

技術展望

鉄筋コンクリートの歴史・エネルギー施設（電力）

HISTORICAL DEVELOPMENT OF REINFORCED CONCRETE FOR ELECTRICAL POWER FACILITIES

水越達雄

Tatsuo MIZUKOSHI

東京電力（株）顧問
（〒100 千代田区内幸町 1-1-3）

Keywords :

history, reinforced concrete, electrical power facilities

エネルギー施設（電力）は、水力、火力、原子力等の発電設備や送変電設備等に大別されるが、明治年代の構造物では、石張り、レンガ等が主に用いられており、鉄筋コンクリートが本格的に採用されたのは、大正年間の水力発電所の基礎や建屋等からである。

現在では、各種の電力土木構造物に鉄筋コンクリートが使用されており、水力、火力、原子力発電設備ならびに送変電の土木設備の鉄筋コンクリートの変遷について以下に概観する。

1. 水力発電設備

わが国で最初の水力発電所は、明治 21 年に宮城紡績会社の自家用として建設された三居沢発電所である。

明治 40 年代後半から、高圧の長距離送電が可能となり各地で大型の一般水力発電所が建設されるようになった。

昭和 15 年には、当時、日本最大の信濃川発電所（16 万 5 000 kW）が建設された。

第二次大戦後は、大規模な貯水池式水力が次々と建設され、昭和 30 年代中頃からは揚水式水力も建設されるようになった。

最近では、良好な立地点の枯渇により一般水力の開発は低迷しているが、一方で超高落差大容量の揚水発電所が活発に開発されている。

水力発電所のコンクリート構造物には、上流から、ダム、取水口、導水路、調圧水槽、水圧管路、発電所基礎、放水路、放水口などがある。ここでは、水力発電所特有の鉄筋コンクリート構造物として、発電所基礎、地下発電所アーチコンクリート、導水路（特に圧力トンネル）および調圧水槽をとりあげ、設計上の変遷を述べることにする。

(1) 発電所基礎

発電所は、水車、発電機などを収める主機室と、運転に必要な開閉器室、配電盤室、事務室などで構成され、発電所形式は主機室の設置場所により地上式・半地下式・地下式発電所に分類される。

わが国の発電所形式を年代別にみると昭和 20 年代後半までは、ほとんどが地上式発電所である。

半地下式は、大正 10 年に建設された信濃川水系土村第三発電所（1 050 kW）が最初である。当初は開削式矩形躯体であったが、昭和 17 年に建設された阿部隈川水系曲竹発電所（2 500 kW）では、主機室の空間を有効に利用し、コンパクトに設計したことにより、地下に設けた主機室を円形に設計している。この立坑型半地下式は、その後数多く採用されるようになった。

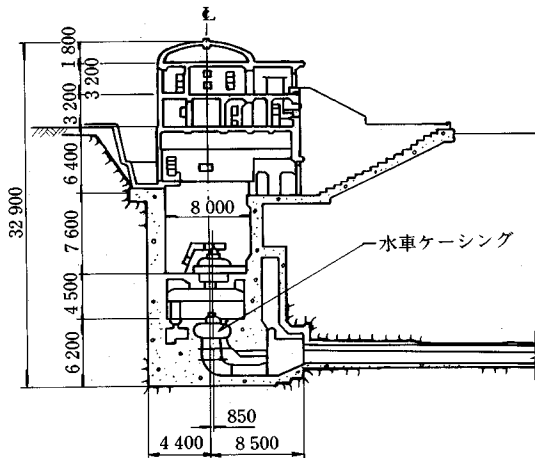
地下式発電所は、昭和 18 年に完成した石狩川水系雨龍発電所（5 万 1 000 kW）が最初で、地下空洞の規模は高さ 28 m、幅 15 m、長さ 51 m、掘削量 2 万 5 200 m³であった。これまでに建設された地下発電所は 51 地点（建設中を含む）を数える。

地下発電所の空洞の規模は建設年代とともに大規模となり、昭和 54 年運開の新高瀬川発電所（128 万 kW、東京電力）では、高さ 54.5 m、幅 27 m、長さ 163 m、掘削量 21 万 m³となっている。

主機の基礎構造は、水車形式と密接な関係がある。横軸水車の場合は、水車・発電機を同じ基礎面に据え付けられる一床式が採用される。立軸水車は、支持方法によって、二床式とパレル（単床）式がある。

一床式基礎は、発電所底部に設けた放水路の上部を厚いコンクリート床版で覆い、この上に水車、発電機を並列に据え付けたものである。大正初期までは、すべてこの基礎形式の発電所であったが、その後は主として小規模発電所に用いられるようになった。

二床式基礎は、発電機を支持する床面と水車床面を



図一 曲竹発電所断面図

別々に設ける形式で、これらの荷重を鉄筋コンクリートばり（ラーメン構造）あるいはアーチ形床版で受け、建屋の側壁または柱を利用して基礎に伝達する方法であり、大正4年に建設された木曾川水系西横山発電所に立軸水車が使用されて以来、比較的小容量の立軸水車の発電所に採用された。なお、大正15年に建設された木曾川水系上麻生発電所（2万7000 kW）では、放水路の洪水位が高く、発電機床面を洪水位以上とするため、水車軸を長くし、中間に軸受室を設け三床式（多床式）としている。

バレル式基礎は、発電機支持台を水車ケーシング上に直接立ち上げ、これによって支持する形式である。これは、鉄筋コンクリート造りの円筒形支持棒であるが、据付けのため鋼製バレルとし、外周に耐震用の鉄筋コンクリート壁を施工した信濃川水系小諸発電所（1万6200 kW、昭和2年）・泰阜発電所（5万2500 kW、昭和11年）もある。

また、バレル式基礎は、地上式、半地下式、地下式のいずれの形式の発電所でも同様な構造、設計手法がとられている。

ここでケーシングまわりのコンクリートの設計について述べると、ケーシング上部に直接発電機基礎台を設けるバレル式では、バレルよりケーシングに伝達される上載荷重を、ケーシング周辺コンクリートで受け持つと考え、この周辺コンクリートをラーメンまたは固定ばり構造として応力を求め配筋補強を行っている。

最近の大容量発電所では、周辺コンクリートの応力を有限要素法ならびに光弾性実験によって検討し、周辺コンクリートのクラック防止対策がとられている。また、ドラフトチューブまわりのコンクリートは、ケーシング、バレル等の基礎となるので、これらの上載荷重をドラフトチューブとドラフトチューブ周辺の基礎岩盤に伝達す

るため、門形またはボックスラーメンとして設計される。

最近の水車据付深度の大きい発電所では、上載荷重のみならず内外水圧についての構造検討も行われている。

（2）地下発電所アーチコンクリート

地下発電所の天井アーチ部の覆工方法については、掘削、岩盤補強方法により異なるが、空洞本体の掘削前に天井アーチコンクリートを先行打設し、本体掘削時の安全を確保するきのこ形形状が、雨籠発電所以降多く採用されている。この場合、アーチコンクリートの形状としては、アーチ効果と経済性を考慮して、スパンライズ比を0.25程度とした例が多い。

しかし、近年の空洞掘削時の挙動解析手法やその裏付けとなる計測技術の進歩により、アーチコンクリートならびに周辺岩盤の挙動が明らかになり、地点の条件に応じたアーチ形状が選定されるようになった。

新高瀬川発電所、奥吉野発電所（高さ42 m、幅20 m、長さ158 m、関西電力）、本川発電所（高さ47 m、幅24 m、長さ165 m、四国電力）では、アーチコンクリートに発生する応力は、主にアバット部の空洞内部へ向かう変形に起因するという考え方により、ストラット効果のより大きい偏平なアーチ形状が採用された。

高見発電所（高さ43 m、幅22 m、長さ55 m、北海道電力）では同心等厚アーチ、俣野川発電所（高さ46 m、幅24 m、長さ156 m、中国電力）ではアーチアバットの切込みを少なくするため、三心等厚アーチをそれぞれ採用している。

一方、昭和53年に建設された有峰第三発電所（高さ21 m、幅15 m、長さ30 m、北陸電力）において初めてNATM工法が採用され、アーチコンクリートのない地下空洞が掘削された。昭和63年に建設された今市発電所（高さ51 m、幅33.5 m、長さ160 m、東京電力）では、さらに大規模な空洞がNATM工法で掘削され、天井壁面の支保には、PS工、SFRCが採用された。

（3）導水路トンネル

導水路覆工は、明治、大正期の無圧トンネルでは、無巻、レンガ巻、コンクリートブロック巻であるが、大正中～昭和初期にはコンクリート巻立がみられるようになった。初期の水力発電所は水路式あるいは調整池式であり、導水路は無圧トンネルであった。その後、河川水をより一層有効利用するためダム水路式が多く建設されるようになり、利用水深の大きい貯水池や調整池から取水するため、導水路は圧力トンネルとなった。圧力トンネルは大正7年に建設された日高川水系高津尾発電所（内径4.0 m）が最初であり、コンクリート巻立が採用された。逆にいえば、コンクリート巻立が可能となったことにより、圧力トンネルが建設されるようになったといえよう。

無圧トンネルの構造設計上考慮すべきことは、施工時

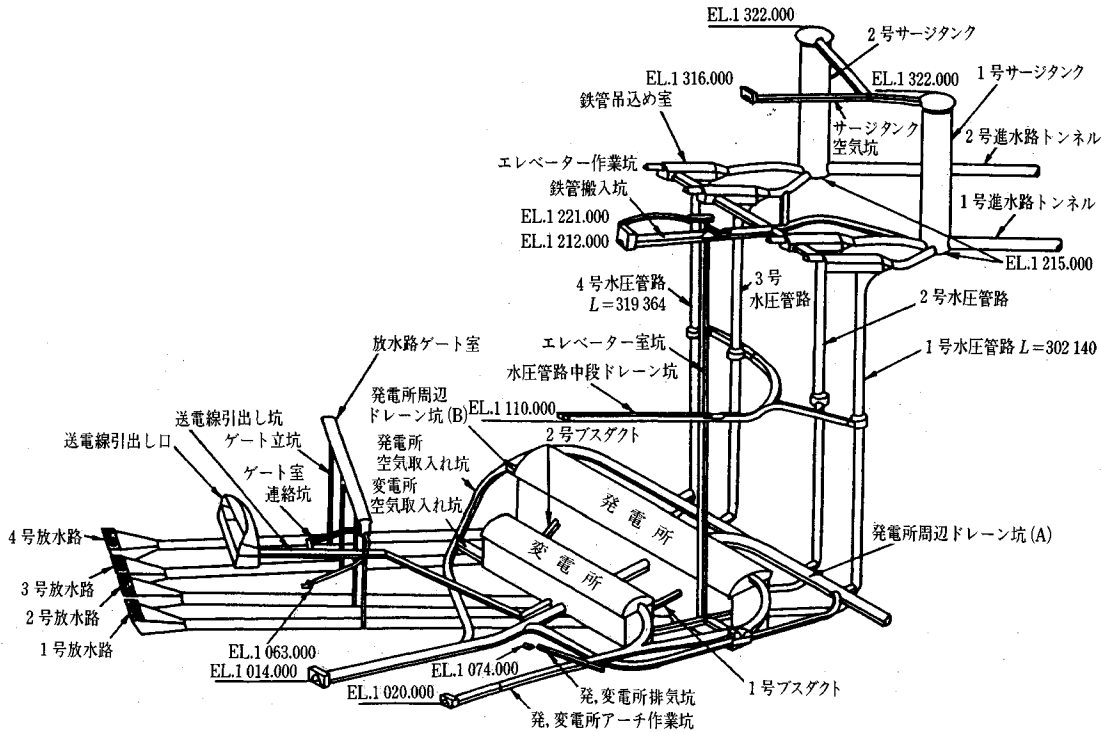


図-2 新高瀬川発電所立体図

の安全、完成後の外圧に対する安全、漏水の防止および流水抵抗の減少であり、一般的には無筋コンクリートで巻立てられている。これに対し圧力トンネルでは、無圧トンネルの設計上考慮すべき事項に加え、内圧による覆工の引張応力に対するコンクリート巻厚および鉄筋量の検討、さらには内圧の地山への確実な伝達と、掘削時に生じた地山ゆるみ領域の補強のため、内圧と地質に応じたグラウチングの検討が必要である。以下に圧力トンネル覆工設計の変遷を示す。

圧力トンネルの形状は、一般に応力集中を避けるために円形断面が選ばれることが多い。1920年(大正9年)スイスのリトム発電所において、圧力トンネルからの漏水事故が発生し、これを契機に地山の特性を把握するための土質力学的研究が開始された。

庄川水系小牧発電所(昭和5年)の圧力トンネル(内径6.51m)の巻立は、岩質に応じて1~2尺, 2.5尺(30.5~61cm, 76.2cm)とし、水槽付近の地質の悪いところでは特に3尺(91.4cm)としている。石井頼一郎は、この小牧発電所の圧力トンネルからの漏水量について、欧米各国の例と比較し、巻立コンクリートの質と地山との接触面の扱いの重要性について指摘した(昭和8年)。

谷本勉之助は、地山を弾性体とする扱いの下に、調圧水槽(立坑)と圧力トンネルの等方厚肉管の解を求め、木曾川水系兼山発電所(昭和19年)の導水路トンネル(内

径5.75m)を例に計算例を示している(昭和16年)。その他のわが国の研究例として、久野重一郎は、地山の表面を水平とし、有限深さのところに円孔を開け、内部より水圧がかかる場合の地山応力についての解を得ている(昭和4年)。

Otto. Frey-Baerは、内圧のある無巻トンネルの岩盤内応力、無筋ならびに鉄筋コンクリート巻立の各部応力について、巻立コンクリートと周囲の岩盤は均質一様であり、その間には隙間がなく密着し、摩擦が働かないなどの仮定のもとに式を誘導した(昭和19年)。

Otto. Frey-Baerの理論は、わが国に紹介されて以降、黒部川第四(昭和36年、内径4.8m、関西電力)、新高瀬川(内径8.0m)、有峰第一(昭和56年、内径4.5m、北陸電力)などの大容量、高内圧の導水路トンネルをはじめ多くの圧力トンネルの設計に導入されている。一般に圧力トンネルでは、地山に高圧グラウチングを行うため、ゆるみ域の問題を大きく取り上げたものはなかったが、奥多々良木(昭和49年、内径6.3m、関西電力)、本川(内径6.0m)では、このゆるみ域を考慮して3層弾性体として圧力トンネルの覆工設計を行っている。

大規模なダム建設と相まってトンネルが高圧、大容量化してくると、コンクリート巻立にプレストレスを与え、内圧による引張応力に抵抗させることが考えられるようになった。その方法として、プレストレスをコンク

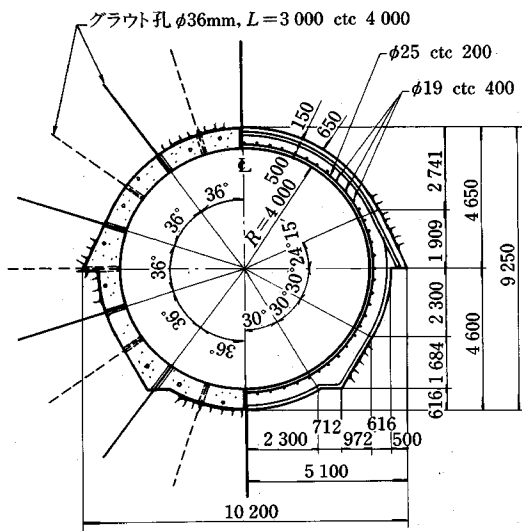


図-3 新高瀬川発電所導水路断面図（鋼アーチ支保工部）

リート巻立そのものに鋼線を与える、いわゆる機械的な方法と、グラウト注入などを利用して外圧によりプレストレスを残留させる方法の2つが検討された。

機械的な方法によるものは施工が複雑で、工期も長くなり、施工例は少ないが、音沢発電所（昭和60年、内径5.2m、関西電力）では、導水路トンネルのTBM施工区間のうち、被りの薄い区間で採用されている。

一方、外圧を与える方法についてはグラウト注入のみでプレストレスを与え得るか否かについての研究が行われ、その成果は、奥多々良木、奥矢作第一（昭和56年、内径7.3m、中部電力）、奥矢作第二（昭和56年、内径7.3m、中部電力）、本川などの導水路トンネルの設計検討に導入されている。

また、化学的にプレストレスを与えるコンクリート素材として、膨張セメントを混入した膨張コンクリートが、昭和48年に、早川第三発電所（内径3.1m、東京電力）、下小鳥発電所（内径4.7m、関西電力）の導水路トンネルの一部に採用されている。

近年、圧力トンネル覆工の実挙動の計測が行われ、設計手法へのフィードバックがなされるようになった。新高瀬川発電所、玉原発電所（昭和57年、内径5.5m、東京電力）では、巻立時、グラウト時、通水時の各ケースについて巻立コンクリートに発生する応力、変形、温度および背水圧等を測定し、巻立コンクリートの安定性を確認している。

（4）調圧水槽

圧力トンネルの登場とともに、導水路と水圧鉄管の接合部に調圧水槽が建設されるようになった。

調圧水槽は、形式により単動、水室、差動、制水口調圧水槽などに分類される。

単動調圧水槽が最初に用いられたのは、相模川水系八ツ沢発電所（明治45年、4万2,000kW）であり、その後数多く建設されたが、その設置年代は、昭和初期から20年頃に最も多く最近ほとんどない。

水室調圧水槽が最初に設置されたのは、利根川水系鬼怒川発電所（大正1年、12万7,000kW）であり、その後あまり設置されていないが、昭和40年代後半から大規模揚水発電所（関西電力奥多々良木発電所初め10か所）に用いられている。

差動調圧水槽が最初に用いられたのは、由良川水系由良川発電所（大正13年、2,460kW）であり、昭和初期には利根川水系佐久発電所（昭和3年、7万5,700kW、東京電力）で、当時世界一高いといわれる鋼製調圧水槽が設置されている。しかし、この形式は構造が複雑で施工しにくいことから最近の採用は少ない。

制水口調圧水槽が最初に用いられたのは、松浦川水系巖木発電所（昭和5年、5,230kW）であり、昭和50年から60年にかけて大型の揚水発電所（東京電力新高瀬川発電所など7か所）に多く用いられている。昭和48年運開の柳又発電所（6万1,900kW、九州電力）においては、調圧水槽の壁体部をわが国初のPC構造とし、プレストレスの導入を確認するため鉄筋応力計により、工事中の計測を実施している。また、奥矢作第一発電所（31万5,000kW）では、地形地質などの条件からその位置に制約を受け、導水路調圧水槽は地下部分をRC構造、地上部分をPC構造とし、また放水路調圧水槽は地上部分をPC構造とした。これらの調圧水槽はプレストレストコンクリート構造としては、わが国最大級の規模をもつものである。

2. 火力発電設備

わが国で最初の火力発電所は、明治20年に東京電燈が建設した出力25kWの第2電灯局（当時は火力発電所ではなく、電灯局と称していた）といわれている。

明治37年には、アメリカからの技術導入により、わが国初の蒸気タービン式の深川火力発電所（出力1,000kW、東京市街鉄道）が建設され、その後、大正を経て昭和初期までの間に、石炭を燃料とした数万kW級の火力発電所が、電力消費の伸長が著しい大都市圏内に建設された。

9電力体制に移行した昭和20年代後半からは、四大工業地帯を中心に大規模な新鋭火力が建設され始めた。

昭和30年代以降は、最大電力が毎年30～40万kWと増加するとともに、火力発電所に最新技術が導入され、機器の大容量化と熱効率の向上が進み、さらには燃料単価の安定等から火力発電の経済性は著しく高まり、全国的に石炭・石油を燃料とした新鋭大規模火力が次々に建設された。

表一 昭和初期の石炭火力における主要な鉄筋コンクリート構造物

設備	RC構造物	潮田火力	鶴見火力
取放水設備	取水路	暗渠構造, 延長: 207m 幅 2.7m×高さ 2.7m×2連 (137m) 幅 3.0m×高さ 3.0m×2連 (70m)	暗渠構造, 延長: 328m 幅 4.3m×高さ 2.2m×1連
	放水路	暗渠構造, 延長: 311m 幅 1.8m×高さ 2.5m×1連 (120m) 幅 2.0m×高さ 1.5m×2連 (191m)	暗渠構造, 延長: 62m 幅 4.3m×高さ 2.1m×1連
揚炭設備	揚炭棧橋	RC桁式構造 (木杭基礎) 幅 1.5m×延長 96.6m	RC床版構造 (RC杭基礎) 幅 6.0m×延長 100.6m

この結果, 昭和 33~34 年には, 火力発電の認可出力が, 水力発電のそれを上回り, 電源構成は「火主水従」となり, その後も 2 度のオイルショックや公害問題を経験したものの, これらを契機に, LNG 火力等の拡大や脱硝・脱硫技術等の向上を図ることにより, 現在, 認可出力が全発電認可出力の約 6 割を占めている。

(1) 火力発電所の鉄筋コンクリート構造物

火力発電所における主要な土木設備は, 港湾施設, 復水器冷却用施設および燃料施設である。このうち, 電力土木設備の代表的な鉄筋コンクリート構造物は, 港湾施設では, 防波堤, 護岸, 復水器冷却用施設では, 取放水路, 燃料施設では, 地上式タンク基礎, LNG 地下式貯槽等であるので, 以下これらについて述べることにする。

わが国で初めて構築された火力発電設備の鉄筋コンクリート構造物は, おそらく, 明治 37 年にわが国初の蒸気タービンを採用して建設された深川火力発電所におけるタービン基礎であると推定される。

少なくとも, 大正から昭和の初期にかけて建設された出力数万 kW の石炭火力における揚炭・取放水設備が火力土木設備関係の最初の本格的な鉄筋コンクリート構造物であったと推察される。

昭和 6 年に建設された潮田火力発電所 (6 万 4 000 kW, 東京電力, 昭和 47 年廃止) および昭和 11 年に建設された鶴見火力発電所 (17 万 8 500 kW, 東京電力, 昭和 59 年廃止) における主要な鉄筋コンクリート構造物は, 表一に示すとおりである。

昭和 20 年代後半から相次いで建設された, 数十万 kW 級の新鋭石炭火力における主要な鉄筋コンクリート構造物は, 種類としては表一と同様であるが, 比較的大規模になったため, 特に施工方法に当時の工夫がみられる。

当時は, 鉄製工具等きわめて少ない時代で当然シートパイル等も入手が難しく, シートパイルを極力使用しないように取放水路, 防波堤, 護岸, 揚炭埠頭等を「ケーソン工法」によって建設した事例が多くみられる。

昭和 30 年代後半からは石炭に代わって, 石油が燃料として主流を占めるに伴い, 揚油埠頭・棧橋あるいは地上式燃料タンク等が数多く建設された。

昭和 40 年代に入ると, 高度経済成長時代を反映し, わが国最大の火力発電所である鹿島火力発電所 (440 万 kW) や世界初の LNG 専焼火力発電所である南横火力発電所 (115 万 kW) 等が東京電力により建設され, 取放水・燃料設備の大規模化や多様化が鉄筋コンクリート構造物にも展開され始めた。

たとえば, LNG (-162°C) を貯蔵する地上式タンクの基礎は, 鉄筋コンクリート床版構造 (直径 40~50 m 程度) であり, LNG の冷熱による温度応力を考慮した設計が採り入れられている。

また, 2 度のオイルショックや公害問題を経た昭和 50 年代後半からは燃料の LNG 化がさらに進み, 大規模な鉄筋コンクリート製の円筒容器である LNG 地下式貯槽を東京電力では袖ヶ浦火力発電所 (360 万 kW), 東扇島火力発電所 (200 万 kW) および富津火力発電所 (200 万 kW) に建設している。

富津火力発電所に建設したわが国最大級の 12.5 万 kW (躯体内径 73.4 m・液深 30.5 m) 貯槽は, 躯体の側壁厚が 2.8 m, 底版厚が 6.5 m にもおよび, 土留めと止水を兼ねた仮設構造物である連続地中壁 (内径約 85 m, 厚さ 1.2 m, 深さ約 50 m) を含めた 1 基当たりの鉄筋およびコンクリートの使用量は, それぞれ約 1 万トン, 約 6 万 m^3 に達する。このため, 設計, 施工面で種々の技術検討を行っている。

設計面では, LNG は -162°C と低温であるため熱伝導解析に基づく温度応力の評価さらには動的解析に基づく耐震設計を適用している。また, 施工面では, 低発熱セメントの採用や綿密な養生管理によるマスコンクリート対策等の最新技術を導入している。

最近の火力発電所の建設にあたっては, 工期短縮やコストダウンの観点に立ち, 鉄筋コンクリート構造物の構築において, 大型重機の導入, 型枠の大組化, 鉄筋のプレハブ化, 電炉鉄筋の積極的活用等が施工面で推進されており, 設計面でも一部の構造物において限界状態設計法の採用や, 塩害対策としての鉄筋かぶり厚の確保等の新しい試行がなされてきている。

3. 原子力発電設備

わが国の原子力開発は、昭和30年、平和利用に限って民主・自主・公開の原則のもとに進めることと定めた原子力基本法が制定され、昭和38年に日本原子力研究所の動力試験炉（1万2500kW）が初めて原子力発電に成功し、これに続き、昭和41年にはわが国最初の電気事業用原子力発電所として、東海原子力発電所（16万6000kW、GCR、日本原子力発電）が運転を開始した。

その後、昭和45年に美浜原子力発電所1号機（34万kW、PWR、関西電力）が、昭和46年に福島第一原子力発電所1号機（46万kW、BWR、東京電力）が営業運転を開始するなど、わが国の原子力発電設備は石油危機に伴う代替エネルギーの中核として順調に増加を続け、また最近では1基当たりの出力も大型化し、135万kWを越すものも計画されている。

平成3年4月1日現在で原子力発電所の運転・建設状況は運転中39基、建設中11基、建設準備中3基、合計53基となっており、平成2年度末において原子力発電の占める割合は、発電設備容量で18%、発電電力量で27%にまで達している。

このように、原子力発電は他の水力・火力発電と比べて歴史は浅いものの、総発電量に占める割合は年々増加している。

（1）原子力発電所の鉄筋コンクリート構造物

原子力発電所の土木構造物には火力発電所と同様、取・放水路、ケーブル・配管収納ダクト、港湾設備等があり、以下これについて述べることにする。

原子力発電所の特徴としては、内蔵する放射性物質による環境への影響の観点から、原子炉補機冷却海水系統、放射線を内蔵する非常用ガス処理系配管、気体廃棄物処理系配管を内蔵するダクト、復水貯蔵タンクの遮蔽壁は設計用地震動に対してその機能が保持できるように設計している点が挙げられる。

その設計用地震動は、地点ごとに発電所敷地周辺の地震、地質調査結果をもとに定めており、柏崎刈羽原子力発電所（東京電力）を例にとると、解放基盤表面において、設計用最強地震 S_1 として最大加速度で300gal、設計用限界地震 S_2 として450galを設定しており、火力に比べ大きな地震力を考慮している。この動的解析手法については、「応答変位法」や「多質点系モデル」が採用されてきたが、近年、地盤と構造物の相互作用を忠実に再現できる「二次元動的FEM解析法」が主流となっている。

なお、原子力発電所は、健全な岩盤の上に直接設置することが原則となっており、基礎岩盤の一部に風化岩や破砕岩が存在する場合には、その部分を良質な人工材料

で置換し、健全な人工岩盤を作ることが多い。

この場合、置換材料としては、コンクリートを用いるのが一般的であるが、基礎岩盤が軟岩の場合には、軟岩の剛性と同程度の剛性をもつ人工軟岩材料を用いている場合もある。

港湾設備においてはポンプ室前面の波高の低減、使用済燃料運搬船の荷役等のため、専用の防波堤を設けており、この防波堤には鉄筋コンクリート製ケーソンを使用している地点もある。ケーソンの製作・進水工法には「フローティング・ドック工法」などがあるが、柏崎刈羽原子力発電所では、経済性、施工性等を考慮して陸上でケーソンを製作し、護岸に設置されたエレベーターにより進水する「シンクロリフト工法」を日本で初めて採用している。

また、建築関係の鉄筋コンクリート構造物には、原子炉建屋、タービン建屋があり、このうち原子炉格納容器については、これまで鋼製格納容器が採用されてきたが、110万kW以上の原子力発電所においては、耐圧および耐震の観点から、プレストレストコンクリート製格納容器（PCCV）および鉄筋コンクリート製格納容器（RCCV）が採用される例もある。

上記のとおり原子力発電所では、放射線遮蔽上および耐震設計上から壁厚が厚く、柏崎刈羽原子力発電所1号機（壁厚3.0m）を例にとると、1プラント当たり約70万 m^3 のコンクリートが使用されている。

このため、経済性、供給量の面等から、発電所構内に専用のパッチャープラントを設置しており、コンクリートの品質管理を行うとともに、きめ細かい施工管理を行っている。

以上のように、原子力発電は歴史が浅いため、設計・施工面において大きな変遷はみられないが、大出力化に伴い構造物の内空断面が大型化し、構造物の壁厚が厚くなっている。

これについては、昭和62年度から、土木学会に部会を設置し、限界状態を考慮した屋外重要土木構造物の耐震設計に関する研究が実施されており、壁厚の削減などについての合理的な設計に関する研究が進められている。

4. 送変電土木設備

（1）架空送電土木設備

架空送電線に用いられている鉄筋コンクリートとしては、主として鉄塔基礎であるので、以下これについて述べることにする。

わが国の高圧架空送電線は、明治32年広一発電所・呉間：電圧11kV・延長9km以来、明治40年駒橋線：電圧55kV・延長75km、明治43年八百津線：電圧66kV・延長42km、大正2年谷村線：電圧77kV・延長

表—2 鉄筋コンクリートの歴史・エネルギー施設（電力）

年 号	事 項
1904(明治37)年	わが国初の蒸気タービン式火力発電所、深川火力発電所(1000kW, 東京市街鉄道)が竣工。
1918(大正7)年	わが国初の圧力導水路トンネルを用いた和歌山県日高川水系の高津尾発電所(5800kW)が竣工。
1921(大正10)年	わが国初の半地下式水力発電所、長野県信濃川水系の土村第三発電所(1050kW)が竣工。
1924(大正13)年	わが国初の差動調圧水槽を用いた京都府由良川水系の由良川発電所(2460kW)が竣工。
1926(大正15)年	わが国初の多床式基礎水力発電所、岐阜県木曾川水系の上麻生発電所(27000kW)が竣工。
1930(昭和5)年	わが国初の制水口調圧水槽を用いた佐賀県松浦川水系の巖木発電所(5230kW)が竣工。
1936(昭和11)年	火力発電所の取放水、揚炭設備にRC構造を採用した、鶴見火力発電所(17.85万kW, 東京電燈)が竣工。
1943(昭和18)年	わが国初の地下式水力発電所、北海道石狩川水系の雨龍発電所(51000kW)が竣工。
1952(昭和27)年	わが国初の275kV送電線、新北陸幹線(関西電力, 延長230km)が竣工。
1963(昭和38)年	わが国初の原子力発電動力試験炉(茨城県日本原子力研究所東海研究所)が竣工。
1966(昭和41)年	<ul style="list-style-type: none"> わが国初の商業用原子力発電所、東海原子力発電所(16.6万kW, 日本原子力発電)が竣工。 栄町共同洞道(中部電力と電電公社)で電力として初めて矩形RCセグメントを適用(高さ2.9m×幅4.1m, 延長0.5km)。
1969(昭和44)年	東京電力、南横浜線で、電力として初めて円形RCセグメントを適用(外径2.1m, 延長0.5km)。
1973(昭和48)年	<ul style="list-style-type: none"> わが国で初めて調圧水槽の壁体部をPC構造とした水力発電所、大分県筑後川水系の柳又発電所(61900kW, 九州電力)が竣工。 導水路トンネルに膨張セメントを混入した膨張コンクリートによりプレストレスを導入した、山梨県富士川水系の早川第三発電所(26000kW, 東京電力)、富山県神通川水系の下小島発電所(14.2万kW, 関西電力)が竣工。 世界初のLNG専焼火力発電所、南横浜火力発電所(115万kW, 東京電力)のLNG地上タンクが竣工。
1974(昭和49)年	導水路トンネルにグラウト注入により外圧を与える方法によりプレストレスを導入した、兵庫県市川水系、円山川水系の奥多々良木発電所(121.2万kW, 関西電力)が竣工。
1978(昭和53)年	わが国初の500kV送電線、房総線(東京電力, 延長84km)が竣工。
1979(昭和54)年	<ul style="list-style-type: none"> わが国最大規模の地下式水力発電所、長野県信濃川水系の新高瀬川発電所(128万kW, 東京電力)が竣工。 東京電力の袖ヶ浦火力発電所(360万kW)で、電力として初めてLNG地下式貯槽(容量6万kl)を構築。
1984(昭和59)年	わが国初の本格的LNG地下タンク群を東扇島火力発電所(200万kW)に構築。
1985(昭和60)年	導水路トンネルに、鋼線を用いた機械的方法によりプレストレスを導入した、富山県黒部川水系の音沢発電所(12.4万kW, 関西電力)が竣工。
1986(昭和61)年	東京電力清州橋通り管路で、電力として初めてトンネル軸方向挿入型(クサビ型)RCセグメントを適用。
1989(平成元年)	<ul style="list-style-type: none"> わが国初の1000kV送電線、UHV南北線(東京電力, 延長250km)が着工。 東京電力野沢4丁目管路で、電力として初めてECL工法(直打ちコンクリートライニング工法)を適用(外径2.3m, 延長1.0m)。
1991(平成3)年	電力として最大容量のLNG地下式貯槽(12.5万kl, 東京電力富津火力発電所)が竣工。

95 km, 大正4年猪苗代線: 電圧115 kV・延長225 km さらに大正8年甲信幹線: 電圧154 kV・延長202 km と高圧化・長距離化が進んでいった。この頃の鉄塔基礎の形式は、無筋の直接基礎や松杭で補強した杭基礎が主体であり、資機材の運搬手段も人肩で、コンクリートの製作も手練りが中心であった。

第二次大戦後になって、電力需要の増加に対応して大容量水力・火力の建設が進み、昭和27年新北陸幹線: 電圧275 kV・延長230 km をかわきりに275 kV送電線が次々と造られていった。この頃から鉄塔基礎に鉄筋コンクリートが本格的に用いられるようになり、その形式は、逆T字形コンクリート基礎およびプレキャストコンクリート杭を用いた杭基礎が主体であった。また、資機材の運搬手段としては簡易索道やヘリコプター等が用いられるようになってきた。

高度経済成長期以降となると、電力需要の飛躍的な急増に対応して大容量電源の建設が進み、昭和53年初めの電圧500 kV送電線房総線: 延長84 km が建設され

超々高圧送電線時代に入った。送電圧が高くなるに従い鉄塔の高さも、60 m程度から80 m程度と高くなり、鉄塔基礎は大型化し、基礎への荷重も大きくなった。また、送電線も山岳地の傾斜地に建設される割合が大きくなり、従来から用いられてきた形式に代わって深礎基礎が多用されるようになった。レデーミクストコンクリートが常用されるようになったのはこの頃からである。資機材の運搬手段についても、1トン索道の導入、ヘリコプターの性能向上、林道開発整備等が推進された。

今後も伸び続ける電力需要に対応して、さらに上位の電圧1000 kV(UHV)の送電線が、新潟県・柏崎刈羽原子力発電所から山梨県に至る間延長約250 kmで現在建設中である。

この鉄塔の高さは約110 m, 鉄塔基礎の形式はほとんどが深礎基礎であり、基礎の径は3~5 m, 深さは10~50 mで、鉄塔1基当たりのコンクリート量は約700 m³である。資機材の運搬手段としては2~3トン索道、ジブクレーン等が採用され機械化が一層進められている。

（2） 地中送電土木設備

地中送電線は架空送電線に比較して電力供給上の信頼度が高く、美観上も優れているが、建設費が高いこと、事故復旧に長時間を要すること等から架空送電線の建設が困難な市街地や人家密集地域に用いられている。

地中送電線に用いられている鉄筋コンクリートとしては、主として地中送電用トンネルの覆工コンクリートであるので、以下これについて述べることにする。

電力における地中送電用トンネル工法としては、まずシールド工法が挙げられる。この工法を最初に適用したのは、昭和39年に行われた東京電力城北線の工事で、その規模は延長1037m、外径1.56mであり、鋼製セグメントが用いられた。

RCセグメントは、経済性と漏水に対する品質面から優れているとされていたが、継手の処理方法と施工時の重量の問題等から採用が遅れていた。しかし、鋼製の継手とセグメントエレクターの開発により採用されるようになってきた。

RCセグメントが最初に用いられたのは昭和41年に行われた栄町共同洞道（中部電力と電電公社）で、その規模は延長534m、外形寸法高さ2.90m・幅4.10mの矩形断面であった。現在一般的に用いられている円形のRCのセグメントが最初に用いられたのは、昭和44年に行われた東京電力南横浜線で、その規模は延長450m、外径2.06mであった。

シールド工法用のセグメントは、鋼製のものを含めて古くから使われているが、昭和48年には設計と工事の合理化・省力化をねらいとして標準化が図られることとなり、土木学会と日本下水道協会共編により「シールド

工事用標準セグメント」が作成された。これによるとRCセグメントは、外径2.15mから6.00mのものまで4タイプ37種類が定められている。

現在のRCセグメントの設計は上記の「シールド工事用標準セグメント」を規準として行われているが、昭和61年に行われた東京電力清洲橋通り管路では新しい試みとしてトンネル真円度の向上を図り、施工の安全性と漏水等の品質を改善する目的で、トンネル軸方向挿入型（くさび型）セグメントが用いられた。

都市部でのトンネル工事は、複雑な地質条件への対応、騒音・振動、地盤沈下等に対する環境保全および安全面から、掘削や覆工技術の確立しているシールド工法が中心的役割を果たしてきたが、最近になってシールド工法ほかに新しい工法の適用が試みられている。

地質条件が良好な場合には、地中送電用トンネルにもNATMが用いられるようになってきた。

NATMが最初に用いられたのは、昭和58年に行われた東京電力京浜潮田線で、トンネルの一部拡大部：延長100mに適用した。本格的に採用されたのは昭和60年に行われた東京電力世田谷弦巻通り管路で、その規模は延長1395m、掘削断面積約9m²、吹付けコンクリートの厚さ7cm、覆工コンクリートの厚さ20cmであった。

また、直打ちコンクリート・ライニング工法が平成元年に東京電力野沢四丁目管路工事に適用され、その規模は延長1005m、外径2.25m、覆工コンクリートの厚さ20cmであった。

(1991.7.3 受付)