

土堰堤による河川の仮締切りとその越流

文献調査委員会 工 藤 正*

1. ま え が き

ダムの建設工事をはじめとして、河川工事を行なう場合に、近くの材料で比較的手軽に築造可能であることから、土堰堤によって河川の仮締切を行なうことが多くある。もし、工事期間中の洪水によってこの仮締切堤が越流するようなことがあれば、土堰堤としての弱点から全面的な決壊を余儀なくされ、本工事に対する大きな影響を及ぼすのみならず、工事全体の建設費の増加をせまられることにもなる。

この土堰堤による仮締切については、仮設構造物であることなどのために、まとまった報告は少なく、過去の経験にたよっている場合が多い。本文は、この土堰堤による仮締切に関して、その施工方法、越流を受けたときの安定、のり面保護の実例の三点をとりあげ、文献の紹介を兼ねて解説を行なったものである。

2. 仮締切堤の施工

土堰堤によって河川を締切するには、a) 流水中に船や「はしけ」などを浮かべ、これより土砂やロックなどを投下する方法、b) 河川の両岸よりダンプトラックおよびブルドーザーなどで堰堤を築いていく方法、の2つの方法が考えられる。前者は流速の小さい河川に適し大河川に多いのに比し、わが国のような流速の大きな中小河川の多い所では後者によるものが多い。

(1) 流水中に投下する方法^{1)~5)}

これはアスワンハイダムの建設などに使用された方法で、水面から土砂やロックを投下して積みあげてゆき、河川を締め切るものであるが、流速が大きくなるとそれに抵抗できるだけの粒径や材料の重量が必要とされる。材料を投下する船は一般には「はしけ」などを用いることが多い。

写真-1 はアスワンハイダムで用いられた 250 t 用の

* 正会員 建設技術研究所 技術第1部

「はしけ」で、ロック材を投下している模様である。

この方法によれば締切りが完成するまでに次の4段階の築堤材料の動きがみられる。

1) 最初の段階は築堤材料が三角形断面に近く、下流面がややゆるい勾配となる。このときの流速増加はわずかであり、頂部に水平部分が生ずるようになると第二段階に入る(図-1(a))。

2) この段階では高さはあまり増加せずに材料は下流へ流され、頂部はまるみをおびた形状となる(図-1(b))。

3) 第二段階が進んで築堤部分の頂部に一定斜面と一

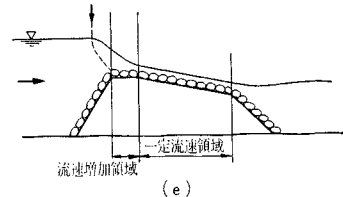
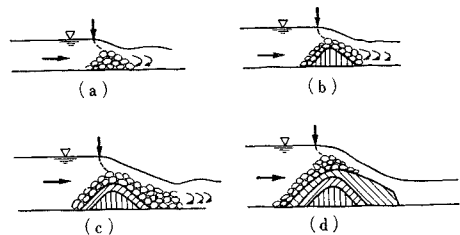


図-1 材料投下による盛立状況

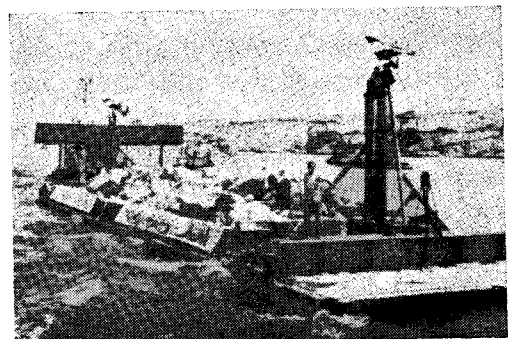


写真-1 250 t 用 はしけ

定流速が生ずるようになる (図-1 (c), (e))。

4) 最終段階では築堤部分の幅は増加せずに、高さをふやせる段階であり、このときには上、下流における水位差は大きくなっているため、仮排水路への流れの移動を伴いながら、締切りを完了できる (図-1 (d))。

(2) 両岸から盛立てる方法^{6)~13)}

この方法は、締切地点の左右岸まではダンプトラックなどで盛立て材料を運んでおいて盛立てを進めるもので、現在一般的に行なわれている方法である (図-2)。

これによると、締切りが進むに従って流積が減少し、それとともに流速は増加してくることから、盛立ての先端部では、築堤材料の安定性が順次変化していくものと考えられる。

仮に一定材料で盛立てを進めて行なったとすると、この材料が流失する限界流速になるまで締切りが進んだ後は、締切不可能となることも理論上は考えられる。ここでは材料の特性 (粒径、重量、内部摩擦係数など)、と河川の状態 (流量、流速、締切りの状態など) との関係について考えてみる。

流水に対する砂礫のつり合いから、砂礫が移動を始めるいわゆる限界掃流力については、1936年の Shields 以来多くの理論や、実験公式が提案されているが、これと同じ頃、Izbash は「第2回国際大ダム会議」において、流水中にある粒子の粒径、重量、限界流速の関係について次式のような提案を行なっている。

$$V_{cr} = 0.86 \left(2gD \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで V_{cr} : 限界流速

g : 重力加速度

D : 粒径

ρ_s : 粒子の単位重量

ρ_w : 水の単位重量

その後、Sandover は各種の実験を重ね、締切りの進行に伴って限界流速が変動することも考慮して次のような2つの方法を提案した。

その一つは、Izbash の公式を用い、これに締切りの完成の程度によって定まる流量係数を加味したもので、式(2)のようなものである。式(2)において、流量条件を与えて締切りの完成度がわかると、それに応じた築堤材料の性質 (粒径、重量) が試算法によって算出できる。

$$C_I^2 = (C_d^{4/3} \cdot Q^{2/3} \cdot \rho_w) / 2gDb^{2/3}(\rho_s - \rho_w) \dots (2)$$

ここで C_I : 締切りの完成度によって定まる係数

C_d : 締切部の流量係数で、フルード数と締切完成度によって定まる。

Q : 河川の流量

b : 締切りの水路幅

Sandover の提案しているもう一つの方法は、水路内における流速分布を対数分布とし、これと築堤材料の限界せん断応力を関連づけた式(3)のようなものである。

$$C_d^{2/3} \left(\frac{Q}{b} \right)^{1/3} = K \log \left(\frac{C_t \cdot b}{D} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ただし

$$K = 4.65 \left\{ g \cdot D (\rho_s - \rho_w) \frac{(\cos^2 \theta \cdot \tan^2 \phi - \sin^2 \theta)^{1/2}}{\rho_w} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

C_d, C_t : 締切りの完成度と、フルード数によって定まる係数

θ : 築堤の傾斜角

ϕ : 築堤材料の内部摩擦角

この式(3)、(4)を用いて締切りの完成度に応じた築堤材料を選ぶことができる。

さらに B.P. Das は水路が堆積土砂などで作られているところで、締切りを行なう場合について築堤の安定材料を求める図表を提案し、これが実績とよく一致することを示している。

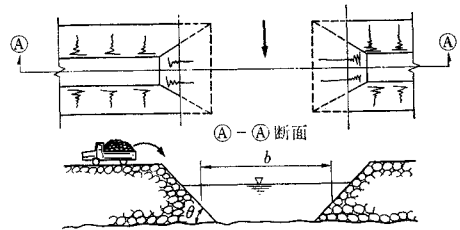


図-2 両岸からの盛立て状況

3. 土堰堤の越流について^{14)~25)}

仮締切堤に限らず、土堰堤 (河川堤防なども含めて) が堤頂からの越流を受けると非常に抵抗力の弱い構造物であることは容易に想像できる。写真 2~5 は河川の仮締切堤が越流する直前から決壊に至るまでのものであるが、この間、約 10 数分で決壊している。このような越流に対する防護工の実例については次節で述べることにし、ここでは、破壊に関してのメカニズムについて、多少理論的な考察を加えてみる。

越流を受けた堤体に作用する力としては、堤体内の浸透圧力、越流水によるのり面のせん断力、それに堤体を構成している築堤材料の自重などがある。いま、のり面を形成している一つの粒子に着目してその安定性について考えると、図-3 においてつり合式は式(5)であらわされる。

$$T + H + F \cdot \cos \theta = (N + F \cdot \sin \theta) \cdot \tan \phi \dots (5)$$

ここで T : のり面の流れによるせん断力

H : 粒子の水平力 ($G \cdot \sin \theta$)



写真-2 仮締切り越流寸前



写真-3 仮締切り、越流後 10 分



写真-4 仮締切り決壊口



写真-5 仮締切り決壊後

N : 粒子の垂直力 ($G \cdot \cos \theta$)

F : 浸透水圧

このなかで、流れによって生ずるせん断力 T は

$$T = \rho \cdot P \cdot V_{cr} \dots \dots \dots (6)$$

ρ : 空気と水の混合された密度 $\left(\frac{C \cdot \gamma_w}{g}\right)$

C : 空気と水との混合係数 $\left(\frac{\gamma_{air \cdot w}}{\gamma_w}\right)$

γ_w : 水の単位重量

g : 重力加速度

P : 粒子に働く流量 ($A \cdot V_{cr}$)

A : 流れ方向の粒子の面積

V_{cr} : 粒子が動き始める限界流速

であらわされ、浸透水圧による力 F は式 (7) で示される。

$$F = i \cdot \gamma_w \cdot A_c \dots \dots \dots (7)$$

A_c : 粒子の浸透圧方向の面積

i : 圧力勾配 (aV^n or 流線網より)

a : 粒子の形状、粒径、間げき比などによって定まる係数

V : 浸透流速

n : 材料と流れの状態による指数

また粒子の表面積 A と重量 G は次式であらわされる。

$$A = k \frac{\pi D^2}{4} \dots \dots \dots (8)$$

k : 粒子の流れ方向の面積有効率

$$G = \frac{\pi \cdot D^3}{6} (\gamma_s - \gamma_w) \dots \dots \dots (9)$$

D : 粒子の平均径

以上の式 (6)~(9) を式 (5) に代入して整理すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{C \cdot k \cdot \gamma_w \cdot V_{cr}^2}{2g} + \frac{D(\gamma_s - \gamma_w) \cdot \sin \theta}{3} \\ & + \frac{a \cdot k \cdot \gamma_w \cdot V^n \cdot \cos \theta}{2} \\ & = \left\{ \frac{D(\gamma_s - \gamma_w) \cdot \cos \theta}{3} + \frac{a \cdot k \cdot \gamma_w \cdot V^n}{2} \right\} \cdot \tan \phi \\ & \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

ここで、浸透水圧が非常に小さく、単にのり面の越流のみを考えた場合には式 (5) の $F=0$ として、粒子の動き始める限界流速は

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{g(\gamma_s - \gamma_w)}{C \cdot \gamma_w \cdot k}} \sqrt{D \cdot \cos \theta} \sqrt{\frac{2}{3} (\tan \phi - \tan \theta)} \dots \dots \dots (11)$$

で求まる。

式 (11) において、

$$C=1.0, k=0.5, \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)} \approx 0.86 \text{ と}$$

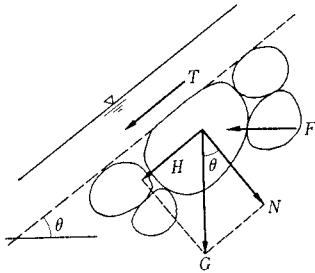


図-3 のり面上の粒子についての力のつり合い

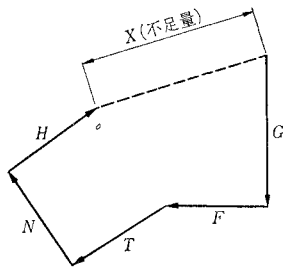


図-4 力の関係図

すると Izbash の提案している限界流速を求める式 (11) が得られる。

一般に堤体からの越流が始まると、越流水によって生ずるせん断力 T が大きくなり、図-4のなかの力の不足量 X が発生するとともに、斜面の崩壊が始まるものと考えられる。いい換えると、この不足量 X を何らかの方法によって受けもつような保護工をのり面に対して行なっていれば、崩壊は防げるものともいえる。

N. Shand, P.J.N. Pells は南アフリカの Xanxa ダムにおいて、図-5 のような鉄筋による下流のり面の保

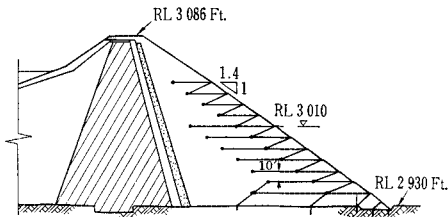


図-5 Xanxa ダムの配筋例

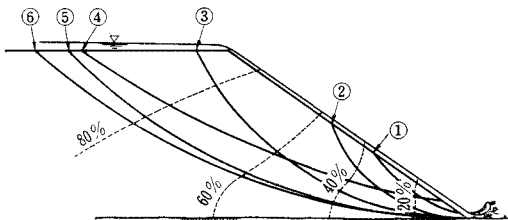


図-6 すべり円弧

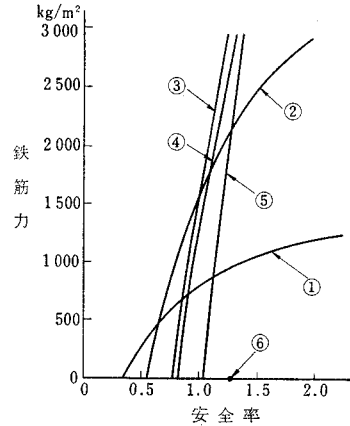


図-7 のり面鉄筋による安全率の変化図

護を行ない、このときの配筋荷重として前述のような式 (5) から $X=1100 \text{ kg/m}^2$ を採用している。また同じダムにおいて、こののり面鉄筋がのり面だけではなく、堤体全体に対する円弧すべりの安全率の向上にも役立つことを示している (図-6,7)。

4. のり面保護の実例^{26)~29), 32)}

土堰堤におけるのり面の保護工として a) 捨石、張石、b) コンクリートおよびアスファルトフェイシング、c) 鉄筋網、d) ブロック張、e) その他(張芝など)があるが、これらの目的は、浸食に対するもの、のり面の安定性の向上をはかるもの、越流に対するもの、美観を主とするものなどいろいろである。ここでは、越流に対する観点からその実施例についてみることにする。

(1) 捨石、張石

のり面を比較的粒径のそろった岩石で置換するもので

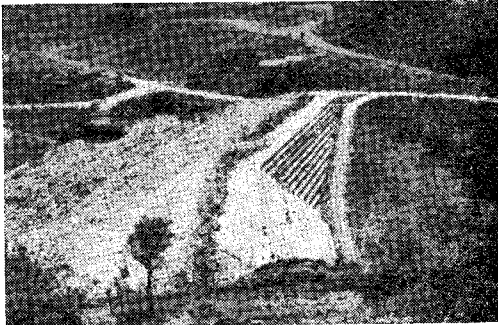


写真-6 のり面捨石工

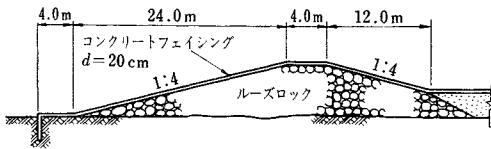
表面のすべり抵抗を大きくすることには有効であるが、越流に対しての抵抗は期待できない。仮締切堤に限らず多くのロックフィルダムでのり面保護工として古くからもっとも多く用いられている（写真—6）。

(2) コンクリートおよびアスファルトフェイスング

下流面にフェイスングを施した例としては、愛知用水の牧尾ダムの仮締切堤、Valsequillo ダムなどがあるが、牧尾ダムの仮締切堤は洪水による越流によって欠壊を受けた後、コンクリートフェイスングに変更されたもので、教えられるところが多い（写真—7、図—8）。



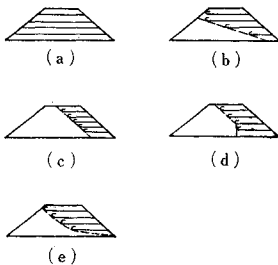
写真—7 変更仮締切り全景
(コンクリートフェイスング)



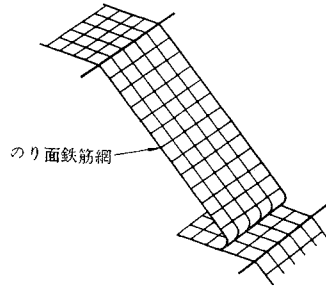
図—8 Palmito ダムのフェイスング例

(3) 鉄筋網による保護工

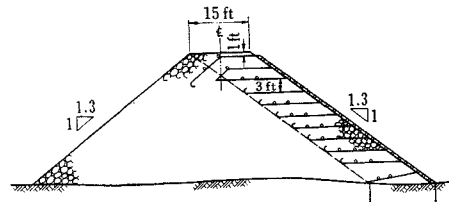
わが国にはみられないが、諸外国には、Afterbay ダム、Bridle Drift ダム、Xanxa ダムなど数例がみられる。この形式によって、越流に対するのり面の保護は有効になされた例も多い（図—9～12）。



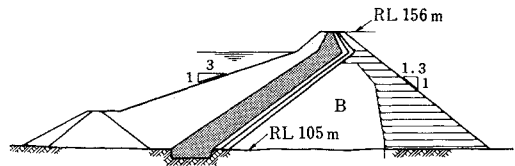
図—9 配筋例(1)



図—10 配筋例(2)



図—11 Shrinumu ダムの配筋例



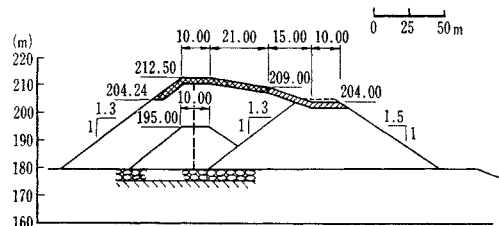
図—12 Bridle Drift ダムの例

(4) ブロック張り

越流に対する防護工としてコンクリートブロックを使った例も多く、Cabora Bassa の仮締切堤では模型実験によって保護ブロックの有効性を確認している（図—13、写真—8）。

(5) その他

以上にあげたほかにのり面保護工として張芝、鉄線蛇籠などによるものがある。ここでは、矢木沢ダムの仮締切に用いられたロックバスケットによる方法、五十里ダ



図—13 Cabora Bassa の仮締切断面図

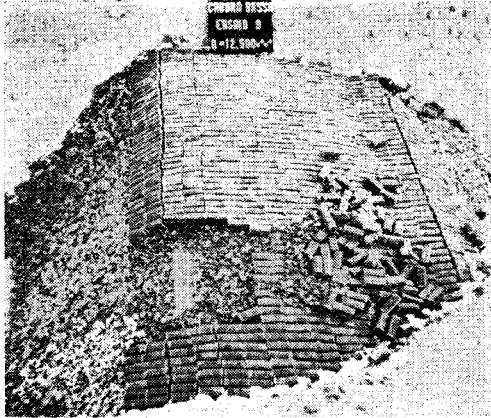


写真-8 越流後の状況

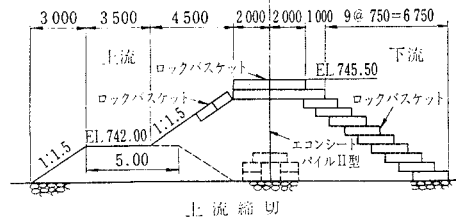


図-14 矢木沢ダム仮締切堤

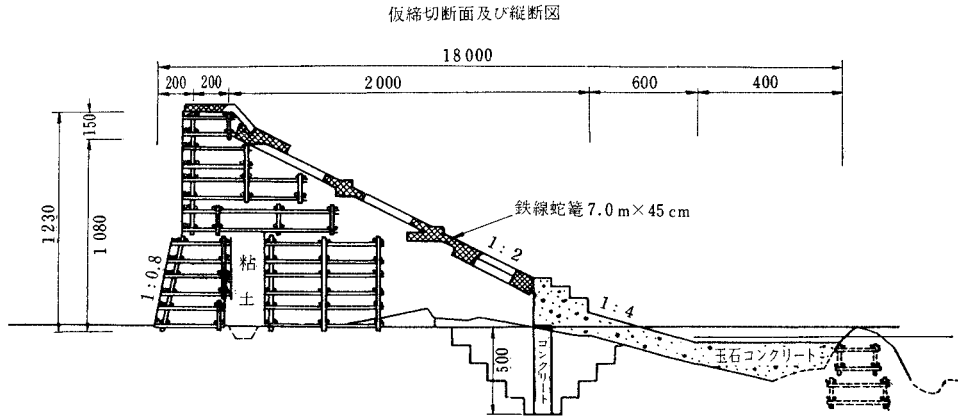


図-15 五十里ダム仮締切堤

ムの蛇籠による方法を示す(図-14, 15)。

5. あとがき^{30)~32)}

従来から土砂やロック材料で作る土堰堤は、越流を受けると必ずや手のほどこしようもなく、決壊するものだという観念がわれわれの頭のなかにある。しかしながらこのようにその越流について調べてくると、越流を予想して作られた土堰堤もあることに驚かされる。しかもそれが仮締切に限らず、洪水調節用として用いられているケースもある。また他方では現在までに越流によって欠壊した土堰堤も数多くみられる。

もちろん、わが国とは河川の流況やそれをとりまく流域の状況の相異など、同一には論じられない点があるにしても、土堰堤によって河川を縮切する場合の設計、施工時において、万一に備えての防護工として、ここに述べてあるような実施例など参考にすべき点も多いように思われる。

なお、実施例については必ずしも仮締切に限らなかったこと、ならびに紙数の都合で保護工事に対する経済性の検討や、文中の式の詳細については割愛せざるを得なかった。これらの点については文献を参照せられたい。

参考文献

- 1) Arhippainen, E.: Submerged dam on Lake Kemi, 10th Congress on Large Dams, Vol. 1 Q 36 R 6 June 1970.
- 2) Lane, R.G.T.: Temporary dam construction under water and overtopping by floods, 9th Congress on Large Dams, Q 35 R 4, 1967.
- 3) Oliver, H.: Through and overflow rockfill dams--New design techniques, Proc. I.C.E., London, March, 1967.
- 4) Sandover, J. A. & Tallis, J.A.: Construction of loose-tip cofferdams, Water, Power, July, 1966.
- 5) Taher, A.W. & Aziz, H.L.: Aswan high dam--Rockfill build under water, Civil Engineering A.S.C.E., August, 1971 (土木学会誌, Vol. 57, No. 6 海外ニュース).
- 6) Lane, E.W.: Design of stable channels, Proc. of A.S.C.E., September, 1953.
- 7) Sandover, J.A.: Backwater effects due to channel

- construction, Water Power, January, 1970.
- 8) Sandover, J.A. : Theories of closure of rockfill dams, Proc. of A.S.C.E., Vol. 97, No. CO 2, November, 1971 (土木学会誌 Vol. 57-6 文献抄録 1972).
 - 9) Sandover, J.A. : Discharge coefficients of constructions in open channels, Water Power, July, 1969.
 - 10) Sandover, J.A. : Hydraulic stability of loose-tip cofferdams, Water Power, August, 1966.
 - 11) 水理公式集, 第2編 5. 流砂, 土木学会, 昭和46年11月.
 - 12) Chow, V.T. (石原訳) : 「開水路の水理学 I」第2編, 7章B, 丸善, 昭和37年11月.
 - 13) Das, B.P. : Stability of rockfill in end-dump river closures, Proc. of A.S.C.E., Vol. 98, No. HY 11, November, 1972.
 - 14) Shand, N. & Pells, P.J.N. : Experience in the design and construction of reinforced rockfill dams, 10th congress on large dams, Vol. 1, Q 36 R 19, 1970.
 - 15) Hartung, F. & Scheuerlein, H. : Design of Overflow rockfill dams, 10th Congress on Large Dams, Vol. 1, Q 36 R 35, 1970.
 - 16) Idel, K.H. : Überströmbare Dämme, Wasserwirtschaft Nr. 1/2, 1972 (土木学会誌 Vol. 58-4. 文献抄録).
 - 17) Curtis, R.P. & Lawson, J.D. : Flow over and through rockfill banks, Proc. of A.S.C.E., Vol. 93, HY 5 September, 1967.
 - 18) Parkin, A.K. & et al. : Rockfill structure subject to water flow, Proc. of A.S.C.E., Vol. 92, No. SM 6, November, 1966.
 - 19) Wilkins, J.K. : The stability of overtopped rock-fill dams, Proc. 4th Australia-New Zealand Conference S.M. 1963.
 - 20) Sparks, A.D.W. : The sloughing overtopping and reinforcement of rockfill and earth dams, 9th Congress on Large Dams, Q 35 R 19, 1967.
 - 21) Speedie, M.G. & Taddell, J.F. : Use of hydraulic models in planning flood diversion through rockfill, 9th Congress on Large Dams, Q 35 R 28, 1967.
 - 22) Shackelford, B.W., et al. : The design, construction and performance of pit 7 Afterbay dam, 10th Congress on Large Dams, Q 36 R 24, 1970.
 - 23) Martins, L.M. : Overtopping tests in model of Cabara Bassa cofferdams, 10th Congress on Large Dams, Q 36 R 45, 1970.
 - 24) Weiss, A. : Construction technique of passing floods over earth dams, Proc. of A.S.C.E., October, 1950
 - 25) The Roseires dam, Water Power, April, 1964.
 - 26) 水資源開発公団 : 「矢木沢ダム工事誌」
 - 27) 建設省 : 「五十里ダム工事誌」
 - 28) 西松建設, 土木学会 : 「ロックフィルダムの設計と施工」
 - 29) 愛知用水公団 : 「愛知用水技術誌」昭和37年
 - 30) 西松建設, 土木学会 : 「ロックフィルダム」昭和28年
 - 31) 発電水力協会編 : 「最近フィルダム工学」昭和47年
 - 32) 河川房義監訳 : 「アースダムとアースロックダム」, 森北出版, 昭和47年.

ネットワーク(工程管理)・品質管理入門

B 6 判・170頁・定価750円・千150円

土木施工管理関係法令集

B 6 判・320頁・定価900円・千150円

〔改訂版〕

現場技術者のための

仮締切工の設計計算法と施工法

東大教授・工博 福岡正巳／東北地方建設局長 神谷 洋 編

B 5 判・上製330頁・定価3,400円・千300円

現場技術者のための

土圧・土留計算法と実例

東京大学教授・工学博士 福岡正巳 編

B 5 判・上製350頁・定価3,700円・千300円

新しい仮設工事の設計と施工

八島 忠 編

B 5 判・上製530頁・定価4,200円・千300円

建設工事の仮設計画と実例

富樫凱一 監修

B 5 判・上製600頁・定価4,800円・千300円

近代図書株式会社

東京都千代田区富士見1-7-12 千102
電話03-263-3871~2 振替東京23801

一級土木施工管理技士
実地試験問題の解き方

B 6 判・二〇〇頁
定価一、二〇〇円・千一五〇円