

表面取水型取水塔水理模型実験

正 員 森 正 秋*

I 総 論

§ 1 序 言

従来の取水形式である斜樋あるいは階段状に門扉を有する取水塔は取水口が比較的深いため取水に際し貯水池深部の低温水を混入し、取水温は一般に低い。そのため取水口が常に水面付近にある取水管による取水方式が近年採用されるようになり、東北地方ではすでに 2・3 構造物の設置をみており、北海道においても昭和 39 年尾白利加ダムに採用された。土木試験所においては昭和 32 年以来取水管の水理機能について模型実験を行ってきたが、流入流速分布、フロート下面の圧力分布などまだ推測の域を出ない点もある。昭和 39 年度においては特に温水取水に関するこれらの問題について実験を行なった。

§ 2 実験の目的

実験の目的は与えられたフローティング・タイプ、シリンダータイプ 2 種類の取水管について温水取水効果を比較検討し、あわせて取水管の水理機能を明らかにするものであるが、実験に採用した項目をあげると次のごとくである。

1. 2 種類の取水管における水理学的な比較検討
2. 負荷変動時における安全性の確認
3. 水位変動の流量に与える影響
4. 流入流速分布の測定
5. 空気連行の限界について
6. その他水理機能の解明

§ 3 模型の概要

実験の施設は 2 面をガラス張とした水槽を使用し、模型の寸法は水槽の高さ、満水時の表面積によって制約を受けるので、それぞれの実験目的に応じて 1/50、1/20 の 2 種類の縮尺のものを採用した。

模型管は取水口附近は流況が明らかなように透明なアクリル系合成樹脂製のパイプを使用し導水管はエスロンパイプ、支柱は木製とした。

実験用水の供給および計量は大型ポンプ施設に取付けたバルブとベンチュリー管により行ない、模型管の末端に取付けたバルブの操作により実験用水槽の所要水位を保持した。

模型の相似律は自由水面を有する管水路であるため、す

べてフルードの相似律が適用されることになる。

§ 4 実験の方法

取水管における取水機能および空気連行などの現象を調べるには取水口のみ拡大した縮尺の大きな部分模型の方が取扱いが簡単で実験判定にも良い結果を得ることができ。しかしながら管全体の水理機能を検討するためには、どうしても取水管全体の末端を含めた全体の模型による実験が必要となる。本実験においても縮尺 1/50 の全体模型実験は負荷変動、あるいは水位変動などの取水管に与える影響を検討して温水取水など大部分の実験判定は縮尺 1/20 の模型により行なった。

(1) 縮尺 1/50 の模型による実験

図-1 は縮尺 1/50 の模型で、これにより各部の圧力変化量および水槌作用による流況などを測定した。

(2) 縮尺 1/20 の模型による実験

取水塔における温水取水効果をめぐる水理学的な優劣は流入流速の速さおよび流速分布形により定められる。本実験においてはシリンダー・タイプとフローティング・タイプとの比較検討を行なったが、流入流速は微流速計および、ピトー管を使用し、流速分布とともに実験判定に必要な流向、特に下層からのまくれ昇り流などは、スチロール樹脂製の粒子 (径 1.5 mm、比重 1.06) を投下してその軌跡を測定した。

II 全体模型による実験

§ 1 取水管の水理条件

取水管における絶対的な水理条件は管内圧力を P とするとき $P > 0$ でなければならない。すなわち直管内の圧力が負となれば高ダムにおける取水管外壁には、貯水池水深に比例する水圧が外圧となって負荷し、管は容易に挫屈する。また管内負圧が絶対圧に近づけば空洞現象も発生し管の摩擦を早めることになる。

これらを防ぐには出口断面積を小にすることで解決される。いま与えられた流量 Q に対し入口および出口断面積の許容範囲を求めると次のごとくである。

取水口における圧力水頭を P とすると

$$P = Z_0 - (1 + f_e) \frac{V_0^2}{2g} \quad (1)$$

* 北海道開発局土木試験所河川研究室

この点における水圧を零になるように出口断面積を縮小するには

$$Z_0 - (1+f_e) \frac{V_n^2}{2g} \left(\frac{A_n}{A_0} \right)^2 = 0 \quad (2)$$

しかるに

$$\frac{V_n^2}{2g} = \frac{Z_n}{1+\eta} \quad (3)$$

これを(2)式に代入すれば

$$\left(\frac{A_n}{A_0} \right)^2 = \frac{Z_0(1+\eta)}{Z_n(1+f_e)} \quad (4)$$

(3)式より

$$Q = A_0 \sqrt{\frac{2gZ_0}{(1+f_e)}} \quad (5)$$

ここに

- Z_0 : 貯水面から取水口までの高さ
- Z_n : 出口中心線より貯水面までの高さ
- V : 管内流速
- A : 管断面積
- f_e : 入口損失係数
- η : 損失係数の総和

(4), (5)式は管内における圧力が負とならないための必要な条件である。

§ 実 験

(1) 圧力水頭

図-1 にしめした縮尺 1/50 の模型により管内各部の圧力水頭を測定した結果、計算値との誤差はほとんどなく、実物における各損失係数および管内水理条件の算定などに一般的な計算式が十分適用できることを確めた。

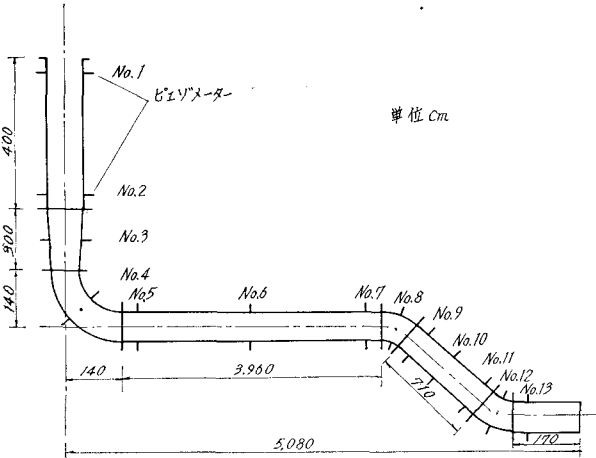


図-1 模型一般図

(2) 損失係数

一般的に管内における損失は摩擦による損失が一番大きく、続いて入口、彎曲、断面変化などが考えられるが、出

口断面積を縮小することが絶対条件となる取水管の場合、これら損失係数が流量に与える影響は極めて小さく(3)式における η は 0.2~0.3 の範囲となっており概算を行なっても大差は認められない程度のものである。

(3) 負荷変動

取水管に与えられる負荷変動は発電最大取水量 48 m³/sec より 24 m³/sec まで数秒間に繰返されるもので、これにより管内に与える水撃圧がどんな値をしめすかは、管の設計上重要な問題である。実験においてはバルブ操作の関係もあり次の 4 種類に分けて圧力水頭の増減量を測定し 表-1 を得た。

発電最大取水量	48 m ³ /sec	⇔ 0
常時取水量	42 m ³ /sec	⇔ 0

管路内の圧力分布は負荷変動の状態により異なるが、弁の閉そくが緩閉そくの場合管内水撃圧水頭について Allievi は次式を提案している。

$$h_m = \frac{NH_0}{2} + \frac{H_0}{2} \sqrt{N^2 + 4N} \quad (6)$$

$$N = \left(\frac{LV}{gTH_0} \right)^2$$

$$h_x = h \frac{2L/a}{T} \cdot \frac{x}{L} \quad (7)$$

ここに

- h_m : 最大水撃圧
- H_0 : 全水頭
- T : 弁閉そく時間
- V : 管内流速
- h_x : 取水口より x の距離における水撃圧水頭
- h : aV/g

(6)および(7)式による 管内各部の水撃圧の計算値は同じく 表-1 にしめたが、模型における実測値とはかなりの差

表-1

No. ピエゾ メーター	流 量 m ³ /sec				h_m	h_x
	42→0	0→42	48→0	48→0		
	上昇	下降	上昇	下降		
1	0.38	0.00	0.00	0.00	0.2528	0.1273
2	0.13	0.25	0.25	0.38	1.7691	0.9431
3	0.38	1.00	0.88	1.00	3.3393	1.6565
4	0.06	1.38	1.63	1.38	10.6262	5.8743
5	0.38	1.81	1.38	1.81	12.5550	7.0652
6	—	—	—	—	35.6763	20.0738
7	0.75	2.00	1.44	2.13	58.7976	35.3330
8	0.88	2.06	1.69	2.36	—	—
9	0.81	1.75	1.75	2.00	—	—
10	1.00	2.13	2.00	2.50	—	—
11	0.81	1.75	1.88	2.38	—	—
12	6.13	7.88	5.63	7.13	—	—
13	7.84	10.31	6.13	9.00	77.0669	48.9800

があり、本例のように取水口が広い水面に急拡して拡散が容易に行なわれる管路には適用できないようである。

模型管による測定値は導水路内においては相当量の増減が認められるが、取水管内での変動は極めて小さく第2次圧力波による変動は認められなかった。またフロート下面にもピエゾメーターを取付けて観測したが、変動量が小さく測定値として表わすにいたらなかった。このことは水樋作用に対して取水管が極めて高い安全性をしめすものと考えられる。すなわち弁の急閉あるいは負荷変動により生じた圧力波は導水管を伝播して取水口に達するが、取水口は断面が急拡して自由水面に続いているため急速に拡散し、サージングは無視できる程度になると思われる。

III 部分模型による実験

温水取水能力を比較検討する場合は取水口のみ拡大して

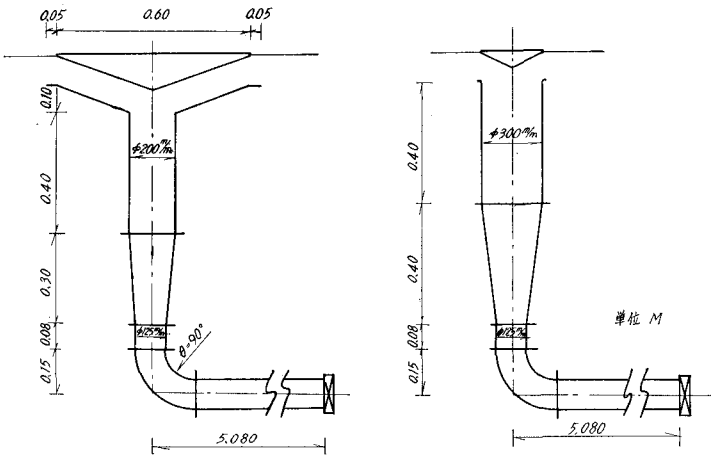


図-2 (単位 m)

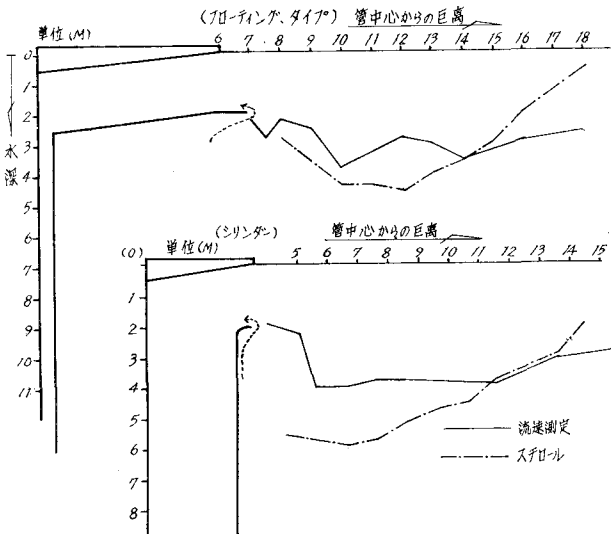


図-3 流入範囲の軌跡

流入流速を大とし、測定を容易にした方が実験判定に良い結果を与える。本実験においては 図-2 にみるような縮尺 1/20 の模型により定量的な温水取水効果を検討した。

§ 1 取水型式の比較

(1) 温水取水

温水取水能力からみた両取水管の比較にあたっては流入流速の分布形および流入範囲を知る必要がある。図-3 は 2 箇の取水管にそれぞれスチロール粒子を投入して測定した流入範囲の軌跡である。(図中点線は別途方法により観測した流入範囲)

取水口よりの距離が大となれば取水型式の影響が小となるので両型式とも流速分布は相似となり、一般的な越流型式の取水口における流速分布に類似してくる。また両型式とも深部まで流速が消滅しないが、流入量および流速分布より考えると下層の流水は取水塔を取巻く旋回流となっているようである。スチロール粒子を投入してその軌跡をスケッチした実験においても深部は全般的に旋回流が認められ、取水口よりの距離が大となれば表面近くも緩やかなカーブを持ってダムあるいは山側に向かう流速となる。温水取水能力は取水口における流速の大小にほぼ逆比例すると考えられるので取水口円周の大きなフローティング・タイプの方が優れていると考えられるが、本例のように躍層形成の推定深 (2.5~3.0 m) に比較して流入水深 (2.0 m) の割合が大きき場合は躍層以下の冷温水の混入も流入流速に比例して飛躍的に増大すると考えられる。図-4 (a), (b) の流速分布から推定した取水温もフローティング・タイプの方がはるかに高温水が取水できて水理学的に優れていると考えられる。

(2) 伸縮部構造

伸縮部の構造は取水口より下部へ階段状に大なる型式(漸拡型式)と小になる漸縮型式が考えられるが、管内圧力および断面変化による損失などを考えると漸縮型式の方が水理学的に優れていると思われる。すなわち取水管における管内圧力は取水口管径と出口管径の比により定まり、管内圧力を小にするためには取水口管径 D_0 をできる限り大にすることが望ましい。伸縮部に接続される垂直管および水平管は通水流量より検討された経済管径 D_m が使用されており $D_0 > D_m$ なる管をスムーズに接続するには D_0 より漸縮の型式が適当であることは明らかである。

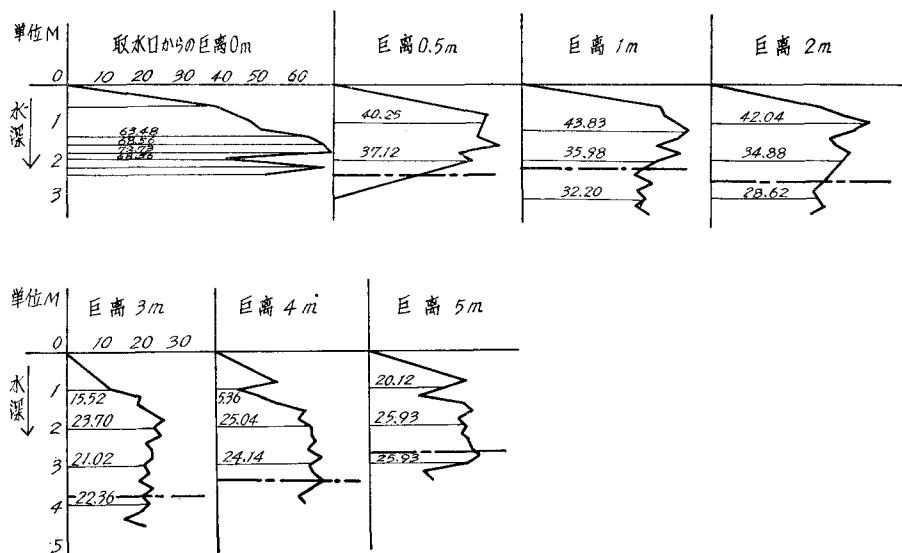


図-4(a) 流速分布 (フローティング・タイプ)

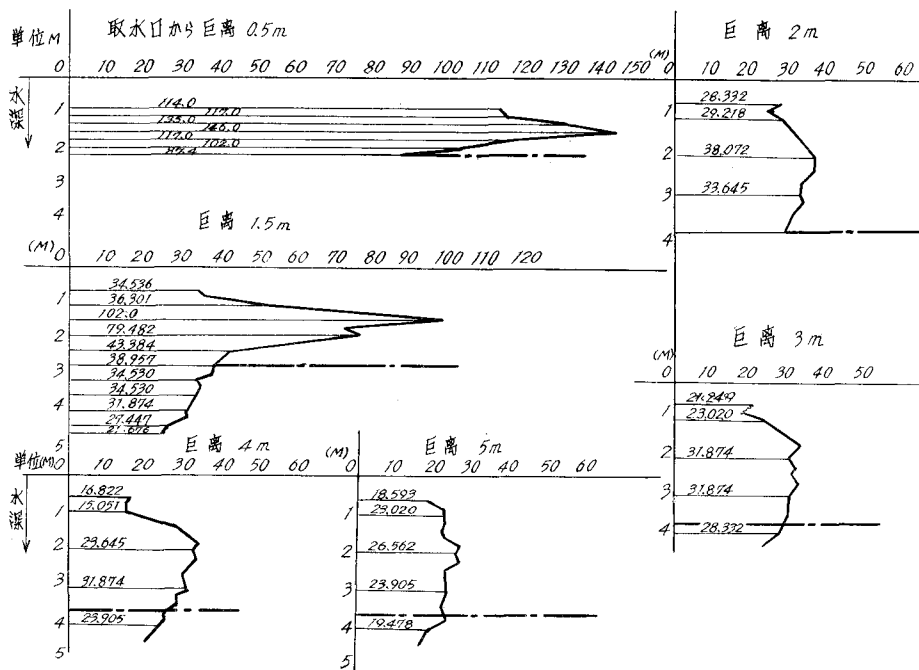


図-4(b) 流速分布 (シリンダー・タイプ)

(3) 空気連行の限界

空気連行の問題は両型式とも水位のみ低下した場合の流況（これは主として高波を想定したもの）を検討し、あわせてフロートを除去した場合の渦の消滅限界などを求めた。水位低下による空気連行は両型式とも流入水深1.0 mまでは流況に変化なく常態を維持する。流入水深が0.75 mになると断続して空気の混入が認められ、水深0.7 mで継続した空気連行となり、両型式の差異は実験においては認

められなかった。空気の連行現象は表面張力、粘性の影響があってフルードの相似則では完全な縮尺の相似が得られないが1.0 m程度の波高には十分な安全性があると考えられる。

フロートを除去した場合の流出渦の発生状況はフローティング・タイプでは8.0 m、シリンダータイプでは9.0 mが渦の消滅限界水深となっている。一般的に取水管の径を D とすると、この限界水深は $2D$ 程度と考えられているが、

いづれの取水塔でも最低水位の場合はフロート上の余剰水深があまりなく、取水管の引上げ、あるいはフロートのみ引上げの状態で取水されることは避けなければならない。

§ 2 フロート下面圧力

フロート下面の圧力分布は、下面の形状設計あるいは水槌作用の影響を論ずるにあたり明らかにしなければならないものである。実験においてはピエゾメーターを取付けたフロートを使用して 2.0, 1.5, 1.0 m の流入水深についてそれぞれ通水流量 48, 40, 32, 24 m³/sec の 4 ケースについて圧力水頭測定を行なった。

取水口の入口付近では流入流速の水平方向分力が比較的大きいため明らかに正圧となっており流下につれて段々小となっているようであるが、流入水深 2.0 m の場合はフロート中心がわずかに負値をしめすのみですべて正圧であり取水口内の水流は必ずしも取水口に沿った流れではないと考えられる。流入水深を小にした場合フロート下面における負圧の範囲は広くなり、中心部の負圧は加速的に大となる。このことはフロートのみ切離して浮上させ一定流量 $Q=42.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ において流入水深を徐々に低下させた実験においても明らかに認められた。すなわち水深 1.0 m 程度までは常態を保つが、0.7~0.8 m に達するとフロート下面の負圧が大となりフロートは取水口に吸引され、あたかも蓋をしたような状態となる。

フロート下面の負圧水頭は流量 Q と流入水深 h の関数として表わされると考えられるが、本実験に採用した取水塔では流入水深は 2.0 m 以上必要と考えられる。

§ 3 温水取水論

貯水地表層の水が長期間にわたり太陽熱を吸収すれば、下層水よりかなり高温となり、密度も小となり比較的稳定した温度層を保つようになり、いわゆる躍層を形成する。

このように躍層が発達した場合は上下両層の密度と粘性によって定まる限界速度以下の流速で表面の水を取水すれば下層の低温水を混入することなく、表層の温水のみを取水することができる。これが温水取水の基礎条件である。

(1) 限界流速と流速分布

Keulegan は躍層の境界における 限界流速について経験式として (19) 式を与えている。

$$V_c = \frac{1}{\theta} \left(\frac{\nu \cdot g \cdot \Delta \rho}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{19}$$

ここに

- θ : 無次元量, 実測により決定される常数
- ν : 下層の動粘性係数
- $\Delta \rho$: 上下両層の密度差
- ρ : 上層の密度

(19) 式により温度差 ΔT と限界流速の関係を調べ、躍層の境界面における流速をこの限界流速より小なる流速になるように取水口直径、流入水深などを決定すれば完全な温水取水となる。

図-5 のような取水状態を想定すると 流入量の 連続の方程式は (20) 式となる。

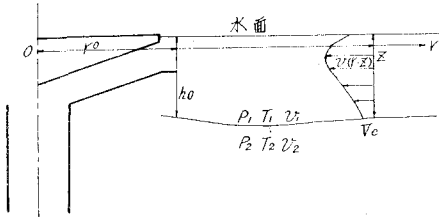


図-5

$$Q = \int_0^h 2\pi r v(r \cdot Z) dZ \tag{20}$$

ここに $v(r \cdot Z)$ は流速の分布関数で $Z_{\max}$ における流速を V_c とするとき (21) 式により流入水温を推定することができる。

$$V_c \leq V_e \tag{21}$$

なお $v(r \cdot Z)$ については、模型実験による値を採用しても良いが、正確には躍層を持つ実物の流速分布を使用しなければならない。

§ 4 取水温度

従来の取水理論においては限界取水流速と躍層の関係について躍層の上下における温度分布を境界面において不連続として取扱っているため、 ΔT の値が大となれば下層水の移動は考えられなくなる。しかしながら連続の状態にある実物の躍層において境界層附近の流速を限界流速 V_c 以下にしたと仮定してもその点に ΔT に相当する剪断抵抗を期待することは難しく、下層水の混入は避けられないと考えられる。

先に両型式における流入流速の測定を行なったが、これによって実物における取水温度を推定してみた。まず表面より所定取水量 (42.0 m³/sec) にいたるまでの流速分布をとりだし、深部の流水の流速は取水塔を回る旋回流と考えた。

いま躍層内の水温を 23.0°C 下層からの流入水の温度を 15.0°C と考えて、躍層の深さが 2.0, 2.5, 3.0 m の場合につきそれぞれ取水温度を計算すると 表-2 のごとくなる。取水口からの距離が大となれば取水形状の影響が小となるが、取水口から 5.0 m までの温度を両型式についてまとめると 表-3 のとおりとなる。

表-2 取 水 温 計 算 値

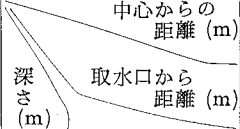
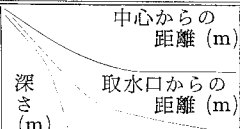
フ ロ ー テ ィ ン グ ・ タ ィ プ		中心からの 距離 (m)	2.0	7.5	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
		取水口からの 距離 (m)	0.0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
	2.0	流 量 (m³/sec)	35.56	32.11	37.99	33.20	17.62	17.90	27.78
		温 度 (°C)	21.00	21.11	22.23	21.32	18.35	18.40	20.29
	2.5	流 量 (m³/sec)	42.00	37.54	42.00	42.00	28.92	26.60	37.38
		温 度 (°C)	23.00	22.15	23.00	23.00	20.50	20.06	22.12
シ リ ン ダ ー ・ タ ィ プ		中心からの 距離 (m)		4.1	5.1	5.6	6.6	7.6	8.6
		取水口からの 距離 (m)		0.5	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
	2.0	流 量 (m³/sec)		42.00	32.54	18.54	18.78	19.01	20.89
		温 度 (°C)		23.00	21.19	18.53	18.81	18.62	15.40
	2.5	流 量 (m³/sec)		42.00	39.86	25.30	25.49	27.00	27.86
		温 度 (°C)		23.00	22.59	19.81	19.85	20.14	15.48
	3.0	流 量 (m³/sec)		42.00	42.00	31.14	32.2	34.55	34.32
		温 度 (°C)		23.00	23.00	20.93	21.14	21.58	20.53

表-3 推 定 取 水 温 (°C)

取水形式	躍層推定深 (m)	2.0	2.5	3.0
フローティング・タイプ		20.5	22.1	22.6
シリンダー・タイプ		19.2	20.1	21.7

IV 結 語

2 カ年にわたり表面取水方式による取水塔の模型実験を行なったが、従来の取水形式である斜樋あるいは多段式ゲイトを持つ取水塔に比較すれば取水位置および流入流速などの点で温水取水に関しては取水管による方式が非常に優れていることが明らかとなった。しかしながら躍層以下の低温水の流入を完全に防止することは困難なようである。現在までに実験により明らかとなった点を列記すれば次のごとくである。

1. 出口断面積は流量の如何にかかわらず縮小しなければならない。
2. 管路におけるすべての水頭損失が流量に与える影響は $(\text{出口断面積})^2 / (\text{入口断面積})^2$ にほぼ比例するので非常に小さく概算を行なっても大差はない。
3. 理想的に設計された管路において動水勾配線は出口

に向って常に下降し、すべての点に空洞現象の生ずる恐れはない。

4. 負荷の変動が取水管に与える影響は小さい。
5. 流入水脈の限界はフローティング・タイプで約 3.0 m シリンダー・タイプで約 4.0 m 程度と考えられる。
6. 温水取水能力はフローティング・タイプの方が優れていると思われる。
7. 伸縮部構造は漸縮型式の方が水理学的に優れていると思われる。
8. 設計案における取水管では空気連行の恐れはなく、限界水深は約 0.75 m である。
9. 設計案の取水管は波高 1.0 m 程度の波に対して十分安全である。
10. フロートを除去した取水は絶対避けなければならない。
11. 設計案におけるフロート下面の負圧は零に近くほぼ理想的であり、流入水深を下げることは好ましくないと考えられる。
12. 躍層以下の低温水の混入は避けられないが、それによる水温低下は僅少であると思われる。

む す び

本実験は取水管の温水取水効果，負荷変動の流況など2・3の水理学的な問題に焦点をしばって行なったもので，与えられた問題については実験的にほぼ明らかにされたと思う。今後流速分布の理論的解析，フロート下面曲線の実

験的解析などについて研究したいと考えている。

終に本実験に終始御協力下さった北海道開発局農水部土地改良課各位ならびに河川研究室実験担当者各位に謝意を表する。

(森 記)

註 1) 水理公式集 p:250