

原子力発電所の施工管理

瀬 山 明*

まえがき

わが国における原子力発電所の建設工事も、日本原子力発電（株）の東海発電所着工以来十余年を経た。その間、土木・建築各界の技術関係者の積年の苦心や努力によって、ようやく初期の地歩は固められつつあり、またこれらに関する数多くの論文・報告などが執筆されている。

現在、わが国で建設されている原子力発電所の炉形式は軽水炉で、東京電力福島発電所で採用されている沸騰水型（略称 BWR）と関西電力美浜発電所で採用されている加圧水型（略称 PWR）とがある。これらの建設工事の施工管理にあたっては、各企業者・請負業者間の契約方式・工事内容などにより、その管理基準や管理体制が多少異なっている。しかし、発電所形態がどうであろうとも、基本的には土木建築工事の管理内容が、それほど異なることはないと思われる。

本文では、関西電力が建設し、また現在建設しつつある PWR 型原子力発電所の経験を参考にして、施工管理面からみた土木建築工事について、その規模、特徴、施工施設の要点を紹介するとともに、将来、施工が期待される PC 格納容器・立地条件に対処するための発電所の地下格納に関する施工上の課題について論述する。

1. 原子炉安全審査と建設工事に伴う関係法令

（1）原子炉設置許可申請

電力会社が原子力発電所を建設しようとする場合は、核原料物質・核燃料物質および原子炉の規制に関する法律により、内閣総理大臣に「原子炉設置許可申請」を提出する。原子力委員会の原子力安全専門審査会では部会を設けて申請内容の審査にあたる。

安全審査は、一般に原子炉グループと環境グループの 2 グループに分れ、共通事項については合同で審査が行なわれる。事務局は科学技術庁原子炉規制課で、通産省公益事業局の原子力発電に関係する方々も参与されている

* 正会員 関西電力（株）建設部副調査役

る。

土木・建築の関係で審査の対象となるのは、主として地盤・地震および耐震設計のうち建築関係部分である。

（2）建設工事に関係する法令

土木建築工事の施行に伴い関連する法令は、原子炉関係法令のほか、表-1 に掲げるものがある。

表-1 建設工事実施に伴う関係法令

制限法令	区 域	おもな内容
建築基準法		建築工事の確認申請
自然公園法	特別・普通区域	工作物新（改・増）築・木竹伐採・鉱物採取・土地形状変更
森林法	魚つき保安林・普通林	土地形状変更・立木伐採
公有水面埋立法	公共の用に供する水流または水面	国の所有に属するもの、河・海・湖・沼・その他
海岸法	海岸保全区域	保全区域の占用・区域内土石採取・工作物設置・土地掘削
漁港法	漁 港	工作物新築・土砂の採取・土地掘削・水面占用
港則法	港 湾	私設信号使用・作業
港湾法	港 湾 区 域	施設の使用・工事・占用・土砂の採取
河川法	1, 2 級 河 川	水利使用・土地占用・河川産出物採取・工作物新築等
道路法	占 用 ・ 管 理	道路管理者以外の行なう工事

2. 調査工事

原子力発電所建設に必要な調査としては、社会環境、気象、海象、原水（淡水）、地震歴、地形および地質、その他建設に必要な資料などがある。いずれも原子力発電所の計画・設計上重要なものであるが、土木工事の施工上、十分に承知しておかなければならないのは地質と気象、海象の調査である。

（1）地質調査

地質調査はほぼ次の 2 つの段階に分けられる。

- ① 発電所敷地全体を含む地質構造を調査するもので、ボーリング・弾性波探査・試掘溝（トレンチ）。
- ② 原子炉建屋（付属建屋を含む）の位置を決定するために行なうもので、試掘坑、坑内からのボーリング、弾性波探査、岩盤特性試験。

調査に際しては、必ずといってよいほど、断層や破砕帯に出会うものであるが、将来問題とならないよう入念

表—2 地質調査工事の実施例

区 分	美 浜		大 飯
	(1号・340 MW 2号・500 MW)	(1号, 2号, 各826 MW)	
発電所付近			
周辺ボーリング (m)	2 600	1 250	3 540
一般構造物ボーリング (m)	1 650	6 100	460
弾性波探査 (m)	800	14 200	12 200
原子炉付近			
試掘坑 (m)	350	807	1 890
坑内ボーリング (m)	600	1 550	130
坑内弾性波探査 (m)	600	1 790	520
トレンチ (m)	200	570	580
その他 (省略)			
調査費 (千円)	81 600	168 900	207 500
(円/MW)	97 000	101 000	88 000

表—3 原子炉建屋背面切取りのり面寸法

区 分	美 浜		大 飯
	1, 2号	1, 2号	
原子炉建屋背面道路地盤高(m)	E L 10.00	E L 32.00	E L 30.00
切取高さ (道路より上部) (m)	68.0	23.0	40.0
のり面平均勾配 (下部・上部)	{ 下部 1:0.85 上部 1:1.67 }	{ 1:1.37 1:1.70 }	{ 1:1.20 1:1.60 }
擁壁部 (下部) 高さ (m)	35.5	8.0	20.0
1段の高さ (m)	7.0, 7.5	3.0, 5.0	5.0
前面勾配	1:0.5	1:0.5	1:0.5
犬走り幅 (m)	2.5	3.5	3.5
のり面保護部 (上部) 高さ (m)	32.5	15.0	20.0
1段の高さ (m)	10.0	10.0, 5.0	10.0
勾 配	1:1.5	1:1.5	1:1.5
犬走り幅 (m)	2.0	3.0	2.0
地 質	花 崗 岩	石英粗面岩 質凝灰岩	輝綠岩質岩石

に調査しておくとともに、避け得ない場合は、どのような処理対策をするのかを、あらかじめ考えておく必要がある (表—2)。

次に、原子炉建屋位置背面に切取箇所を生ずる場合、その安定についてとくに留意して検討しておくことが大切である。原子炉建屋背面切取りの例を 表—3 に示す。

(2) 海象調査

原子力発電所は多量の冷却水を必要とするので、海岸立地となるケースがほとんどである。調査内容も地域特性により異なるが、風・浪・深淺・底質・漂砂などの調査が必要で、とくに大規模港湾工事、取水・放水のための沈埋管工事を伴うときは、さらに詳細な調査を実施する。

3. 施 工

(1) 土木建築工事の規模

- ① 主要な設備の項目を表—4 に示す。
- ② 全工事に対する比率を表—5 に示す。

(2) 原子力発電所工事の特徴

- ① 設置の許可に際しては、厳正な安全審査が行なわ

表—4 主要な土木建築設備

区分	土 木 建 築	
	土	木
1	敷地造成	原子炉建屋
2	防波堤・護岸	原子炉補助建屋
3	原子炉基礎	タービン建屋
4	タービン建屋基礎	事務所
5	取水口・取水路	特高開閉所
6	循環水管ポンプ室	固体廃棄物倉庫
7	循環水管基礎	原水処理室
8	放水路・放水口	塩素処理室
9	物揚岸壁	危険物倉庫
10	道路・橋梁	倉庫・守衛室・宿舍

表—5 原子力発電所建設諸元

区 分	美 浜		高 浜	
	1 号	2 号	1 号	2 号
発電所出力 (MW)	340	500	826	826
工 期 (昭和年月)	41.12 ~45.11	43.5 ~47.6	44.12 ~49.8	45.12 ~50.7
工 事 費 (10 ⁹ 円)	31 500	35 800	68 100	55 000
建設単価 (10 ⁹ 円/kW)	92.7	71.6	82.4	66.6
発電原価発電端初年度 (円/kWh)	3.05	2.50	2.75	2.41
土木建築費 (10 ⁹ 円)	約 8 050		約 16 700	
比 率 (対全工事費)	12.0%		13.5%	

れ、工事に着手する前に、原子炉施設に関する設計および工事の方法について、官庁の認可を受けることになっている。

② 耐震設計上、構造物の部材断面が大きくなるとともに、使用する鉄筋量も多くなる。最近の原子炉格納容器基礎の鉄筋量は 1 000 t 以上に及び、鉄筋径も $\phi 35 \sim 38$ という太ものが使用され、これらが 20 cm あるいはそれ以下のピッチで配筋され、重ね段数も 4 段以上にもなっている。施工に際しては、圧接工法について十分研究しておくことが大切である (表—6)。

③ 隣接機器の破損などによる飛来物防護のため、タ

表—6 耐震設計基準の要点

クラス分け	記 事	
重 要 度 に 分 よ る	Aクラス	その機能喪失が原子炉事故をひき起こす可能性のある施設、および周辺公衆の災害を防止するために緊急な施設
	Bクラス	Aクラスに含まれたもの以外で高放射線物質に関連する施設
	Cクラス	AおよびBクラスに含まれない一般施設
耐 震 設 計 法	ユニットの施設は剛構造に設計すること、およびAクラス建物・構築物の基礎は堅硬な岩盤に直接着けることを原則とする。すべての施設を静的解析による耐震設計の対象とするが、なお、重要な施設については静的解析だけでなく動的解析による耐震設計を行なうこと	
静 的 解 析	A, B および C クラスに対して、日本の建築基準法に示される震度の少なくともそれぞれ 3 倍、1.5 倍および 1 倍にすることを原則とする	
動 的 解 析	A クラスのすべての施設および B クラスの機器・配管類で支持構造物の振動と共振をするおそれのあるものについては静的解析に加えて動的解析を行なうこと	

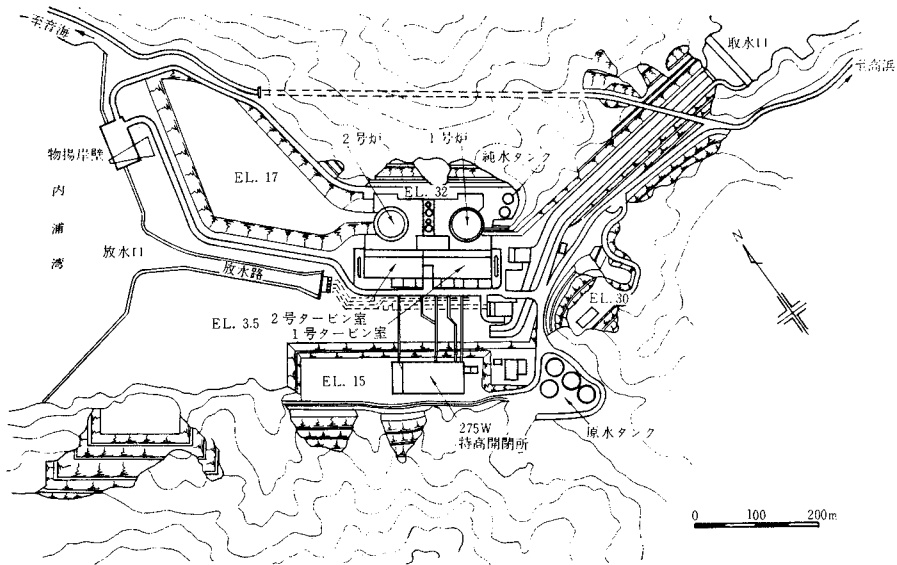


図-1 高浜原子力発電所構内一般配置図

ンクや機器格納箇所に隔壁が設けられるケースが多いので、機器すえ付け順序に対応して、コンクリート打込みが部分的にあと打ちとなり、施工がむずかしくなる。

④ 配管や埋込み金物のための箱抜きが数多く、とくに原子炉機器まわりの施工は複雑で、かつきびしい精度が要求される。

⑤ 土木建築工事と機械電気工事との併行作業が狭小な区域内で行なわれることが多いので、相互に密接な連絡と綿密な管理が大切である。

⑥ 契約解釈の相違、誤解、意志伝達のそご、さらには原子力技術の進歩の早さ、国内外の諸事情などにより設計・製作すえ付けの遅れを生ずるので、工程確保上、施工期間が圧縮されることが多い。

⑦ 技術的に許容値内の現象で、原子炉施設に直接関連しないことでも、原子力発電所というために、社会環境上、余分な配慮を必要とすることがある。

(3) 施工上重要な箇所

- ① 原子炉設置箇所の基礎状態（排水処理を含む）。
- ② 原子炉設備背面山腹切取（のり面の安定）。
- ③ 防波堤・護岸（施設の安全と経済性）。
- ④ 取水口・放水口（構造自体および温排水対策）。
- ⑤ 鋼製格納容器関連工事（しゃへい壁、下部填充、内部コンクリートの施工）

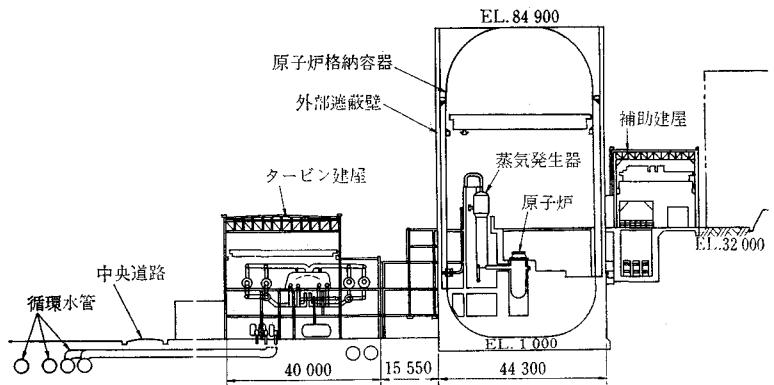


図-2 高浜原子力発電所断面図

- ⑥ 原子炉補助建屋内の工事。
- ⑦ コンクリート製造工事。

(4) コンクリート工事

a) コンクリート プラントの規模

表-7 コンクリート プラントの規模

発電所名	コンクリート量 (10 ³ m ³)			敷地面積 (m ²)	ミキサ容量 ・基数 (m ³)	日最大打設量 (m ³)
	土木	建築	計			
美浜	1号	58	74	6 000	0.75×2	570
	2号	9	76			
	計	67	150			
高浜	1号	128	134	6 000	1.51×2	720
	2号	27	113			
	計	155	247			
大飯	1号	322	187	6 000	1.51×4	1 000
	2号	37	133			
	計	359	320			

表-8 コンクリート標準調査表

設計基準強度 (kg/cm ²)	温度補正 (°C)	粗骨材 最大寸法 (mm)	所要スランプ (cm)	所要空気量 (%)	W/C (%)	S/A (%)	W (kg/m ³)	重 量				減水材種別 百分率 (g/m ³)
								C	S	G		
										40~25	25~5	
210	—	40	8	3.5	51.3	38.8	142	277	736	1193		P C 0.4 1108
										477	716	

建設用地内の仮設備配置統制および用地の有効利用上コンクリートの製造設備も、土木建築業者が共同責任で一つの設備にまとめるのが望ましい。土木と建築あるいは各業者の立場もあり、むずかしい点もあるが、参考までに関西電力で実施してきた3つの原子力発電所建設地点のプラントの例を表-7に示す。

b) コンクリートの強度と調査

コンクリートの強度および調査の管理は、日本・アメリカ合衆国の規準を調整して行なわれている。強度は原子炉建屋では4週強度 210 kg/cm²、補助建屋では4週強度 180 kg/cm²で、スランプは8cmである。発電所施設では、とくに重コンクリートを用いてまで壁厚を薄くする必要もないので、普通コンクリートを用いている。調査の代表的な例を表-8に示す。

c) 試験室設備

試験室の設備の一例をあげれば、次のとおりである。試験室延べ 100 m² パネルハウス平屋建、恒温養生室 30 m² (養生水槽 15 m²)、実験室 46 m²、管理事務室 15 m²、資料整理室 9 m²。

試験機器は 50 t 万能アムスラー試験機、ランサム型試験練り用ミキサ (2切)、その他必要なものが設備されている。

(5) 施工計画

a) 立案の方針

原子力発電所の建設は、あらゆる技術分野の総合工事といっても過言ではない。建設目的に対応する総合工程の作成、およびこの工程の一部を形成する土木建築工程は十分に関連工事の施工内容、とくに仮設備の変遷状態などを考慮して、施工が安全・確実・迅速に進捗するよう入念に計画されなければならない。

また、施工者は契約した工事の内容、立地条件、技術条件、法規等をよく理解し、十分にその責務を果たすよう考慮しておくことはいうまでもない。

ことに、原子力の工事は技術的に新しい分野が多く、外国に依存する度合いが大きく、設計や機器配置の変更、これに伴う建築工事の設計変更、施工図の作成の遅れをきたすことが多いので、実施工事は事前によく検討して施工の手もどりを極力防止するよう心がけておくことが必要である。

表-9 主要建設工程 (クリティカルパス)
(800 MW 級)

工事区分	主要月数
敷地造成	5~12
原子炉基礎掘削	3~4
原子炉基礎コンクリート	3~4
格納容器おえ付け	12~13
格納容器内部コンクリート	8~10
原子炉設備	11~13
試運転	11~12
基礎掘削~運転開始	50~54

表-10 電力会社の組織の例

建設準備所	建設事務所	
所長・所長代理	所長・所長代理・次長 (事務・電気機械・土木建築)	
(課名)	(課名)	(係名)
事務	庶務 経理	庶務・労務 経理・資材
技術	工程管理 機械設計 機械工事	工程管理・工務 電気設計・原子炉設計・汽機設計 電気工事・機械工事
土木建築	土木 建築	土木設計・土木工事 建築設計・建築工事

b) 建設工程

建設工程としては、まず敷地が選定されてから1~2年の調査期間を経て、敷地造成工事に入る。

敷地造成工事は、サイトの諸条件によりその施工期間はかなり異なるが、原子炉基礎工事に着手できるまで通常数箇月ないし1か年程度を要している。

建設期間のクリティカルパスとなる主要工事工程を表-9に示す。

なお、取水口・放水口などの土木工事、タービン建屋などの建築工事は、上記工程内で並行作業として行なわれる。

(6) 管理体制

まず、電力会社側の体制の一例として、関西電力高浜原子力発電所の場合を示すと表-10のとおりである。

建設準備所が開設される時期は諸般の情勢で判断されるが通常敷地造成工事に入るころである。準備所が建設所に移行する時点は、原子炉設置許可日がめどである。組織は美浜1号の経験から各設備別の体制を改め設計、工事に区分し、新たに工程管理課を設けた。

また、海外での設計・製作工程促進のため、必要に応じて一定期間、駐在技術者を派遣している。とくに建築工事の場合、機器すえ付け・配管工事との関連が深いので、設計条件・図面作成工程が問題となる。土木・建築技術者は、各 10 名ほどである。

次に、土木・建築請負業者側の体制は工事内容によってかなり異なるが、通例、所長・所長代理・事務・技術系の主任が配置され、構成人員も約 20~30 名程度である。なお、機器メーカーなどの体制は省略する。

4. PC 格納容器と発電所の地下格納

現在建設中の原子力発電所は、前にも述べたとおり、アメリカ方式の軽水炉であるが、今後はプラントの規模増大、技術革新、さらには立地条件などにより、現方式の改良、新しい形式が要請されることとなろう。

プラントの立地についてみると、人工島の造成によるもの、海上・海底設置のほか、地下格納、軟弱地盤上への設置などの研究がなされている。

ここでは、PC 格納容器、地下格納の施工上の問題点について若干ふれてみたい。

(1) PC 格納容器

a) プレストレス工法

PC 格納容器には数種のプレストレス工法が用いられているが、それぞれ一長一短があって、最適のものを決定づけることは、はなはだむずかしい。したがって、採用にあたっては、ケースバイケースに長所・短所を比較検討して決定することとなろう。現在各国でおもに使用されているものは、BBRV・SEEE・フレシネー・CCL などである。また、PC ケーブルの配置にも、円筒部に縦・横配置をしたもの、ヘリカル配置をしたもの、あるいはドーム部に三方向に 120° 交差させたものや、縦とドーム部を 1 本でまたぐように配置したものなど種々の考案がなされている。

b) ライナー プレート

気密性確保のため、通常、鋼製ライナープレートが用いられ、これはコンクリート打込み時の内側の型枠をも兼ねることとなる。この設計は普通、座屈荷重についてチェックされるが、開口部・隅角部の応心集中については、とくに注意が必要である。また近年、合成樹脂系の塗料のような内張法も考えられている。

PC 格納容器は確率的にはほとんど考えられないことではあるが、仮想事故時に高い温度を受けるのはごく短い時間であるので、コンクリートよりむしろ内張りライナープレートの挙動のほうが、きびしい条件となるであろう。

c) ケーブル鋼材の防錆法

この対策として、グリスのような防錆剤を注入する方法と、シース内のグラウトによる方法とが通例は使われているが、安全なテンドンの定着方法などの論議とあいまって、どちらがよいとの結論はまだ出ていない。

このグラウトと防錆の問題には、鋼線の防錆のほかには再緊張、交換の必要有無、地震時の安定性など総合的に検討される必要がある。

d) コンクリートの施工

コンクリートの所要強度は高強度のものが要求され、セメント使用量も多くなるので、その品質管理とコンクリートの養生には十分な配慮が必要である。また、開口部周辺は補強のための配筋と、弯曲したケーブルシースが混み合うので、施工に注意を要する。コンクリート施工後に貫通孔を補足することは容易でないので、施工前に機械・電気の関係者とよく打合せて、遺漏のないようにするのはもちろんであるが、若干の予備孔を適当に配置しておくほうがよい。

最近では、スリップフォームによるコンクリートの連続打設工法が採用され、工期の短縮に役立っている。

(2) 地下格納

原子力発電の初期のものでは、スウェーデンの Ågesta、スイスの Lucens、ノルウェーの Halden、フランス・ベルギー共同体の SENA Chooz など、地下に収容したことによる心理的な安全観などが買われて建設された地下発電所の例があるが、その後、あまり大きなメリットも見られず、経済的にも不利であるとの観点から、関心は薄れていた。しかし最近、環境保護の強い世論もあって、再び地下格納による自然景観の保持や広範な用地占有をさけるなどの効果が期待されるようになってきた。

わが国においても、大規模発電所のための用地取得、大量の切り取り整地工事は今後ますます困難となることが予想されるので、従来の火力発電所のようなプラントレイアウトの概念を改め、半地下式を含めた地下立地の研究を進めなくてはならない。この場合の研究課題は、次のようなものが考えられる。

- ① 岩盤の熱力学的特性や、ガス・エアロゾルの移動特性。
- ② 地下水の挙動と放射能の地下水に及ぼす影響。
- ③ 地下空洞の規模と大容量原子力機器の分割配置。
- ④ 地下立地の安全評価の確立。
- ⑤ 経済性の追求。

あとがき

原子力発電所の建設工事もますます盛んとなり、よろ

こぼしい限りであるが、前途にはなお幾多の難問があると思われる。しかし、その一つ一つを地道に研究し、解決して、よりよき工事を行ない、その成果を次代へ伝えてゆくのが、われわれ技術者の責務である。原子力の建設工事に関係している者として感じたことの二、三を記して、あとがきとしたい。

(1) 調査工事の重要性の認識

現地の条件を理解し、目的に合致した調査を行なうのは論をまたない。安全審査の対象となる事項や外国との接衝事項は、的確な調査資料を得ておくことが大切である。調査費はややもすれば惜しまれがちであるが、必ず工事全体にプラスを生むことを確信してよいと思う。

(2) 契約内容の理解

工事の契約方式はいろいろあり、その内容も国状その他によりさまざまである。工事実施の過程は必ずしもス

ムーズに行なわれるものでない。したがって、われわれは常に契約書(図面・仕様書とも)の内容をよく理解し、事務処理が円滑、かつスマートにできるよう訓練されていなければならない。

(3) 連絡と確認

技術が高度化し、各自の分担が細分化してくると、お互いの連絡、処理後の確認が、なおざりになりがちとなる。とくに、ものごとのジョイントにあたる部分について、その現象がみられる。これはきわめて一般的なことであるが、実際に複雑な施工にたずわってみて、設備の機能、安全につながる重大なことであることを痛感する次第である。

施工管理の命題に対し、内容的にあるいは当を得ない点もあったかと思うが、これを機会として読者各位の原子力発電に対する、より深きご理解をお願いするものである。

土木製図基準 1972年版 A4・152 ページ (一部2色刷) 折込付図 20 枚
 <3 月末完成> 1600 円 会員特価 1450 円 (〒 200 円) ● 全国主要書店でも取扱う予定です ●

山海堂 新刊・近刊案内

新道路構造令に沿った道路工学最新の書!!

新稿 道路工学

松尾新一郎編 A5判
280頁 1,200円

序論 調査・計画 一般構造/交通容量, 設計交通量他 路体構築/道路土工他 道路舗装/安定処理工法他 安全施設/防雪施設他 交通管理施設 道路の維持補修

だれにもわかる ラーメンの解法

広瀬卓蔵著 A5判 300頁 1,500円

静定構造物と不静定構造物 静定構造物と不静定構造物の見分け方/支点について・静定, 不静定の判定 静定構造物の解法 不静定構造物の特色/単純, 固定ばりの相違他 モーメント図の書き方/曲げモーメント・せん断力他 分配法/撓み角法の約束他 計算例

資料 水質保全

西川 喬監修 A5判 1300円

公害防止の観点から水質保全に取り組む管理者, 使用者, 受験者の必携座右書。<解説・法規・用語解説付>

<続刊> 資料 大気保全 資料 騒音, 振動防止

東京都新宿区細工町15(☎ 162)
振替 東京194982 ☎ 269-4151

各内容見本呈

■道路建設講座 第9巻 7回記念

道路トンネル

村上良丸・長友成樹著 2月末刊

道路トンネル計画上の諸要素を明確にし、トンネルの設計を具体的に論述すると同時に、最新の施工技術を豊富に取り入れながら解説。調査と荷重推定, 施工, 工事の安全性向上と工事経営他

■土木工事施工例集 全6巻

「土木施工」に42年から掲載した工事例を集大成して刊行

1. 道路・鉄道編
2. 橋りょう編
3. 基礎工編
4. トンネル・地下鉄道編
5. ダム・河川・砂防・地すべり編
6. 港湾・海岸編 2~3月刊予定

解説 土木用語集

2月末刊行予定 新書判 450頁