••••••• 報

告

庄川扇状地における浸透型洪水調整池の浸透挙動 ―扇状地地盤の高透水性を活用した洪水調整池の取り組み―

Infiltration Behavior beneath the Permeable Flood-control Reservoir in Syougawa Alluvial Fan

満谷達也(しぶや たつや) 富山県砺波農林振興センター 班長

瀧本裕士(たきもと ひろし)石川県立大学准教授 生物資源環境科学部

黒 田 清一郎 (くろだ せいいちろう) 姆農研機構農村工学研究所 主任研究員

和田健 → (わだ けんいち) 応用地質㈱ エンジニアリング本部 上級専門職

1. はじめに

近年,局地的な豪雨による災害が頻発している。中小 河川の内水氾濫もその一つである。富山県は内水氾濫の 被害軽減のために洪水調整池を計画・施工した。

調整池は扇状地の透水性の高い砂礫地盤を自然排水シ ステムとみなす浸透型調整池である。洪水調整時,流入 水が地盤に負荷され,図-1の不飽和帯を浸透し地下水 面に至る。同様の過程をたどる雨水浸透については多く の研究がなされている。調整池は雨水浸透に比べ負荷水 量が大きく,洪水調整機能が地盤の浸透挙動に支配され ることから大規模な浸透実証試験を行った。本稿は実際 に観測された浸透挙動について述べるものである。

2. 庄川扇状地と調整池の配置

庄川扇状地は我が国の代表的な扇状地で地理学的には 散村が展開していることで知られている。散村の成立は 扇状地の表層地質と水環境によるとされている。

庄川は近代の治水工事で河道が定まるまで流路の変遷 を繰り返し,洪水被害を与える一方で農業ポテンシャル をも高めた。この地の人々は氾濫でもたらされた泥土に 耕地を,川跡にかんがい用水や生活用水を求めた。爾来, 時代とともに水環境が整備され,今日に至っている。 1990年代後半より扇央部から扇端部にかけて内水氾濫 が頻発するようになった。市街地や農地の洪水被害解消 のため(口絵写真-13)に11ヶ所の洪水調整池を段階 的に配置する計画がたてられた。広域的には地下水の低 下傾向が続いており,自噴井の枯渇や臨海部での塩水化 などの諸問題が顕在化していることから,地下水への涵



図-1 浸透型調整池模式図

養も視野に入れ、4ヶ所の浸透型調整池を施工した。現 在、先行施工した調整池での経験を反映し、より深化し た構造の5ヶ所の浸透型調整池の計画・施工が進展中 である。

3. 浸透型調整池の諸元

洪水時の河川流量の調整方式は,水門により調整池に 導流するバケットカット方式と,横越流堰を設け導流す るレベルカット方式を地形条件に応じて用いた。

浸透型調整池の容量は流入量と浸透量の関係により定 まり貯水位増分は(1)式で表現できる。

 $dh/dt = Q_{\rm in} - Q_{\rm p}$ (1)

 $h: 貯水位 t: 流入時間 <math>Q_{in}: 流入量 Q_p: 浸透量$

浸透型調整池の容量は流入量と浸透量の関係により定 まり貯水位増分は(1)式で表現できる。

調整池容量は洪水調整量に浸透量を見込み決定してい る。このことにより表-1に示すとおり従来の方式に比 ベ小さな容量で洪水調整が可能と計画した。また、浸透 を期待する構造物は従来から目詰まりが問題となってい ることから、調整池底面に厚さ50 cm のフィルターを設 けた。

調整池は扇央部から扇端部に位置している。調整池底 面から地下水面までの不飽和帯の層厚は表—1のとおり で,調整池底面の地盤の粒度分布は図—2である。間隙 率は15~24%の範囲であった。また,室内透水試験に よると透水係数は k_{15} =9.5×10⁻⁴ m/s~2.8×10⁻³ m/s を示した。

浸透実証試験と浸透挙動

浸透実証試験は浸透量の時間的変化とフィルターの効

表-1 各調整池の諸元

項目		太郎丸	神島	砺波西中	小矢部西中
洪水調整量	m ³	16,000	19,400	24,700	30,300
調整方式		バケットカット	レベルカット	レベルカット	レベルカット
設計貯水量	m ³	14,700	13,300	14,100	12,770
底面積	m²	3,590	4,170	4,110	4,710
調整時間	hr	2.0	4.5	6.5	9.0
不飽和帯層厚	m	22.7	11.8	4.5	3.3

地盤工学会誌, 59-2(637)



図-2 調整池底面地盤の粒径加積曲線

表-2 実験時の洪水負荷条件

1百日	太!	太郎丸		砺波西中	
項日	冬期	夏期	冬期	冬期	夏期
累積流入量 m ³	15,870	6,880	19,400	15,930	18,090
流入時間 hr	1.80	0.55	3.80	2.65	3.00
最高水深 m	2.81	1.22	2.43	2.00	1.97
流入水温 ℃	5.9~6.4	14.2~14.4	7.2~8.3	8.6~9.5	18.1~19.5
流入水SS mg	/1 2.9~3.2	4.0~12.0	2.7~8.7	9.6~117.0	3.6~12.9



果を調べるために,人工的に河川水を調整池に負荷し, 流入量,浸透量,および地盤の間隙水圧を計測した。本 稿で述べる実験の負荷条件は表-2のとおりである。

神島調整池の計器配置が図-3 で間隙水圧計をフィル ター,原地盤および地下水面下に配置した。他の調整池 においても同様の計器を配置した。

4.1 調整池の浸透挙動状況

神島調整池(口絵写真-14)の浸透実証試験時の全水 頭の推移を図-4,貯水位上昇時の間隙水圧の消長を図 -5,貯水位下降時の消長を図-6に示す。

浸透実験は流入を10時に開始し,貯水位が2.43 m に 至った時点で停止した。貯水位は流入停止後下降に転じ, 10時間35分後に調整池内の浸透が見掛け上終了した。

フィルター内の間隙水圧(CH1, CH2, CH3)は,流 入後,上部より順次18分以内に,原地盤の間隙水圧 (CH4, CH5)は31分以内に負圧が正圧に転じ,貯水位 の上昇・下降に追随する挙動を示した。

地下水面下の間隙水圧計 CH7(底面-15.5 m)は流 入90分後に応答しているにもかかわらず,原地盤中間 地点の CH6(底面-8.5 m)は180分後に負圧が消失し た。この現象は,粗粒層の不飽和浸透に特有なフィン ガー流の発生,急激な流入水の負荷による空気の封入, 間隙空気の消散の時間的な遅れなどによるものと考えら



図-4 全水頭の経時変化





図-6 間隙水圧の鉛直分布(水位下降時)

れた。

フィルター内の間隙水圧は,実験終了後,徐々にサク ションが増加し,ほぼ実験前の値に回復した。

計測された貯水位と地盤の間隙水圧の消長を登坂ら¹⁾ が開発したモデル,GETTFLOWSを用い解析・再現し た。実験時,貯水面から空気の噴出が常時観測されたこ とから,水・空気2相流解析とした。

図一7は満水時,図一8は貯水位が降下直後の飽和度 分布で浸透が不飽和浸透に終始したことを示している。

告

29

報 告



図-7 満水位時の飽和度分布



図-8 水位降下後の飽和度分布

実験時の浸透挙動の再現は不飽和帯の透水係数に異方性 を与えること (k_h =1×10⁻³ m/s, k_v =8×10⁻⁵ m/s) で 可能となった。

4.2 「難透水層」による影響

砺波西中調整池の冬期試験において,不飽和帯の水分 動態を把握するため孔井間地中レーダによる計測を行っ た。孔井間地中レーダは高周波の電磁波を用いる地中 レーダ探査の一種で,送受信アンテナを異なるボアホー ルに配置し電磁波伝播特性から,深層の地盤を非破壊的 に体積含水率を推定する手法²⁾である。

透水性の高い砂礫地盤であることから図一9(a)のボ アホールに送受信アンテナを0.25 m ピッチで等深度に 上下に昇降する方法を用いた。調整池底面から深度0.65 ~5.65 m の間での体積含水率の変化を測定した。実験 時の貯水位は流入後2時間39分後に最高水位 H=2.00 m を示し,流入停止後9時間13分後に調整池内の浸透 が終了した。この間の洪水負荷前から流入開始後390分 間の体積含水率の変化を図-9(b)に示す。

調整池底面-4.5 m 付近に地下水位が存在しており, -5.5 m 付近の地下水面下には10 cm 程度の粘土層が確 認されている。不飽和帯の初期体積含水率は10~14% の範囲にある。浸透過程で初期体積含水率が高く砂礫間 に細粒分を多く含む図-9(b)の層(→印)が,下部層 の体積含水率の増加を抑制し,飽和度の進展を阻害して いることが判る。従来から,細粒分含有率が浸透特性を 支配する要因の一つであることが各種の室内試験により 知られている。孔井間地中レーダの観測により,実際の 地盤においても,細粒分が卓越した層(以下,難透水層 と表現する)が浸透挙動を支配していることが確認され た。

水溶性ポリマーを用いて採取した乱れが少ないコアを 観察すると太郎丸調整池で8層,神島調整池で2層,





図-11 太郎丸調整池原地盤(19 mm 以下)の粒径加積 曲線

砺波西中調整池で3層の難透水層が不飽和帯に明瞭に 確認された。ボーリング調査結果および孔井間地中レー ダの計測結果により,扇状地の砂礫地盤の構造上の不均 質性と難透水層の存在を確認した。

浸透試験の流入停止後の浸透量と貯水位の関係を図一 10に整理した。

最も浸透量の少ない太郎丸調整池の難透水層の粒度分 布が図—11である。例えば、底面より $-1.4 \sim -1.5$ m の試料は $F_c=17.2\%$ を示した。その他 $F_c=5.0 \sim 11.3\%$ が7層確認された。

太郎丸調整池は,底面近くの難透水層の存在が浸透量 に影響を与えたと考えられる。

4.3 水温による影響

室内の浸透試験では水温により浸透挙動が大きく変化

表-3 流入水温と浸透量(貯水位1m時)

T香日	太郎丸調整池		砺波西中調整池		
復日	冬期	夏期	冬期	夏期	
単位面積浸透量 $m^3/hr/m^2$	0.169	0.245	0.326	0.492	
夏期浸透量/冬期浸透量	1.45		1.50		
流入水平均水温 ℃	6.2	14.3	9.0	17.8	
粘性係数 ×10 ⁻³ Pa・	1.166	1.466	1.352	1.466	
1/(夏期粘性/冬期粘性)	1.26		1.29		

することが知られ一般式(2)が示されている。

 $k = \rho g K / \mu \cdots (2)$

k:ダルシー則の透水係数 ρ:水の密度

g:重力加速度 μ:水の粘性係数 K:浸透率 調整池底面の地盤が完全飽和であれば,(2)式に従え ば水温の異なる季別の浸透量の比と粘性の比の逆数は一 致する。試みに表-3に季別の浸透量を示す。実測され た浸透量の比と粘性係数の逆数を比べると,浸透量の比 のほうが大きくなっている。これは初期の体積含水率, 飽和度の進展の度合,負荷水圧の差異,地盤中での水温 変化などに起因するものと考えられる。いずれにしても, 実際のフィールドにおいても水温が大きく浸透挙動に影 響を与えていることが判った。

4.4 浸透場のスケールによる影響

調整池の施工に先立ち,太郎丸では底面10m平方, 神島においては底面5m平方の比較的小規模な実証池 を設け浸透試験を行った。実証池は法面に不透水処理を 施し底面より浸透する構造とした。

この時の浸透量と調整池の貯水位の関係を図―12に整 理した。実証池と調整池の浸透量を表―4に比較した。 流入水温により浸透量は異なるとはいえ調整池の浸透量 は実証池の32~33%にとどまっている。

降雨による地盤の浸透挙動について実験・解析した齋 藤らの研究³⁾によると,地盤内の間隙空気はまず側方に 移動し,その後,上方に移動するとされている。実証池 は規模が小さいことから側方に間隙空気は容易に消散す ると考えられる。一方,調整池は規模も大きく,難透水 層の広がりは浸潤前線の降下に伴う間隙空気の上方への 消散を阻害する。このことにより,調整池は実証池に比 べ飽和度の進展が遅延し,浸透量が抑制されたものと考 える。

実験時,空気のフィンガー流とも形容できる実証池で は見られなかった局所的な激しい噴出が調整池で観察さ れた(**口絵写真―15**)。このことからも浸透場のスケー ルが間隙空気の消散に影響し,浸透量に大きな差異を与 えたと解釈できる。

5. おわりに

February, 2011

自然界の浸透現象は多くの場合、不飽和浸透であると



表-4 調整池と実証池の浸透量の比較(貯水位1m時)

T百 日	太郎丸		神島	
· [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1]	調整池	実証地	調整池	実証地
単位面積浸透量 m ³ /hr/m ²	0.169	0.522	0.326	0.996
浸透底面積 m ²	3590	100	4170	25
流入水平均水温 ℃	6.2	8.4	7.7	2.6
調整池浸透量/実証地浸透量	0.32		0.33	

いわれている。今回の大規模な実際のフィールドでの浸 透実験においても空気が浸透の邪魔をする不飽和浸透の 挙動を如実に示した。

流入水の水温のほか,地盤の成層状態,浸透場のス ケールが間隙空気の消散時間に影響を与え,浸透挙動を 支配することが判った。

本稿で報告した調整池は、2008年7月8日に富山県 西部地方を襲った4時間連続雨量121 mmの降雨に、そ の役割をはたし減災機能を発揮した。ことに、近年、溢 水被害が頻発していた市街地の災害拠点病院近くでの冠 水が回避され、地域住民や防災関係者から高い評価を得 た。

参考文献

- 登坂博行・小島圭二・三木章生・千野剛司:地表流と地 下水流を結合した3次元陸水シミュレーション手法の開 発,地下水学会誌,Vol. 38, No. 5, pp. 253~267, 1996.
- 2) 黒田清一郎・奥山武彦・斉藤広隆・金 善俊・竹内睦 雄:繰り返し孔井間レーダ探査による不飽和帯涵養過程 の定量的評価,物理探査, Vol. 60, pp. 467~476, 2007.
- 3) 齋藤雅彦・川谷 健:間隙内空気の運動を考慮した数値 シミュレーションによる雨水浸透・浸出過程に関する研 究,応用力学論文集, Vol. 6, pp. 865~872, 2003. (原稿受理 2010.11.1)

31