

講

演

第 23 卷 第 3 號 昭和 12 年 3 月

## ボールドーダム工事に就て

(昭和 12 年 1 月 28 日第 73 回土木学会講演會に於て)

會員 小 野 基 樹\*

## On the Boulder Dam

By Motoki Ono, C. E., Member.

## 要 旨

本講演は著者が昭和 11 年 9 月米國にて開催せられた第 3 回世界動力會議並に第 2 回國際大堰堤會議に出席して、その視察旅行にて親しく視察した Boulder Dam の特長の二三に就て述べたものである。

昨年 11 月に、アメリカから歸りまして、間もなく此の席に於きまして、ボールドーダム (Boulder Dam) の工事の大体をフィルムに就てお話申上げましたので、今回井上會長から何かお話をしろといふ御命令がありましたけれども、既に前回に於きまして矢張り此の席から、皆様にお話を申上げて居ることでありまして、一応御辭退を申上げたのであります。所が顔だけでも演壇に出せといふ御命令でございましたから、再び臆而もなく罷出たやうな次第でございます。従ひまして今回は此の前のお話の中で足りない點を補足するといふやうな、軽い氣持でお話をするつもりでございますから、皆さんも其のおつもりで御聴取りをお願い致します。

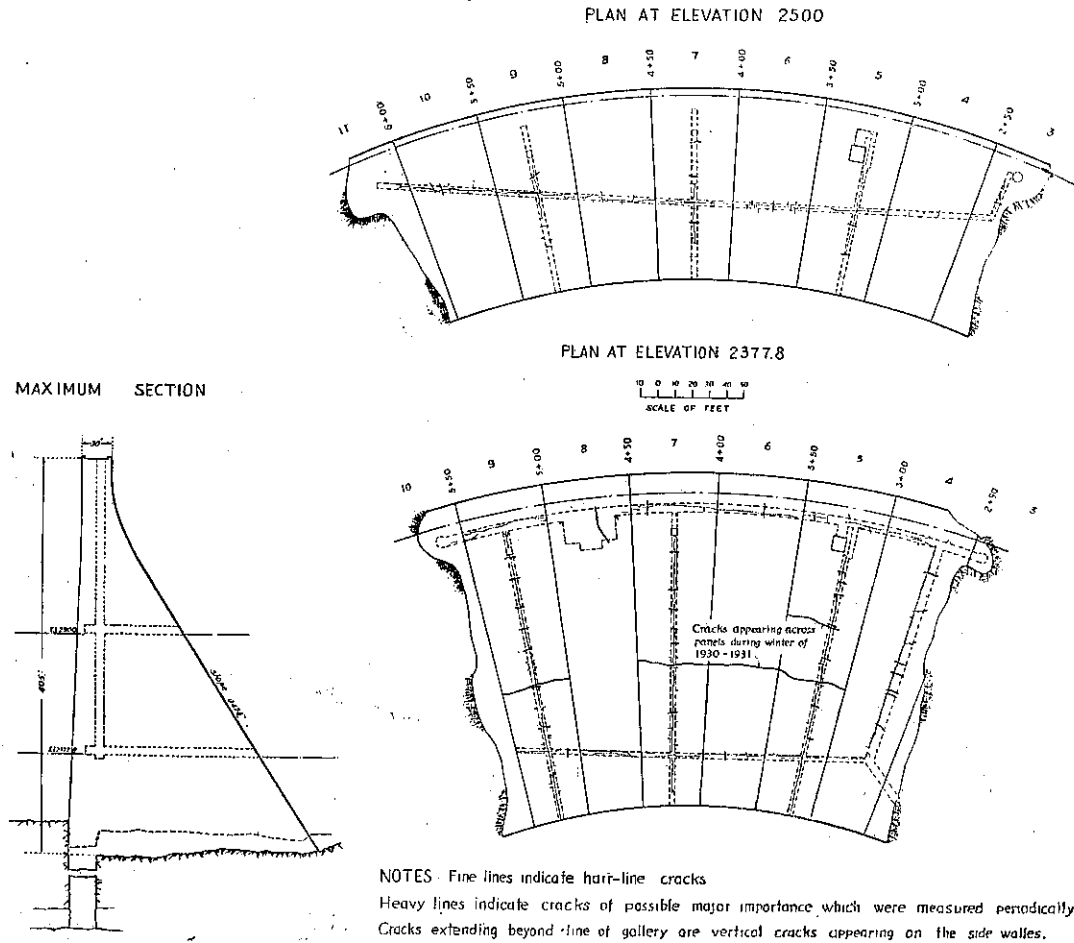
ボールドーダムの全般に就てお話をすることは、時間の關係で不可能でありますから、其の特長の二三の點を、かいつまんでお話申上げたいと思ひます。

高い堰堤を築造する場合に、一番困難な問題は、マスコンクリートに龜裂が入るといふ點であります。之をどうして處理して行くかといふことが、一番重大な問題であります。ボールドーダムを設計する場合には、此の點に關しまして、研究所に於て慎重に研究を遂げたばかりでなく、ボールドーダムのコンクリート工事に著手する 1 年位前に竣工したオワイヒーダム (Owyhee Dam) の實物に就て、貴重な研究資料が得られたのであります。私はオワイヒーダムの視察に行くことが出来ませんでした。此のダムを仕上げました Construction Engineer の Mr. Frank A. Banks といふ人が、今日ではグランドクーリーダム (Grand Coulee Dam) のコンストラクションエンジニアになつて居りますので、直接其の方にオワイヒーダムの話も聞き、又米國の内務省で出版しました報告書に就て、いろいろ調べたのであります。是からお話申上げようとするボールドーダム工事の特長といふことに關係を持ちますから、簡単にオワイヒーダムの實績に就てお話を申上げることに致します。オワイヒーダムは、オレゴン州の東の方にオワイヒーリバーといふ河がありますが、其所へ築造されたもので、1930 年 6 月から 1932 年 7 月まで滿 2 年かゝつて、出来上つたのであります。セメントは此所ではスタンダードポートランドセメントを使ひました。型式はアーチダムになつて居ります。高さは 417 呎で、基礎地盤に非常に深い断層がありまして、其の深さは 117 呎といふことであります。長さは全体で 810 呎、それに 50 呎間隔にコントラクショ

\* 東京市小河内貯水池建設事務所長 工学士

ンジョイントを設けてあります。コントラクションジョイントに依つて仕切られて居ります concrete block の大いさは底部では幅 40 呎、厚さ 250 呎といふ寸法と、頂部では幅 50 呎、厚さ 30 呎といふ寸法とに変化して居るのであります。このオワイヒーダムの竣工後どういふやうな結果が表はれたかと申しますと、此の 図-1 に

図-1. TYPICAL CRACKS IN OWYHEE DAM



現してありますが、之がオワイヒーダムのマキシマムセクションであります。其のマキシマムセクションの監査廊が、2段にありますが、上の段と下の段を切つて見ますと、上の段は斯ういふやうな断面になります。下の段は斯ういふやうな断面になります。出来上りましてから1年経たないうちに、無数の龜裂が起りました。其の龜裂は黒の濃い線で書いてあります。一番大きな龜裂は circumferencial の方向のものでありまして、兩岸に突き通つて居るだらうと観測されて居ります。其の外にダムの circumferencial の方向に重大な龜裂が、14個入つたと言はれて居ります。尚ほ radial の方向にも相當の龜裂が入つて居りますけれども、それはヘヤークラックの類でありまして、さう重大なものではありません。是は先程お話申上げましたやうに、これだけの大きなブロックになつて居ります。此の幅は 50 呎、radial の方向は 250 呎といふ厚さのものが連続して居ります。此のコンクリートが、一旦硬化熱を發生して後漸次に冷却した爲に收縮します時に、斯ういふ龜裂を起したものと考へ

られます。大きなダムに於きましては circumferencial の方向即ちダムの厚さの方向に於ける龜裂は、従来の實例に徴しましてどうしても避け得られなかつたのであります。此のオワイヒー ダムの實例は、現實に其の事實をを物語つて居るのであります。若し大きな、厚いダムを作る場合に、此の厚さの方向に何か特別の工法を用ひなければ、必ず硬化熱が発生しました。後に冷却して收縮する時に龜裂が起るといふことは、どうしても避け得られない問題である事實が愈々明瞭になつたのであります。之がボールダー ダムの start に於ての非常に良い參考資料になりました次第であります。

從て、ボールダー ダムに於きましては、此の硬化熱に原因する龜裂を、どうして處理して行くかといふことが、一番重大な研究事項であります。どういふ方法に依つたかと申しますと

第 1 番目にローヒート セメントを使ひまして、成るだけ硬化熱の高くなるのを防いだ、從て收縮するために起る龜裂が減少される譯であります。

第 2 番目には vertical column の block system に依つてコンクリート打ちをなした。

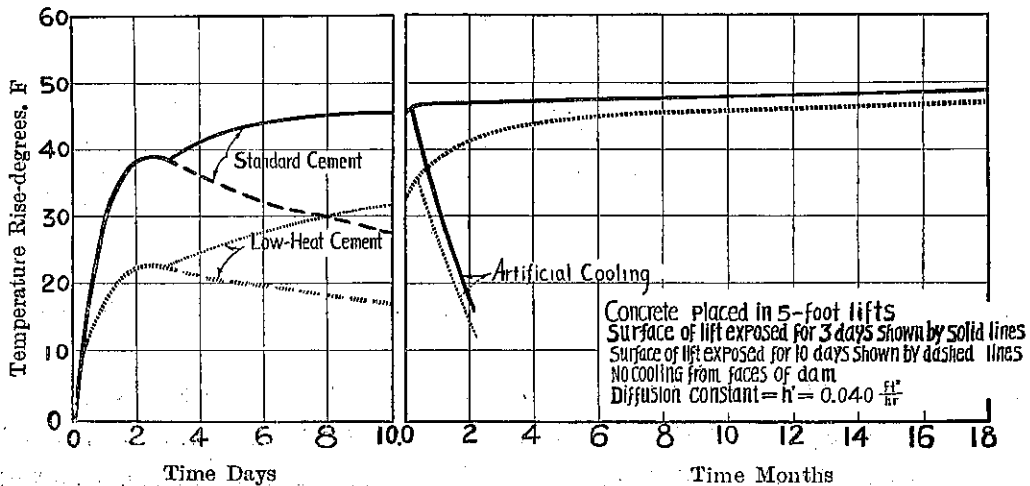
第 3 番目には、コンクリートを早く冷却させるために、cooling pipe を挿入した。

第 4 番目には、ブロックの空隙を conduit box といふ特別の裝置に依つて、grouting を施した。

大体此の四つの方法に依つて、龜裂の問題を解決して居ります。此の四つの方法に就て、順次にお話申上げたいと存じます。最初にボールダー ダムの工事に着手されました時には、まだローヒート セメントに就て研究し盡されて居りませんので、堰堤下部の 80 呎は全部普通のポルトランド セメントを用ひて居りました。上部は冬季を除く外は、全部ローヒート セメントを用ひて居りました。冬季は 40% のポルトランド セメント、60% のローヒートセメントを blend したものをを用ひて居りました。

尚ほ、ブロックが小さくなり各ブロックの間に生ずべき空隙も亦小さくなりまして、grout をするのに不充分なる場所は、特別に夏でも上述の 2 種のセメントを混合したものをを用ひて居りました。それらのセメントは五つの違つた會社から購入しまして、各別に 5000~6000 樽の容量のあるセメント タンクに貯藏し各タンクから screw conveyer で混ぜ合はせながら搬出し品質の均一を図るために、是等各々を一定の割合に混合して使用致しまし

圖-2. SIMPLIFIED AVERAGE TEMPERATURE-RISE HISTORY  
OF CONCRETE OF AN EXTREMELY LARGE DAM



た。ローヒートセメントの硬化のために上昇する温度は、平均値をとりますと 32°F、それから 60% のローヒートセメントと、40% のポर्टランドセメントを混ぜ合はせたものは 38°F、ノルマルセメントは 41°F といふ平均値が出て居ります。以上の上昇温度の平均値は孰れも周囲の外氣温度より以上に上昇する温度を表はしたものであります。

是はアメリカの内務省で出しました印刷物に出て居りました図表(図-2)でありますが、上の線はスタンダードセメント、下の線はローヒートセメントの發熱の具合を現はして居ります。左側の縦軸には華氏で温度を現はしまして、水平軸には左方では日數を現はし右方では月の數を現はしました。是はコンクリートを打ちましてから、硬化熱がだんだん上つて来て、18箇月目にまだ多少づゝ上る傾向を持つて居ります。ローヒートセメントも最初は極く硬化熱が少いが、だんだん先へ行つてスタンダードセメントの線に接近して参ります。是は後程の説明に出ますが、クーリングパイプを用ひまして、硬化熱を冷却したらどうなるかといひますと、artificial cooling と書いてある線のやうにスタンダードセメント及ローヒートセメント共に図示の線のやうに急激に下つて2ヶ月餘を經過しますと發生した硬化熱は殆んど除去せられまして外圍の天然の温度の近く迄に回復します。點線で書いてありますのはダムの直立した5呎の堅壁の表面をコンクリートを打ちましてから10日間大氣に放置して置きました後に熱の絶縁体で蔽ひまして、外氣の影響を受けて下つて参ります。此の實線の方はダムの直立した表面を3日間大氣に放置してから後に、其の表面を熱の絶縁物で覆つた場合の温度の過程を示したものでありまして、此の兩者の差異が相當に大きなことを以て見ましても、マスコンクリートの内部の熱の發散しない狀況のあらましが推察せられるのであります。即ちマスコンクリートの内部に於きましては、大体に矢張り上の實線のやうな傾向を辿ることになります。尙ほ印刷物を見ますと、此のボールダーダムに於きましては、人工的に冷却を爲さなかつた場合に於きましてはマスコンクリートの中央部に於ける硬化熱が外周りの水溫や氣溫の影響を受けましてだんだん自然に硬化熱がさがり切つて、結局外圍の温度と一致するまでには、125年かゝる、従てダムの内部を冷さずに其の儘放置しますと、125年経つて初めて收縮が止まる。従て125年後までは、コンクリートの体積が收縮する原因が残存して居つて従て龜裂が出来る可能性があるといふやうなことが書かれてあります。

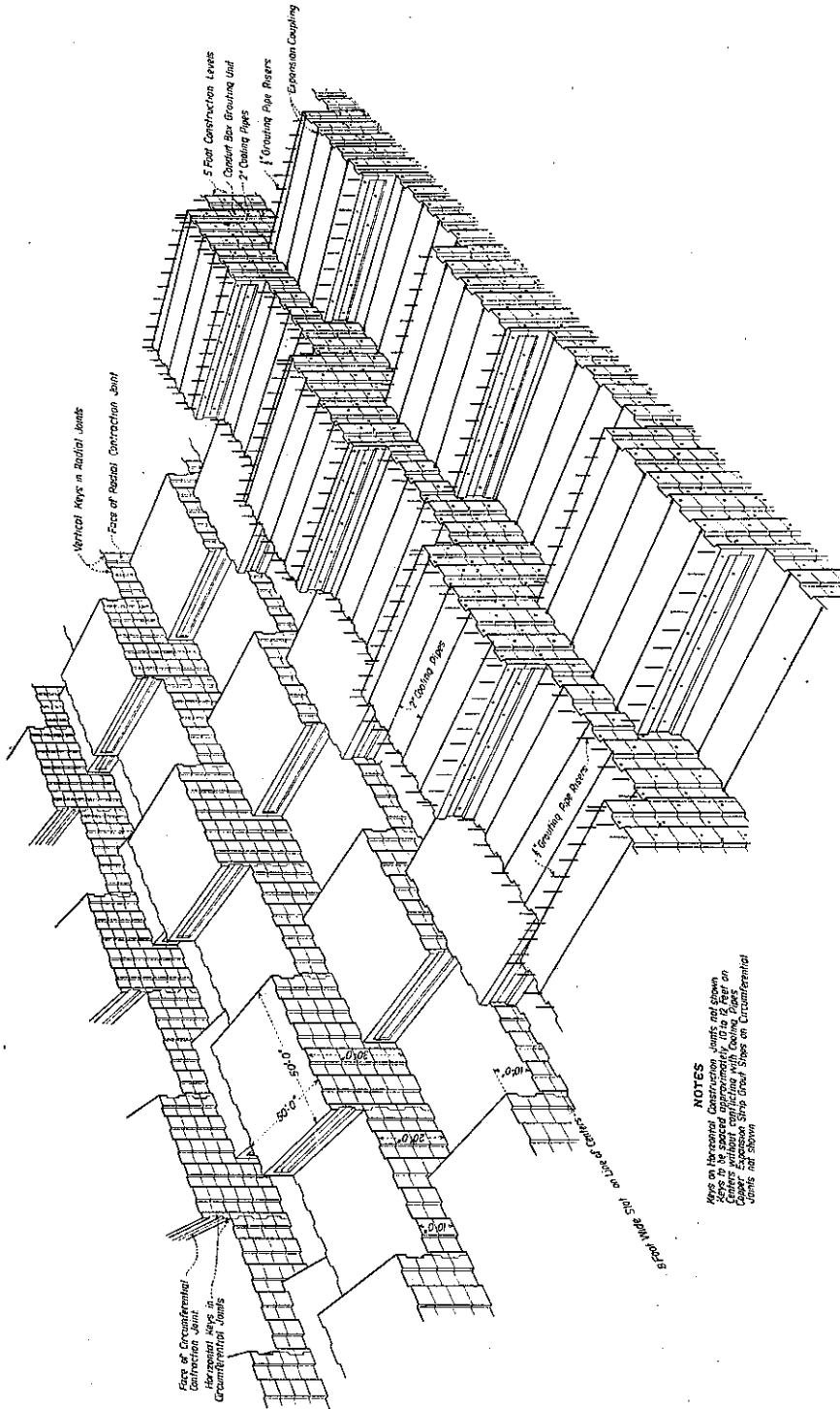
次に、ブロックシステムに依つた工法であります。此のブロックは 50'×50' の水平方向に於ける断面を持つて居る大さの柱を、ダムの全体の容積を cover する如くに併立させて行きます。そして其の柱と柱との間に楔型の凹凸を設けまして、前後左右と上の方にも矢張り楔型を設けて、お互のブロックを咬み合せ最後にはブロック間の空隙にセメント汁を注入してブロック全体を打つて一丸と爲すと云ふ考へ方にして居ります。

図-3 はブロックシステムの施工法を判り易く現はしたものであります。此の図面に小さく縦に見える線は、此のブロックの間に grout をするためのパイプであります。横に太く見える線は、此のダムボデーを冷却するためのクーリングパイプであります。コンクリート打設の速さは72時間に5呎以上あがつてはいけない、又35日間に35呎以上あがつてもいけない。それから隣りのブロックの間に、35呎以上の差を付けてはいけないといふやうな、やかましい事項が示方書に書き表はされて居ります。

ダムの一番中央に8呎の隙間(slot)を設けまして、其の隙間に冷却用配水本管を聯立せしめて其の本管から多數の小管を分枝せしめて居ります。

次にコンクリートの冷却の問題であります。實驗的の調査に依りますと、コンクリート 1 y<sup>3</sup> の容積のものを、1°F 冷却に要する熱量は、965 B. T. U. (British Thermal Unit) といふことになつて居りますが、B. T. U. といふのは、1ポンドの目方の水を 1°F 上昇させるに要する熱量でありまして C. G. S 單位のキロカロリーに、

図-3.



**NOTES**  
 Keys on Horizontal Construction Joints not shown  
 Keys to be spaced approximately 10 to 12 feet on  
 Center. Expansion Slit Joints and Slits on Circumferential  
 Joints not shown

3,968 を乗じた値であります。此のコンクリートの硬化熱は大氣の溫度から上昇することが、大体に於て平均 40°F となつて居りますから、コンクリートの 1 y<sup>3</sup> の硬化熱を大氣の溫度まで引下げるためには、先程申しました 965 B.T.U. に 40°F を乗じた 38,600 B.T.U. といふ數が出るのであります。此のダムのコンクリートの總体の容積は、3,325,000 y<sup>3</sup> でありますから、之に 38,600 B.T.U. を乗じたもの即ち 128,345,000,000 B.T.U. がダムのコンクリート總体から平均 40°F の溫度を冷却に依つて引き去る爲に要する總体の熱量といふことになるのであります。斯様なことが土臺になりまして 825 t のアンモニア瓦斯發生の冷却裝置が準備されて居ります。此の冷却裝置は 2,100 gal/min の水、即ち約 6 箇 (6 ft<sup>3</sup>/sec) の水を平均 40°F だけ引き下げる爲に絶えず循環せしめる能力を持つて居るのであります。冷却用の水はダムの中央から 1" o.d. (outside diameter) の鋼管に依つて、ダムの

表-1. 溫度, 除去溫度, 冷却期間

月	平均季節溫度	混凝土最高溫度	除去溫度	冷却月數
	°F	°F	°F	月
1 月	52.0	92.0	20.3	1.14
2 月	57.0	97.2	25.5	1.33
3 月	63.6	103.6	31.9	1.60
4 月	71.2	111.2	39.5	1.83
5 月	78.6	118.6	46.9	2.06
6 月	87.6	127.6	55.9	2.28
7 月	93.8	133.8	62.1	2.40
8 月	91.9	131.9	60.2	2.37
9 月	83.0	123.0	51.3	2.17
10 月	70.8	110.8	39.1	1.83
11 月	59.4	99.4	27.7	1.39
12 月	51.5	91.5	19.8	1.10
平均	71.7	111.7	40.0	1.79

の兩端まで水平に導かれまして、再びダムの中心の slot に戻つて、コンクリートに發生した硬化熱が完全に取去られるまで、絶えず循環することになつて居ります。

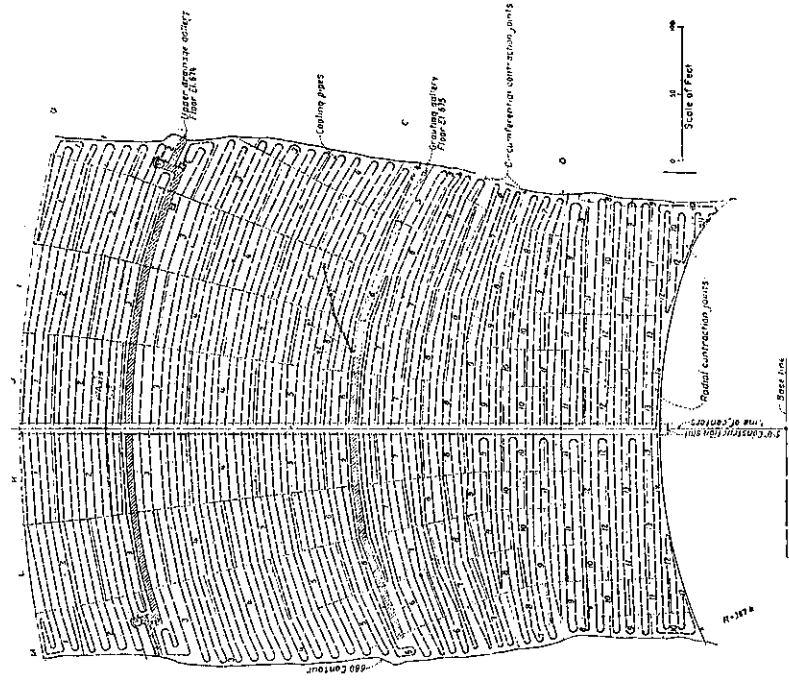
表-1 は、ボールダーダムの地點に於ける各月の平均溫度を示したものであります。次の行にはコンクリートの硬化熱のために上る最高溫度を示して居ります。其の次は、最高溫度から除却す

る熱を示して居ります。例へば眞夏の 7 月には大氣の平均溫度が、93.8°F になる、之に硬化熱の 40 度加はりまして、133.8°F といふことになります。それから、71.9°F といふ溫度を引去りまして、62.1°F に引き下げるといふことにしてありますが、さういふ場合には、7 月のやうな暑氣の嚴しい月には、2 箇月 4 分の期間だけ継続して冷却の水を循環せしめなければならないといふことが、標準として規定されまして其の通り實行されたのであります。

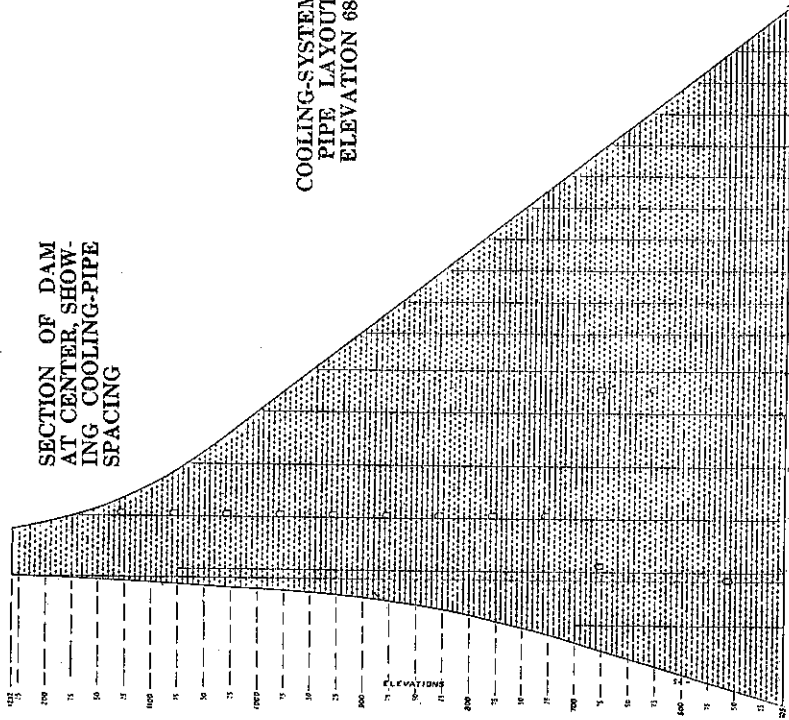
圖-4 は冷却に用ひました 1" o.d. のパイプを配置した横断面を現はしたものでありますが、最初は 2" o.d. ~ 2½" o.d. のパイプを上下左右に 10 呎間隔毎に配置する設計でありましたところが、其の後になりまして、1" o.d. のパイプを、上下左右 5 呎間隔に配置することに変更されました。圖-4 の左側は即ち設計変更をされました後に於ける 1" o.d. のパイプを配置した堰堤の横断面であります。

圖-4 の右側は堰堤をある高さ (El. +680) に於て水平に切つた平面図に冷却用パイプの配置を表はしたものでありますが、眞中に 8 呎のスロットがありまして、このスロット中に多數の配水本管が敷設せられまして、其の本管から分枝せられた無数の小管に依つて冷却水はダムの体内に導かれ兩岸取付箇所迄ぐるつと一廻りして、再びスロットに歸るやうになつて居ります。其の循環の方法は、逆方向にも送れることになつて居ります。パイプの

図-4.



SECTION OF DAM AT CENTER, SHOWING COOLING-PIPE SPACING



COOLING-SYSTEM PIPE LAYOUT, ELEVATION 680

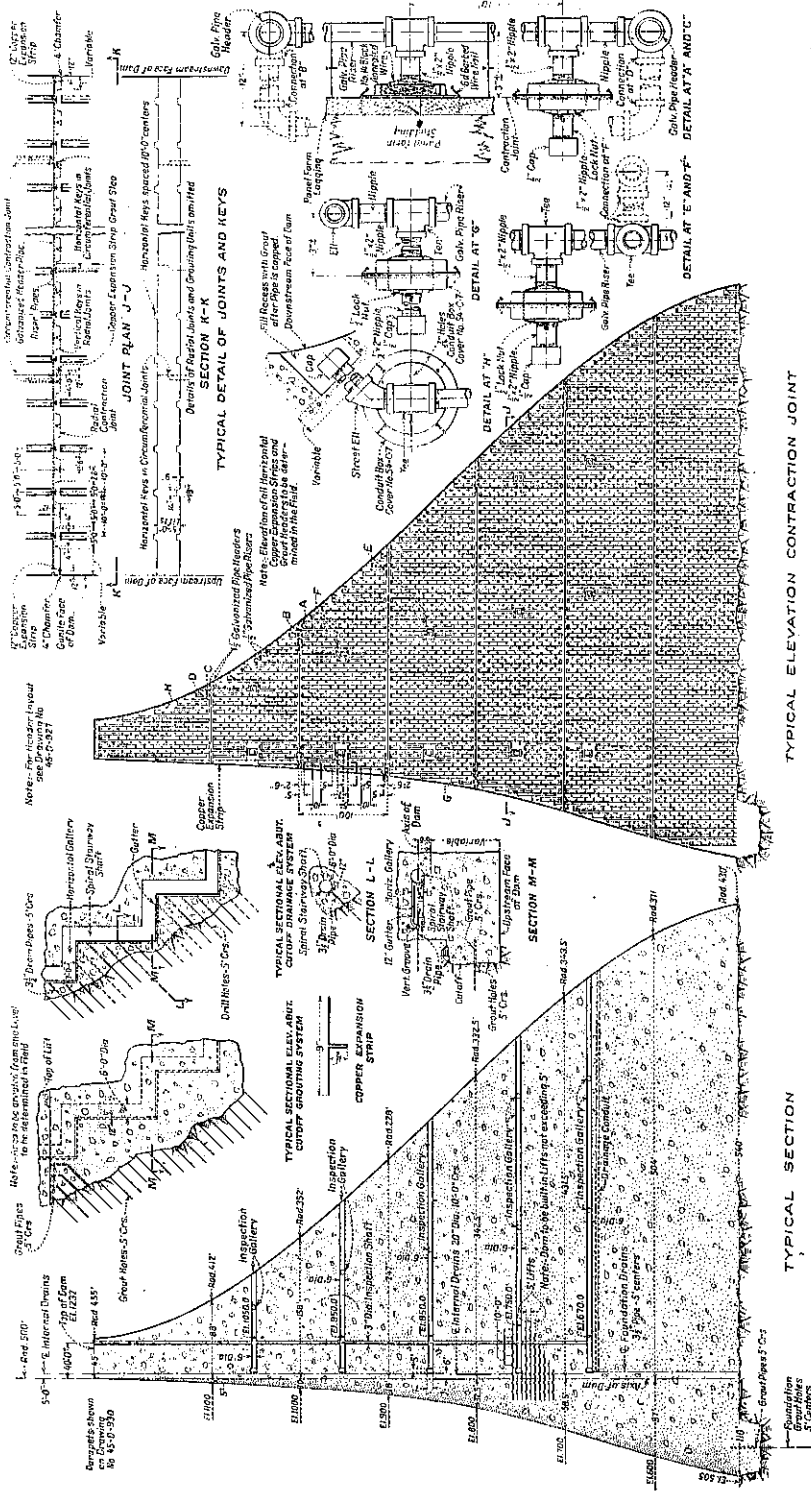
中を通します冷却水の速度は、2 ft/sec より早くしろ、又水圧は 100 lbs/ft<sup>2</sup> より大きくしてはいけないといふことが規定されて居ります。ダムの要所には resistance thermometer が 461 箇所備へてあります。是は遠方からコンクリートがどれ位冷却したかといふことを計る装置であります。此の冷却装置は diversion tunnel をコンクリートで閉塞した時も、矢張り同じやうな方法を用ひたのであります。

次は、グラウティングをどういふ風にしたかといふことに就て、お話申し上げます。只今のやうに、クーリングパイプでダムの体内に於ける硬化熱を冷却しますと、一旦セメントの硬化熱によつて膨脹した各ブロックが体積を縮少して各ブロックとブロックの間に、大体  $\frac{1}{10}$ " ~  $\frac{1.5}{10}$ " の隙間が生じて参ります。ダムの一番頂上では、ブロックがだんだん小さくなります關係から従て体積の縮少も減じて隙間は僅かに  $\frac{5}{100}$ " を生ずるといふことになつて居ります。其の隙間をどういふ具合にしてグラウトするかといふと、此所へ模型を持つて参りましたが（以下模型に就て説明）此の模型は圖-5 のダムの section の中一部を 1/8 のスケールで現はしたものであります。

此所に見えます縦に長方形に出て居りますが、パーティカルキーであります。之がブロックの端でありまして、こちらの方に 50 呎ブロックが接続して居ります。此の上はまだ 100 呎ブロックが接続して居ります。是は其の下の一部を現はしたものであります。此所に出てみます銀色に塗つてあります円盤型のものが conduit box と名づられるものであります。此の一つのブロックと次のブロックとの間に、溫度が冷却しますと、双方の体積の縮少に依つて隙間が生ずることになります。其の隙間に對しまして、この銀色に塗つてあるのは 1/2" (o. d.) のパイプであります。此のパイプから 100~500 lbs/ft<sup>2</sup> プレッシャーのグラウトを注ぎ込むのであります。此の conduit box と云ふのは鑄鉄皿状のもの 2 個から成り立つて外径で 2 1/2" ありまして一方の box はグラウトパイプに結合し他方は cover となつて居ります。そうして一つのコンクリートブロックに box を埋め込んで置いて其の向ふ側のブロックのコンクリートを打つ時に cover を被せて兩者を 20 w. g. の銅線で堅くしぱり付け兩者の隙間からコンクリートの汁や埃が這入らぬ様に致しました。cover 方には cap が捻ぢ込まれてこの cap が向ふ側のブロックに固着されます。やがて兩ブロックのコンクリートが硬化して冷却しますと box と cover とは各ブロックに引き付けられて、銅線が伸びて隙間を生ずる様になります。此の兩 block 間の對立した立ち上り面の 50' x 100' に生じた隙間の四周にはグラウトストップといふコッパープレートで圍繞しまして、そして、圧力のあるグラウトが外方に噴き出ることを防いで居ります。それから此所に黒色に塗つた black pipe がクーリングパイプであります。そうしてこの模型はコンクリートが全部詰つてしまつた所の模型でありますけれども、中をよく見透すことが出来るやうに中空に作りましてでありまして高さ 5 尺毎にコンクリートを打つて行きます境界に薄板を挿入して各段毎に仕切を設けたのであります。グラウトパイプと、それからクーリングパイプが、斯ういふ工合に、錯綜して中に入れ混ぜつて居ります。クーリングパイプで冷却して、体積を縮小して、そこに人工的にブロックとブロックの間に clack を生ぜしめて、其の clack の中に、conduit box でもつて、全部グラウトを萬遍なく行渡らせるといふ工法に依つて居ります。斯ういふやうな工法に依りまして、ボールダーダムのマスコンクリートに生ずる clack といふ問題を、完全に征服したのであります。ボールダーダムが出来まして以後、クラックが入つてゐるかどうかといふことを、細密に調べたのであります。clack らしいものは、真中の 8 呎スロットの上の方に、極く僅な hair clack が、8~9 呎間隔にダムの厚さの方向に現はれた以外には、全然生じてゐないといふことが、今日完全に證明されたのであります。従て dam body からは leakage といふものは、今日のところでは些少だも現はれて居りません。未だ完成しましてから日が浅いことでありまして、今後どういふ状態を現はすかも知れませんけれども、今日迄の過程を以て考へれば、clack の生ずる原因が、總べて cooling



図-5.



に依つて防がれ、dam body が縮小するだけは既に縮小し盡して居りますから、今後も crack は、全然生じないであらうといふことが確信せられて居ります。

斯ういふやうな、全然新しく工夫されました工法に依りまして、此のボールダーダムの、高さ720呎、下部の厚さ620呎といふ大きなマスコンクリートの中に、全然龜裂が生じないといふ工法に成功したのであります。此の工法は、現在盛に工事中であります。Grand Coulee Dam に於きましては、殆ど同じ工法に依つて、工事を進めて居ります。先づ今後も高い堰堤でありまして、マスコンクリートを必要とする場合には、斯ういふやうな考へ方による外には、之以上に宜い工法はないのではないかと思はれます。従ひまして、此の工法に依りまして、マスコンクリートの龜裂といふ問題が、全然解決されたやうに思はれます。此の新しく試みられ、之に依つて成功致しました此の工法を、私が實驗致しまして、茲に皆様にご紹介することが出来ましたことは、私の寔に光榮に存する所であります。御判りにくい點が多々あることと思ひますが、時間の關係もありますから私の講演は之を以て終りと致します。皆様の御静聽を感謝致します（拍手）。

本講演後次の様な質疑応答があつた。

問（眞島健三郎君） ブロックとブロックは、縦にも横にも、くっつけて打つてあるのですか。

答（小野基樹君） さうです。次のコンクリートは、直接くっつけて打つて居ります。其のために conduit box は、次に打つコンクリートの汁が入りますから、反対側に box cover を附けます。

問（眞島健三郎君） Conduit box は、コンクリートの方に引張られるのですか。

図-6.

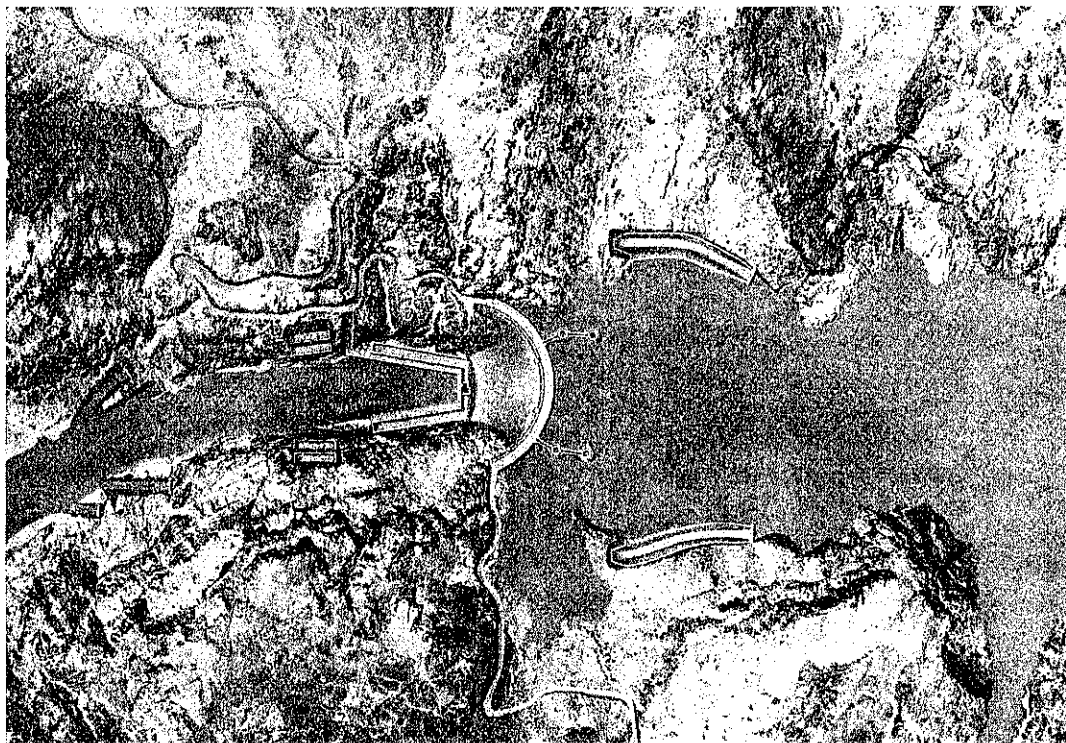
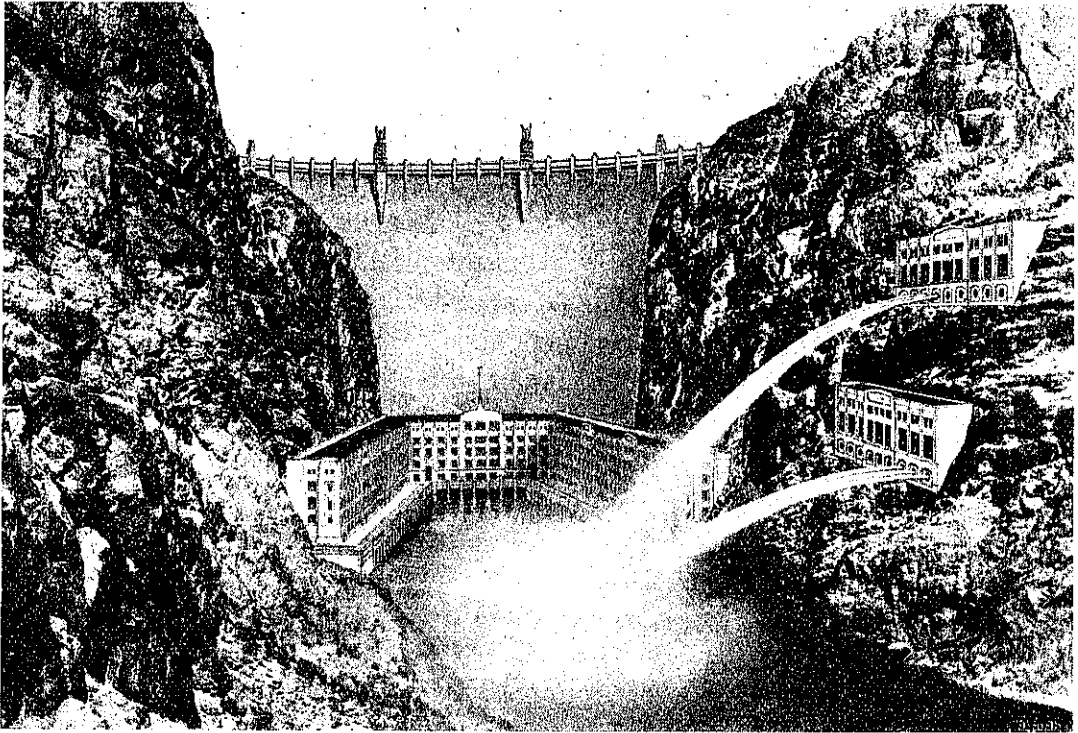


図-7.



答 (小野基樹君) 一方 box の方はグラウトパイプが捻ぢ込んでありましてこのパイプによつてコンクリートの中に固着せられて居りますし、他方 cover の方には cap と云ふ脚が附いて居つて、次のコンクリートに、がつしりと食ひ込んで居ります。

問 (眞島健三郎君) クーリングパイプは、コントラクションジョイントにかまはずに挿入して居るのですか。

答 (小野基樹君) コントラクションジョイントに當る個所には cooling pipe に expansion joint が設けられ cooling pipe が破れるのを防いで居ります。そうして双方の block が収縮しただけ cooling pipe がそこで伸びることが出来る様になつて居ります。

問 (眞島健三郎君) 此の前後つた時分には、バーチカルジョイントとの間には、8吋かのスペースも置いたといふお話を伺つたやうに記憶して居りますが、それはどんなものですか。

答 (小野基樹君) さういふ事は全然やつて居りません。

問 (眞島健三郎君) 眞中のスロットは、どの位の幅が置いてありますか。

答 (小野基樹君) 8 呎の幅があります。

問 (眞島健三郎君) それは天井まで突抜けて居るのですか。

答 (小野基樹君) 天井まで突抜けて居ります。下から順次にコンクリートを填充して居るのです。

問 (今泉茂松君) 先程ローヒートセメントの硬化温度のお話の所で、ローヒートセメントの硬化温度は、平均 32°F それから 60% のローヒートセメントに、40% のポर्टランドセメントを混ぜたものは 38°F 純粹のスタンダードセメントは 41°F といふお話がございましたが、其の外氣の温度と申しますか、それはどういふ温度

になつて居るのでございませうか。

答 (小野基樹君) それは極く一般的のことを、概括的な數字で申しましたのですが、外氣の溫度から是だけ上るといふことになります。

#### 會長の挨拶

一同を代表致しまして、私から簡単に御禮の御挨拶を申し上げます。小野君は先程も申上げましたやうに、土木學會並に堰堤委員會の代表としてアメリカに渡られまして、更に多くのダムを視察せられたのでありますが、本夕は御多忙の所を御差繰下さいまして、最も新しきマスコンクリートの施工方法に就て、詳細に又懇切に御講演下さいまして、吾々に取つて裨益する所が非常に多かつたのであります。又將來我國に於けるコンクリートの施工上に、幾多の効果を與へるものと信じて居る次第であります。一同を代表致しまして、深く御禮を申し上げます。茲に諸君と共に拍手を以て感謝の意を表したいと思ひます (拍手)。