

# 海水取水時の沈砂池機能と放水口の洗掘

—東海発電所を事例として—

大 西 外 明\*  
小 西 勇\*\*

## 1. はじめに

さきに、東海発電所の復水器冷却水取水鋼管の稼動現況を報告し、建設に先立って行なわれた調査と模型実験の結果と、構造物完成後の実際の状況との比較を行なった<sup>1)</sup>。その後、本取水設備の計画や建設に関係された人達から放水口の洗掘状況と沈砂池の現状についても報告して欲しいとの希望があった。放水口の洗掘は、計画当時においては大きな関心事であり、東京大学土木工学科港湾研究室において模型実験が行なわれ<sup>2)</sup>、その結果を基にして構造物の設計が行なわれたわけである。また、沈砂池については、今後、外洋での取水を行なう例が多くなるにつれて、その必要性が、高まることが予想される点から、高い関心も当然かと思われる。幸い、放水口の洗掘状況および沈砂池の状況については、過去において調査を実施しているので、それらの結果を基に若干の考察を加え参考に供することとしたい。なお、今後とも、調査を適時継続していく予定である。関係各位の一層のご指導を願う次第である。

## 2. 東海発電所復水器冷却水路の沈砂池と放水口の概要

復水器冷却水取放水施設の配置は図-1に示すとおりであるが、その機能、諸元等については、著者らの前報告<sup>1)</sup>を参照されたい。

沈砂池および取水路は、工事中、取水鋼管製作の乾渠として利用したが、完成後の現在の形状寸法は、図-2に示すとおりである。また放水口

の形状寸法は図-3のとおりである。本発電所の放水口のように冷却水を海岸において直接放流する方式は工事費が低廉であるが、計画時および設計時において、放水が周辺海岸や構造物に与える影響を十分検討する必要がある。また、放水口敷高の決定に際しては、放水路内への波の侵入の有無あるいはその程度、さらに、発電所停止時における放水路内への滞積土砂の有無とその除去方法等についても十分な検討を行なう必要がある。

東海発電所の冷却水取放水設備の計画設計に際してはこれらの問題点を広範囲な現地調査と水理模型実験を行なうことにより解明した<sup>2),3)</sup>。

図-1 一般配置図

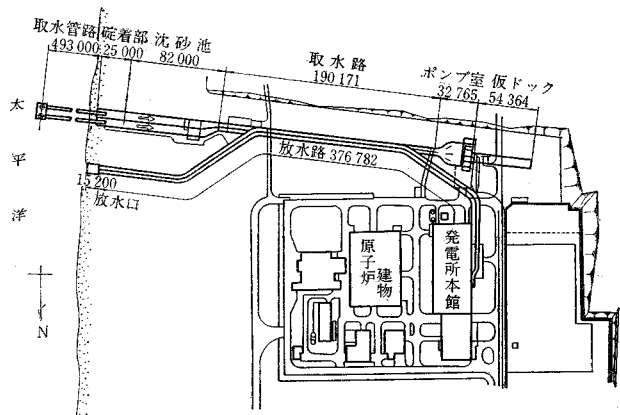
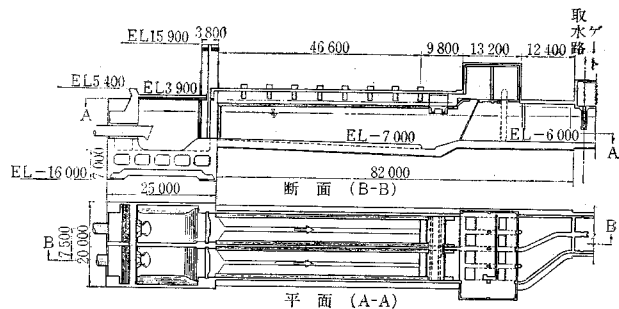
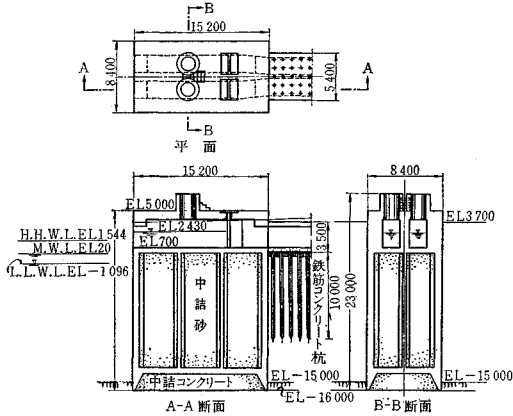


図-2 沈砂池



\* 正会員 日本原子力発電(株)技術本部土木建築課副長  
\*\* 正会員 日本原子力発電(株)技術本部土木建築課主任

図-3 放水口



### 3. 放水口付近の洗掘

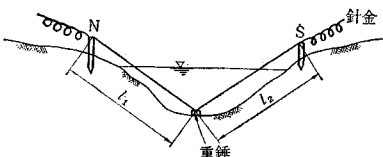
放水口洗掘状況の現地調査は、過去3回にわたり、水面下の洗掘孔の形状を実測することにより行なった。

発電所運転中、冷却水の放流を行ないながら洗掘孔の深さを直接測量することはきわめて危険であるので、次のような方法で実施した。すなわち、図-4を参照して

- ① 測量杭 N, S の平面位置、高さをあらかじめ測定しておく。
- ② 目盛を付した針金に重錘を取り付け、N, S を結び直線上の深みへ投入する。
- ③ 重錘と各測量杭までの距離  $l_1, l_2$  を測定する。
- ④ 測量杭と  $l_1, l_2$  の関係を解いて深さを求める。

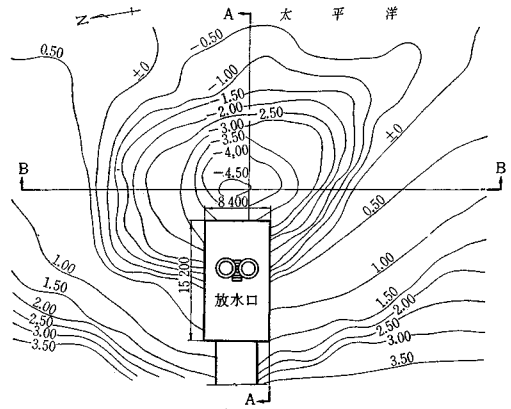
各測定時の放流量、潮位および測定によりえられた洗掘の最大深さおよびその平面的広がり、表-1のとおりである。この3回の測定のうち、41年6月18日のもは、放水口設計流量  $Q=15.5\text{ m}^3/\text{sec}$  を放流したときのものであるが、その実測結果を図示すると、図-5のとおりである。この図にみられるように、この場合の最大洗掘深さは約 4.5m、幅約 34m、背後への広がり、は約 7m となっている。さて、放水口を海岸に設けて海中に冷却水を放流しようとする場合、将来起こりうる最大洗掘深さを、設計時において適確に予測することはきわめて重要な事項である。この問題を解決する最も一般的、かつ、有力な手段は水理模型実験であるが、この種の模型実験では、流量、波浪特性の決定に Froude の相似則を用いるとしても、Reynolds 数の影響も、当然、相当

図-4 洗掘孔測量方法の説明図



程度考慮しなくてはならないことが考えられる。しかしその考慮すべき程度は、必ずしも明確ではない。そこでこの問題解決の手掛りを与えるため、上記の実測結果と本放水口計画時に行なった模型実験結果を比較検討してみることとする。模型実験は、東京大学土木工学科港湾研究室で行なわれたが、その実験結果<sup>4)</sup>から、最大洗掘部の水深  $d_{\text{max}}$  を求めると、表-2のとおりである。表中‘実物換算’とは、模型における数値に模型の縮尺倍数 40 を乗じて求めたものである。このようにして求めた

図-5 (a) 放水口前面洗掘孔の測量



測量年月：昭41・6・18  
C.W. ポンプ稼動状況：C.W. ポンプ4台運転中  
( $Q=15.5\text{ m}^3/\text{sec}$ )

図-5 (b) 図-5 (a) の B-B 断面

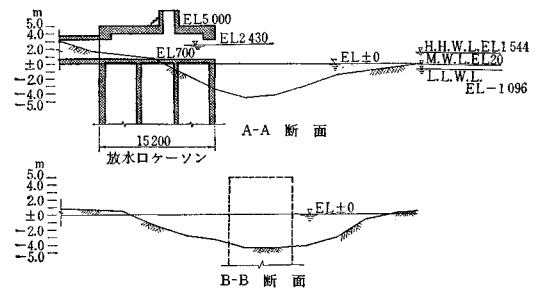


表-1 放水口洗掘状況実測の概要

測定年月日	測定時の条件		洗掘の最大深さ (m)	洗掘の広さ (m)
	海面水位 (cm)	放流量 ( $\text{m}^3/\text{sec}$ )		
昭和 39 年 4 月 21 日	-82	15.5	2.0	幅 20, 背後へ 3
昭和 41 年 6 月 4 日	-7	4.0	2.5	幅 15, 背後へ 2
昭和 41 年 6 月 18 日	10	15.5	4.5	幅 34, 背後へ 7

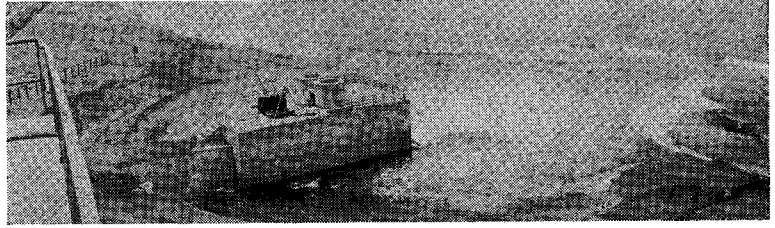
表-2 模型実験による洗掘深さ ( $Q=15.5\text{ m}^3/\text{sec}$  のとき)

海面水位	最大洗掘部水深	
	模型 (cm)	実物換算 (m)
H.H.W.L (EL. 1.544 m)	8.5	3.4
M. W. L (EL. 0.020 m)	13.5	5.4
L.L.W.L (EL.-1.096 m)	14.5	5.8

放水口洗掘深さは、海面水位により、3.4~5.8 m の範囲に変化している。この数値は、表-1 に示した現地実測でえられた洗掘深さ4.5 m と、たまたまよく一致した大きさである。しかし、この種の模型実験を Froude の相似則にしたがって行なってよいと結論づけるためには、より多くの実測資料を取る必要がある。

発電所運開後の放水口における洗掘深さ等の現況は、このように、模型実験によりえられた範囲内に収まっている。放水口基礎は模型実験の結果に従いが、図-3 に示すとおり、鉄筋コンクリートケーソンにより根入れを深くして着岩させてあり、また、それに接続する放水路基礎には、鉄筋コンクリート杭を施してあるので、洗掘に伴う構造物の危険は全くない。また、放水口設置に伴う周辺海岸線の変化については、模型実験から、かなりの浸食が予測されたが、設計当時では、台風時におけるような大きな波浪による洗掘等を想定して防護工を施工するのは、きわめて不経済であると判断され、発電所運開後において実状を調査し、その対策を考えることになっていた。発電所運転開始後における冷却水の放流と、特に、高潮位時の大波浪に伴う放水口の左右海岸線の浸食状況は、写真-1 に示すとおりであるが、現在、海岸線浸食範囲もほぼ明確になったので、敷地の保護のため目下その防護工を検討中である。

写真-1 高潮位時の大波浪に伴う放水口の左右岸線の浸食状況



するためには、取水路および沈砂池の設備費と復水器管維持費の和ができるだけ小さくなるように配慮しなくてはならない。しかし、これを定量的に決定することは、現在のところきわめて困難であるが、山下<sup>5),6)</sup>が行なった実験的研究は、この問題解決の一つの手掛りを与えてくれるものと考えられる。すなわち、山下は、砂粒混合の流水による金属材料の摩耗および砂粒の影響について実験的研究を行なって次の結果、すなわち、流体の速度に比例して金属面の侵食は増大すること、および侵食の程度は砂の量、粒径および金属表面の材質に関係することを見出した。このうち、流体の速度のほうは、復水器設計条件により決定されるので、沈砂池の設計に当たって考慮しなければならないのは、後者の砂の量および粒径に関する点である。この点について山下は、さらに詳細な実験を行ない次の結果をえた。

(i) 砂粒混合率と摩耗との関係

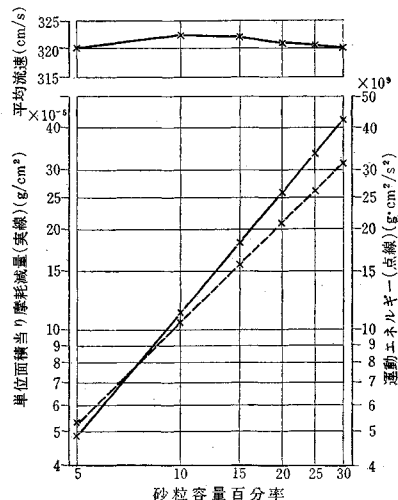
図-6 は砂粒容量百分率と金属面の単位面積当りの摩耗減量との関係で、平均流速を 320 cm/sec に保った場合である。この図には砂粒の全運動エネルギーも併記してある。この図からわかるように、摩耗減量および砂粒の全運動エネルギーは、混入率の増加とともに増大するが、運動エネルギーの増加割合に比べ摩耗減量の増加割合

4. 東海発電所沈砂池の沈砂能力と海水中浮遊砂の関係

冷却水の水源として、外洋の海水を使用する例が将来増加することが予測されるが、漂砂海岸における取水の場合、沈砂池の設置が不可欠となる。しかしながら、浮遊砂を含む海水を対象とした沈砂池施工例が少なく、設計上の基本的な考え方は、まだ確立されていないのが現状であると考えられる。そこで、この種の問題解決の手がかりをえるため、東海発電所の沈砂池を例に取り、若干の考察を行なってみたい。

東海発電所では、海水中の浮遊砂が取水口より流入するのを極力防止する意味合いから、取水管先端を沿岸砂洲の消長する地点より沖合いに設けることとしたため、取水管延長は約 500 m となった。浮遊砂の流入を完全に防止しようとするれば、取水管長が長くなり不経済となる。一方、取水管長の短縮を計ろうとすると、沈砂池および排砂設備の費用が増加し、また、流入砂量の増加と粒径の増大は、復水器管の損耗を促進して、復水器維持費の増加をきたす。復水器冷却水の水路系を最適に設計

図-6



合は大である。次に、管内の圧力を一定に保って、砂粒混合の流水の流速を変動させたときの摩擦減量と砂粒の運動エネルギーの変化の状態を示すと、図-7 のとおりである。すなわち砂の混入率が増加すると流速が低下するにもかかわらず、摩擦減量が大きくなっているが、これは流速低下の影響より砂粒混合率が増加する影響が、摩擦減量にとっては大であることを示すものと考えられる。

(ii) 粒径と摩擦減量との関係

流水中の砂の容量百分率を 10% とし、管路内流速を 300 cm/sec に一定に保ち、粒径を変えた場合の摩擦減量の変化の状態は、図-8 のとおりである。この図から見られるように、平均粒径が 0~0.2 mm までは摩擦減量は急激な増加を示し約 0.2 mm のとき最大値を示し、以下平均粒径が大になるにつれて漸次減少する。さらに山下は粒形の影響についても検討したが、粒形の相違より粒径の相違のほうが、摩擦減量に与える影響が大きくなると述べている。また、相異なった粒径のものが混合した場合、そのおのおの異なる砂粒単独の場合の摩擦減量の平均値より大なる摩擦減量を示すことを明らかにしている。

以上の実験結果を考慮すると、沈砂池の設計条件としては、復水器管を閉塞する恐れのある大粒径のものを沈砂せしめることは当然であるが、最大効果をあげるためには 100~200 μ という沈砂困難な微粒砂を除去しなければならないことになる。一方、当発電所の取水口位置の水深 8 m における底質は、本間、堀川の調査報告書<sup>7)</sup>によると、中央粒径約 125 μ で良好な対数正規分布を示している。また浮遊砂の鉛直濃度分布についてみると、海面が比較的静穏なときは浮遊砂はほとんどなく、海底上 2 m の所で開口する取水口をとおして流入してくる砂の量は問題となるほどではないと考えられる。しかし台風時におけるような海面が荒れた状態では、図-9 に示すように海面近くまで砂が浮遊し、その濃度も大きくなる。海底底質の中央粒径が、125 μ であることを考えれば、荒天時にはこの 125 μ を中心とした中細砂が沈砂池内に運ばれてくることになる。それで沈砂池設計に際して、125 μ 粒径のものの完全除去を果すことができれば理想的であろうが、そうした場合、沈砂池の規模は非常

図-7

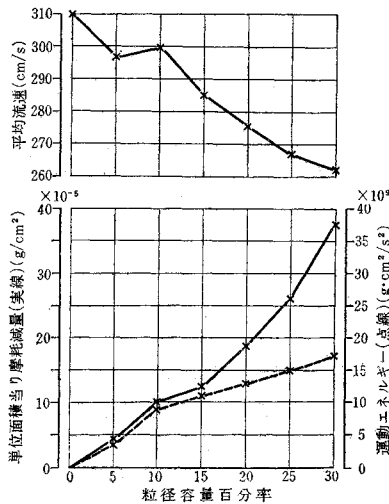


図-8

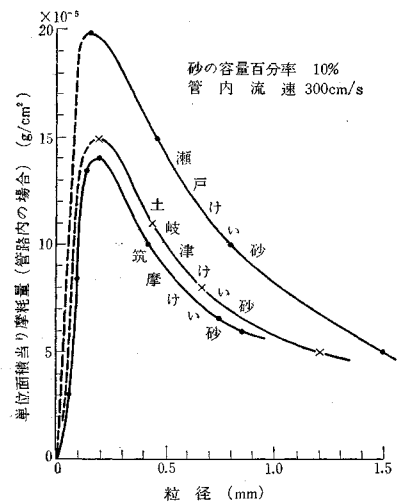
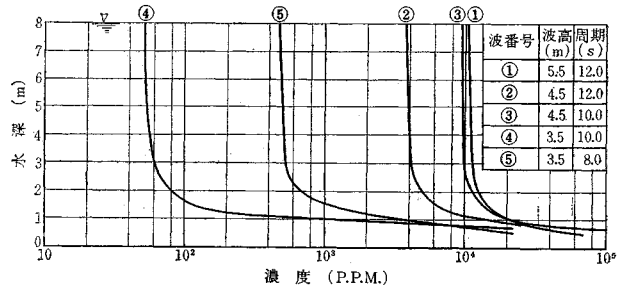


図-9 荒天時浮遊砂濃度分布 (計算結果)



に大きくなる。そのため、復水器管維持費と沈砂池設備工事費との双方を考慮に入れた工学的あるいは技術的判断が必要となってくるわけである。前に述べた山下の実験結果を参考にすれば、200 μ 径の砂が 100% 除去できるように設計すれば、復水器管の摩擦減量が最大になることを避けることができる。いま、既設の東海発電所沈砂池の沈砂能力を砂の粒径別に計算してみると、表-3 のとおりとなる。表-3 により明らかなように、本発電所沈砂池は、復水器管に大きな摩擦を与えることが予測される 200 μ 付近の砂を十分に沈降させる能力を有するといえよう。しかし、荒天時の浮遊砂の中で大きなウエイトを占める 125 μ 前後の砂は沈砂池内で 100% 沈降することはできず、ある程度沈砂池よりポンプ室の方へ運ばれるものと考えられる。このことは次節に述べる調査結果からも明らかである。なお海面静穏時には、浮遊砂はほとんどないので、本沈砂池は実用上十分な能力を有するものと著者らは考えている。

5. 発電所運開後の沈砂池下流水路内の土砂沈殿状況

前節において述べたように、本発電所冷却水取水口周

表-3 沈砂池における粒径別沈殿能力

粒 径 (μ)	50	100	120	150	180	200	250
沈 降 速 度 (cm/sec)*	0.2	0.7	0.9	1.3	1.7	2.0	2.9
沈 殿 率 (%)**	10	35	45	65	85	100	100
備 考	常時流入土砂			荒天時流入土砂			

注：① \* は限界沈降速度 (v) を示す      ② \*\* は沈砂池の除去率 (E) を示す

$$v = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{d}{C_D} \cdot \frac{\rho' - \rho}{\rho} \cdot g} = 45.4 \sqrt{\frac{d}{C_D}}$$

d: 粒子の径  
 C<sub>D</sub>: 粒子の抵抗係数  
 ρ': 粒子の密度=2.65  
 ρ: 媒体の密度=1.03  
 C<sub>D</sub> は R<sub>e</sub> により定まる  
 水温は 10°C とする

$$E = \frac{LBv}{Q}$$

L: 沈砂池長さ  
 B: 沈砂池幅  
 v: 沈降速度  
 Q: 流量

表-4 取水路内滞積土砂の粒度測定結果 (%)

粒径(μ) No.	350	250	177	125	74	53	以下
1~1	—	4.12	11.00	30.63	36.50	11.16	6.59
1~2	—	4.60	5.98	5.90	3.60	79.92	—
2~1	5.60	10.54	21.80	43.78	15.06	0.78	2.44
2~2	1.54	5.71	16.71	45.08	24.68	2.63	3.65
3~1	0.19	1.23	46.14	41.22	7.71	0.80	2.17
4~1	2.76	4.46	16.30	51.66	20.22	1.60	3.00
4~2	1.20	2.30	9.98	38.06	26.62	9.56	12.28
5~1	4.10	2.80	6.74	29.10	30.00	9.74	17.52
5~2	1.30	3.52	13.62	47.24	23.14	4.40	6.78
6~1	—	7.62	28.76	46.80	7.98	2.00	6.84
6~2	—	2.45	10.85	50.09	26.88	5.48	4.25
7~1	3.30	3.20	7.80	41.40	34.24	4.40	5.66
7~2	3.64	6.36	6.10	33.66	18.46	21.00	10.78
平均	1.82	4.53	15.52	38.82	21.16	11.81	6.34

辺の海域では、荒天時において、125 μ を中心とした粒径を有する浮遊砂が海水中に分布し、長時間にわたる発電所運転後に、沈砂池下流にも 125 μ を中心とした砂が多少沈殿することが予測された。そこで発電所運転後ロータリースクリーン背面からポンプ水槽に至る水路内に沈殿した泥土を採取して粒度分析を行えば、浮遊砂に関する上記の調査方法や調査結果の解析方法、および前節で述べた沈砂池能力の検討結果の検証に役立つものと考えられる。

東海発電所では、昭和 41 年 5 月に沈砂池よりポンプ

図-10 滞積泥土・砂等の調査およびサンプル採取箇所

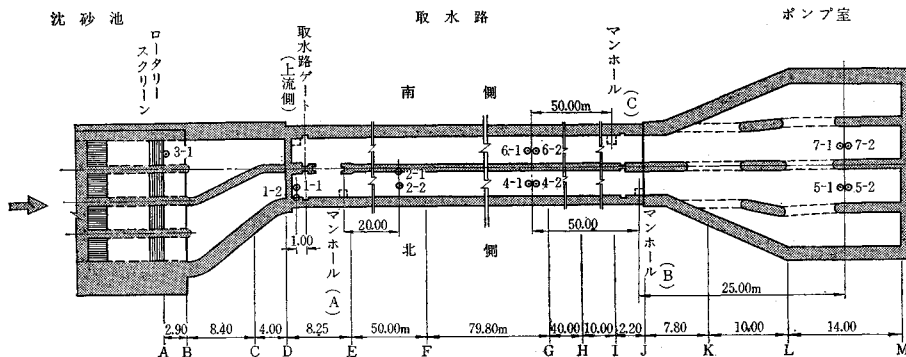
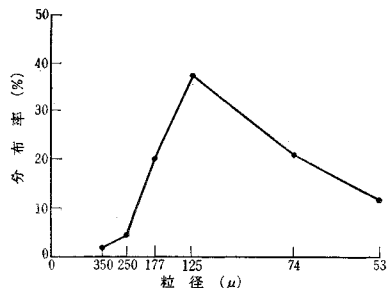


図-11 取水路内滞積泥土・砂等の平均粒度



水そうに至る取水路内における沈砂状況調査を行なった。調査は潜水夫により各部の沈砂厚さを実測することと、沈降した泥土のサンプルを採取し、粒度分析を行なうことよりなっている。調査場所は 図-10 に示すようにロータリースクリーンからポンプ水槽に至る区間について行なわれたが、泥土、砂の滞積状況はスクリーン背面で 0.7~1.00 m、取水路内で 0.05~0.40 m、ポンプ室では 0~0.6 m であった。また、採取したサンプルの粒度測定の結果は、表-4、図-11 のとおりである。これにより明らかなように、各採取位置とも 125 μ の粒径のものが最も多く含まれている。このことは前節で述べた海象調査における予測とよく一致しており、沈砂池能力の検討に関して述べた予測とも合致している。しかし、表-3 では、200 μ 以上の土砂が 100% 沈降しうる結果が示されているのに対して、実測結果では、そのようになっていない。これは、表-3 に示した沈砂池の沈砂効果を示す数値が、一般的に用いられる砂の沈降速度に基づくものであり、その沈降速度は沈砂池内における流れの乱れの規模や、土砂が有する比重、形状等の特性によって多少異なるものと考えられるので、上記の差異はむしろ当然の結果といえよう。沈砂池下流の取水路部分の沈砂量は、発電所運転上問題となるほどではなく、発電所の

定期点検時に排出することで十分である。この点から、当発電所の沈砂池は、当初期待したおりの沈砂能力を有しているといえることができる。なお、沈砂池内の土砂は、発電所定期点検時のほか、適時必要に応

じ、排砂ポンプにより排出している。なお、沈砂池を設計する場合、十分な機能を長期間保持しうる排砂ポンプを設置することは、きわめて重要なことである。

## 6. おわりに

本発電所放水口における洗掘状況を実測して、先に行なわれた模型実験の結果と比較し、Froude の相似則による実験値が、当放水口の場合、現地での実測値とよく一致したことを述べた。こうした実物と模型との比較検討は、さらに多くの事例について、また、種々の構造物について行なわれ、意見を交わされることを、著者らは願っている。漂砂海岸における火力あるいは原子力発電所の沈砂池の設計には、土木技術者が有する海岸工学、流体力学に関する知識のほか、排砂ポンプ、復水器タービン等に関する知識を加えなくては経済的な設計をすることはできない。沈砂池からポンプ水槽に至る取水路内の沈砂状況の調査結果は、本発電所取放水設備の計画に先立って行なわれた海象調査方法と解析方法が妥当であったことをわれわれに示した。このことは、今後におけるこの種の海象調査に強いサポートを与えてくれるものと考えられる。

なお、本文を取りまとめるに当り、日本原子力発電(株)敦賀建設所土木建築課長 真鍋恭平氏より、有益な多くの助言をいただいたことを特記し、感謝の意を表したい。

## 参考文献

- 1) 辻本・竹村・大西・渡辺：長大な海底取水鋼管における保守上の問題点，土木学会誌，Vol. 53. Oct. 1968
- 2) M. Hom-ma, K. Horikawa, C. Sonu : Field Investigation at Tokai, Japan, Conducted by Combined Procedure of Macroscopic and Microscopic Approaches, Coastal Engineering in Japan, Dec. 1962
- 3) M. Hom-ma, K. Horikawa : Experimental Studies on the Cooling Water Intake System for the Atomic Power Plant at Tokai, Japan, Coastal Engineering in Japan, Dec. 1962
- 4) 東京大学工学部港湾研究室：冷却水海中取水および放水口に関する研究（日本原子力発電(株)委託研究報告書），昭和36年6月
- 5) 山下貞二：砂粒混在の流水による金属平板の摩耗について，日本機械学会論文集（第3部）23巻，133号（昭和32.9）
- 6) 山下貞二：砂粒混在の流水による金属材料の摩耗に及ぼす砂粒の影響について，日本機械学会論文集（第3部）23巻，133号（昭和32.9）
- 7) M. Hom-ma, K. Horikawa : Suspended Sediment due to Wave Action, Proc. 8th Conf. on Coastal Engineering.

(1968.12.11・受付)

## 鹿島研究所出版会 専門分野別在庫目録

土木・都市・建設経営・施工管理

〈図書目録呈〉

### 新刊

#### ●無音無振動基礎工法

無音無振動基礎工法研究会編  
B5判・240頁 ¥2,200

工法の分類・問題点ならびに障害原因の追求と対策などの研究を行ない、その成果を1巻にまとめた唯一の指導書。各社の工法がもれなく分類・掲載されている。

#### ●インターチェンジの計画と設計

武部健一・八木寿共著B5判250頁 ¥2,800  
データや方式・実例等の図版・写真を豊富に挿入し・技術者が直ちに活用できる実務書。

#### ●土木一般

- 土木年鑑1969…………… ¥3,500
- 薬液注入工法—指針と解説—… ¥1,400
- 土木工事ののり面保護工… ¥1,500
- 鉄筋コンクリートの耐久性… ¥430
- 基礎反力の解法…………… ¥800
- 高速道路計画論…………… ¥2,400

- 建設機械手帳…………… ¥300
- 土木・建築の防錆防食…………… ¥1,200
- 現場技術者のための土質工学… ¥2,500
- 土地造成…………… ¥1,000
- トンネル施工の問題点と対策… ¥1,300
- 軟弱粘土の圧密…………… ¥800
- 軟弱地盤における  
建築の地下掘削工法… ¥590
- 井筒基礎…………… ¥450
- 簡易索道の計画と設計…………… ¥980
- 荷役・運搬の計画と設計… ¥1,200
- アースドリル基礎工法…………… ¥600
- 構造物基礎の応力調整工法… ¥580
- 道路土工の調査から設計施工まで… ¥1,300
- シールド工法…………… ¥1,600
- 水底トンネル…………… ¥840
- 爆破—付ANFO爆薬—…………… ¥900
- 土木新技術選書〈全5巻〉… ¥1,000~1,400
- 都市工学
- 増補都市問題事典…………… ¥3,500
- 都市問題概説…………… ¥950
- 都市開発講座〈全3巻〉…各 ¥980
- 駐車場の計画と設計…………… ¥2,500
- 新都市の計画…………… ¥2,500
- 都市の自動車交通…………… ¥4,800
- 新しい都市の未来像…………… ¥920
- フランスの都市計画…………… ¥900

- 都市の新しい運輸計画…………… ¥750
- オランダの総合開発計画…………… ¥2,000
- 東京2,000万都市の改造計画… ¥1,500
- 都市の土地利用計画…………… ¥3,200
- 国土と都市の造形…………… ¥5,600
- 高蔵寺ニュータウン計画…………… ¥2,700
- ランドスケープ・アーキテクチャ… ¥5,300
- 敷地計画の技法…………… ¥1,600
- 高速道路計画論…………… ¥2,400
- 都市のデザイン…………… ¥6,300
- 新しい都市理論…………… ¥1,200
- 前産業型都市…………… ¥1,200
- 地域再開発…………… ¥1,200
- 変動する大都市…………… ¥1,000
- 英国の都市計画法…………… ¥1,200
- 建設経営・施工管理
- 工事管理…………… ¥800
- 工事原価管理…………… ¥650
- わかりやすいPERT・CPM… ¥1,600
- 新しい工程管理…………… ¥1,300
- 建設業成功の秘訣…………… ¥680
- 新版ジョイント・ヴェンチュア… ¥480
- 国際ジョイント・ヴェンチュア… ¥1,500
- 工事入手から未収金回収まで… ¥480
- 建設経営入門…………… ¥750
- 道路経済学…………… ¥1,400
- 建設業経営選書〈全13巻〉… ¥700~1,500

鹿島研究所出版会

■東京都港区赤坂六丁目5-13 電話:582/2251 振替東京180883