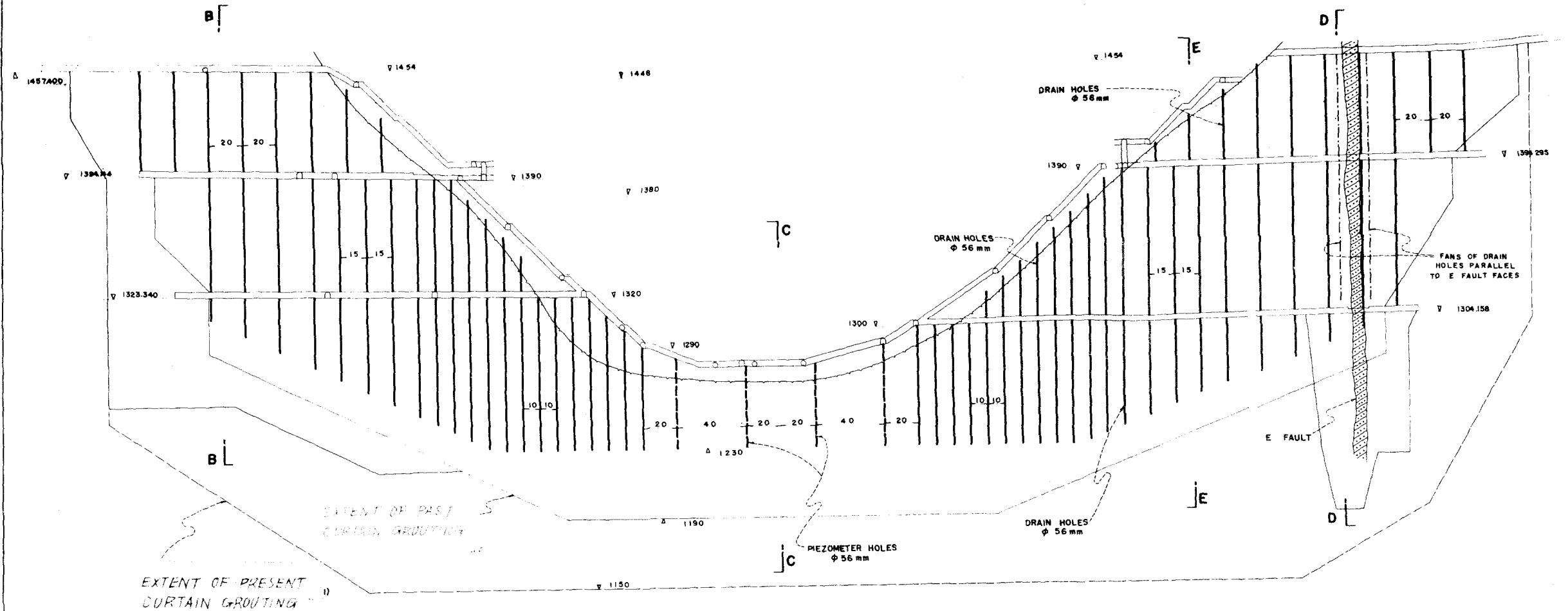
NOTE : DRAIN POTENTIAL IN THE PROTOTYPE MEASURED AUG. 10, 1961.
W.L. IN THE PROTOTYPE AND MODEL EL. 1376 M

FIG - 8 COMPARISON OF POTENTIALS IN DRAIN HOLES BETWEEN MODEL AND PROTOTYPE

1.- DRAIN MUST BE KEPT ALWAYS OPEN.
2.- PIEZOMETER HOLE MUST BE EQUIPPED WITH VALVE AND GAUGE AND KEPT ALMOST ALWAYS CLOSE.

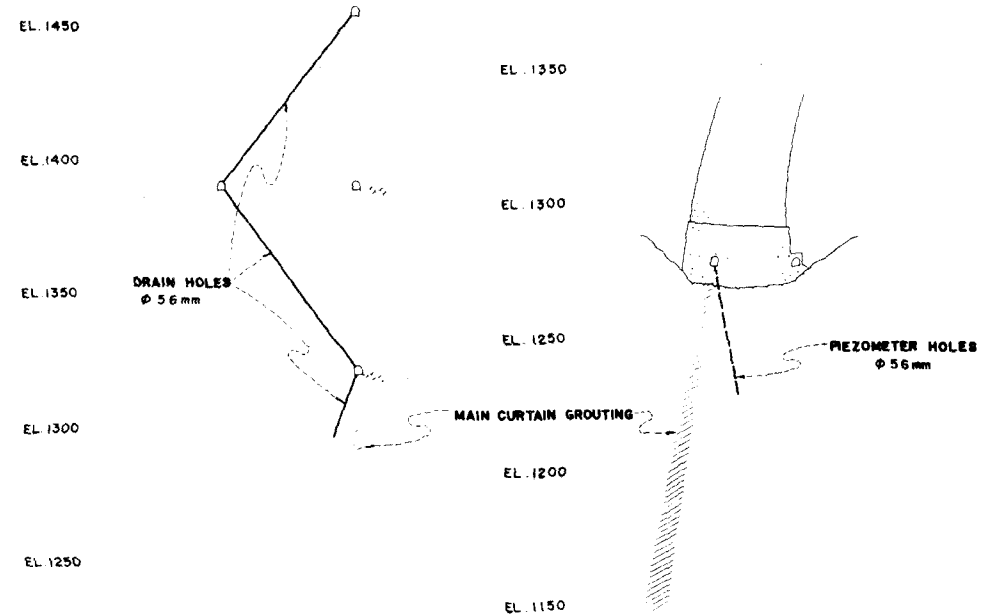


SECTION A-A

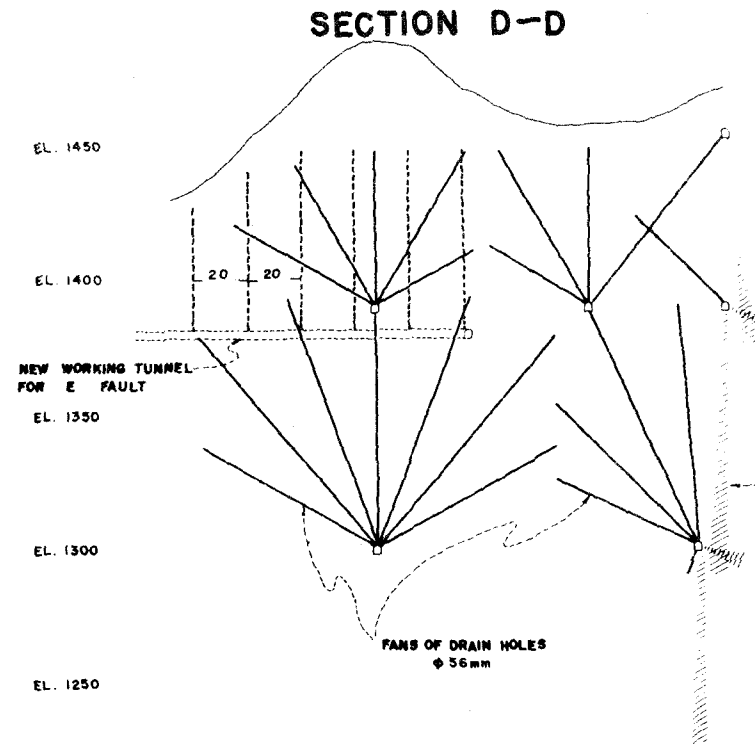


KUROBE IV DAM	SCALE 1 : 1000
TENTATIVE SKELETON OF DRAIN SYSTEM	EA
SECTION	4 ²
THE KANSAI ELECTRIC POWER CO., INC.	DATE NOV. 25, 1961

SECTION B-B

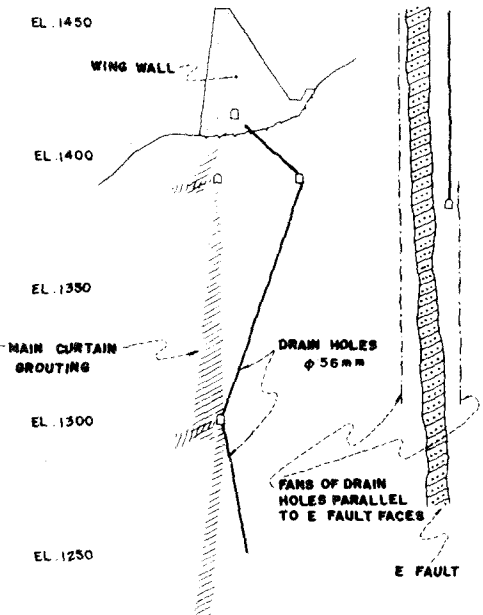


SECTION C-C

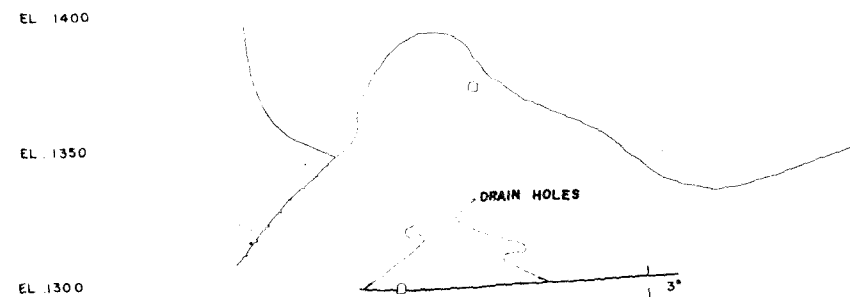


SECTION D-D

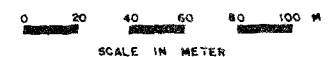
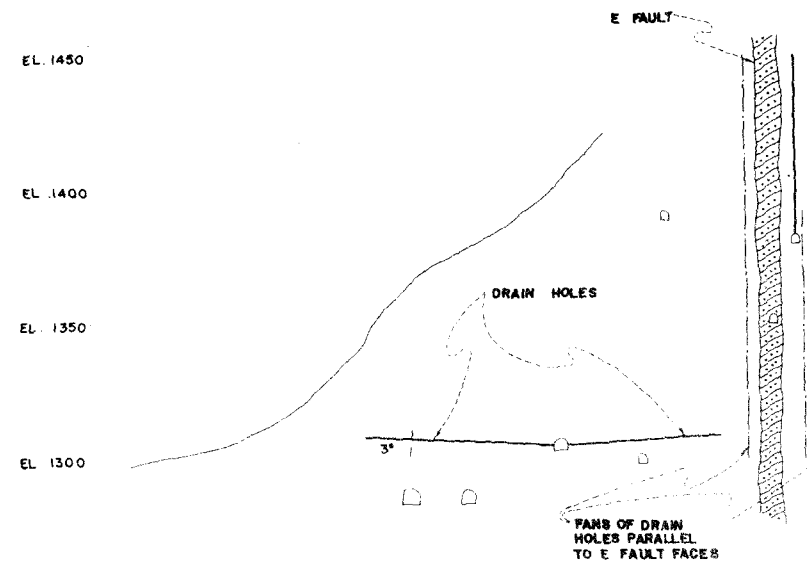
SECTION E-E



SECTION F-F



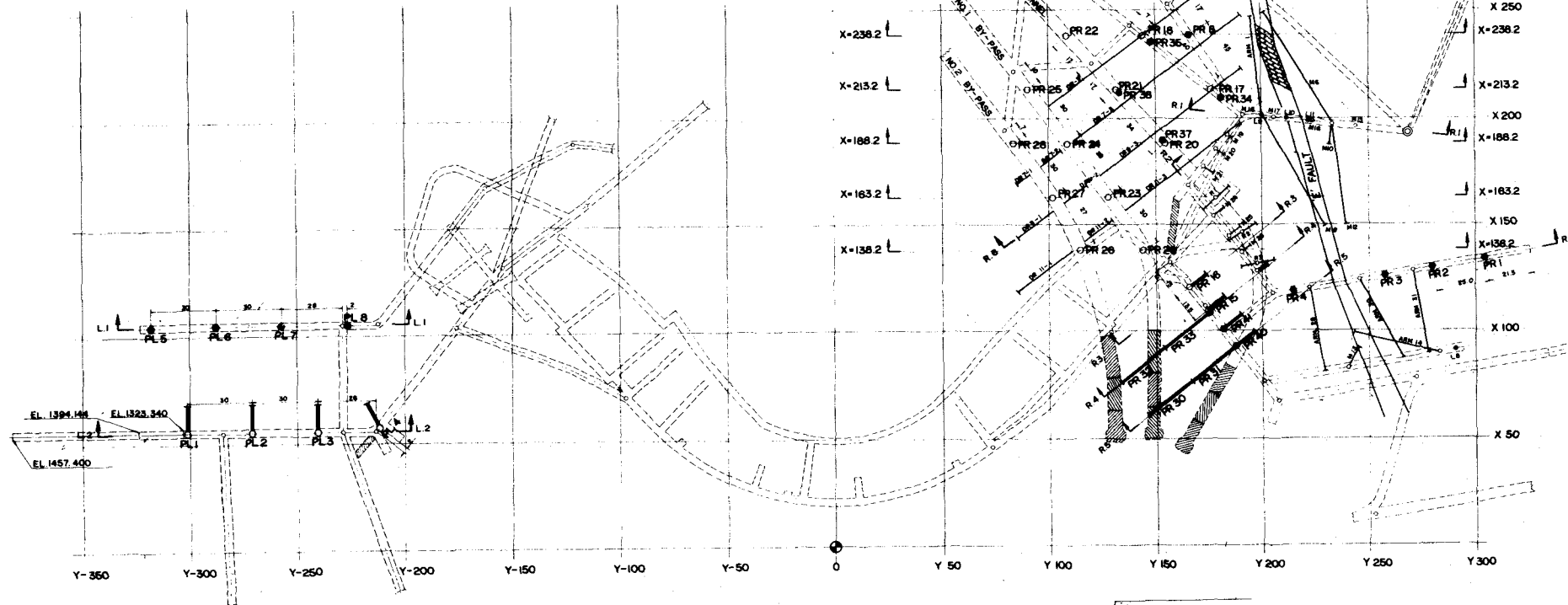
SECTION G-G



KUROBE IV DAM	SCALE 1:1000
TENTATIVE SKELETON OF DRAIN SYSTEM	EA
SECTIONS	4 ³
THE KANSAI ELECTRIC POWER CO., INC.	DATE NOV. 25, 1961

PLAN

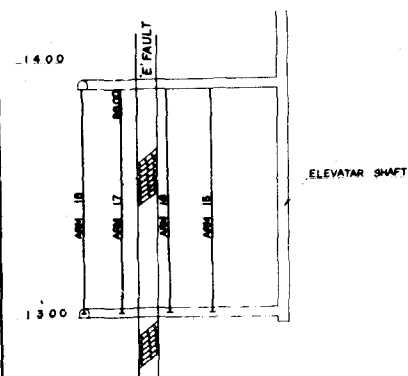
S = 1:1000



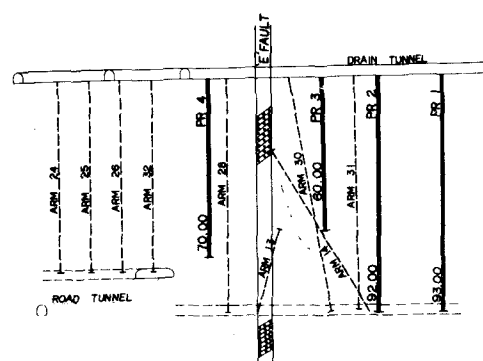
SECTION

S = 1:1000

SECT R.1



SECT R.2



SECT R.3

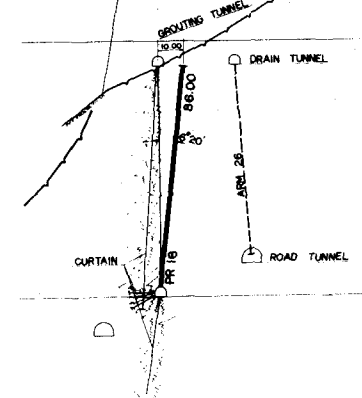
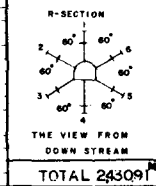


TABLE OF PIEZOMETER HOLE

NO.	LENGTH	NOTE	NO.	LENGTH	NOTE
PR 1	9.00		PL 1	58.00	
2	9.20		2	55.00	
3	60.00		3	55.00	
4	70.00		4	55.00	
5	89.00		5	40.00	
6	89.00		6	40.00	
7	86.00		7	40.00	
8	86.00		8	40.00	
15	86.00				
16	86.00				
17	83.00				
18	85.00				
19	48.00				
20	73.00				
21	43.00				
22	42.00				
23	58.00				
24	63.00				
25	43.00				
26	35.00				
27	44.00				
28	35.00				
29	66.00				
30	80.00				
31	80.00				
32	80.00				
33	80.00				
34	30.00				
35	30.00				
36	30.00				
37	30.00				
38	30.00				
40	60.00				
41	80.00				
TOTAL 1957' RIGHT BANK			TOTAL 2337'		

TABLE OF DRAIN HOLE

NO.	LENGTH	NOTE	NO.	LENGTH	NOTE
DR 1	8.50		R-1-1	10.00	
2	10.40		2	10.00	
3	11.40		3	10.00	
4	81.80		4	10.00	
5	21.80		5	10.00	
6	13.40		6	10.00	
7	89.00		7	10.00	
8	32.40		8	10.00	
9	16.00		9	10.00	
10	86.00		10	10.00	
11	30.00		11	10.00	
12	30.00		12	10.00	
13	30.00		13	10.00	
14	30.00		14	10.00	
15	30.00		15	10.00	
16	30.00		16	10.00	
17	30.00		17	10.00	
18	30.00		18	10.00	
19	30.00		19	10.00	
20	30.00		20	10.00	
21	30.00		21	10.00	
22	30.00		22	10.00	
23	30.00		23	10.00	
24	30.00		24	10.00	
25	30.00		25	10.00	
26	30.00		26	10.00	
27	30.00		27	10.00	
28	30.00		28	10.00	
29	30.00		29	10.00	
30	30.00		30	10.00	
31	30.00		31	10.00	
32	30.00		32	10.00	
TOTAL 20237M PREVIOUS HOLE			TOTAL 243091'		



NOTES

- SHOWS PIEZOMETER HOLE (φ 56mm)
- SHOWS DRAIN HOLE (φ 56mm)
- SHOWS UPWARD HOLE
- SHOWS DOWNWARD HOLE

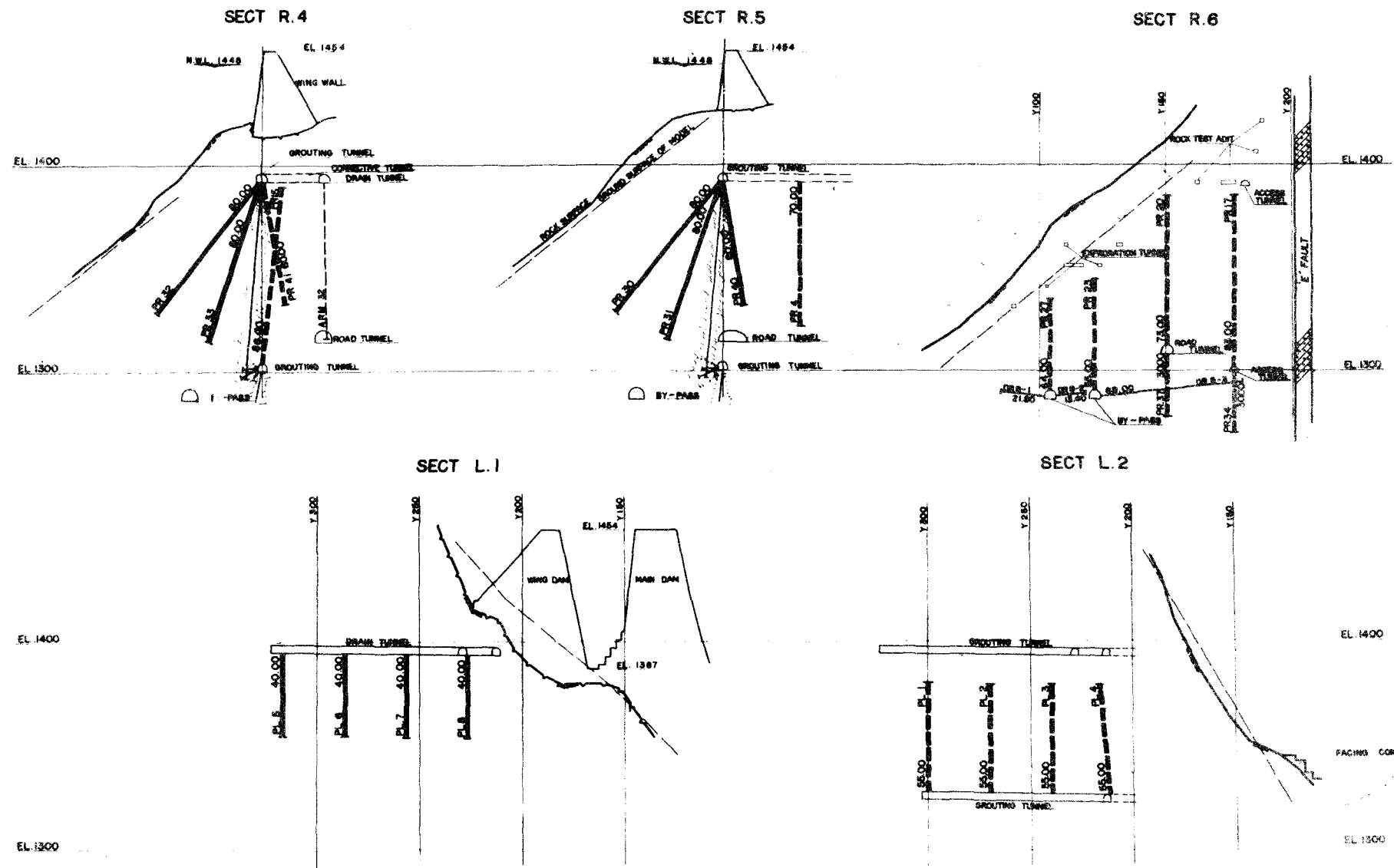
KUROBE IV DAM

SCALE
1:1000

ARRANGEMENT OF PIEZOMETER
HOLES AND DRAIN HOLES

E A
5'

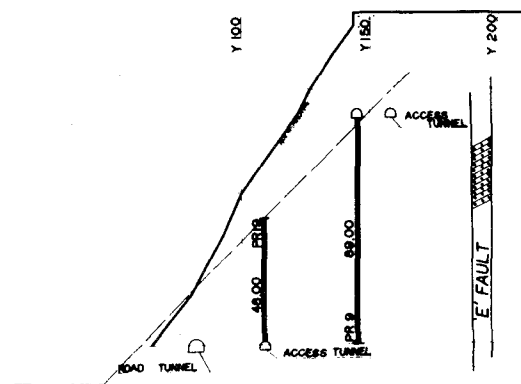
THE KANSAI ELECTRIC POWER CO., INC. DATE
MAY 10, 1962



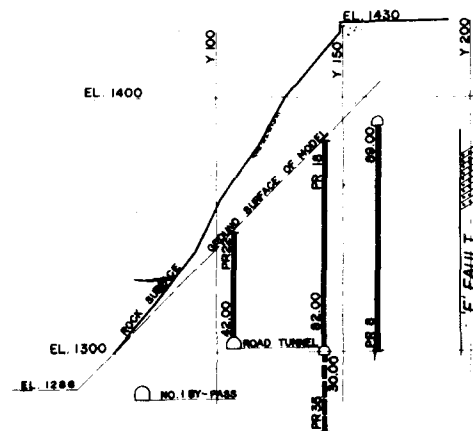
KUROBE IV DAM		SCALE 1"=1000'
ARRANGEMENT OF PIEZOMETER HOLES AND DRAIN HOLES		EA 5 ²
THE KANSAI ELECTRIC POWER CO., INC.		DATE MAY 19, 1952

SECTION S = 1:1000

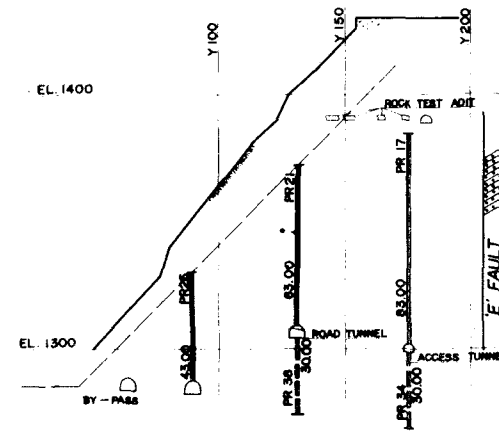
SECT. X 263.2



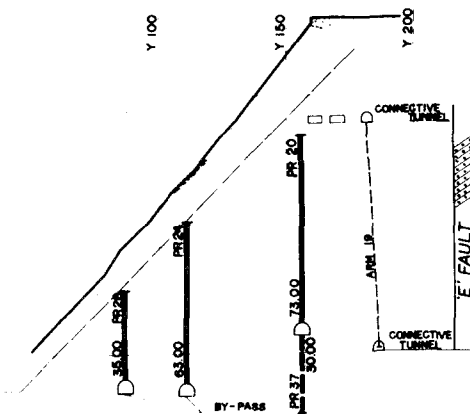
SECT. X 238.2



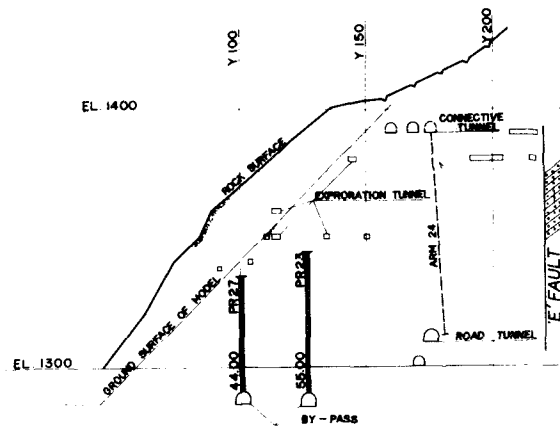
SECT. X 213.2



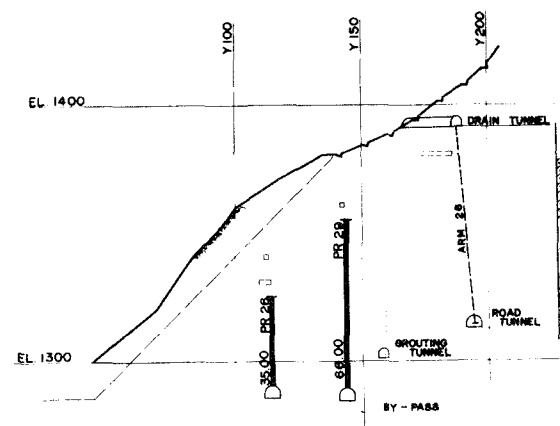
SECT. X 188.2



SECT. X 163.2



SECT. X 138.2



KUROBE IV DAM		SCALE 1:1000
ARRANGEMENT OF PIEZOMETER HOLES AND DRAIN HOLES		EA 5'
THE KANSAI ELECTRIC POWER CO., INC.		DATE MAY 10, 1962