

# 講 座

## コンクリート・ダム特論Ⅱ

### ダムの打上り及び冷却について

正員 藤田 博愛\*

#### 1. まえがき

ダムコンクリートが設計仮定を満足するためには、均一性及び一体性が必要条件であつて、一様に打上げられた所定断面で、水圧その他の外力に対して安定であり、且つ漏水に耐え得なければならない。

然るに施工上全面積及び全高のコンクリートを一度に打上ることは出来ないので、鉛直継手及びリフト制限による水平継手が必要となる。

又ダム完成後の気温変化によつて、コンクリートの表面近くには伸縮が起るから、普通のコンクリート構造物の伸縮継手と同様な意味で、堤軸線に直角な横断継手が適當間隔に必要となる。

尙コンクリートはセメントの水和作用によつて、内部的に温度を上昇して、これが徐々に冷却し長年月の間に容積を収縮するものである。従つてコンクリートの各部が一様に冷却して、容積変化が何等外界の拘束を受けなければ、ひびわれの原因とはならないが、コンクリートは割合に熱の不良導体であるから、表面と内部の冷却速度には著しい差異を生じ、この温度勾配によつて、表面にひびわれを発生することになる。又岩盤面とか打設後相当に時間を経過して、殆ど容積変化を起きない様になつたコンクリート上に打継がれたコンクリートは容積変化に応じて、基礎の拘束を受けひびわれを発生するに至るものである。このひびわれは前述の必要から横断継手を適當間隔に設けると、ほぼ堤軸線に平行方向に発生するもので、これは特別なものをおいて表面に現われるのが普通である。

然るにこの堤軸線に平行な縦断方向のひびわれはダムの三角形断面の一体性を損わしめて、設計仮定と根本的に異つた構造物とするのみならず、堤体主剪力の方向とほぼ一致する関係で最も好ましくないものである。又これは表面に現われないため、その処理方法がないのである。

従つて堤体コンクリートは施工その他の目的で、計画的に継手を設け、又必然的ひびわれのため、根本的に一体制を破壊されることになる。然るに計画的に

設けた継手に対しては、完全とは云えぬまでも処理の方法があるが、予知出来ない個所に不規則に発生するひびわれに対しては殆ど処理の方法がないから、ダムコンクリート施工の重点は如何にしてひびわれを少なくするかが問題であつて、これは結局コンクリートの熱処理を如何にするかに尽きるので、以下この点に最も影響のあるセメントの使用量、自然熱放散、人工冷却及びPre-Cooling等について述べる。

#### 2. セメントの使用量

コンクリートの内部温度上昇を抑制するには、第1に熱源であるセメントの使用量を少くすること及び低発熱性のセメントの使用が重要であるが、この点は大野氏が本講座のダムコンクリートの配合設計について執筆されるので、熱処理を目的としたセメント使用量の変遷について述べて見る。

セメントの節約の見地からは 1900 年頃より玉石コンクリート時代があつたが、熱問題を主眼としてセメント使用量を減じたのは、Arrowrock Dam(1912)で花崗岩の石粉(45%)とセメント(55% 223 kg/m<sup>3</sup>)、Elephant Butte Dam(1913)で砂岩の石粉(48%)とセメント(52% 179 kg/m<sup>3</sup>)を混合使用した。

その後 1930 年頃までのシートを使用する手掘施工のコンクリートでは、セメント使用量を 223~179 kg/m<sup>3</sup> 以下には出来なかつた。

然しクレーンを利用するバケット運搬及びバイブレーター締固めによる硬練コンクリート施工が発達し、セメント使用量は更に減少することが可能になつた。

その上 Hoover Dam 建設に当面して、熱問題が一層重要視され種々研究の結果、低熱セメントの製造に成功し、Morris Dam(1932)に試用して、1933 年から Hoover Dam(223 kg/m<sup>3</sup>)に採用、その優秀性を確認して、Parker, Marshall Ford, Hiwassee 等にこれを用いて施工した。

又 Norris, Grand Coulee, Ross 等には普通ボルトランドセメントと低熱セメントの中間的性質をもつ中備熱セメントが使用された。

斯くして混合材の使用は低発熱性セメントの出現に

\* 東京都水道局小河内貯水池建設事務所、技術課長

よつて、一時凋落の兆を示したが、1940年頃からボゾラン質の混合材使用が始まり、Friant Dam (1940~1943) ではピューミサイト (20%) を低熱セメント (<80% 179 kg/m<sup>3</sup>) に混合使用した。

然るに1938年に道路工事にAEコンクリートを始めて使用してから、AE材の使用は急速な発達を遂げ、マスコンクリートは前代未聞の大革命を來し、セメントの使用量は極度に減少出来る様になつた。

AEコンクリートをダムに使用したのは1946年Allatoona Dam が最初であつて、現在では殆どAE材を使用し、天然セメント又はボゾラン質の混合材を混合して、セメントの使用量は120~130 kg/m<sup>3</sup>程度の貧配合とするのが常識となつて來た。

今日施工中のBuggs Island Dam の如きはポルトランドセメント 102 kg/m<sup>3</sup>、天然セメント 38 kg/m<sup>3</sup>と云う超貧配合であり、又 Hungry Horse Dam はポルトランドセメント 112 kg/m<sup>3</sup>に fly ash 53 kg/m<sup>3</sup>を混合し、AE材を用いて施工している。

一方我国に於いては戦前II型程度のセメントが製造され、塚原及び水豊ダムに使用されたが、當時としては220~230 kg/m<sup>3</sup>位が精々であつた。唯有峰ダムはポルトランドセメント 180 kg/m<sup>3</sup>で我国貧配合の記録であつた。又現在施工中の平岡ダムはAE材を使用してポルトランドセメント 180 kg/m<sup>3</sup>で施工している程度にすぎない。

### 3. 継手間隔

マスコンクリートは長年に亘る容積変化のため、如何にしてもひびわれを完全に防止することが出来ないので、このひびわれを適當間隔に設ける継手に集中させて、この継手に対して耐水性及び一体性を考慮する必要がある。

コンクリートダムが施工された初期に於ては主として施工上又は表面に発生するひびわれ防止策として、横断継手が設けられた。米国では1910年頃の横断継手間隔は25~35 m位であつて、Arrowrock Dam (1911) の如きは45 m以上にもなつていたが、これ等は殆ど中間にひびわれを発生した。

1930年頃各國が既設ダムの継手間隔とひびわれの関係を調査研究した結果、ダムコンクリートの継手間隔は15 m以上にすべきでないと云う結論に達した。特に高さ200 m以上にも及ぶHoover Dam建設に際して、米国開拓局は種々なる実験研究の結果、横断継手のみでは満足出来ず、縦断継手も設けることとし15×15 mブロックとして柱状式工法を始めて採用して成功した。その後各國に於いてダムの継手間隔は15 mが常識となつた。

然し最近のAE材又はボゾラン質混合材の使用によるセメント使用量の減少、Pre-Cooling及びFirst Stage Coolingの発達は継手間隔の増大を可能ならしめ、十数年に亘つた15 m間隔時代を脱するに到つた。最近はコンクリートの発熱温度上昇とこれを抑制又は処理する方法を考慮して、継手間隔を適当に決定する傾向にある。

現在施工中のDetroit Dam の如きはPre-Coolingを強力に実施し、Pipe Coolingも一部併用して、100 mにも及ぶ堤巾を縦断継手なしで施工している。又 Hungry Horse Dam は Pipe Cooling の First Stage を行い、AE材及び Fly ash の使用によって、24×55 m ブロックで施工している。斯くの如く現在は継手間隔の増大即ちブロックの増大時代と云つても過言ではないであろう。

これはコンクリートの一体性の見地から当然のことである。特に縦断継手については殊更に強調したい處である。然しこのブロックの増大は1回に打設するコンクリートを必然的に増大するので、施工設備の能力と併せて考慮しなければならない。

尚継手間隔の決定には必要条件を満足する様に配合設計されたコンクリートの発熱上昇温度又はこれを適當な処理によつて抑制した終局の温度と、打設個所の最終安定温度との差が何度なりやが直接容積変化の原因となり、収縮応力に影響するので最も重要である。

### 4. 自然熱放散

コンクリートのリフト表面及び周囲の型枠面からの熱放散を一般に自然熱放散と云うが、型枠面からは発熱の盛んな時期に型枠で放散を抑制されるがら、主としてリフト表面からの放散を考えるのが普通である。

従つて普通のコンクリート工事においてリフトは型枠の強度、その他施工上の制限から自ら限度がある。然しマスコンクリートの場合には如何にして熱を有効に放散させるかが問題であつて、リフトの厚味及び曝露日数が自然熱放散に果す役割は大きいのである。

今この熱放散とは無関係にリフトの変遷を辿つて見ると、米国では1910~1930年代は1.5 mリフトを用いた処もあつたが、殆どが1.2 mリフトを採用していた。これがOwyhee Dam (1932) を最後として、1933年のHoover Damから1.5 mリフトになつた。然しこの間にAriel Dam (1931), Tygart Dam (1937冬のみ)等の如く3 mリフトを採用したものがあつたが、1.5 mリフトのものに比してひびわれが甚しかつたことは事實であつた。尚 Hiwassee Dam (1940) に至つて、1.5 mリフトは原則であるが、岩盤面及び30日以上曝露したコンクリート上に打継ぐ

ときは 0.75 m リフトを 4 層施工し、15 日以上曝露したコンクリート上に打継ぐときは 0.75 m リフト 2 層を施工して、温度勾配の緩和を計り、ひびわれ防止に努めた結果は良好であつたので、今日この方法が一般に採用されている。

今自然熱放散を理想的な状態でコンクリートを打継ぐとすれば、本誌 35-6 「堰堤コンクリートの自然熱放散及び人工冷却について」の図-2 を参考として見ると、1.5 m リフトで 9 日、0.75 m リフトで 7 日位が打継に適した曝露状態である。それは打継後の断熱温度上昇が 1.5 m リフトの 5 日、0.75 m リフトの 3 日における最高温度より上昇しない程度が良いのである。これはセメントの種類及び温度伝達率等に大きく影響するので一概に述べることは出来ない問題であるから、それぞれ計算によつて確認すべきである。

然し余り曝露日数のみに重点を置くと、施工能率を低下せしめるのみならず、上述の如く打継コンクリートのリフトを制限して、温度勾配を緩和せしめなければならなくなるから、これ等を充分考慮して慎重に決定すべきである。

又人工冷却をする場合は最終安定温度との差が問題であるが、温度差の大なるときの 1~2°C は冷却日数にそれ程影響なし、人工冷却はコンクリート打設と無関係に出来る点等も考慮して計画すべきである。

尚米国で良く云われる 1 ft 1 day の打設速度は 1.5 m リフトで曝露日数を 5 日とすることであるが、これは上昇温度、発熱速度及び温度伝達率により影響を受けるから、鵜呑みにすべきでない。唯理想的状態に於ける最少の曝露日数であることを注意して置く。

## 5. 人工冷却

自然熱放散に対して人為的にコンクリート内部の熱放散を促進することを人工冷却と云う。これには一般に Slot 工法と Pipe Cooling とがあつて、前者は主として欧洲で発達し、後者は米国で発達したものである。

Slot 工法 この方法はダムコンクリートの熱処理を目的として、1920 年頃 Stacky 氏によつて提案されたもので、人工的にコンクリートの熱を放散せしめんとした最初の工法である。

これはダムのブロックの間に slot を設け、リフト表面のみでなく側面からも熱の放散を促し、自然熱放散を効果的ならしめんとしたもので、この slot は予定温度まで冷却した後コンクリートで填充するのである。

この工法を採用して施工したのはスイスの La Joyne Dam が最初で、ブロックの巾 20 m, slot 巾

1 m として、約 2 ヶ月間でコンクリートを填充したが、曝露期間が不充分なため、コンクリート填充後ひびわれが発生して、目的を完全に果すことが出来なかつた。その後 Grimsel (スイス)、Bromne (仏)、Ceresole (伊) 等が欧洲で施工せられ、又この工法が米国に渡つて Water Ville, Ariel 等が施工された。

この工法は曝露時間を幾何にするかが重点であつて、La Joyne Dam は 2 ヶ月で、Grimsel Dam は 2 年も曝露しているが、リフト表面からの自然熱放散の場合と同様に考えて計算して見れば明瞭なる如く、短時日で冷却出来ないのみならず、表面と内部の冷却速度が著しく違うから、温度勾配を緩和するため Pipe Cooling を併用するのが望ましい。又 slot の間隔は今日までの例では 1~2.5 m 程度であるが、填充コンクリートの収縮を考えると極力小さくすべきである。

この工法は今までアーチ式又はアーチ重力式に採用したのは填充コンクリートの収縮並びに熱放散の不完全に因るひびわれが予知されるから、アーチ作用で安全度を期したものと思われる。従つて人工冷却の初期の工法としては致し方ないが、この工法のみでは不徹底の嫌いがある。尙この工法で最も注意すべき点は各ブロックが単独で相当の高さに打設されるので、洪水のダムサイト流過は非常に危険であるから、排水施設を完全排水方式とすることを忘れてはならない。

Hoover Dam 建設計画の初期には温度調節にこの工法を採用し、slot には冷却空気を送り、コンクリート温度と表面温度との差を大ならしめて、冷却速度を促進せしめる様に考えたが実施には到らなかつた。

Pipe Cooling 埋設管による冷却はリフト毎に一定間隔でコンクリート中に鋼管を埋設し、その中に冷水を通して、コンクリートの温度を低下せしめて、収縮を促進させる方法で、その発達の起源は 1930 年米国開拓局が Ariel Dam のブロックに試験的に採用したのが最初であつて、その結果コンクリートに何等悪影響を及ぼさないことが明かとなつたので、Owyhee Dam で大々的に実験して、数学的計算の正確性を確認し、Hoover Dam 建設に本格的に採り入れ成功したものである。

Hoover Dam の Pipe Cooling は低熱セメントの使用により熱源を抑え、Pipe Cooling によりコンクリートを一様に最終安定温度まで冷却して、15×15 m のブロック割をして容積変化に伴うひびわれを縦手に集中し、最後にこの縦手にグラウチングを施工すると云う、熱処理の目的を徹底的に一貫した所謂柱状工法を案出した点に特に重大な意義があるのである。その後はこの工法を以て世界的 Grand Coulee Dam

及び Shasta Dam を完成した。

当時の Pipe Cooling は通水開始がコンクリート打設後相当日数を経て、コンクリートの温度上昇が大体完了してから行われたが、ドイツの Hohenwarte ではコンクリートの打設直後に自然水で冷却を開始し、約2週間継続して、コンクリートの最高温度をある程度抑制し、その後適当な期間を置いて仕上げの冷却を行い、所定の最終安定温度まで冷却した。一般に打設直後の冷却を First Stage Cooling と云い、次のを Second Stage Cooling と云つている。

その後米国でも Friant, Seminoe からは Pipe Cooling を行う場合は two stage cooling を採用する様になり、現在施工中の Hungry Horse Dam もこれを用いている。尚 Friant Dam 以後岩盤附近又は日数を経過したコンクリート上に打設する場合の様に基盤の拘束を考慮される部分には埋設管の間隔を密にして、Cooling の能率を良くし、温度上昇を徹底的に調節する方法が考えられる様になつた。

その外この方法は理想的に温度調節が出来るので、Pre-Cooling の不備を補う目的とか、局部的に必要な場所に採用され、温度調節上主要な役割を果している。

### 6. Pre-Cooling

打設時のコンクリート温度は大体その時の気温に近いものであるが、夏季などは太陽の直射による副射熱のため、骨材は気温より相當に高温になるし、セメントも焼きたてのものが工場から直送されて直ちに使用しなければならぬ場合等には打設時のコンクリート温度は気温より遙かに高温となるものである。

この場合セメントの水和作用による発熱と相俟つて、コンクリートの最高温度が非常に高くなる傾向は必然であつて、ひびわれ発生を著しくするため、この打設時温度を低くすることが重要なひびわれ防止策の1つである。この目的で練混ぜ前にコンクリートの成分を人工的に冷却するのが所謂 Pre-Cooling である。

米国 TVA の Hiwassee Dam (1940) においては骨材に冷水を撒布し、圧搾空気を吹付けて、蒸発熱により骨材の温度を下げ、混合水も冷却して使用した。これがダム工事に Pre-Cooling を実施した最初のものと思う。

我国においても有峰ダム (1938) で石井頴一郎博士が Pre-Cooling を考慮された様に 土木学会誌 24-5 に出てるが、遂に実施されなかつたと聞いている。

又 Friant Dam (1943) では夏季 6~9月のコンクリート温度を 70°F 以下に保つため、Hiwassee Dam

と同様な方法を採用し、混合水には氷片を入れて施工した。その後 1943 年テキサス州の Dennision Dam から近代的 Pre-Cooling が実施される様になつた。

これを契機として Pre-Cooling は多くのダム建設に採用される様になつたが、特に米国陸軍工兵隊はこの方法を盛に用い、今日も広く採用されている。

Pre-Cooling はコンクリートの大部分を占める粗骨材を冷却するのが最も有効であつて、次いで細骨材及び混合水の冷却、氷片の混入等で、セメントの冷却は相当に困難であるから余り実施していない様である。

実施に当つて混合水の冷却、氷片の混入等は最も容易であるが、コンクリートの温度を 2~3°C 降下せしめ得るに過ぎない。粗骨材の冷却には空冷式と水冷式があるが、水冷式の場合には骨材表面の附着水を考慮して、混合水を加減する必要がある。砂の冷却には空冷式、水冷式、Pipe Cooling 式及びコンベイサー式等がある。又セメントの冷却には Detroit Dam で Water jacket screw conveyor に冷水を循環させて冷却すると云うが詳細は解らない。唯前記の様に焼きたてのものを直ちに使用しない様にセメントサイロを2基以上準備して使用する様にすれば多少ともこの点を是正し得ると思う。

今米国に於ける実例によると打設時コンクリートの温度を夫々次の様に示方している。Bull Shoals 40~65°F, Narrow Rock 60°F, Mac Nary 55°F, Bugg Island 40~62°F, Davis 80°F, Detroit 50°F, Harlan County 50~65°F, Philpott 40~62°F, Chark Hill 50~60°F, Fort Gibson 40~50°F 等であつて、これ等の示方温度は夫々の土地の気温及び許容最高温度によつて異なるものであるが、Steel 氏はコンクリートの最高温度と最終安定温度の差が 25~30°F 以下であるならば、杞憂する程のひびわれの原因とはならないであろうと云つている。

### 7. 結 言

以上マスコンクリートのひびわれ防止を目的とした温度調節法の近代的傾向を概述したが、あくまでこれは一般論であつて、目的は同一であつても夫々違つた意味のものであり、又夫々のダムの固有条件によつても異つて来るものである。

即ちセメント使用量もダムの高さによつて、所定の強度に対して適当な配合設計がなされるものである。又縦手間隔もセメントの種類及び使用量、ダムサイトの気温、混合材の有無及び性質、Pre-Cooling 及び Pipe Cooling の採否等によつて、夫々異なるものである。

尚 Pipe Cooling はコンクリートの温度調節を徹

底的に施工する点からは、最も有効であるが、Pre-Coolingと併用すると更に有利である。然し夏季に於ける Pre-Cooling の効果も絶対に見逃せないものである。

結局ダムの設計に當つて、ダムサイトの気温関係地理的条件、ダムの型式及び経済的条件を充分考慮して、施工設備の容量とも睨み合せて、ひびわれ防止策を計画に取入れるべきである。

尙我が國のダム技術の現状を把握して、先進国の工法を充分研究し、模倣するにしてもその工法の因つて来たる所以を理解してから採用すべきである。今日迄もその好例はあるが、単なる模倣であつて、最も重要な要素が1つでも欠陥していたとすれば、目的である温度調節即ちひびわれ防止が不完全になるのみならず

その工法を採用したが故に却つて不安定な構造物を築造することになるのである。

最後に一言して置きたいことは現在我國のダム現場の実情から考えて、本問題を取上げるまでに施工設備を完備して、計画された性質を充分満足する様な良質のコンクリート打設に留意して戴きたいものである。又計画の面では夫々有数な技術者が関与され、万々遺憾ないものとは思うが、直接施工を担当している方々が設計者の意のある処を充分理解して、設計と施工が一貫した軌道に乗つたときに初めて我が國ダム技術の進歩が現われるものと信ずるものである。

以上まとまらぬことではあるが、ダムの設計及び施工を担当される諸賢の参考ともなれば幸いである。

(1951.9.28)

#### (46頁より)

んだ櫓上より3台の懸吊ジャッキにより吊上げ所定の位置に運搬し、吊下す工法による。又井筒の沈下法としては東京方は荷重沈下、神戸方では送気式沈下法を試みることになっている。

写真-1



写真-2



#### 土木学会中国・四国支部学術講演会について

中国四国支部では去る10月21(月)、22(日)の両日、広島大学物理学教室に於て学術講演会を開催したが、その題目は次の通りであつた(記事参照)。

##### (研究発表)

##### 曲梁の剪断応力度及半径方向の応力度に

対する新公式：徳島大学 大野 謙

軌条接続について：広 鉄 馬越 道也

軌条に作用する総荷重について：

山口大学 最上 幸夫

捲立なき円形隧道の変位：広島大学 小田 英一

広島市内物理波調査と試錐における

実験的研究の考察：地下工研 川本 武司

滲透水圧を受ける法面の安定：徳島大学 久保田敬一

土木工事の計画と工程管理について：

広島県土木部 河村 繁

広島のデルタの土質について：広島大学 河内 清彦

旭川合同用水工事報告について：

中四地建 川上 賢二

ゲルバー桁橋スパン割の合理化について：

山口大学 川上 輝夫

エキスカーベーターによる掘削抵抗について：

四国機械 三島 康生

河川堤防の高さについて：徳島大学 久宝 保

中国地方各河川砂利の篩分について：

広 鉄 佐藤 光正

土粒子の真比重測定について：広島大学 細川 寿夫

円筒内の応力図のスケッチ法：徳島大学 青木 康夫

潮位差を利用するケーソン製造工法について：

第三港建 下田 保

水中電気切断と熔接の現状について：

第三港建 田中 次郎

軟弱地盤の沈下について(特別講演)：

九州大学 松尾 春雄

コンクリートの話(特別講演)：京都大学 近藤 泰夫

アメリカ視察談(特別講演)：東京大学 最上 武雄