

講 演

第 20 卷 第 12 號 昭和 9 年 12 月

重 力 堰 堤 管 見

(昭和 9 年 10 月 28 日土木學會創立 20 周年記念講演會に於て)

會 員 工 學 士 藤 井 雄 之 助*

Some Private Opinions on the Gravity Dam

By Yunosuke Hudiwi, C. E., Member.

内 容 梗 概

設計施工の實情より現在のコンクリート造重力堰堤工事を批判し、これが安全性の確保と合理的且經濟的の爲には斷面の増大と混合セメントの使用とを考慮すべき事を述べた。

晩近我邦水力電氣事業の發達に伴つて、堰堤の築造せらるゝもの多く、基礎岩盤上高 60 m 以上の高堰堤は庄川筋小牧、祖山兩堰堤及び朝鮮赴戰江堰堤の 3 を數へ、尙目下工事中或は計畫中に屬するものを加ふれば其の數 10 指を屈するも尙足らずとする。

これ等は何れもコンクリート造重力堰堤であつて、最近米國邊で高堰堤に種々の新型式を採用する傾向もないでもないが、先づ茲暫く否恐らく永久に、この安定度の批判の割合に簡單な、工事自體も比較的 simple な、又部分的の小故障が直ちに堰堤全體の安定度を脅かすといふ様な事の少い此の型式は、最も信頼し得るものとして繼續採用されるものと信ずる。

この種工事の設計施工に携つてゐる技術者として茲に一、二所感を述べて大方の御叱正を乞ひたいと思ふ。

重力堰堤の設計に際して考へる附加力即ち水壓及び自重以外の外力のうち最も重要なものは揚壓力である。

前世紀末 H'abra 及び Bonzey 兩堰堤の破壊により佛人 Lévy がこの揚壓力の存在に着目して、彼の著名な基本斷面を定めて以來、何れの重力堰堤でもこの揚壓力の輕減設備を考へ、又大なり小なり揚壓力を外力として加へて設計してゐる。伊太利に於ては高さ 25 m 迄の堰堤は基礎岩盤の性質如何により 0~100%、50 m 迄は 50~100%、75 m 迄は 67~100%、75 m 以上の高堰堤又は特に重要な堰堤は基礎岩盤の性質如何を問はず 100% の揚壓力係數を採るべく規定されてゐる。

重力堰堤の斷面決定に際して最も苦心するのは此の揚壓力係數の採り方である。經濟上成可く小さな斷面としたいといふ苦心と正體不明な此の揚壓力に對する不安と錯綜して技術者を悩ませる。實際揚壓力係數の假定如何が斷面の大きさを左右することは著しいものであつて、例へば比重 2.4 の材料で築造される重力堰堤の基本三角形斷面の頂角の tangent 即ち底幅の高さに對する比は、揚壓力係數を 0 から考へ得べき最大限 100% に増大することによつて 64.5% から 84.5% に増大する、即ちコンクリート容積を約 3 割近く増大する。之を地震力の影響に比較するに、満水時の震度 0 からこれを普通吾邦山間の堰堤設計に考へる震度 0.15 に増大することにより底幅の高さに對する比が前記の 64.5% から 72.5% に増大、即ちコンクリート容積を約 1 割 2 分増大するのに較べて見て揚壓力係數假定の經濟的重要性が知られる。

又一方考ふるに揚壓力は其の性質上滲水と同時に作用する可能性がある。と共に一度これが作用すれば滲水位

* 日本電力株式會社技師

其の他に依り其の大きさに變化はあるとしてもこれが決して消滅することはあり得ない、堰堤として即ち貯水を擁して立つてゐる以上永劫にこの作用が繼續する。この點一時的又は瞬間的にしか作用しない水壓、地震力、地震に伴ふ他の外力の増加或は一體何年後に假定の高さ迄來るか分らない堆積土砂の土壓等に比して技術的重要性も知られる。

上流堤踵部に遮水溝のない獨逸 Oester, Lister 及び Möhne の 3 堰堤に於ては基礎に排列した排水管の水壓測定により上流面附近に於ては略 100%, 下流に向ふに従つて略直線的に漸減する揚壓力の存在を實證した。遮水溝のある米國 Willwood 堰堤では遮水溝下流端で 60~70%, 更に遮水溝に注膠工を施した American falls 堰堤では遮水溝下流端で約 30% の揚壓力の存在を知つた。

單にこれ等丈の例を以てすれば、遮水溝、注膠工、排水管等の施設は、揚壓力の輕減に確實に有效である様に見える。然し地質の如何又施工の如何等個々の條件に總ての状態が支配される堰堤工事に於て、これ等の揚壓力輕減設備を完備する設計(完備した施工とはいはない)其の設計をなすの故を以て、揚壓力係数を 30% 或は 50% とし充分安全なるものとする論者があつたらこれは餘りにこれ等の設備の有効性を盲信するものといはなければならぬ。

これは單に基礎に於てのみではない。堰堤の全高に互つて數十箇所にも餘るべき水平の打繼面では如何。打繼面は充分疵付、清掃し濕潤ならしめ又膠泥を流して充分なる施工をなしたとて、これが全く一體に密着したと信ずる技術者ありや否や、もし何等かの原因により、打繼面に水壓ある水の侵入した場合、もし不幸にして上流面に於て 100% 近い揚壓力を生じ、これが下流に向つて直線的に漸減せずとも其の減り方が距離に對して直線的より大であらうとも、もし全面に互つて揚壓力を生じた場合、直ちに上流端に張力を生じ——勿論上流端に 100% 近い揚壓力を生ずるが如き打繼面では些少たりとも耐張力は望めない——打繼面は上流より開口し更に大なる揚壓力を全面に生じさせる虞はないか。揚壓力係数を 30~50% 程度に假定した斷面で充分安全なる施工をなし得ると自信を有する技術者ありや否や。

茲に幸なる事には我邦に於ては揚壓力に次で斷面の大きさに影響を及ぼすこと大なる地震力を計算に入れる。又河川の性質上堆積土砂を充分高く假定し、中には堰堤附近でさへこの高さに堆積するものならば一體目的とする貯水量は如何になるのかと疑問を生ずる位迄高く假定し、而も地震時の土壓を考へる外、斷面に些細な影響を及ぼすに過ぎない雜附加力を考へる。斯くて揚壓力係數 30~50%, 満水時震度 0.15, 堆積土砂の土壓其の他の雜附加力を加へ、更に空虛時上流に向ふ地震力震度某を假定して、基本三角形斷面の頂角の tangent 大約 85~90% 位を得る。これは幸にして他の附加力を考慮せぬ場合揚壓力係數を 100% に假定した斷面に匹敵してゐるのである。

要するに作用する可能性の比較的薄弱な且斷面の大きさに比較的影響の少ない雜附加力を細大洩さず充分な假定をとり乍ら、泄水直後から永劫に作用する可能性あり、且 100% に作用すべしと言ふもこれを否定するに亦證據なき揚壓力を徒に小に假定し、この取引の不安を漸く他の附加力の假定以下の存在で cover して貰つてゐるといふのが實狀だと言ひ度い。

勿論既述の事は各外力の合成力が底面の middle third に存在すべしといふ原則を確守する場合の數字であつて、獨逸邊で論ずる如く上流面に或程度の張力の存在を許すとか下流面の應力が或制限以上にならねばよいかといふ場合の事は論外である。

而して上述の様に 85~90% なる tangent を持つ基本三角形斷面を得て滑動に對する安定度を check すると、摩摺係數 0.7~0.8 程度となる。これ亦正體知れぬ此の數字が妥當なりや否や經驗淺い吾々を惱ませる。出来るな

らばこの様な得體の知れぬ数字は小さく出したい。然し經濟上斷面を大きくする事は苦痛だ。先づ基礎の根入れを充分深くし、且底を鋸齒状にしてども幾分なりと滑動に對し安定度を増さうといふ處で自己の技術的良心を納得させてゐる。

然らば一方に於て重力堰堤を構成する材料コンクリートの性質は如何、最近に於けるセメントの品質主として強度の進歩、コンクリート學說の發達及び施工法の改善等によりコンクリート強度の増大著しきものがある。桁、柱等コンクリートの強度を主たる目的とする構造物に於てはこの強度の増大により經濟的に又技術的に有利なる設計をなし得るに至つた。然し重力堰堤として使用するコンクリートは單に強度のみでない、其の字の示す通り重量、又性質上當然耐水性耐久性を必要としてゐるのである。著しく高き堰堤例へば米國 Hoover 堰堤等に於ては勿論この強度は重大なる要素とならう。然し普通吾々の取扱ふ程度の堰堤例へば高 80 m 程度では堤趾に於ける應力は僅かに 25 kg/cm^2 以下、50 m 程度では 15 kg/cm^2 以下である。現在のコンクリートの有する強度から言へば其の安全率が如何に大なるものか自明である。

勿論重力堰堤としても強度の大なるものはこれを越す事なく、如何に強くとも強過ぎると言はない。然しこれに伴つて重力堰堤として不都合を生じなかつたかどうか。これは大いに議論すべき必要がある。

數年來に於けるセメント業者の競争は手取早く數字に表れる早期強度の増大に向けられた。従つて施工後遅きは數箇年至つて漸く所期の應力を生ずる重力堰堤に對して、著しく大なる早期強度を與へた點は尙恕すべしとするも、茲にセメントの硬化に際して甚大なる熱量を發生し重力堰堤内部に於ける溫度上昇は驚くべきものあるに至つた。庄川筋小牧堰堤に於ける此の溫度上昇は攝氏 30° と記録され、歐米各國に於けるこの種測定記録も亦攝氏 20° 乃至高きは 40° に達する溫度上昇を示してゐる。夏期大氣溫度 25° の折に施工せらるゝコンクリートが 50° 以上或は 60° にも熱せられる事實、従つて數箇月又は數箇年にこれが冷却するに際し如何なる現象を惹起するだらうか。重力堰堤として好ましからざる伸縮縫手の開口、堤體表面或は内部に於ける龜裂の發生の原因となる事實は否み難い。斯界に於て論議される重力堰堤の變形 (deformation) の内、堤體及び基礎岩盤の elastic 及び plastic deformation を除けばこの内部溫度の變化に基因する deformation は最も重大なる要素であつて、漏水、透水又従つてコンクリートの deterioration の原因をなす諸現象を惹起するものとして重力堰堤の安全性を確保する爲には技術者の見逃すべからざるものである。

多少奇矯な言を弄する傾向があるかも知れないが最近のコンクリート造重力堰堤は不必要な早期強度と有害な高熱を發生する所謂進歩せるセメントを用ひ、工事の困難工費の膨脹を忍んで施工法の改善をなし、著しく大なる強度と同時に漏水透水等の誘因を藏するコンクリートを施工しつゝ、一面に於ては現在の設計及び施工法にては 100% に存在すといふもこれを否定し得べき具體的根據のない揚壓力を切下げて斷面の縮少を計つて自ら顛倒滑動に對する安定度を切下げて居ると言ふべきである。

歴史に徴するに、重力堰堤の全體的又は部分的破壊の總數 67 の内、原因不明の 9 を除き遮水溝の不完全より基礎透水を惹起して滑動したもの 21、重力堰堤として斷面不足なりしもの 8、masonry の施工不完全なりしもの 8 を最多とし、構築材料の貧弱即ち材料の強度が小に過ぎて破壊せるものは絶無である。堰堤の高さが次第に高くなりつゝあるとはいふものゝ最近のコンクリート強度を思ひ合すれば、恐らく將來と雖も強度不足を原因とする破壊は起らないのではあるまいか。遮水溝の不完全より基礎透水を起して滑動せるもの及び斷面不足で顛倒せるもの合計 29、正に原因判明せる破壊 58 の半數は何れも既述揚壓力の問題、斷面の大きさの問題と密接なる關係を有する事は論ずる迄もない事だ、これに對して、材料の強度不足を原因とせるものなしといふ事實は最近の重力堰

堤の設計施工に對し雄辯なる抗議を提出して居るのである。

斯く論をなすも決して現在の堰堤工事に對してセメントの配合を更に貧弱にし又施工法も疎かにしてよいと言ふのでない。蓋し強度は多々益々辯ずべくまた重力堰堤としてのコンクリートはまだ耐水性耐久性等の重要な役目を有してゐるからである。

然らば重力堰堤安定度の改善法如何、

先づ第 1 に断面の再検討、材料特にセメントの研究及び施工法の改良を必要とする。

断面の再検討、即ち重力堰堤は重量によつて他の外力に對抗するもので決して桁等の如く材料の強度を以て安定度を確保するものでないといふ事の再認識である。遮水溝の根入れ、注膠工及び排水設備等の施設が揚壓力の軽減に如何なる程度、如何なる永久性を以て有効であるか、堰堤基礎及び各水平面に於ける揚壓力の正體を掴むべく研究が必要である。

これが如何なる個々の條件の下に於ても數字的に明かにされる時代が來なければ、之れ等の設備は宛もコンクリート強度が應力に對して數倍否 10 數倍の安全率を有するが如き意味に於て揚壓力の假定に對する安全瓣として、即ち顛倒滑動に對する安定度の餘裕としたい。そして揚壓力係数は可及的大に出來得べくんば 100% とりたい。そして其の上に妥當なる他の附加力を加へて考慮したい。但し他の附加力が全部同時に作用するが如き可能性は揚壓力が 100% に作用すべき可能性よりも更に稀薄なものなる事に留意を要する。

斯く假定する事により重力堰堤の断面は現在普通行はれてゐるものに比して恐らく 10~20% 増大するであらう。

即ち比重 2.4、揚壓力 100%、震度 0.15 と假定すれば基本断面の頂角の tangent は 98.5% となり、これに空處時震度とか他の雜附加力を加算すれば更に數%之れが増加する。

この断面増加は顛倒滑動に對し安定度を増すと共に上下流面のコンクリートの deterioration による安定度の危惧に對しても對抗して呉れる。

勿論施工法も更に研究すべきである。基礎注膠工の研究、伸縮継手の位置、之れが防水方法、透水を防ぐべきコンクリートの施工、毛細龜裂の原因となる温度上昇を制限する方法、特に夏期に於ける注意、打繼面の密着方法等は一段の改善を要する。特に施工法理論の進歩に現場の施工を追隨せしむる事が緊要である。

これと共にセメントの特殊研究を要求する。現在のセメントは何も重力堰堤のみを目標として進歩したものでない事に注意すべきである。折角進歩した強度は何もこれを復古する必要もない、寧ろ高堰堤には望ましい。然し少くとも早期強度は必要性を缺いてゐる。これ位は多少犠牲にしても、硬化に際する化學熱を減少させて望ましからざる諸現象の原因を消滅させたい。又現在のセメントが數 10 m 以上の水壓に對して耐水性であるかどうか。透水性は如何、透水による侵蝕、此の例も渺しとせぬが、この事があつてはならぬ。

最近我邦に於てもこれ等内部温度、耐水性等に關聯して重力堰堤用特殊セメントに關する研究勃興し、大堰堤國際委員會日本國內委員會内に専門委員會を設置せられ既に數種の研究發表あり、又或セメント製造會社よりは特に mass コンクリート用特殊セメントの發賣を見て居る。誠に斯界の爲に慶賀すべき事である。

米國 Hoover 堰堤、Pine canyon 堰堤に於ける特殊セメントの研究製造、又瑞典に於ける Wasserbauzement の製造等何れも皆同様の目的を持つて居るのである。

昨夏 8 月完成した諾威 Gronvollfoss 堰堤に於ては堰堤工事場に mill を据付け、セメント工場より klinker を購入し slag と混和粉砕して所期の耐水性、低熱性あり亦強度に於ても申分なき一種の混合セメントを製造使用

し成功を収めたといふ事は吾々に深い興味を與へるものであつて、即ち現在のポルトランド・セメントとは又異なる性質の特殊セメントの出現亦大に歓迎する處であるが、一方更に各堰堤工事特に多量のセメントを要する工事場に於て市場統制其の他の條件から free だらうと思ふ klinker, 山間不便な堰堤工事に於て運搬、貯藏等あらゆる取扱がセメントより樂な此の klinker を以て適當なる個々の目的に適當なる混合セメントを市販セメントよりも廉價に得る事が出来るならば、そして不合理に高價な市販セメントを使用して不適當なるコンクリートを造るよりも經濟的に工費を節約し得るならば、重力堰堤界に一光明を見出し得るであらう。

即ち重力堰堤の斷面を現在より更に増大して設計に際して技術者の抱く不安を除却し、顛倒滑動に對する安全性の増加、内部温度に關聯する各種問題の解消、耐水性耐久性の改善、妥當なる強度の確保、而も工費の節約、斯て經濟的又技術的に重力堰堤の各種安定條件が渾然として融和し眞に完全なる重力堰堤を出現せしめ得る事と思ふ。淺學にて無經驗なる此の技術者は斯く重力堰堤の斷面増大と、混合セメントの使用による合理的經濟的工事を夢想してゐるのであります。