地下発電所岩盤空洞における大規模吹付け コンクリートの施工

御 牧 陽 一*

概要 東京電力(株)が建設中の今市地下発電所は、空洞断面が 1420 m^2 あるため、 100 kg/cm^2 に及ぶ初期地圧を考慮して断面形状を卵形とし、掘削に伴う再配分応力の集中を防ぐとともに、支保覆工として NATM の考え方を基本に、岩盤 PS 工、ロックボルト工、吹付けコンクリート工を採用している。特に、従来、仮設的に用いられていた吹付けコンクリート工を、そのまま永久覆工を兼ねる設計としている点に特徴がある。本稿は、吹付けコンクリート工の設計・施工の概要を報告するものである。

キーワード：吹付けコンクリート、鋼繊維補強吹付けコンクリート、曲げタフネス、乾式、湿式

1. ま え が き

東京電力(株)は、栃木県の北部山間部の鬼怒川支川砥川において、有効落差 524 m 、最大出力 105 万 kW ($3\times 35\text{ 万 kW}$) の大容量純揚水式発電所を建設中(昭和 54 年 10 月～63 年 7 月)である。発電所は地下式であり、空洞規模は発電機室と変圧器室を同一建屋としたため、幅 $33.5\times$ 高さ $51\times$ 長さ 160 m で、断面積 1420 m^2 (主機断面)、掘削量 20 万 m^3 に及び、世界でも最大級のものである。

空洞の断面形状は、従来のきのこ形断面に対し、天井アーチコンクリートのない卵形を、わが国で初めて採用している。空洞の支保覆工としては、後述するように堅硬・緻密な周辺岩盤をできるだけ有効に利用する NATM の考え方を基本に、岩盤 PS 工、ロックボルト工、吹付けコンクリート工を採用し、発電機床面標高以上では、そのまま永久覆工を兼ねる設計としている。空洞本体の掘削工事は昭和 57 年 10 月に完了し、引き続き発電機床面以下のコンクリート構造物を構築中である。

本稿は、岩盤の空洞壁面に施工した吹付けコンクリートの設計・施工ならびに品質管理結果について、そのあらましを紹介するものである。

2. 空洞の支保・覆工の設計概要

空洞周辺の岩盤は、基岩である古生代の砂岩、粘板岩の互層部分に、中生代末期にマグマが貫入して生成された珪質砂岩と火道角礫岩で構成されている。いずれも堅

硬・緻密(一軸圧縮強度 800 kg/cm^2 、岩盤弾性係数 20 万 kg/cm^2 以上)であり、顕著な破碎帯、湧水は存在しない。岩盤等級でみると局部的に C_M 級が点在するが、大部分は $C_H\sim B$ 級である。

空洞は地表から 400 m の地山深部に位置し、地山初期応力も大きいことから、掘削に伴う再配分応力が空洞壁面近傍特定個所に集中するのを防ぐとともに、空洞壁面に沿って円滑に応力の伝達が行われるよう断面形状を卵形にするとともに、支保覆工として PS 工、ロックボルト工、吹付けコンクリート工を採用し、掘削された新壁面の変位をできるだけ早く拘束して空洞の安定をはかる設計としている。

2.1 岩盤 PS 工

空洞を安定確保するため、確実に力を導入できる PS 工を主要な支保工とし採用した。

PS 工の長さは、定着部を空洞開削に伴うゆるみ領域外にしたため、 $l=15\text{ m}$ (内定着長 4 m) とし、設計導入力には壁面変位を考慮し、ワイヤストランドの降伏点荷重の 70% に相当する 96 t ケーブルとした。

PS 工の配置は、粘弾塑性および弾塑性によるモデル計算の結果を基本に、地質条件、経済性等を総合勘案して、標準的には 8 m^2 (天井部)～ 10 m^2 (側壁部)に 1 本 (96 t) とし、岩質に応じ適宜割増しを行っている。

2.2 ロックボルト工、吹付けコンクリート工

ロックボルト工 ($\phi=29\text{ mm}$, $l=5\text{ m}$, 導入力 $P_i=5\text{ t}$ /本、全面接着型)ならびに吹付けコンクリート工は、掘削により出現した新壁面を早急に拘束することによって応力再配分をスムーズに行わせ、表面部分の剝離等によ

* 東京電力(株)今市水力総建設所第二建設所所長

図-1 支保覆工パターン図

写真-1 壁面に吹付けコンクリートを施工した
地下発電所空洞全景

る局部破壊が壁面深部に進展するのを防ぐとともに、天井部岩盤のゆるみによる崩落や側壁部のすべり出しに対して抵抗する支保部材として考慮している。

吹付けコンクリートの厚さは、アーチ部で $8 \text{ cm} \times 4 \text{ 層}=32 \text{ cm}$ 、側壁部において $8 \text{ cm} \times 3 \text{ 層}=24 \text{ cm}$ とし、最表層部には、永久覆工を兼ねることも考慮して、鋼繊維混入の吹付けコンクリートを採用した(図-1)。

3. 吹付けコンクリートの設計

吹付けコンクリート工は、従来、仮設的な要素がつよく、施工性ならびに品質に関する系統だった実績データならびに規定基準に乏しいため、当地点の吹付けコンクリートの設計にあたっては、施工性ならびに品質について以下のような事前検討を実施して 配合設計 を 決定 した。

3.1 吹付けコンクリートの施工性ならびに品質に関

Large-Scaled Shotcrete Lining in the Deep Cavern at the Imaichi Underground Power Station

By Yoichi Mimaki

Concrete Journal, Vol. 21, No. 9, pp. 53~59, Sept. 1983

Synopsis Tokyo Electric Power Company is now constructing the Imaichi Underground Power Station with the cross section area of 1420 m^2 . In the design of the power cavern, the horse-shoe shape section is adopted to avoid the stress concentration at the stage of opening induced by high initial rock pressure more than 100 kg/cm^2 . Rock anchoring, rock bolting and shotcreting, conventionally used for temporary works, are also utilized as the permanent supporting system on the basis of the NATM concept. This paper describes the outline of the design and construction of shotcreting.

Keywords : shotcreting, steel-fiber reinforced concrete by shotcrete, bending toughness, dry system, wet system

図-2 乾式ならびに SEC 工法併用湿式吹付け方式のフローチャート

表-1 吹付けコンクリート試験結果の比較
(プレレンコンクリート)

試験項目 吹付け方式	圧縮強度*1		はね返り*2		粉塵量*2 (mg/m³) 吹付け後 10分後 高さ 1.5m
	σ_{28} (kg/cm²)	変動係数 (%)	アーチ部	側壁部	
乾式	325	13.5	32	29	6.2
湿式 (SEC 工法併用)	293	12.4	18	14	4.0

*1 施工時の品質管理試験の平均値を使用

*2 施工性試験結果の平均値を使用

する試験結果

(1) 乾式と湿式 (SEC 工法併用) との比較

吹付けコンクリートの施工方式の採用にあたっては、乾式ならびに湿式の両方で吹付けコンクリートの施工性ならびに品質に関する試験を実施した。なお、湿式吹付けコンクリートについては SEC 工法 (Sand Enveloped with Cement) を併用し、いっそうの効率化をはかるととした。

乾式ならびに湿式 (SEC 工法併用) のフローチャートは図-2 に示すとおりである。

乾式工法は、連続練りミキサでドライミックスした吹付け材料を、材料台車に搭載されたアリバー 260 吹付け機によりマテリアルホースに圧送し、ノズル直前で圧力水ならびに急結剤を添加して吹き付ける方式である。

一方、SEC 工法併用の湿式方式は、サンドコンローラで表面水量を処理した砂にセメント、水を加えて、いわゆる SEC モルタルを分割練りまぜし、別途ドライミックスした吹付け材料をノズル直前の混合管で合体する方式である。なお、SEC モルタルとは、表面水量をコントロールした砂とセメントを練りまぜることにより

砂粒子表面に水セメント比の小さなセメントペーストの皮殻を形成したモルタルであり、ブリージングが少なく、強度が高い特性をもっている。

乾式ならびに SEC 工法併用の湿式方式による吹付けコンクリートの施工性ならびに品質試験結果を表-1 に示すが、これを要約すると以下のとおりである。

- 1) 圧縮強度 (σ_{28}) は、乾式で 325 kg/cm² (変動係数 13.5%)、SEC 工法併用湿式で 293 kg/cm² (変動係数 12.4%) である。
- 2) はね返り率は、乾式が 30% 程度であるのに対し、SEC 工法併用湿式方式は 15% 程度と小さい。
- 3) 同様に粉塵量も、乾式が 6.2 mg/m³ であるのに対し、湿式方式は、4.0 mg/m³ と小さい。

以上の結果に施工時の条件を加味して乾式ならびに湿式吹付けの特徴を列挙すると以下のとおりとなる。

品質面では、

- 1) 乾式は、ノズル直前で技能員により水を添加するため、品質管理がむずかしい。一方、湿式は、プラントでモルタルを練りまぜるため配合管理が容易で安定した品質が得られる。これは、わずかではあるが変動係数の差に現れている。
- 2) 圧縮強度は、同一配合に対し、乾式のほうが SEC 併用湿式よりも大きい。これは、はね返り条件の差による付着配合の相違であると思われる。

ちなみに吹付け前の基本配合ではセメント 350 kg/m³ であるのに対し、吹付け後の付着配合では、乾式でセメント 480 kg/m³、SEC 方式で 410 kg/m³ であり、乾式のほうが結果的には富配合になっている。

また、施工面については、

- 1) 乾式は、SEC 方式に比較し、遠距離圧送性が大である。
- 2) 乾式は、SEC 方式に比較し、設備が簡単で機動性に富んでいる。
- 3) 乾式は、SEC 方式に比較し、空練り材料で搬入するため、吹付けトラブルに対し時間的制約がない。
- 4) SEC 方式は、吹付け材料が 2 系列供給であるためモルタルポンプの容量が追加され、乾式に比較し約 1.5 倍 (6~8 m³/h) の施工能力がある。

以上、乾式と SEC 方式では、品質ならびに施工面でそれぞれ一長一短があり、優劣を断定することはむずかしく、現場の条件に合致した方式を採用することが望ましい。

当地点では、発電所空洞では乾式を、周辺トンネルでは SEC 併用湿式吹付けを採用した。

(2) 鋼繊維補強吹付けコンクリート

吹付けコンクリートの最表層部には、ひびわれに対する抵抗性ならびに変形能(タフネス)を得るため、鋼繊維

ケース	プレーン	0.5X0.5X20	0.5X0.5X25	0.5X0.6X30	0.5X0.5X25	0.5X0.5X25	φ0.45X25
	C=350kg/m³	1vol. C=350kg/m³	1vol. C=350kg/m³	1.5vol. C=500kg/m³	1vol. C=350kg/m³	1vol. C=400kg/m³	1vol. C=350kg/m³
吐出量	乾式	6.0m³/h	5.1m³/h	4.1m³/h	4.0m³/h	3.2m³/h	4.8m³/h
試験	パナール試験						
	プレーン	SFRC(A社)					SFRC(B社)
養生方法	1週間坑内養生 → 温度20℃ 湿度80% 養生 → 試験前48h水中養生						

図-3 SFRC の試験結果

維補強吹付けコンクリート (Steel Fiber Reinforced Concrete by shotcrete, 以下 SFRC と略記) を施工する設計とした。

SFRC に関する試験では、混入する鋼繊維の長さ、混入率、吹付けコンクリートの配合をパラメータとし、強度、タフネス、施工性等について比較した。その結果は図-3 に示すが、要約すると以下のとおりである。

- 1) 圧縮強度は、プレーンコンクリートと比較しても大差ない結果が得られたが、曲げタフネスは鋼繊維の長さが長いほど増加し、プレーンコンクリートと比較し、曲げに対する効果が顕著に現れた。
- 2) 吐出能力は、鋼繊維が長いほど低下する傾向を示し、特に鋼繊維混入率 1.5 vol.% の場合は脈動が生じ、施工不可能と判断された。鋼繊維混入率 1 vol.% の場合は吐出量に若干の差が生じたが、鋼繊維の長さのいかにかわらず、施工性ならびに鋼繊維付着は良好であった。
- 3) 単位セメント量は、350 kg/m³ よりも 400 kg/m³ のほうが強度特性ならびに施工性が良好であった。これらの結果ならびに経済性を考慮して、当地点では単位セメント量をプレーンと同じく $c=350 \text{ kg/m}^3$ とし鋼繊維混入率を 1 vol.%, 長さを 30 mm と定めた。

3.2 吹付けコンクリートの配合設計ならびに品質管理基準

(1) 吹付けコンクリートの配合設計

吹付けコンクリートの設計基準強度は、圧縮・曲げ・せん断破壊モデルを想定し、 $\sigma_{ck}=200 \text{ kg/cm}^2$ とし、目標強度は、吹付けコンクリートの品質のばらつきを考慮し変動係数を 20% と想定して 250 kg/cm^2 と定めた。

上記目標強度に対し、3.1 に述べた吹付けコンクリートの施工性ならびに品質試験の結果から、プレーンコンクリートならびに SFRC の基本配合を表-2 に示すように定めた。

(2) 品質管理基準

品質管理基準としては、以下に述べる理由から、パネル採取コアによる圧縮強度を代表させることとし、現場採取コアによる試験は補完として実施することとした。

- 1) 圧縮強度と曲げならびにせん断強度の相関性は図-4 に示すとおりであり、圧縮強度を把握することにより、吹付けコンクリートの品質が十分推定できる。特に圧縮強度の相関性が高い。
- 2) パネル採取コアと現場採取コア ($\phi=65 \text{ mm}$) との圧縮強度の相関は図-5 に示すとおりで、非常に高い相関関係を示し、実用上簡便なパネル採取コアによる強度管理が可能と判断される。

表-2 設 計 配 合

	粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメ ント比 (%)	細骨材率 (%)	鋼 繊 維 混 入 率 (vol.%)	単 位 量 (kg/m ³)					
					水	セメント	細 骨 材	粗 骨 材	鋼 繊 維	混 和 剤
ブレン	15	50以下	70	—	175	350	1272	549	—	シグニット L 17.5
SFRC	15	50以下	70	1.0	175	350	1272	549	80	シグニット L 17.5
鋼繊維形状 0.5×0.5×30 mm または φ0.5×30 mm										

注) 骨材はトンネル掘削石屑の砕砂を使用。

図-4 圧縮強度と曲げおよびせん断強度との相関

4. 吹付けコンクリートの施工

4.1 吹付けコンクリートの施工手順ならびに施工機械

発電所空洞における吹付け工は、掘削により新壁面が出現すると、ただちに吹付けコンクリート1層、ならびにロックボルト工 ($l=5$ m) の1次支保を実施し、壁面拘束を極力迅速に行い、ゆるみの進展を防ぐことを目的としている。2～4層目については、PS 工施工後、切羽の進行とは無関係に、後向きの仕事として実施しているが、これについても、できるだけ早く最終層まで吹付け工を完成させることとしている。

吹付けコンクリートの施工にあたっては、安全と施工能率の向上、ならびに省力化をはかるため、吹付けロボットの開発をはじめとして、鋼繊維混入のためのディスペンサ (分散機) の開発等、従来の工法とは異なった吹付けシステムを開発した。主要な機械名ならびに特徴は

図-5 パネル採取コアと現場コアの圧縮強度の比較

表-3, 図-6 に示すとおりである。

なお、吹付け施工にあたっては、表-4 に示すような管理基準に基づいて実施した。

4.2 施工実績ならびに品質管理結果

発電所空洞壁面ならびに周辺の関連トンネルにおいて施工した吹付けコンクリートの実績は表-5 に示すとおりであり、発電所本体 (乾式) においては、ブレンコンクリート 62 000 m³, SFRC 13 000 m³, 周辺トンネル (湿式) では 26 000 m³ に及んだ。

(1) ブレン吹付けコンクリートの品質管理結果

(a) 発電所本体 (乾式吹付け)

パネルコアならびに、現場採取コアによる圧縮強度 (σ_{28}) の試験結果は図-7 に示すとおりであり、次のように要約される。

- 1) パネルコアの平均圧縮強度 (試験回数 58 回) は $\sigma_{28}=325$ kg/cm², 変動係数 13.5% となり、設計基準強度を大幅に上まわった。

図-6 吹付けロボットおよび材料供給台車

表—3 吹付け工施工機械一覧(乾式吹付け)

機 械 名	規 格	台数	目 的	特 徴
コンクリートモービル (ミキサ)	CM-250 寸法 8×2.3×3 m 重量 6500 kg 所要電力 32 kW	1	練りまぜ	①連続的に練りまぜ、20 m³/h の能力をもつ。 ②計量は容積計量で簡便である。 ③機械がコンパクトで運転操作が簡単、かつ故障が少ない。
ファイバーディスペンサ	定量分散型 (20 kg/min)	1	繊維の分散投入	①連続ミキサとの組合せでファイバーボールが生じがたい。 ②連続かつ定量供給が可能である。
トラックミキサ 吹付け機	容量 6 m³ アリバー 260 寸法 1.65×0.85×1.55 m 重量 1000 kg 使用空気量 12~14 m³/min 使用空気圧 3~6 kg/cm²	2	運 搬 吹 付 け	①5~10 m³/h の吹付け能力をもつ。 ②ホッパ台車と直結しているため、大量連続施工が可能。
送水ポンプ	ブースターポンプ AL-20 (模型3連ブランジャー) 寸法 0.43×0.78×0.5 m 重量 71 kg	2	送 水	①吐出量 23~30 l/min ②吐出圧力 20 kg/cm² ③水量計をセットして送水量を管理し、コンクリート品質の均一化がはかれる。
吹付けロボット	寸法 3.1×8.0×2.5 m 重量 11000 kg ノズルスライド速度 0~15 cm/s ノズル俯仰角 90° ノズル旋回角 180°	2	自動吹付け	①連続大量施工可能 6 m³/h (ノズル径 65 mm, 吐出圧力 3 kg/cm²) ②上下・左右・前後の任意方向にノズル操作が可能で、吹付け面に對し常にノズルを直角に保持できる。 ③足回りはクローラタイプなので機動性に富んでいる。 ④切羽に直接作業員が行かないため、安全施工が可能である。

材料供給
台車に搭
載してコ
ンパクト
化

写真—2 吹付けロボットによる施工状況

- 2) 現場採取コア強度(試験回数 29 回)は $\sigma_{28}=296$ kg/cm², 変動係数 10.6% であり、パネルコアの 90% を示した。掘削壁面の凹凸に基づく打継目角度を考慮すると、ほぼ妥当な値が得られている。これは、吹付けロボットの開発が大きく貢献しているものと思われる。また、現場採取コアとパネルコアの圧縮強度の相関は 図—5 に示すとおりであり、相関係数は 0.746 と高い値を示し、品質管理をパネルで実施しても十分妥当であると判断された。
- 3) σ_{28} 強度に対する長期材令強度の伸びは σ_{28} に対し、 σ_{91} , σ_{180} , σ_{360} は 124, 142, 163% となり、普通コンクリートに比較して大きく、永久覆工の条件を備えているものと考えられる。

表—4 吹付けコンクリートの施工管理基準

管理対象	管理項目	管理基準	頻 度
細 骨 材 吹 付 け 機	砂の表面水率	±1%	吹付けごと
	圧送水平距離	ブレーション 20~60 m SFRC 20~40 m	"
	使用圧力	3~5 kg/cm² (供給圧力 6.5 kg/cm² 以上)	"
	吹付け面とノズルとの距離 流量計キャリブレーション	1.0~1.5 m (吹付け面に垂直) ±5% (I)	1 回/日
連続ミキサ	計量器キャリブレーション 練りまぜ配合試験	セメント ±2% 骨 材 ±3%	1 回/日 または 1 回/150 m³ 1 回/500 m³

(b) 周辺トンネル (SEC 工法併用湿式吹付け)

周辺トンネルは SEC で吹付けを実施したが、パネルコアの 35 回の平均圧縮強度は $\sigma_{28}=293$ kg/cm², 変動係数 12.4% であり、乾式と同様、設計基準強度を上まわった値を示した。

表—5 吹付け施工実績ならびに品質管理試験回数

	発電所本体(乾式)		周辺トンネル(SEC)	備 考
	ブレーション	SFRC	ブレーション	
吹付け面積 (m²/1層)	アーチ 6700 側壁 13000	同 左	26000	・アーチ部 {ブレーション 3 層 SFRC 1 層 ・側壁上部(EL473 以上) {ブレーション 2 層 SFRC 1 層 ・側壁下部(EL473 以下) {ブレーション 1 層 SFRC 1 層
吹付け延べ面積 (実績)	61800 m²	12500 m²	26000 m²	試験 1 回の供試体は 3 本である。
品質管理試験 ①パネルコア ②現場採取コア	58 回 29 回	14 回 —	35 回 13 回

図-7 強度特性の管理図 (プレーン)

乾式に比較して強度が若干下まわったのは、はね返り率が小さいため付着したコンクリート中のセメント量が乾式に比し相対的に少なく、付着配合が異なるためと考えられる。

(2) 鋼繊維補強吹付けコンクリートの品質管理結果

図-8 強度特性の管理図 (SFRC)

空洞壁面吹付けコンクリートの最表層部に採用した SFRC の強度ならびにタフネスの品質管理結果は図-8に示すとおりであり、平均圧縮強度は $\sigma_{28} = 310 \text{ kg/cm}^2$ (変動係数 16%)、圧縮タフネス 1.6 (変動係数 9%) であり、いずれもプレーンコンクリートに比較し顕著な差はない。一方、平均曲げ強度は 60 kg/cm^2 (変動係数 16%)、曲げタフネスは 5.2 (変動係数 32%) であり、プレーンに比較し、強度で約 20%、タフネスで 3~9 倍増加している。

鋼繊維の効果は曲げ強度に顕著に現れたのは、鋼繊維の配向が吹付け方向にほぼ二次元配向状態になっており、ライニングの曲げ挙動に有効に配向しているためである。

5. おわりに

昭和 57 年 10 月に、発電所空洞掘削は全量 20 m^3 を終了し、岩盤の壁面挙動も、従来のきのこ形状の空洞に比べ、かなり小さな値で収束した。

吹付けコンクリートが壁面挙動を早期に拘束した効果はきわめて大きいと判断され、さらに永久覆工を兼ねるという当工事の試みは、ある程度の成果をあげることができたと考えられる。

最後に、当工事の吹付け施工にあたりご指導・ご助言をいただいた東京大学生産技術研究所の小林一輔教授ならびに鹿島建設(株)、大成建設(株)の各技術研究所および今市出張所の方々に深く感謝する次第である。