

既設火力発電所リプレースにおける 土木構造物に係わる技術検討

報告書

平成 23 年 3 月

土木学会エネルギー委員会

新技術・エネルギー小委員会

火力発電所のリプレースに関する技術分科会

既設火力発電所リプレースにおける土木構造物に係わる技術検討報告書<目次>

1 既設火力発電所の現状	1
2 既設火力発電所のリプレース事例	7
2.1 既設火力発電所のリプレース分析	8
2.1.1 リプレースの理由	8
2.1.2 流用した土木設備	9
2.1.3 残置した土木設備	10
2.2 今後の既設火力発電所のリプレースの可能性	10
3 流用する主要土木構造物の評価・技術対策	11
3.1 既設構造物の健全度評価	14
3.1.1 基本的な検討の手順	14
3.1.2 調査	16
3.1.3 照査	17
3.2 補修及び補強工法	26
3.3 劣化予測	28
3.4 ライフサイクルコスト	28
4 残置する土木設備の残置方法	30
5 関連する諸技術	32
5.1 維持管理および点検・調査	33
5.1.1 維持管理	33
5.1.1.1 原則	33
5.1.1.2 維持管理計画について	33
5.1.1.3 診断	35
5.1.1.4 対策(補修方法)	35
5.1.1.5 記録および記録の保管	35
5.1.2 点検・調査	36
5.1.2.1 原則	36
5.1.2.2 定期点検	37
5.1.2.3 調査の項目	38
5.1.2.4 調査の方法	40
5.1.2.5 中性化に対する調査	43
5.1.2.6 塩害に対する調査	44
5.2 性能評価および健全度判定	46
5.2.1 性能評価	46
5.2.2 定期点検に基づく評価	48
5.2.3 臨時点検に基づく評価	50

5.2.4	詳細調査に基づく評価	52
5.2.4.1	許容応力度法による耐力評価の例	52
5.2.4.2	限界状態設計法による耐力評価の例	53
5.2.5	健全度および措置程度判定の考え方	54
5.2.5.1	健全度判定	55
5.2.5.2	重要度判定	55
5.2.5.3	措置程度判定	56
5.3	補修方法	58
5.3.1	補修順序の決定	58
5.3.2	補修工法の選定	59
5.3.3	補修工法の設定および施工	62
5.4	劣化予測方法	66
5.4.1	劣化予測方法	66
5.4.2	塩害	67
5.4.3	中性化	72
5.4.4	その他の劣化	74
5.5	ライフサイクルコストの評価方法	77
5.5.1	アセットマネジメントおよびアセットマネジメントの概要	77
5.5.2	アセットマネジメントにおける投資判断の指標	78
5.5.2.1	ライフサイクルコスト (LCC)	78
5.5.2.2	割引現在価値	80
5.5.2.3	純現在価値	80
5.5.2.4	DCF 法	80
5.5.3	アセットマネジメントにおける確率数理モデル	81
5.5.4	電力土木への適用事例	81
5.6	その他	83
5.6.1	残置方法	83
5.6.2	環境対策	84
5.6.3	耐震設計に関する基準類の変遷	88
6	今後の技術検討に関する提言	91
6.1	はじめに	92
6.2	現 状	92
6.3	今後の方向性	92

関連する諸技術一覧表

付録資料

パワーポイント

はじめに

我が国の電気事業者(一般電気事業者及び電源開発)が保有する火力(汽力)発電所は、全国に90箇所程度あり、最大出力の合計は2008年3月現在で1億2700万kW以上にのぼる。環境問題への対応や燃料のコスト変化などの時代背景から、燃料の種類の内訳は運転開始の年代により変化しているが、火力発電所は、最大出力の合計が発電設備全体の約6割を占める主要な電源設備である。

高度経済成長に伴う電力需要の急増などを背景に、1960年代から建設が増大した我が国の火力発電所では、運転開始からの経過年数が30年を超えるユニットの割合が増大してきた。2000年代に入り、これらの発電所を中心に、既設のユニットを撤去して新たなユニットを設置する、いわゆるリプレースの計画が検討、実施される例が増えてきている。

この火力発電所のリプレースにおいては、土木構造物を新たに建設する場合だけでなく、既設の構造物が流用される場合もあり、また、場合によっては既設の構造物が残置される場合もある。しかし、このようなリプレースに伴う土木構造物の取扱いの実態や検討内容が整理された例は少ない。

このような背景の下、土木学会 エネルギー委員会 新技術・エネルギー小委員会では、火力発電所のリプレースおよびその検討に要する諸技術について、既存の技術や最新の技術動向を調査するとともに、今後の方向性についての議論を行うことを目的として、2008年9月に、火力発電所のリプレースに関する技術分科会を設置し、活動を開始した。

分科会では、まず、火力発電所のリプレースの検討手順や項目の洗い出しを行い、主要な構成を抽出した。そして、これらについて、電気事業者へのアンケートを行い、リプレースの事例を収集、整理するとともに、文献調査により電気事業や他分野の関連技術についても情報を収集し、整理した。さらに、これらの事例や関連技術の情報、さらには分科会委員の経験等を踏まえて、今後のリプレースの方向性についても議論を行った。記録が残っているリプレースの事例は予想したよりも少なく、検討の詳細が不明なものが多かったものの、現状としてのリプレースの検討内容を整理するとともに、最新の関連する諸技術を広範囲に収集した。また、これらの現状を踏まえた今後の方向性についての提言も試みた。約2年間で10回の分科会を開催し、活動の成果として、本報告書を取りまとめた。

分科会幹事ならびに委員各位には、業務多用な中、積極的、精力的に委員会活動に取り組んでいただいた。また、新技術・エネルギー小委員会委員各位には、終始、分科会活動に多大なる支援をいただいた。皆様に厚くお礼申し上げます。本報告書が、学会会員各位の業務の参考になれば幸いである。

2010年12月

エネルギー委員会 新技術・エネルギー小委員会
火力発電所のリプレースに関する技術分科会
主査 松村 卓郎

土木学会エネルギー土木委員会 新技術・エネルギー小委員会
火力発電所のリプレースに関する技術分科会

1. 委員構成（所属は委員当時のもの）

主査	松村 卓郎	(財)電力中央研究所 地球工学研究所 (H20/9/30～H22/10/14)
委員	田中 則和	北海道電力(株) 土木部土木センター (H20/9/30～H22/3/9)
	田島 陽一	北海道電力(株) 土木部土木センター (H22/3/9～H22/10/14)
	大宮 宏之	東北電力(株) 土木建築部火力原子力土木グループ (H20/9/30～H22/7/29)
	佐藤 智	東北電力(株) 土木建築部火力原子力土木グループ (H22/7/29～H22/10/14)
	舘 宏樹	北陸電力(株) 土木部土木工務チーム (H20/9/30～H21/9/17)
	野口 幹夫	北陸電力(株) 土木部土木工務チーム (H21/9/17～H22/7/29)
	中本 利正	北陸電力(株) 土木部建設チーム (H22/7/29～H22/10/14)
	鈴木 英治	中部電力(株) 発電本部土木建築部火力土建グループ (H20/9/30～H21/6/18)
	菊地 憲司	中部電力(株) 発電本部土木建築部火力土建グループ (H21/6/18～H22/7/29)
	菊地 宏	中部電力(株) 発電本部土木建築部火力土建グループ (H22/7/29～H22/10/14)
	審 浩年	関西電力(株) 土木建築室土木建築エンジニアリングセンター (H20/9/30～H21/9/17)
	西川 亨	関西電力(株) 土木建築室土木建築エンジニアリングセンター (H21/9/17～H22/9/8)
	村本 荒喜	関西電力(株) 土木建築室土木建築エンジニアリングセンター (H22/9/8～H22/10/14)
	角田 秀昭	中国電力(株) 電源事業本部火力土木担当 (H20/9/30～H21/3/10)
	山村 淳一	中国電力(株) 電源事業本部火力土木担当 (H21/3/10～H22/10/14)
	杉本 達弘	四国電力(株) 土木建築部土木技術グループ (H20/9/30～H20/12/9)
	立川 貴重	四国電力(株) 土木建築部土木技術グループ (H20/12/9～H22/3/9)
	中廣 政之	四国電力(株) 土木建築部土木技術グループ (H22/3/9～H22/10/14)
	丸山 光浩	九州電力(株) 土木部火力建設グループ (H20/9/30～H22/10/14)

幹事 中野 修 東京電力(株) 建設部土木・建築技術センター原子力火力土木技術グループ (H20/9/30～H22/10/14)

寺浦 努 電源開発(株) 火力エンジニアリング部土木グループ (H20/9/30～H22/10/14)

2 活動実績

	開催日	場所	内容
第 1 回	平成 20 年 9 月 30 日 (火)	土木学会 F 会議室	▶ 分科会方向性意見交換
第 2 回	平成 20 年 12 月 9 日 (火)	主婦会館 4F 会議室	▶ リプレース事例紹介
第 3 回	平成 21 年 3 月 10 日 (火)	土木学会 D 会議室	▶ 事例収集方法検討 ▶ 関連技術文献調査分担検討
第 4 回	平成 21 年 6 月 18 日 (木)	土木学会 D 会議室	▶ 事例収集結果検討 1 回目 ▶ 文献調査結果報告 1 回目
第 5 回	平成 21 年 9 月 17 日 (木)	上越火力建設所	▶ 事例収集結果検討 2 回目 ▶ 文献調査結果報告 2 回目
第 6 回	平成 21 年 12 月 15 日 (火)	土木学会 E 会議室	▶ 報告書素案検討
第 7 回	平成 22 年 3 月 9 日 (火)	土木学会 E 会議室	▶ 報告書原案審議
第 8 回	平成 22 年 5 月 25 日 (火)	土木学会 D 会議室	▶ 報告書第 1 次案審議
第 9 回	平成 22 年 7 月 29 日 (火)	土木学会 D 会議室	▶ 報告書第 2 次案審議
第 10 回	平成 22 年 10 月 14 日 (木)	土木学会 D 会議室	▶ 報告書第 3 次案審議

1章 既設火力発電所の現状

1 既設火力発電所の現状

表-1.1 に日本全国における各電力会社毎の火力発電所の一覧表を示す。
(但し沖縄電力、共同火力は除く)。

表-1.1 全国の各電力会社毎の火力発電所一覧
(電気新聞(平成20年9月22日)全国火カマップより抽出)

電力名	発電所名	認可出力(kW)	ユニット	運転開始	使用燃料
北海道	砂川	250,000	3, 4号機	1977年6月, 1982年5月	石炭
	奈井江	350,000	1, 2号機	1968年5月, 1970年2月	石炭
	苫東厚真	1,650,000	1, 2号機	1980年10月, 1985年10月	石炭
			4号機	2002年6月	
	苫小牧	250,000	1号機	1973年11月	重油, 原油
	伊達	700,000	1, 2号機	1978年11月, 1980年3月	重油
知内	700,000	1号機	1983年12月	重油	
		2号機	1998年9月		

電力名	発電所名	認可出力(kW)	ユニット	運転開始	使用燃料
東北	八戸	250,000	3号機	1968年8月	重油, 原油
	秋田	1,300,000	2~4号機	1972年2月~1980年7月	重油, 原油
	能代	1,200,000	1, 2号機	1993年5月~1994年12月	石炭
	新仙台	950,000	1, 2号機	1971年8月~1973年6月	重油, 原油
	新潟	500,000	3, 4号機	1966年1月~1969年8月	重油, 天然ガス LNG
			1, 2号機	1977年4月~1983年6月	
	東新潟	4,600,000	3号系列	1985年10月	LNG
			4号系列	2006年12月	
原町	2,000,000	港1, 2号機	1972年11月~1975年11月	重油	
			1997年7月~1998年7月	石炭	

電力名	発電所名	認可出力(kW)	ユニット	運転開始	使用燃料
東京	千葉	2,880,000	1, 2号系列	2000年4月, 2000年6月	LNG
	五井	1,886,000	1~6号機	1963年6月~1968年3月 1994年7月	LNG
	姉崎	3,600,000	1~6号機	1967年12月~1979年10月	重油, 原油 NGL, LNG, LPG
	袖ヶ浦	3,600,000	1~4号機	1974年8月~1979年8月	LNG
	富津	4,027,000	1, 2号系列	1986年11月, 1988年11月	LNG
			3号系列	2003年11月	
			4号系列	2008年7月(初軸)	
	横須賀	2,274,000	3~8号機	1964年5月~1970年1月	重油, 原油
			G/T 1号	1971年7月	
			G/T 2号	2007年9月	
	川崎	1,000,000	1号系列	2007年9月(初軸)	LNG
	横浜	3,325,000	5, 6号機	1964年3月, 1968年6月	重油, 原油 LNG, NGL
			7, 8号系列	1998年1月	
	南横浜	1,150,000	1~3号機	1970年4月~1973年5月	LNG
	東扇島	2,000,000	1, 2号機	1987年9月, 1991年3月	LNG
	鹿島	4,400,000	1~6号機	1971年3月~1975年6月	重油, 原油
	大井	1,050,000	1~3号機	1971年8月~1973年12月	原油
	広野	3,800,000	1, 2号機	1980年4月, 1980年7月	重油, 原油
3, 4号機			1989年6月, 1993年1月		
5号機			2004年7月		
品川	1,140,000	1号機	2003年8月	都市ガス	
常陸那珂	1,000,000	1号機	2003年12月	石炭	

電力名	発電所名	認可出力 (kW)	ユニット	運転開始	使用燃料
中部	新名古屋	2,992,400	7号系列	1998年12月	LNG
			8号系列	2008年10月	
	四日市	1,245,000	1～3号機	1963年6月～1963年9月	LNG
			4号機	1988年7月	LNG, LPG
	尾鷲三田	875,000	1号機	1964年7月	重油
			3号機	1987年6月	重・原油 ナフサ
	知多	3,966,000	1～3号機	1966年2月～1968年3月 (1995年8月～1996年8月)	原・重油 LNG
			4～6号機	1974年3月～1978年4月 (1994年9月～1995年6月)	
	武豊	1,125,000	2～4号機	1972年6月～1972年11月	重油・原油
	西名古屋	1,190,000	1～4号機	1970年7月～1972年9月	重油, 原・重油 ナフサ
	渥美	1,900,000	1号機	1971年6月	
			3, 4号機	1981年5月, 1981年6月	重油, 原油
	知多第二	1,708,000	1, 2号機	1983年9月, 1983年11月 (1994年9月, 1996年7月)	LNG
川越	4,802,000	1, 2号機	1989年6月, 1990年6月		
		3, 4号系列	1996年12月, 1997年11月	LNG	
碧南	4,100,000	1～3号機	1991年10月～1993年4月	石炭	
		4, 5号機	2001年11月, 2002年11月		

電力名	発電所名	認可出力 (kW)	ユニット	運転開始	使用燃料
北陸	富山	250,000	4号機	1971年1月	重油
	富山新港	1,500,000	石炭1, 2号機	1971年9月	石炭, 重油
			1, 2号機	1972年6月	原油, 重油
	福井	250,000	三国1号機	1978年9月	重油
	敦賀	1,200,000	1, 2号機	1991年10月, 2000年9月	石炭
七尾大田	1,200,000	1, 2号機	1995年3月, 1998年7月	石炭	

電力名	発電所名	認可出力 (kW)	ユニット	運転開始	使用燃料
関西	堺港	2,000,000	1, 2, 5～8号機	1964年12月～1971年2月	LNG
	多奈川第二	1,200,000	1, 2号機	1977年7月, 1977年8月	重油, 原油 ナフサ
	南港	1,800,000	1～3号機	1990年11月～1991年10月	LNG
	宮津 エネルギー 研究所	750,000	1, 2号機	1989年8月, 1989年12月	重油, 原油
	海南	2,100,000	1, 2号機	1970年5月, 1970年9月	重油, 原油
			3, 4号機	1974年4月, 1973年6月	
	御坊	1,800,000	1～3号機	1984年9月～1985年3月	重油, 原油
	姫路第一	1,442,000	5, 6号機	1995年4月, 1996年5月	LNG
	姫路第二	2,550,000	1～6号機	1963年10月～1973年11月	LNG
	相生	1,125,000	1～3号機	1982年9月～1983年1月	重油, 原油
	赤穂	1,200,000	1, 2号機	1987年9月, 1987年12月	重油, 原油
	関西国際空港 エネルギー センター	40,000	1, 2号機	1993年11月	都市ガス 灯油
舞鶴	900,000	1号機	2004年8月	石炭	

電力名	発電所名	認可出力 (kW)	ユニット	運転開始	使用燃料
中国	三隅	1,000,000	1号機	1998年6月	石炭
	水島	621,000	1, 2号機	1961年11月, 1963年8月	石炭, LNG
			3号機	1973年2月	LNG
	玉島	1,200,000	1～3号機	1971年3月～1974年6月	重油, 原油
	岩国	850,000	2, 3号機	1972年4月, 1981年9月	重油, 原油
	柳井	1,400,000	1-1～1-6	1990年11月～1992年12月	LNG
			2-1～2-6	1994年3月～1996年1月	
	下松	700,000	3号機	1979年9月	重油, 原油
	新小野田	1,000,000	1, 2号機	1986年4月, 1987年1月	石炭
下関	575,000	1号機	1967年3月	石炭	
		2号機	1977年9月	重油, 原油	
大崎	259,000	1-1	2000年11月	石炭	

電力名	発電所名	認可出力 (kW)	ユニット	運転開始	使用燃料
四国	阿南	1,245,000	1, 2号機	1963年7月, 1969年1月	重油, 原油
			3, 4号機	1975年6月, 1976年12月	
	西条	406,000	1, 2号機	1965年11月, 1970年6月	石炭, 重油 木質バイオマス
	坂出	1,150,000	2～4号機	1972年5月～1974年5月	重油, 原油 コークス炉ガス
橘湾	700,000	1号機	2000年6月	石炭	

電力名	発電所名	認可出力 (kW)	ユニット	運転開始	使用燃料
九州	新小倉	1,800,000	3～5号機	1978年9月～1983年7月	LNG
	苅田	735,000	新1号機	2001年7月	石炭, 重油 原油
			新2号機	1972年4月	
	豊前	1,000,000	1, 2号機	1977年12月, 1980年6月	重油, 原油
	唐津	875,000	2, 3号機	1971年7月, 1973年6月	重油, 原油
	相浦	875,000	1, 2号機	1973年4月, 1976年10月	重油, 原油
	松浦	700,000	1号機	1989年6月	石炭
	大分	500,000	1, 2号機	1969年7月, 1970年6月	重油
	新大分	2,295,000	1～3号系列	1991年6月～1998年7月	LNG
川内	1,000,000	1, 2号機	1974年7月, 1985年9月	重油, 原油	
荅北	1,400,000	1, 2号機	1995年12月, 2003年6月	石炭	

電力名	発電所名	認可出力 (kW)	ユニット	運転開始	使用燃料
電源 開発	磯子	1,200,000	新1, 2号機	2002年4月, 2009年7月	石炭
	高砂	500,000	1, 2号機	1968年7月, 1969年1月	石炭
	竹原	1,300,000	1～3号機	1967年7月, 1995年6月 1983年3月	石炭
	橘湾	2,100,000	1, 2号機	2000年7月, 2000年12月	石炭
	松島	1,000,000	1, 2号機	1981年1月, 1981年6月	石炭
	松浦	2,000,000	1, 2号機	1990年6月, 1997年7月	石炭
	石川	312,000	1, 2号機	1986年11月, 1987年3月	石炭

<建設中のユニット>

電力名	発電所名	認可出力 (kW)	ユニット	運転開始	使用燃料
東京	富津	1,520,000	4号系列	2010年10月	LNG
	常陸那珂	1,000,000	2号機	2013年12月	石炭
	広野	600,000	6号機	2013年12月	石炭
	川崎	1,920,000	2号系列	2013年2月以降	LNG
中部	上越	2,380,000	1-1, 1-2	2012年7月, 2013年1月	LNG
			2-1, 2-2	2013年7月, 2014年5月	
関西	舞鶴	900,000	2号機	2010年8月	石炭
	堺港	2,000,000	1～5号機	2009年4月～2010年9月	LNG
四国	坂出	296,000	1号機	2010年8月	LNG
九州	松浦	1,000,000	2号機	2023年以降	石炭

<計画中のユニット>

電力名	発電所名	認可出力 (kW)	ユニット	運転開始	使用燃料
東北	能代	600,000	3号機	2023年度以降	石炭
	仙台	446,000	4号機	2010年7月	天然ガス LNG
	新仙台	800,000級	3号系列	2017年7月	天然ガス LNG
	上越	1,440,000	1号系列	2023年度以降	LNG
	新潟	100,000級	5号系列	2011年3月	ガス, 重油
東京	五井	2,130,000	1号系列	2020年度以降	LNG
関西	和歌山	3,700,000	1, 2号系列	2020年以降	LNG
中国	三隅	400,000	2号機	2017年度	石炭
	大崎	259,000	1-2	計画変更手続き中	石炭
九州	新天分	400,000級	3-4	2016年7月	LNG

全国の電力会社における火力発電所は、水島火力発電所の1961年営業運転開始以降、営業運転中88箇所、建設中9箇所、計画中10箇所となっている。

また営業運転しているユニット数は240程度にのぼるが、40年以上運転しているユニット数が50近くあり、これらは今後、老朽化や燃料転換等によるリプレースの可能性が示唆される。

なお本報告書では、リプレースの定義として、古い発電所を撤去して同じ敷地に新しい発電所を建設する場合を基本とする。

図-1.1 に運開年度および燃料種別の火力発電所ユニット数の推移を示す。

経過年数は、35～40年（1971～1975年運開）が最も多く、平均で29年程度である。

1970年代は、重油等火力の建設ラッシュの時代であり、この5年間で40ユニット数以上が建設されている。1980年代後半になると重油等火力は急激に減少し、SO_x、NO_xの排出が少ないLNG火力および燃料単価が安価な石炭火力が増加しているのがわかる。またLNG火力については、1960年代から運転しているユニットも存在する。

燃料種別では、重油が最も多く、石炭は少ない。重油等火力は1970年代運開のユニットが圧倒的に多く、LNGおよび石炭火力は1990年代以降に運開したユニットが多い。

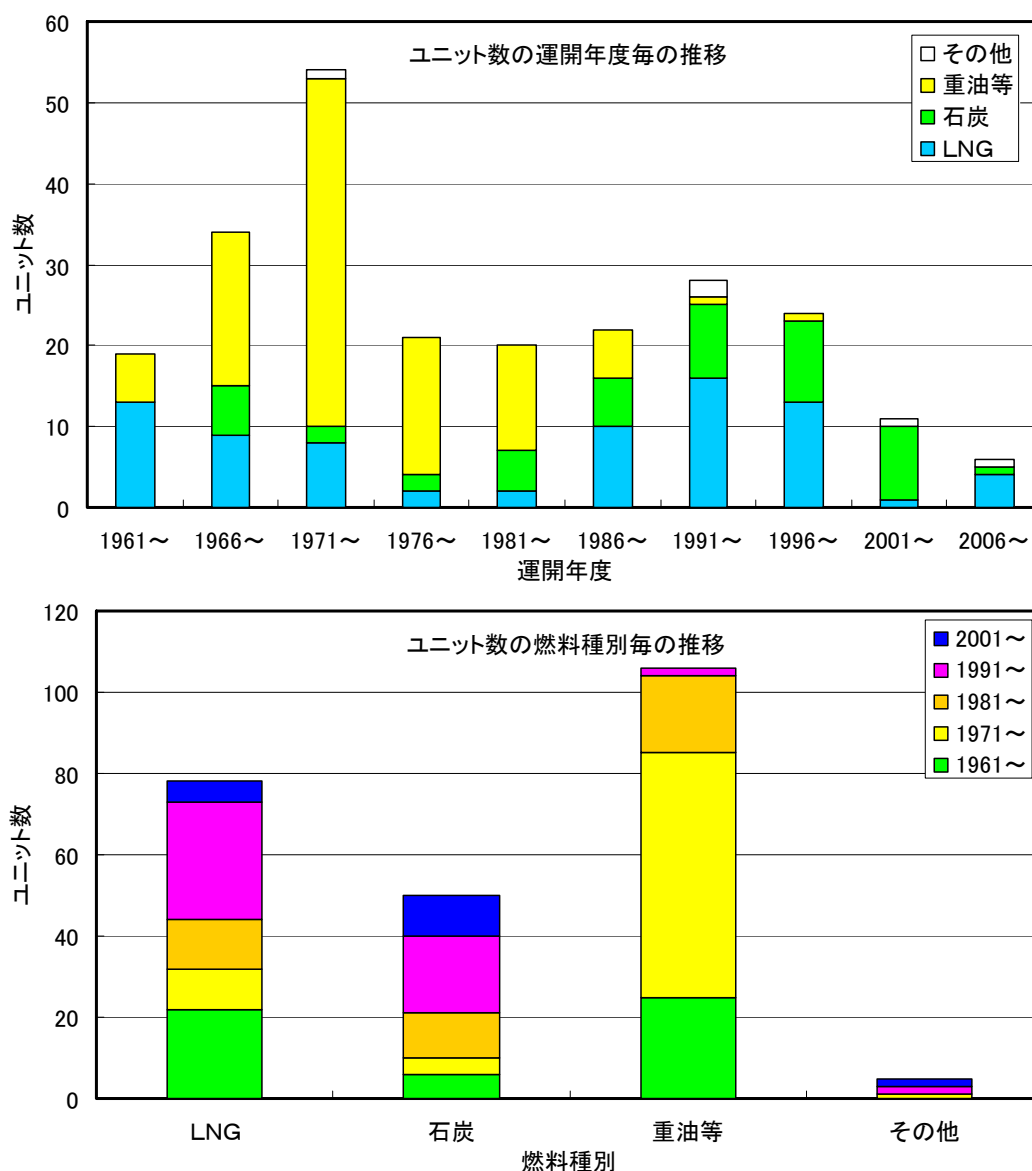


図-1.1 運開年度および燃料種別の営業運転ユニット数の推移

(電気新聞(平成20年9月22日)全国火力マップより抽出)

2章 既設火力発電所のリプレース事例

2 既設火力発電所のリプレース事例

2.1 既設火力発電所のリプレース分析

2.1.1 リプレースの理由

本章に集計されているデータは、電力10社（北海道電力、東北電力、東京電力、中部電力、北陸電力、関西電力、中国電力、四国電力、九州電力、電源開発）に対して実施したアンケート結果に基づいている。

リプレース火力発電所の運転開始の西暦と既設火力発電所の運転年数を図-2.1に示す。1970年代から1990年代までは既設火力発電所の運転年数が約30年までの発電所がリプレースされる傾向があったが、2000年代より増加し、2000年代から2010年代（計画）までは既設火力発電所の運転年数が約30～50年の発電所がリプレースされる傾向である。

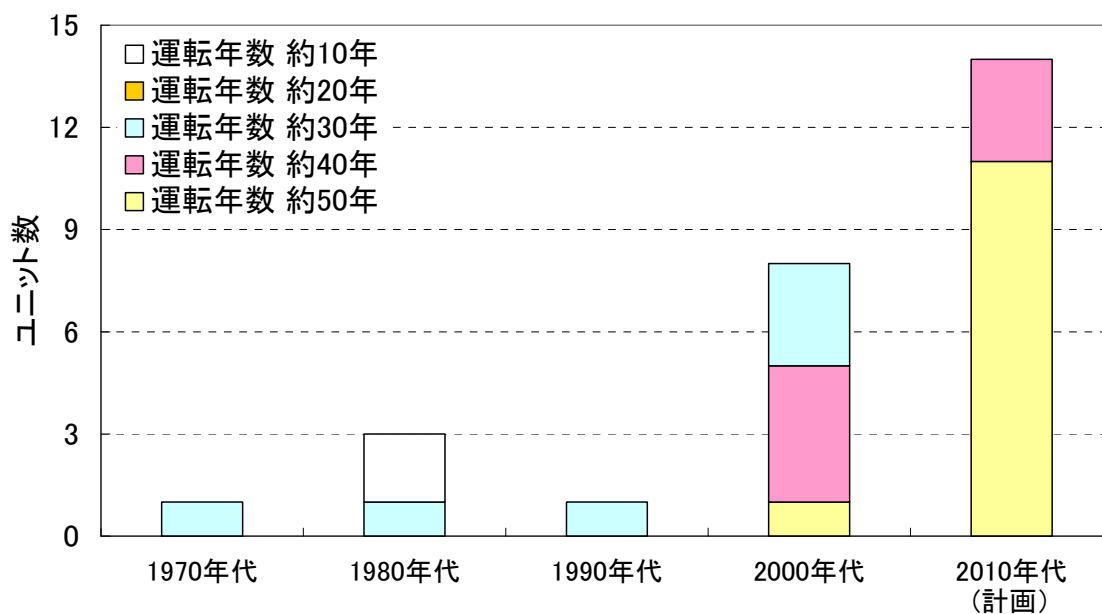


図-2.1 西暦と既設火力発電所の運転年数（ユニット別）

既設火力発電所のリプレースを行った理由を図-2.2に示す。リプレースの理由として、1970年代から2010年代（計画）において継続的に燃料転換があるが、2000年代から2010年代において、効率改善が多数を占めてきている。これは図-2.1に示されるように既設火力発電所の高経年化に起因しているものと想定される。

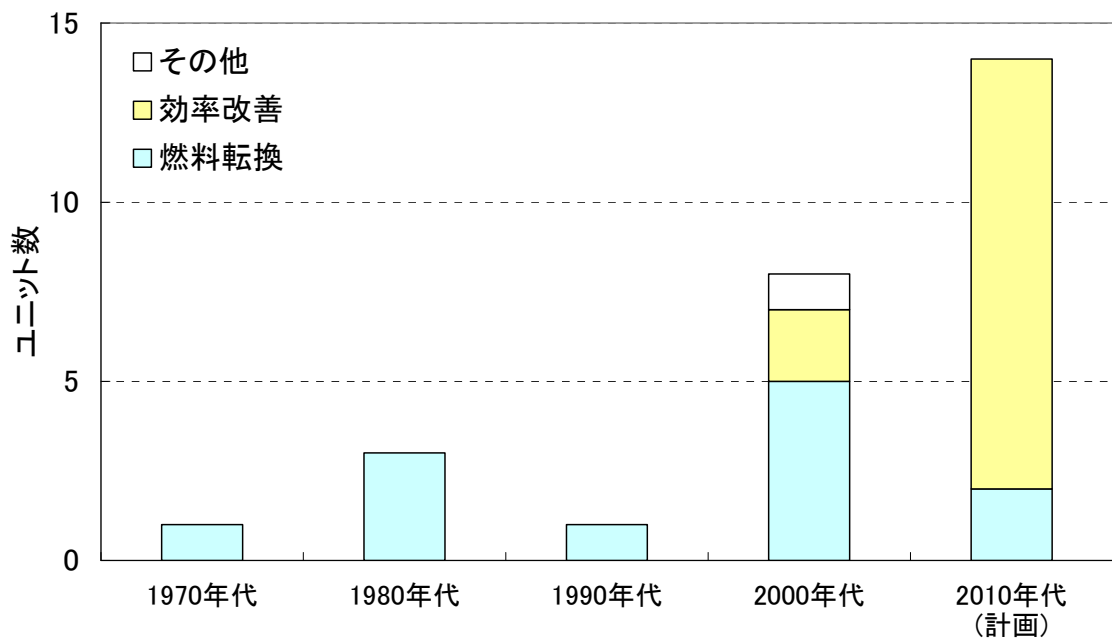


図-2.2 西暦とリプレースの理由（ユニット別）

2.1.2 流用した土木設備

リプレースをした発電所の内、土木設備を流用した発電所の割合は90%を越えていた。

既設火力発電所のリプレースにおいて、既設火力発電所の土木設備を新設火力発電所の設備として使用した（以下「流用した土木設備」という）割合を図-2.3に示す。復水器冷却水路の内放水路、取水路の順に流用した例が多い。その他、機械基礎の流用も一部あったが、各社で取り扱いが異なるため図から除いた。

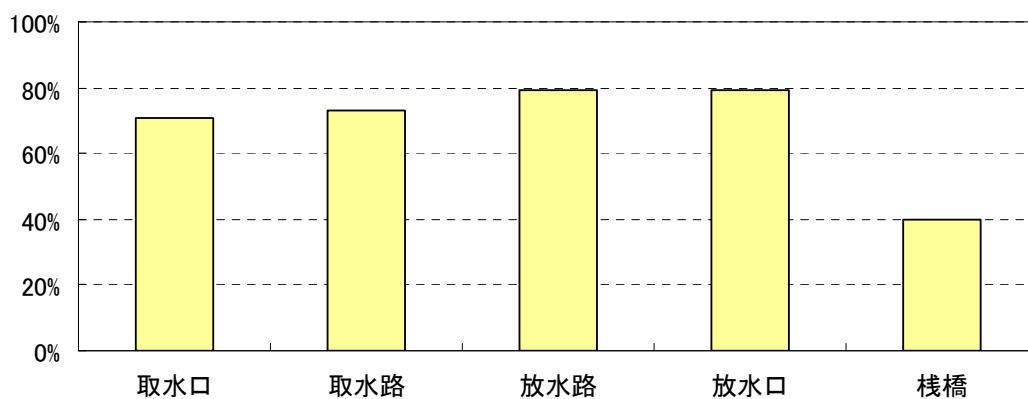


図-2.3 流用した土木設備の割合

2.1.3 残置した土木設備

新設火力発電所で使用しないにも拘わらず撤去されなかった既設火力発電所の土木設備（以下「残置した土木設備」という）がある発電所の割合は約 50%であり，復水器冷却水路、栈橋があった。

2.2 今後の既設火力発電所のリプレースの可能性

図—1.1 から潜在的なリプレース候補ユニット数としては，

- ・ 供用年数として 30 年以上経過している。
- ・ 燃料として重油を使用している。

などと仮定すると，1980 年以前の重油等火力が 80 ユニット数以上あり，リプレースする発電所は今後増加する可能性があると考えられる。

3章 流用する主要土木構造物の評価・対策技術

3 流用する主要土木構造物の評価・対策技術

表-3.1 に各電力会社毎のリプレイス実施内容の取り纏めを示す。

表-3.1 リプレイス時の設備流用実施内容

電力会社	発電所	設備名	要求性能	設定供用年数	調査項目	劣化予測	LCC評価	再生骨材 コンクリート	今後の課題	備考
北海道	砂川3号	取水口 (4号)	機能性	不明	不明	不明	不明	不明	<ul style="list-style-type: none"> 適切な設備診断と劣化予測 LCCを考慮した維持管理費適正化 	取水路：全長のうち70%流用，老朽化の著しい区間→取壊し+建替 取水路：通水断面積不足→側壁嵩上，表面補修 放水口：放水量増加→一部拡幅，弱堤増設
	砂川4号	取水路 放水路 放水口								
東北	新潟	取水口 取水路 放水路 放水口	構造的 耐久性 機能性	-	【コンクリート】 ・外観調査 ・圧縮強度 ・中性化試験 ・塩分含有量 ・反発硬度測定 ・配筋調査 ・鉄筋腐食 (以下放水口のみ) ・アルカリ骨材試験 【地盤】(放水口除く) ・ボーリング調査 ・原位置，室内試験 【管路】(取放水路) ・試験，肉厚調査	有	-	-	<ul style="list-style-type: none"> LCC評価のためのデータ蓄積 合理的な発錆限界値の設定 耐震性評価 	・煙突流用
		仙台								
東京	品川	取水路 放水路 放水口	耐震性 構造的 耐久性 機能性	-	・外観調査 ・コンクリート圧縮強度 ・塩化物含有量 ・中性化試験 ・鉄筋腐食 ・破り試験 ・鉄筋引張強度	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 供用期間設定による耐久性の定量的評価 	<ul style="list-style-type: none"> 取放水路：コンクリートガラセメントベンチマークを充填し残置 放水路：内面全面被覆を実施 放水口：放水流速確保のため導流壁，阻柱を設置
	千葉	護岸	耐震性 構造的	40	・外観調査 ・鋼材腐食量	-	試行有	-	<ul style="list-style-type: none"> LCC評価の精度向上 	・信頼性設計の試行により補強範囲を縮小
中部	新名古屋	-	-	-	-	-	-	-	-	-
北陸	富山新港	取水口 取水路 放水路 放水口	-	-	-	-	-	-	-	-
関西	堺港	取水口 放水路 放水口	耐震性 構造的 耐久性 機能性	30	・外観調査 ・鉄筋腐食 ・塩分含有量 ・コンクリート圧縮強度 ・鉄筋引張強度 ・中性化試験	有 (中性化)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 限界塩分濃度の合理的評価基準 	<ul style="list-style-type: none"> ポンプ能力増大によるスラスト力増加に対するクレーン梁補強の実施 取水口・放水路は一部残置
	姫路第二	取水口 放水路 放水口	耐震性 構造的 耐久性 機能性	-	・外観調査 ・鉄筋腐食 ・塩分含有量 ・コンクリート圧縮強度 ・鉄筋引張強度 ・中性化試験	有	-	-		<ul style="list-style-type: none"> 取水口・放水路は一部残置予定
中国	水島	取水口 取水路 放水路 放水口 栈橋	耐震性 (以上栈橋除く) 構造的 機能性	-	-	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 取水流量に変更がないため既存設備をそのまま流用 台船から直接陸上へ重量物は水切り実施のため栈橋補強は未実施
四国	坂出	取水口 放水路 放水口	耐久性	仮に50	・圧縮強度 ・塩分含有量	試行有	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 劣化予測精度向上 限界塩分濃度の合理的評価基準 	<ul style="list-style-type: none"> 予測式と現状が一致しない LCC評価による対策方法検討中
		栈橋	-	50	-	-	-	-	-	・リプレイス前補修実施済
九州	苅田	取水口 取水路 放水路 放水口	構造的 耐久性	-	・外観調査 ・反発硬度測定 ・コンクリート圧縮強度 ・鉄筋引張強度 ・鉄筋腐食 ・塩分含有量 ・中性化試験	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 健全度評価→「臨海コンクリート設備の維持管理手引き」 空气中，干満部→打継工法 水中→表面被覆+電気防食 	
電源開発	磯子	栈橋	耐久性	-	・鉄筋腐食 ・塩化物含有量 ・コンクリート圧縮強度等	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 充填，表面被覆，断面修復，電気防食による補修を実施

要求性能については、出力増に伴う機能性、構造的性、耐久性などであり、耐震性は一部の設備で実施している。

供用年数については、設定している発電所は非常に少なく、3地点で設定されている程度であった。

調査項目については、鉄筋コンクリートに対する劣化調査を実施しているところが大半であった。

LCC評価は1地点で試行的に実施されているだけであり、再生骨材コンクリートの検討を実施している地点は皆無であった。

今後の課題としては、どの地点もほぼ共通で、LCC評価のためのデータ蓄積と限界塩分濃度の合理的評価基準が挙げられており、これらの項目については、今後知見の蓄積が期待される。

3.1 既設構造物の健全度評価

3.1.1 基本的な検討の手順

図-3.1 に品川火力を例にした火力発電所リプレースにおける土木設備流用フローを示す。

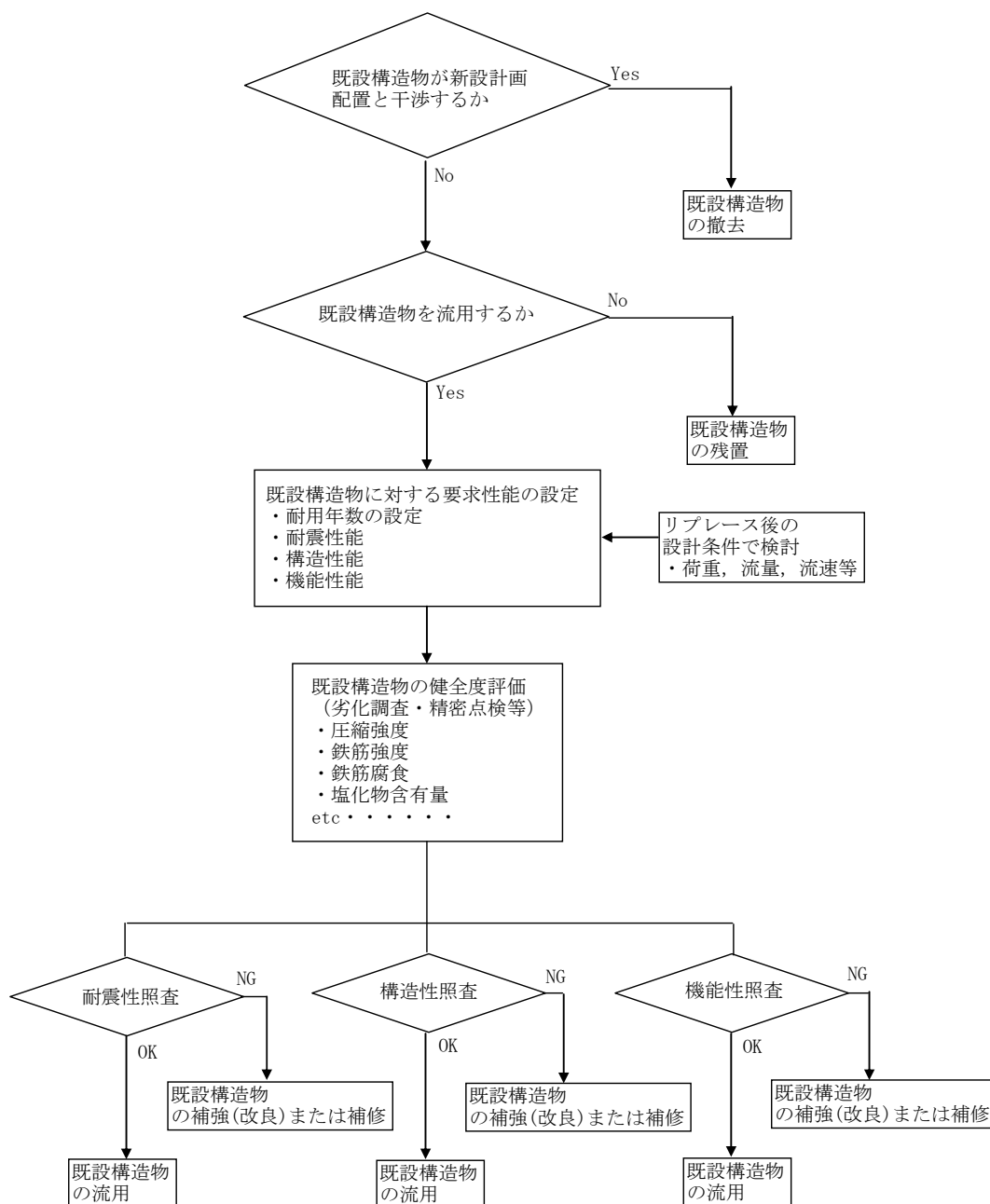


図-3.1 土木設備流用フロー（品川火力の場合）

図-3.1 のフローの概要は次のとおりである。

まず既設構造物と新設計画配置が干渉するものは撤去し、その後流用する設備を選定する。また必要に応じて、リプレースが既設構造物に及ぼす影響の検討を実施する。

新設計画配置と干渉せずかつ流用しない既設構造物は残置することになる。

流用する設備を選定してから、リプレース後の設備にどのような性能を持たせるかをよく検討して、既設設備の要求性能を設定する。要求性能の設定としては、機能的、構造的、耐震性があり、設備の必要性に応じて以下のように設定する。

- ①機能的：リプレースにより取水流量が増加した場合などが検討対象となる。
- ②構造的：リプレースにより荷重条件等が変更になった場合などが対象となる。また耐久性なども検討対象となる。
- ③耐震性：流用する設備にどこまでの耐震性能を求めるかを設定する。新設と異なり設備のグレード（重要度）などに大きく左右されると考えられる。

設備の要求性能が決定したら、既設構造物の劣化調査（外観、塩化物含有量、鉄筋腐食など・・・）を実施し、構造物の健全度評価を実施する。その際には、調査結果のばらつきを考慮して評価する必要がある。

健全度評価後に、機能的、構造的、耐震性に関する照査を実施する。

耐震性では、適用する照査基準の選定や解析手法などを適切に選定する必要がある。

耐久性では、補修工法や補修後劣化予測を含めた検討を実施する必要がある。

許容値内であれば、既設設備を流用して使用する。NGとなったら補修または補強計画を立てて、要求性能を満足するような設計を検討する。その際には、新設の場合とのコスト比較による検討も流用可否判断の重要な要素の1つであると考えられる。

3.1.2 調査

健全度判定で実施した調査をアンケート結果より表-3.2に一覧を示す.

設備毎にばらつきがあるが、コンクリート劣化調査において、圧縮強度・中性化試験・塩分含有量試験・鉄筋腐食量および鉄筋引張強度試験を実施しているのはほぼどの設備においても共通している.

一部に、ASR試験、ボーリング調査、原位置・室内試験などを実施している設備もあった.

表-3.2 既設設備調査項目一覧

調査方法	調査項目
外観調査	ひび割れ, 浮き, 剥離
はつり調査	鉄筋諸元および腐食状況の確認
中性化試験	コア採取による中性化深さの評価
塩化物イオン含有量試験	コア採取による塩分量の深さ方向の分布評価
鉄筋腐食診断	電位測定による診断
かぶり試験	実測およびRCレーダーによるかぶりの測定
鉄筋引張試験	内部鉄筋の引張強度試験
圧縮強度試験	コア採取による圧縮強度測定
反発硬度試験	表面反発度から圧縮強度測定
ASR試験	ASR反応性骨材の試験
板厚調査	超音波パルスによる板厚測定
試掘調査	水路天端面の調査
ボーリング調査	地質状況の確認
原位置試験, 室内試験	振動三軸試験, PS検層等調査

3.1.3 照 査

設定した要求性能毎に照査を実施した照査事例を以下に示す。

①品川火力発電所 放水路

本事例は、リプレース時に既設放水路の劣化状況や材料強度などを綿密に調査し、当時の最新の技術基準（「コンクリート標準示方書，設計編・耐震設計編，平成8年制定」など）に基づき、既設放水路の流用検討を実施したものである。

「既設放水路の流用検討と内部補修の施工，電力土木，No.286，2003.3，p52-55」³²⁾より一部抜粋

- ・機能性：放水流量 26.86m³/s（リプレース前 14m³/s）
- ・構造的：鉄筋の腐食進行を抑制する
- ・耐震性：常時・レベル1地震時→弾性範囲内の状態を保持（耐震性能1）
レベル2地震時→靱性も考慮した耐震性能の保持（耐震性能2）

1. 機能性の照査

放水流量 $Q=26.86\text{m}^3/\text{s}$ （リプレース前 $Q=14\text{m}^3/\text{s}$ ）に対し、流速と損失水頭の照査を実施。結果として通水可能と判断した。

制限流速： $V=0.54\sim 2.23\text{m}/\text{s} < 3.0\text{m}/\text{s}$ （流水によるキャビテーションの制限）

損失水頭： $hf=2.11\text{m} < 2.35\text{m}$ （放水路上下流の水面高低差以内）

2. 構造的（耐久性）の照査

表-3.3 調査項目一覧

調査項目	点検内容	数量	点検結果
外観目視調査	目地、ひび割れ、漏水状況等の調査	放水路全体	放水路全体に錆汁は散在してみられるが、骨材露出が10数箇所見られる程度であり、ひび割れからの漏水は滲む程度である。
圧縮強度試験(コア)	圧縮強度測定	17ヶ所	平均34.6N/mm ² (>24N/mm ²)
圧縮強度試験(シュミットハンマ)	圧縮強度測定	79ヶ所	反発硬度による推定値 平均35.3N/mm ² (>24N/mm ²)
塩化物イオン含有量	塩分量測定	11ヶ所	0.29wt% (※)
中性化試験	中性化深さの測定	20ヶ所	平均中性化深さ5.3mm(理論値22.0mm)
鉄筋腐食量調査	鉄筋の腐食状況の調査	20ヶ所	被りが確保されている箇所では腐食なし。
被り試験(実測)	被り深さの実測	20ヶ所	被りは平均で約71mm確保されている。
被り試験(RCレダ-)	被り深さの実測	90ヶ所	被りは平均で約87mm確保されている。
鉄筋引張試験	内部鉄筋引張強度測定	5ヶ所	平均降伏強度294N/mm ² (SR24と推定)

(※)塩化物イオン含有量が多くても、酸素が供給されない環境であるため、発錆は抑制されている。

表-3.3に示す調査項目を実施。コンクリート中の塩化物イオン含有量が多いが、塩化物イオンによる鉄筋腐食の進行を将来に亘り防止できれば、概ね健全であると考え、流用可能と判断した。

3. 耐震性の照査（準拠基準：コンクリート標準示方書）

a. 検討条件

①コンクリート設計基準強度

圧縮強度試験の統計処理に基づき、95%信頼区間の平均強度 23.3N/mm² に設定した。

②鉄筋降伏強度

引張試験から使用鉄筋をSR24と推定し、降伏強度 235N/mm² に設定した。

③コンクリート材料係数 γ_c

コンクリート標準示方書（設計編）⁵⁴より、コンクリート材料係数 γ_c は、通常 $\gamma_c=1.3$ に設定するが、本検討では、設計基準強度を圧縮強度試験のばらつきを評価して設定したことおよび鋼材の材料係数 ($\gamma_s=1.0\sim 1.05$) を下回らないことを考慮して通常の 1.3 より小さい $\gamma_c=1.1$ に設定した。

④鉄筋材料係数 γ_s

降伏強度を引張試験結果以下に設定したことから $\gamma_s=1.0$ に設定した。

⑤耐震設計用地震動の設定

新設構造物と同様な考え方にに基づき表-3.4のように設定した。

表-3.4 設定入力地震動

地震動レベル	入力加速度	保有すべき耐震性能	遭遇する可能性	再現期間
レベル1	150gal	・液状化させない ・構造物の健全性の確保	構造物の供用期間中に起こり得る大きさの地震動	30~40年程度
レベル2	290gal	・要求機能の維持の確保	構造物の供用期間中にまれに発生する大きさの地震動	300年程度

b. 沈下検討

レベル2地震動において、砂質シルト層(320cm)が液状化することから、次式により沈下量を推定し、結果として液状化に伴う沈下対策は実施しない。

$$S = mv \times H \times \Delta \sigma = 0.002 \times 320 \times 1.54 = 1.0 \text{ cm} < 10 \text{ cm} \text{ (計算結果より設定)}$$

S : 沈下量(cm), mv : 動的体積圧縮係数(cm²/kgf), H : 液状化層厚(cm),

$\Delta \sigma$: 液状化層厚での有効上載圧(kgf/cm²),

c. 限界状態設計法による照査

①使用限界状態の照査

通水確保という放水路の要求性能から、耐久性に影響を及ぼすひび割れ照査が対象であるが、次の理由から使用限界照査を省略。

- ・コンクリート中塩化物含有量は大きいですが、内部鉄筋が腐食していない。
- ・水路内部：海水満水、躯体外側：地下水位以下のため、酸素が供給されない。

②終局限界状態の照査

- ・常時・レベル1地震動：弾性範囲内（耐震性能1），
- ・レベル2地震動：靱性も考慮した耐震性能の保持（耐震性能2）

終局限界状態の照査結果を表-3.5 に示す。また予期せぬ条件で酸素が供給され、腐食が進行する場合を想定して、常時における最も厳しい断面に対し、外側鉄筋量が腐食により半減した場合のレベル2地震動時の照査も併せて実施した。その結果、鉄筋量を半減させても構造上は問題にならないことを確認した。

表-3.5 照査結果

照査項目	常時	レベル1	レベル2	備考
曲げ	0.66<1.00	0.55<1.00	0.50<1.00	荷重条件が最も厳しい最深部の断面 (現状断面)
せん断	0.95<1.00	0.80<1.00	0.95<1.00	
曲げ	—		0.18<1.00	常時で最も厳しい断面（現状断面）
			0.27<1.00	常時で最も厳しい断面（鉄筋量を1/2）

以上から、既設放水路は、将来において現状のままでも十分に供用できるとし、耐震補強は実施しない。

②荏田火力発電所 取水設備

健全度調査は、土木学会エネルギー土木委員会の「臨海コンクリート設備の維持管理手引き（案）」（平成6年調査当時）に準拠して実施した。後に「臨海コンクリート設備の塩害に関する維持管理手引き（土木学会 エネルギー土木委員会 設備診断・補強技術小委員会）」³⁾として発刊されている。

詳細については、「荏田発電所新1号機再開発に伴う取水設備の健全度診断（電力土木1995年9月）」⁴⁾を参照されたい。

本事例は、土木学会で策定中であった手引きに準拠して検討されており、当時としては最新の知見に基づき、調査・健全度評価・対策工立案されたものであり、リプレース時の設備流用検討において、参考となる事例である。

1. 検討フロー

調査検討の概略フローを図-3.2に示す。

文献調査，判断基準の選定（臨海コンクリート設備の塩害に関する維持管理手引き）および現地調査（外観調査，強度試験，性状試験，鉄筋腐食診断）を実施する。

これらの調査に基づき，応力度照査（許容応力度法）による耐力の確認をする。現地調査および応力度照査結果から措置判定および補修工法の選定を実施する。

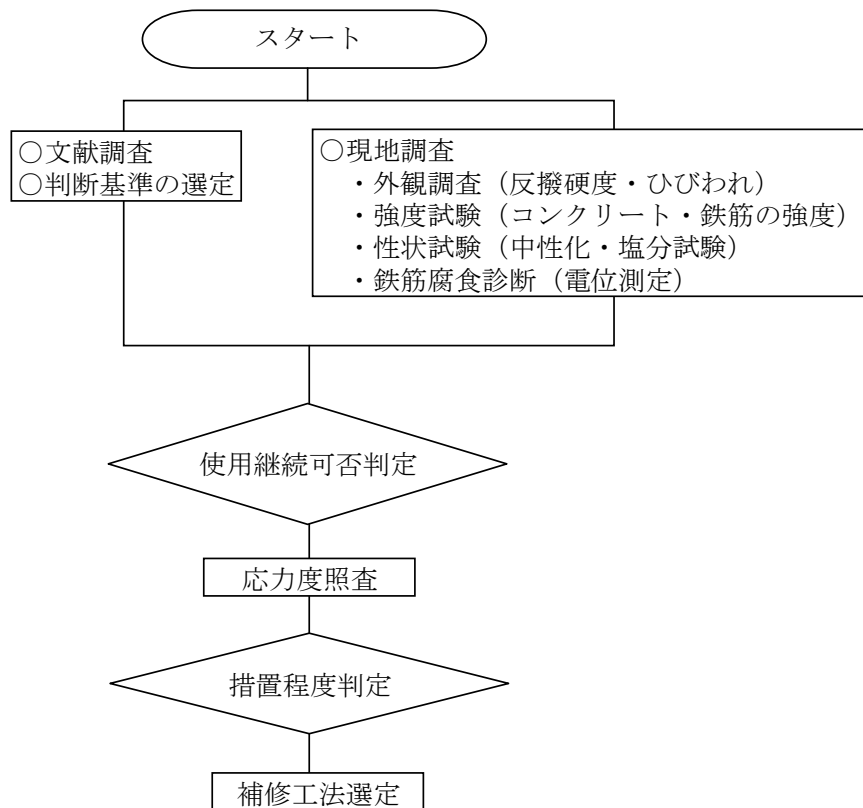


図-3.2 検討フロー

2. 調査項目

表-3.6 調査項目一覧

調査項目	取水口		取水路	取水ピット	
	気中・干満部	水中部	水中部	気中・干満部	水中部
外観調査	227 m ²	1,297 m ²	2,390 m ²	503 m ²	1,108 m ²
反発硬度	494 点	18 点	38 点	38 点	14 点
非破壊鉄筋腐食診断	—	6 箇所	6 箇所	1 箇所	6 箇所
コア採取	15 箇所 47 本	2 箇所 8 本	3 箇所 12 本	3 箇所 10 本	2 箇所 8 本
はつり調査	11 箇所	2 箇所	2 箇所	1 箇所	3 箇所
鉄筋採取	8 箇所 14 本	1 箇所 1 本	—	—	—
コンクリート圧縮強度試験	13 箇所 39 本	2 箇所 6 本	2 箇所 9 本	3 箇所 9 本	2 箇所 6 本
中性化試験	同上	同上	1 箇所 3 本	3 箇所 7 本	2 箇所 6 本
塩化物含有量試験	8 箇所 8 本	2 箇所 2 本	2 箇所 3 本	1 箇所 1 本	2 箇所 2 本
鉄筋成分分析	1 本	—	—	—	—
鉄筋腐食評価試験	1 本	1 本	—	—	—
鉄筋引張試験	8 箇所 8 本	—	—	—	—

表-3.6 に調査項目一覧を示す。

取水設備の、外部的劣化損傷状況（ひびわれ、浮き・剥離、施工不良等）を明らかにすると共に、部材内部のコンクリートおよび鉄筋の状況を把握するために、上表に示す項目について調査・試験を実施した。

3. 調査結果

a. 調査結果集約

表-3.7 調査結果集約一覧

調査項目	取水口		取水路	取水ビット		備考
	気中・干満部	水中部	水中部	気中・干満部	水中部	
外観 (㎡) (グレード ii ~ iv)	19	41	179	0	57	要措置(グレード iii ~ iv)は 91 ㎡
コンクリート強度 (kg/cm ²)	343 (311)	316 (213)	258 (306)	274 (246)	272 (231)	()は反発硬度からの推定強度
鉄筋腐食診断	約 80%の鉄筋が腐食していないと評価されるが、コンクリートが全面腐食環境(塩害領域)にあるため、将来的には腐食すると推定される。					
鉄筋位置での 塩化物含有量 (kg / m ³)	0.8~5.7	13.42, 14.1	6.8, 15.8	1.3	7.3, 13.6	
中酸化 (mm)	Max 40	Max 10	Max 15	Max 33	Max 7	
鉄筋引張強度	要措置部では健全筋の 55~80%の強度となっている。その他の区域(全面積の 98%)では SR295 の強度を満足する。					

表-3.7 に調査結果集約一覧を示す。

外観の不健全部(グレード ii ~ iv)は 5,525m²中 296m²(5.4%)であった。このうち、要措置部(グレード iii ~ iv)は 91m²あり、その比率は 1.6%であった。

コンクリート圧縮強度は十分な強度を有していた。また鉄筋は、全体の 98%で J I S の規格値(SR295)を満足していた。

塩化物含有量は、ほぼ全ての区域で限界塩分量(1.2kg/m³)以上であるが、未発錆の鉄筋が多く見られた。

非破壊による鉄筋腐食診断では、約 80%の鉄筋が腐食していないと評価されるが、コンクリートが全面腐食環境にあるため、将来的には腐食すると推察された。

b. 項目別集約結果（構造性の照査）

①コンクリートおよび鉄筋強度

表-3.8 コンクリート強度，鉄筋強度一覧

調査箇所 (部位・名称)		コンクリート一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	塩化物含有量(鉄筋位置) (kg/m ³)	鉄筋引張試験(降伏点) (kgf/mm ²)
取水口	気中・干満部	343 (260~437)	0.8~5.7	グレード ii 部 : 32.7
	水中部	316 (275~357)	11.4~14.1	グレード iv 部 : 22.7
取水路(水中部)		258 (240~276)	6.8~15.8	—
取水 ピット	気中・干満部	274 (241~298)	1.3	—
	水中部	272 (242~302)	6.3~13.6	—

表-3.8 にコンクリート強度，鉄筋強度一覧を示す。

コンクリートの一軸圧縮強度は，いずれも 210kgf/cm² 以上あり，現状で十分な強度を有していると判断される。

鉄筋位置における塩化物含有量は，ほぼ全てにおいて限界塩分量の 1.2kg/m³ 以上になっているにもかかわらず，未発錆の鉄筋が多く見られた。限界塩分量は環境条件やコンクリートの品質などにより大きく変化するとされており，塩化物含有量の多少により発錆の有無を一概に論じることにはできないと思われるが，少なくとも塩害による劣化の過程にあると推察される。

鉄筋の強度試験結果は，発錆グレード ii に該当するほぼ健全な鉄筋の降伏点は，平均で 32.7kgf/mm² で，J I S 規格(SR295)を満足していた。しかし，発錆グレード iv の鉄筋の降伏点は，平均で 22.7kgf/mm² で，規格値を下回っていた。

②鉄筋腐食調査

表-3.9 鉄筋腐食調査結果一覧

外観状況	領域割合 (%)				
	腐食評価			腐食大移行領域	塩害領域
	大領域	軽僅領域	無し領域		
健全全部平均値 (外観グレード i)	0	1	99	96	100
不健全全部平均値 (外観グレード ii, iii)	12	16	72	76	100
総平均	9	10	81	83	100

腐食大領域 : E ≤ -200かつRp ≤ 40かつRs ≤ 30
 腐食軽僅領域 : Rp < 60(但し腐食大領域に含まれる範囲を除く)
 腐食無し領域 : Rp ≥ 60
 腐食大移行領域 : Rs ≤ 30(但し腐食大領域に含まれる範囲を除く)
 塩害領域 : E ≤ -200あるいはRp < 60あるいはRs ≤ 30

表-3.9 に鉄筋腐食調査結果一覧を示す。

健全全部ではほとんど腐食しておらず，不健全全部では 3 割程度が腐食を生じていると推定された。全体的にみると約 8 割の鉄筋が現状では腐食していないと推定されるものの，大部分が腐食移行過程にあることから，将来，腐食が全体に及ぶものと予想される。

③応力度照査

表-3.10 応力度照査結果一覧

調査対象		作用応力度 (kgf/cm ²)		許容応力度 (kgf/cm ²)		備考
取水口	左岸側 (常時)	$\sigma_c = 33.6$ $\sigma_s = 1400.1$ $\tau = 3.94$	$<$	$\sigma_{ca} = 70.0$ $\sigma_{sa} = 1600.0$ $\tau_a = 7.20$	$<$	作用応力度は全て 許容応力度以内となる.
	中央部 (常時)	$\sigma_c = 36.7$ $\sigma_s = 1191.6$ $\tau = 4.16$	$<$	$\sigma_{ca} = 70.0$ $\sigma_{sa} = 1600.0$ $\tau_a = 7.20$	$<$	作用応力度は全て 許容応力度以内となる.
取水路	常時	$\sigma_c = 65.3$ $\sigma_s = 1308.5$ $\tau = 6.37$	$<$	$\sigma_{ca} = 70.0$ $\sigma_{sa} = 1600.0$ $\tau_a = 7.20$	$<$	作用応力度は全て 許容応力度以内となる.
	PFBF 格納容器 搬入時 (短期)	$\sigma_c = 55.0$ $\sigma_s = 1539.4$ $\tau = 5.51$	$<$	$\sigma_{ca} = 105.0$ $\sigma_{sa} = 2400.0$ $\tau_a = 10.80$	$<$	作用応力度は全て 許容応力度以内となる.
取水ピット (常時)		$\sigma_c = 28.6$ $\sigma_s = 723.6$ $\tau = 3.64$	$<$	$\sigma_{ca} = 70.0$ $\sigma_{sa} = 1600.0$ $\tau_a = 7.20$	$<$	作用応力度は全て 許容応力度以内となる.

表-3.10 に応力度照査結果一覧を示す.

コンクリートの最大作用応力度は 65kgf/cm², 鉄筋の最大作用応力度は 1400kgf/cm² となっており, どちらも許容応力度以内であった. また, 限界状態設計法による評価においても耐力に余裕があることから, 当該構造物は耐力的に健全であると評価した.

④必要措置と改良範囲

表-3.11 補修工法一覧

区 分	改良工法	面積 (m ²)	摘 要
取水口 上床版	スラブ打替工事 (撤去して新設する)	107	スラブ打替工事
取水口, 取水ピット 気中干満部	打継工法 (はつり厚10cm 防食工施工後埋め戻し)	1,470	気中・干満部 補修工事
取水口, 取水路 取水ピット	表面被覆工 (はつり厚5cm 防食工施工後埋め戻し)	4,795	水中部補修工事 + 電気防食工事
水中部全体	電気防食工 (流電陽極方式 鉄筋防食 モニタリング装置共)		
新2号機 水中部全域	電気防食工 (流電陽極方式 鉄筋防食 モニタリング装置共)	4,795	電気防食工事
特殊補修を 必要とする箇所	コールドジョイント部では削孔の上, シーリング材を充填し, 埋め戻しを行う	現地で指示	

表-3.11 に補修工法一覧を示す。

構造物の変状・欠陥は軽微であるものの、進行性があると判断し、健全度をグレードⅡからⅢの段階として、「手引き」に従って評価すると「時期を見てなんらかの措置を必要とする」となる。

また必要措置について検討した結果、気中干満部は「打継工法」によって補修する。取水口上床版は劣化状況を勘案して、スラブ打替工法(新設)とした。

水中部全体の防食対策としては、①水中であること、②流速があること、③メンテナンスフリーであること等を考慮して流電陽極方式とした。

3.2 補修及び補強工法

調査した結果より推定される性能が照査により、求められる性能以下の場合、設備の性能を回復させる（以下「補修」という。）工事を行なう。また、照査において求められる性能が既設土木設備の性能以上である場合、設備の性能を向上させる（以下「補強」という）工事を行なう。

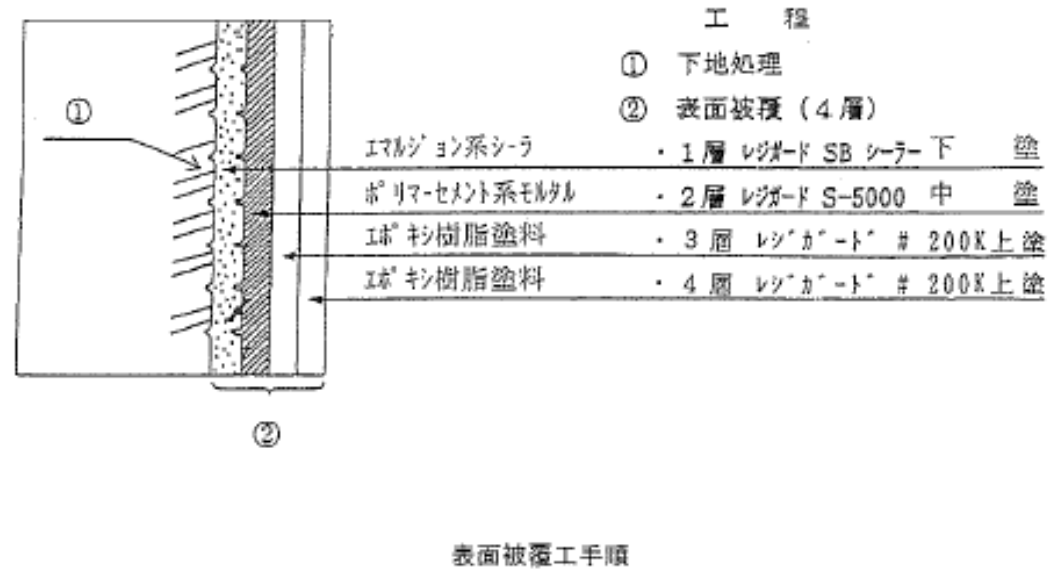
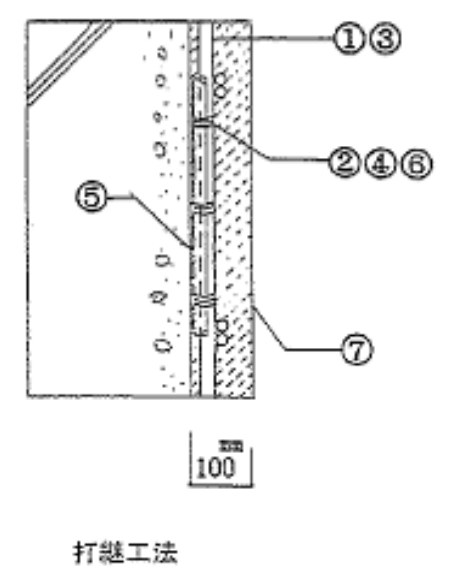
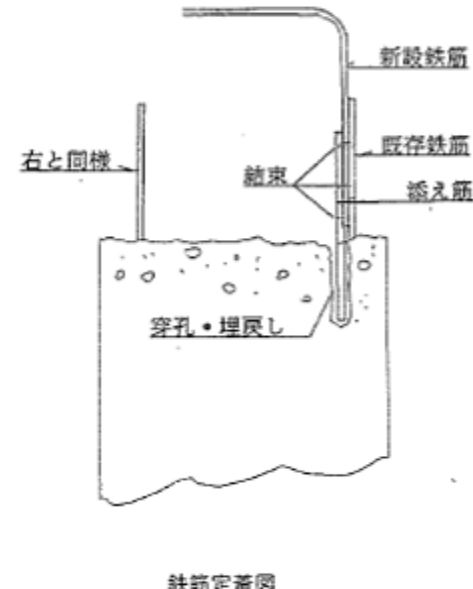
補修工法及び補強工法の事例として、以下の事例があった。

(1) 補修工法

取水口，取水路，取水ピットを流用する際，調査をした結果，全体的に十分な強度を有しているが，全体的にコンクリートが腐食環境下にあり，将来的に腐食する可能性があることから，構造物及び部位を考慮の上，補修工法を選定した事例があった（九州電力，苅田火力発電所）。その概要は，表-3.12 に示す通りである。

表-3.12 構造物及び部位毎の補修工法

構造物	部位	補修工法	施工手順
取水口	上床版	スラブ打替工法	<p>① 所定の位置までコンクリート版を除去し、洗浄、清掃する。</p> <p>② 既存の鉄筋を露出させ、錆落としをおこない防錆剤を塗布する。</p> <p>③ 既存の鉄筋に新しい鉄筋を定着させる。</p> <p>④ 既存コンクリートに穿孔し、新旧鉄筋に添え筋をおこなう。</p> <p>⑤ 中間版から立ち上げた、支保工・型枠により新設コンクリートを打設する。</p> <p>⑥ 定着長は鉄筋径の30倍とする。</p> <p>⑦ 穿孔し、添え筋を挿入した後は埋戻し材で埋戻す。</p>
取水口 取水ピット	気中部 干満部	打継工法	<p>① 鉄筋が完全露出するまではつる。</p> <p>② 鉄筋の錆落とし。</p> <p>③ 鉄筋・はつり面の洗浄・清掃。</p> <p>④ 塩害防除剤塗布。</p> <p>⑤ 鉄筋補強。</p> <p>⑥ 鉄筋防錆処理。</p> <p>⑦ 埋戻し整形。</p>
取水口 取水ピット 取水路	水中部	表面被覆工法	<p>[劣化部の処理・下地処理]</p> <p>① ひびわれ、コールドジョイントおよびジャンカ等の手当てを先行させる。</p> <p>② 全面50mm厚にはつりを行なう。</p> <p>③ 鉄筋が露出したものについては、錆落とし、洗浄、塩害防除剤塗布を行なう。</p> <p>④ はつり面の洗浄、清掃。</p> <p>⑤ 埋戻し整形</p> <p>[表面被覆：4層]</p> <p>① 上記処理完了後、表面被覆を行なう。</p>
		電気防食工法	<p>流電陽極方式</p> <p>鉄筋防食</p> <p>モニタリング装置有</p>
その他		シーリング工法	コールドジョイント部は削孔を行い、シーリング材を充填。



(2) 補強工法

ポンプ能力増大によるスラスト力の増加に対応するため、一部の構造物（クレーン梁）にバットレスを設置して補強を行なう事例があった（関西電力，境港火力発電所）。

この事例の特徴としては、構造物の健全性を評価した結果、リプレースにより部材応力が増加し局所的に強度不足となる箇所に対し、既設構造物を補強することで、経済性および環境負荷低減を実施した有効な事例である。

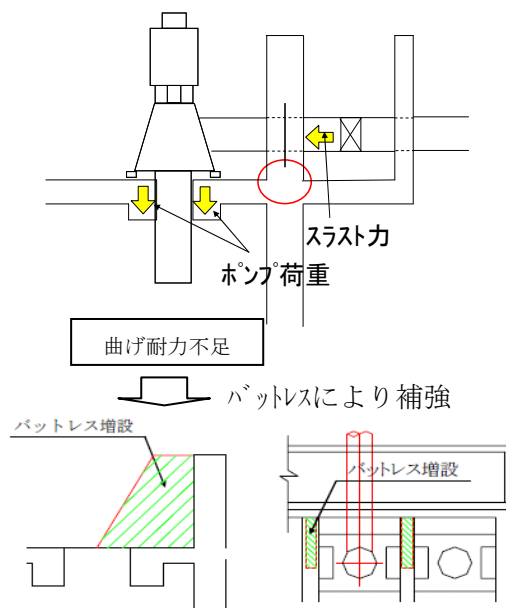


図-3.3 補強工法の概要

3.3 劣化予測

劣化予測に対しては、コンクリート構造物に対して、中性化進行予測評価，塩化物イオン拡散予測評価を行なっているリプレースが数例あったが，詳細は不明であった．課題として，調査データの蓄積が挙げられていた．

3.4 ライフサイクルコスト

ライフサイクルコストは，コンクリート構造物に対して，試行的に行われた例があったが，詳細は不明であった．ここでは既設護岸の信頼度に基づく期待総費用最小化の検討が試行的に実施された事例を以下に紹介する（東京電力，千葉火力発電所）．

旧基準により設計された護岸が地震により護岸天端が最大 10cm 程度変位する事象が発生したため，現行基準に準拠して耐震診断を行った結果，全長に亘り補強が必要となった．但し，全長に亘り補強を行なうと過剰な信頼性を確保してしまうことから，被災した場合の影響を評価し，地震発生確率や被災時損失費用を考慮して次式により算定した期待総費用が最小となる案を最適と判断した．

$$C_T = C_I + P_F \Sigma (C_{F1} + C_{F2}),$$

C_T : 期待総費用, C_I : 初期補強費用, C_{F1} : 護岸復旧費用, C_{F2} : 周辺設備復旧費

P_F : 地震時に護岸が破壊する確率(耐用年数 40 年),

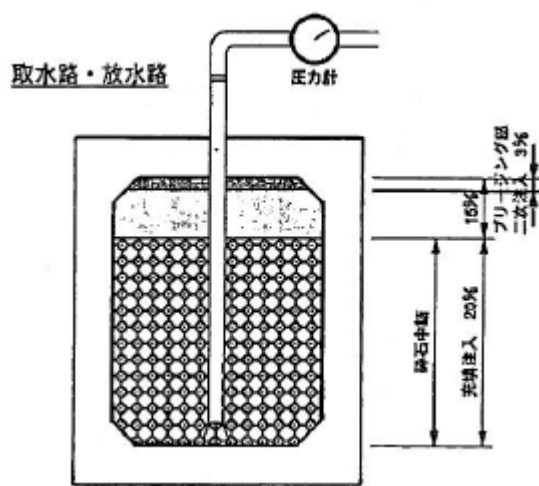
その結果, 耐震補強を行なう断面を部分的に絞り込んだ.

4章 残置する土木設備の残置方法

4. 残置する土木設備の残置方法

新設の建物ならびに設備基礎と干渉しない地下構造物は残置され、取水路、放水路等の空洞を有する設備に中詰め工が採用されており、以下に紹介する（東京電力、品川火力発電所）。

撤去工事で発生したコンクリートガラを構内に設置されたクラッシャーにより 0～40mm にクラッシングし、碎石送水設備により空洞内の 85%の中詰めを行ない、大量発生する建設副産物の有効利用を図った。碎石中詰め完了後、空隙部の残り 15%及び碎石中詰め間隙部の 20%に対して、固定混練りプラントで製造したセメントベントナイトミルクを充填注入した。また、ブリージングにより発生する空隙については、移動式車上プラントにて全体中詰め数量の 3%に対し、再度セメントベントナイトミルクを充填注入した。中詰め断面は図－4.1 に示す通りである。



図－4.1 中詰め断面

5章 関連する諸技術

5 関連する諸技術

5.1 維持管理および点検・調査

本項は「コンクリート標準示方書〔維持管理編〕⁵³⁾」および「臨海コンクリート設備の塩害に関する維持管理手引き³⁾」に基づき記載している。

5.1.1 維持管理

5.1.1.1 原則

土木構造物の維持管理とは、予定供用期間を通じて構造物の性能を許容範囲内に保持するように維持管理計画を策定し、これに沿って構造物の診断、診断結果に基づいた対策の実施、さらには診断および対策の記録を適切に行うことであり、図-5.1.1.1 に示す手順となる。

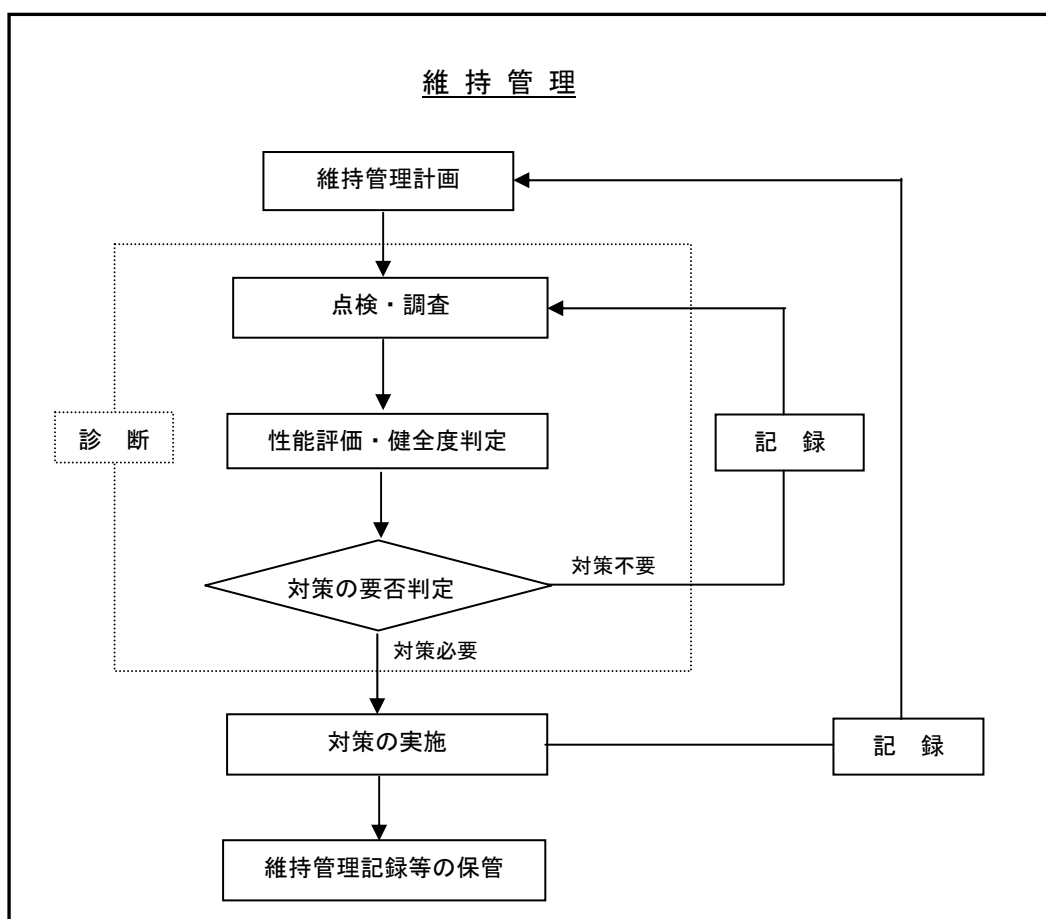


図-5.1.1.1 維持管理の手順⁵³⁾

「実務者のためのコンクリート構造物の維持管理マニュアル¹⁰⁾」には、維持管理の基本的な考え方から補修工法まで一連の手順が記載されている。

5.1.1.2 維持管理計画

維持管理計画とは、構造物の状況を考慮して、診断、対策、記録などの実施時期、頻度、

方法および体制等について総合的に計画することであり、図-5.1.1.2 に示す手順となる。

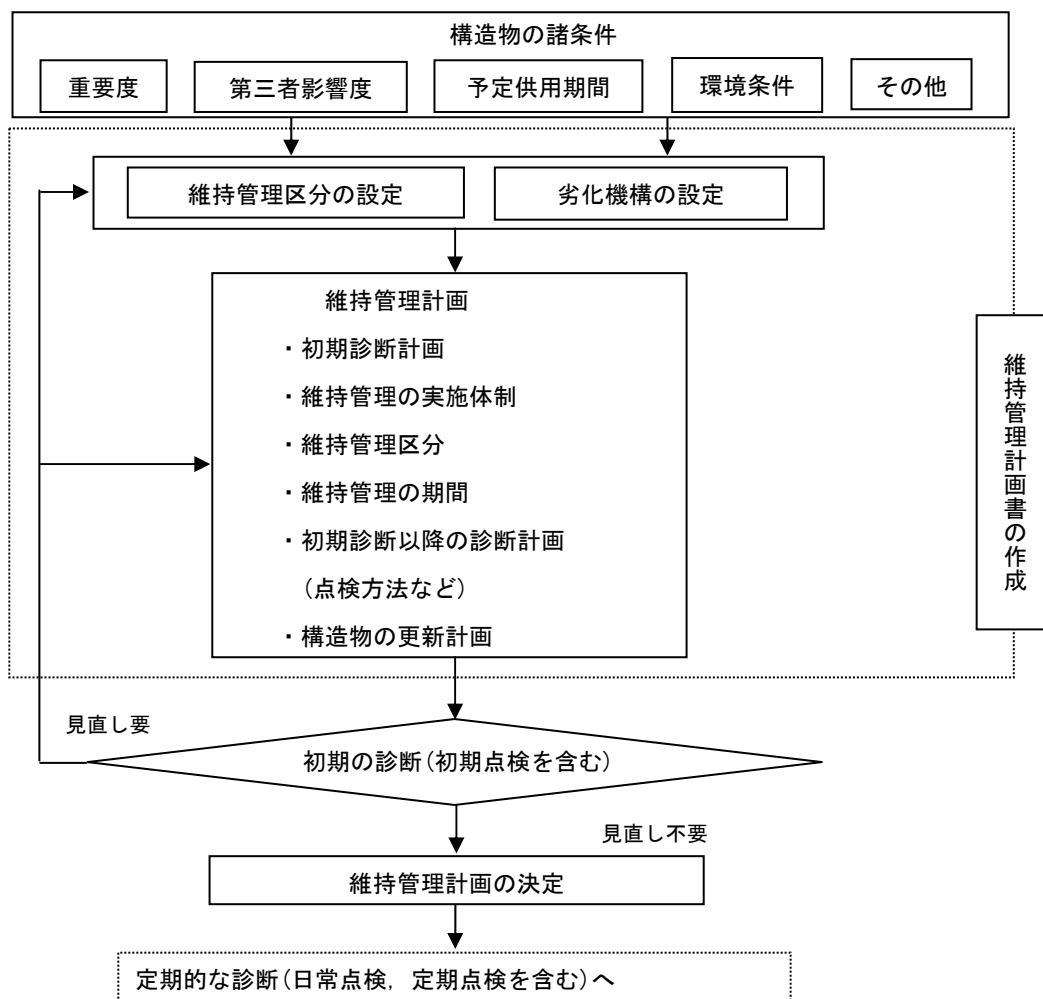


図-5.1.1.2 維持管理計画策定の手順⁵⁴⁾

維持管理計画書の作成にあたっては、構造物の設計段階で考慮された予定供用期間や供用中の構造物の残存予定供用期間を定める必要がある。

また、構造物はそれぞれに重要度、予定供用期間、環境条件などが異なるため、構造物に応じた適切な維持管理区分を設けることや劣化機構を適切に推定する必要がある。

(1) 維持管理区分の設定(以下の3つから選定する)

A：予防維持管理

- ① 劣化が顕在化した後では維持管理が困難なことから劣化を生じさせないもの
- ② 劣化がコンクリート表面へ現れることによって障害が生じるもの
- ③ 第三者に対する安全性が特に重要となるもの
- ④ 設計耐用期間が長いもの

B：事後維持管理

- ① 劣化が顕在化した後でも容易に対策がとれるもの

② 劣化が外に現れても困らないもの

C：観察維持管理

① 設計耐用期間の設定がなく、使用できる限り使用するもの

② 直接には点検を行うのが非常に困難なものについて、間接的な点検(測量、地盤沈下、漏水の有無など)から評価および判定を行うもの

(2) 劣化機構の設定

構造物に劣化を生じさせる現象を劣化機構と称す。

構造物に劣化を生じる要因を大別すると、外的要因と内的要因に分類される。このうち外的要因は、環境条件、気象条件、外力条件などである。一方、内的要因には、部位、部材の形状寸法、かぶり、鋼材配置、設計基準強度、配合、材料の品質などの設計に関わるものと、フレッシュコンクリートの状態、打ち込み方法、養生方法など施工に関わるものがある。同一環境条件下にある構造物でも、内的要因が異なることによって劣化機構が異なることがある。

5.1.1.3 診断

診断とは、点検・調査、性能評価・健全度判定および対策の要否判定という、維持管理の中で構造物や部材の変状の有無を調べて状況を判断するための一連の行為であり、維持管理を実施するにあたって最初に実施する初期の診断、維持管理の実施期間中、日常的にあるいは定期的実施する定期の診断、ならびに偶発荷重などが作用した場合に実施する臨時の診断に大別できる。

診断の詳細については、5.1.2「点検・調査」および5.2「性能評価および健全度判定」による。

5.1.1.4 対策(補修方法)

対策は、残存供用期間、維持管理のしやすさ、第三者影響度、もしくはライフサイクルコスト等について総合的に検討し、適切な工法を選定する必要がある。

対策の詳細については、5.3「対策」(補修方法)による。

5.1.1.5 記録および記録の保管

記録は、合理的な維持管理のためには必要不可欠な行為であり、当該構造物の維持管理の資料としてだけでなく、類似構造物の維持管理の参考とすることもできる。したがって、点検・調査、劣化機構の推定および劣化予測性能の評価および対策の要否判定など、診断によって得られる一連の結果、および対策の内容等、維持管理に必要な内容は、参照しやすい形で記録し原則として構造物を供用している期間は保管するものとする。

また、維持管理者が複数の構造物を同時に維持管理している場合などでは、記録の様式や保管方法について統一して整理できるものとするのがよい。

5.1.2 点検・調査

5.1.2.1 原則

「コンクリート標準示方書（維持管理編）」⁵³⁾によると、以下のように記載されている。

コンクリート構造物を適切に維持管理するためには、適切な診断を行うことが不可欠である。この適切な診断を行うためには、診断の目的に応じた点検を行い、構造物の安全性、使用性、第三者影響度、美観・景観および耐久性などに関する情報を入手することが基本となる。

点検は、診断の目的、頻度、実施する調査の内容などにより様々に分類できるが、コンクリート標準示方書では診断の目的に合わせて、図-5.1.2.1に示すように、初期の診断時に行うもの、定期的診断時に行うものおよび臨時的診断時に行うものの3つに大別している。さらに、定期的診断時に行う点検の中には、その頻度に応じて日常点検と定期点検を、また、臨時的点検の中には、実施する診断の目的の違いにより、臨時点検と緊急点検にそれぞれ区別して示している。

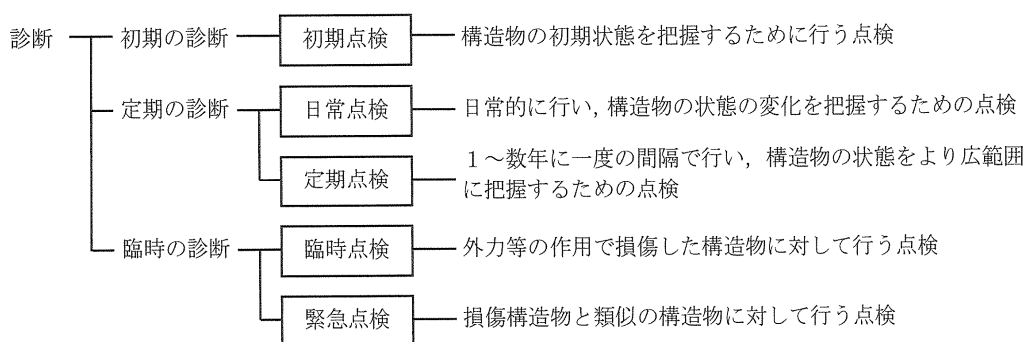


図-5.1.2.1 点検の種類⁵⁴⁾

これらの点検を行いそれぞれの情報を比較検討することで、図-5.1.2.2に示すように、共用開始からの構造物の状態の変化、点検時以降における構造物の状態変化の予測など、合理的な維持管理を行う上で必要となる構造物の情報を入手することが可能となる。

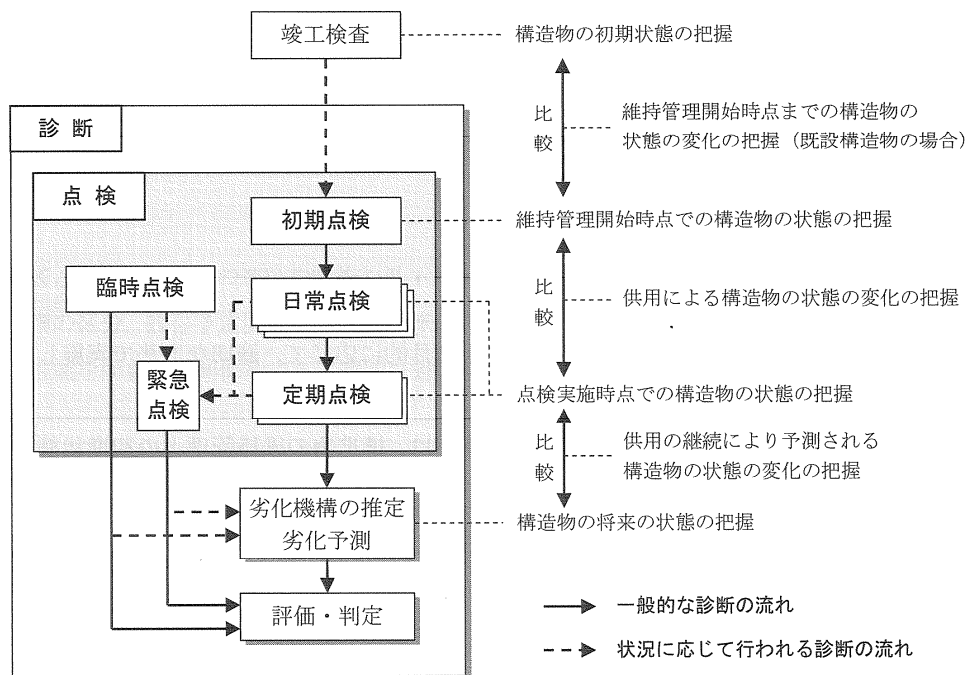


図-5.1.2.2 点検の種類と構造物の状態の変化に関して把握される内容⁵⁴⁾

以降は、火力発電所のリプレース検討時の調査において参考になるとと思われる、定期点検、中性化および塩害に対する詳細調査について、「コンクリート標準示方書（維持管理編）」⁵³⁾より、要点を抜粋して記載する。

5.1.2.2 定期点検

定期点検は、目視やたたきなどの簡易な方法を主とした調査により、日常点検では把握し難い部位・部材も含む構造物全体にわたって、劣化、損傷、初期欠陥の有無およびそれらの程度を把握するものである。

基本的には目視やたたきによる調査とするが、必要に応じて非破壊検査機器を用いる方法や、コアの採取などの項目を組み合わせることもできる。定期点検における標準調査の項目の例を以下に示す。

- ・ ひび割れ（発生時期，幅，長さ，発生パターンなど）
- ・ 錆汁，遊離石灰，変色，スケーリング，断面欠損，ゲル等の発生状況
- ・ かぶりの実測値
- ・ 劣化因子の侵入の有無（有りの場合は因子の種類，侵入程度など）
- ・ 鋼材腐食の有無（有りの場合は腐食の形態，程度，範囲など）
- ・ 付帯設備の損傷の有無（有りの場合は位置，程度など）
- ・ 既往の診断，対策に関する記録
- ・ 劣化外力となる気象などの環境条件（飛来塩分，冬季における凍結など）
- ・ 構造物の使用条件（乾湿繰返し，凍結防止剤の使用など）

点検箇所は原則として構造物全体とする。また、日常点検では確認が困難な箇所や、劣化や損傷が生じやすいと推定される部位・部材などは、入念に点検することが重要である。

標準調査の結果に基づき必要に応じて、詳細調査を実施するものとする。詳細調査は、標準調査を実施した結果、

- ① 劣化が確認され、その劣化機構が不明もしくは推定されたものと異なる場合
- ② 劣化が確認され、その進行が劣化予測結果と大きく異なる場合
- ③ 変状が確認され、その原因が不明な場合
- ④ 変状は確認されないが、構造物の使用条件、荷重条件、環境作用などが著しく変化した場合

などで、構造物や部位・部材の重要度、維持管理区分、変状の程度、劣化予測結果などを考慮し、適切な時期に実施する。

5.1.2.3 調査の項目

調査の項目は、調査の種類および目的、対象とする構造物の状況、必要とされる情報、構造物の劣化の原因などを考慮し、適切に選定しなければならない。

一般的な調査の項目としては、構造物の概要、構造物の供用状態、外観の変状・変形、コンクリートや鋼材の状態、構造細目、付帯設備等の状態、環境作用および既往の対策の状態などの項目が挙げられる。また、これらの項目に関して得られる情報および調査方法の例を表-5.1.2.1に示す。このうち、調査の項目については、標準調査、詳細調査に関わらず、必要な情報が入手できるような項目を選定することが原則である。

表-5.1.2.1 一般的な調査の項目と得られる情報、主な調査の方法の例⁵⁴⁾

一般的な調査の項目	得られる情報の例	主な調査の方法の例
構造物の概要	<ul style="list-style-type: none"> 適用した示方書、設計基準 設計図書 施工記録 検査記録 維持管理記録 	<ul style="list-style-type: none"> 書類に基づく方法 ヒアリング（聞き取り調査）に基づく方法
構造物の供用状態	<ul style="list-style-type: none"> 供用の状態（荷重、外力等） 周辺環境の概要 支持の状態 異常音、異常な振動 使用性（乗り心地等） 	<ul style="list-style-type: none"> 目視等による方法（近接、遠望） 車上感覚試験による方法 載荷試験、振動試験による方法
外観の変状・変形	<ul style="list-style-type: none"> 初期欠陥の有無（ひび割れ、豆板、コールドジョイント、砂すじなど） コンクリートの変色、汚れの有無 ひび割れの有無 スケーリングの有無 浮き、はく離、はく落の有無 鋼材の露出、腐食、破断の有無 変形の有無 さび汁の有無 漏水の有無 遊離石灰の有無 ゲルの有無 	<ul style="list-style-type: none"> 目視等による方法（近接、遠望） たたきによる方法 反発度に基づく方法
コンクリートの状態	<ul style="list-style-type: none"> 使用材料、配合に関する情報 浮き、内部空隙の有無 コンクリートの含水状態 物理的特性（強度、空隙構造など） 化学的特性（水和物、反応生成物など） 劣化因子の侵入程度（中性化深さ、塩化物イオン浸透深さなど） 	<ul style="list-style-type: none"> 反発度に基づく方法 弾性波を利用する方法 電磁波を利用する方法 局部的な破壊による方法（コア採取、はつり、ドリル削孔粉の採取など）
鋼材の状態	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋量 鉄筋の位置、径、かぶり 配筋の状態 鋼材腐食の状態 断面欠損の有無 	<ul style="list-style-type: none"> はつりによる方法 電磁誘導を利用する方法 電磁波を利用する方法 直接測定する方法 設計図書による方法
構造細目、付帯設備等の状態	<ul style="list-style-type: none"> 部材の断面寸法 かぶり 定着、継手の状態 柱はり接合部の状態 付帯設備の状態 	<ul style="list-style-type: none"> 電磁波を利用する方法 直接測定する方法
環境作用および荷重	<ul style="list-style-type: none"> 気象条件（気温、最低気温、湿度、降水量、日射量など） 水分の供給（雨掛りの状況、地盤からの水の供給条件、防水層や排水設備の状況） 塩分の供給（飛来塩分量、海水の影響、凍結防止剤の散布量など） 風（向き、速さ） 二酸化炭素濃度 酸性度の高い河川水等の pH 下水道関連施設における水質 酸性雨、酸性霧の発生状況 アルカリの供給状況 荷重条件（車両等の状況、振動、水圧など） 災害に関する外力（地震、火災など） 	<ul style="list-style-type: none"> 既往の記録に基づく方法 気象情報（AMeDAS など）に基づく方法 直接測定する方法（センサの利用など） モニタリングによる方法
既往の対策の状態	<ul style="list-style-type: none"> 補修、補強の状態 機能性向上の状態 供用制限の状態 	<ul style="list-style-type: none"> 目視による方法（近接、遠望） 補修、補強材料に関する試験による方法

5.1.2.4 調査の方法

本示方書では、一般的な調査の方法として、①書類などによる方法（書類調査）、②目視による方法、③たたきによる方法、④非破壊検査機器を用いる方法、⑤局部的な破壊を伴う方法、⑥実構造物の載荷試験および振動試験による方法、⑦環境作用等を評価するための調査方法、⑧補修、補強材料に関する試験、⑨モニタリングによる方法について、その基本的な内容を記述している。表-5.1.2.3に調査の方法と得られる情報の例を、また、表-5.1.2.4に劣化機構と対応する調査方法の一例を示す。

なお、「臨海コンクリート設備の塩害に関する維持管理手引き（土木学会）」³⁾においては、表-5.1.2.2を詳細点検の標準としている。

表-5.1.2.2 詳細点検の標準³⁾

点検項目		主要測定機器	測定方法
外部状況	ひび割れ	クラックスケール, コンタクトゲージ, ルーペ, ノギス, 巻尺他	ひび割れ位置, パターンを測定する。特に, 鉄筋に沿ったひび割れについては, 幅と長さを測定する。また, 進行度を把握するため測定箇所についてはマーキングを行う。
	浮き・剥離	テストハンマー, コンベックス, ノギス	ハンマー打音により浮き・剥離の範囲を調査, 把握し, 鉄筋に沿っての位置, 大きさをコンベックス等で測定する。また, 一部の鉄筋の断面減少率を測定する。
	鉄筋露出	コンベックス, ノギス	露出した鉄筋の位置, 長さ, および断面減少率を測定する。
	錆汁	コンベックス	錆汁の位置, 範囲を測定する。
内部状況	鉄筋の腐食の程度	コンベックス, ノギス	ひび割れ部のコンクリートをはつり取り, 鉄筋を露出させ, 鉄筋の腐食程度, 断面減少率を測定する。
	圧縮強度	反発硬度測定器 (シュミットハンマー)	コンクリート表面を打撃したときの反発強さ(はね返り量)を測定し圧縮強度を測定する。
		コンクリート圧縮試験機	コアを採取してその圧縮強度を測定する。採取したコンクリートコアを, JIS A1107により試験し, 圧縮強度を求める。
	塩化物イオン量	塩分含有量測定器	コンクリートコアまたは破片を粉砕し, 科学分析によりコンクリートに含まれる塩化物イオンを抽出させて測定する。 簡易測定方法は小型ドリルにより採取したコンクリート粉末を硝酸にて溶解させ塩化物イオン濃度を測定する。
	中性化	ノギス, フェノールフタレイン溶液	コンクリート表面の一部をはつり取り, 破断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し, コンクリート表面から赤着色部までの距離(中性化している部分)をノギスで測定する。
鉄筋かぶり	コンベックス	コンクリート表面の一部をはつり取り, 鉄筋の表面までの距離を測定する。	
	鉄筋探査計	電磁誘導方式等の探査計によりかぶりを測定する。	

表-5.1.2.3 調査の方法と得られる情報の例⁵⁴⁾

調査の方法		得られる情報の例	
書類などによる方法 (書類調査)	図書収集 ヒアリング (聞き取り調査)	① 使用した示方書, 設計基準 ② 設計図書 ③ 施工記録 ④ 検査記録 ⑤ 維持管理記録 (点検記録, 補修, 補強履歴など)	
目視およびたたきなどによる方法	肉眼による方法 双眼鏡による方法 カメラによる方法 たたきによる方法	① 初期欠陥 (ひび割れ, 豆板, コールドジョイント, 砂すじなど) ② コンクリートの変色・汚れ (さび汁の溶出, カビの発生, ゲルの析出, エフロレッセンス, 白華 (遊離石灰), コンクリート自身の変色, 漏水など) ③ ひび割れ (発生方向, パターン, 本数, 幅, 長さ, さび汁の溶出など) ④ スケーリング ⑤ コンクリートの浮き (有無, 箇所数, 面積など) ⑥ コンクリートのはく離・はく落の有無 ⑦ 鋼材の露出・腐食・破断の有無 ⑧ 変形の有無	
非破壊検査機器を用いる方法	反発度に基づく方法	反発度法 ① コンクリートの強度	
	電磁誘導を利用する方法	鋼材の導電性および磁性を利用する方法 コンクリートの誘電性を利用する方法	① コンクリート中の鋼材の位置, 径, かぶり ② コンクリートの含水状態
	弾性波を利用する方法	打音法 超音波法 衝撃弾性波法 アコースティック・エミッション (AE)	① コンクリートの圧縮強度, 弾性係数などの品質 ② コンクリートのひび割れ深さ ③ コンクリート中の浮き, はく離, 空隙 ④ コンクリート厚さなどの部材寸法 ⑤ シース内のグラウトの充てん状況 (PC 構造物)
	電磁波を利用する方法	X線法 電磁波レーダ法 赤外線法 (サーモグラフィ法)	① コンクリート中の鋼材の位置, 径, かぶり ② コンクリート中の浮き, はく離, 空隙 ③ コンクリートのひび割れの分布状況 ④ シース内のグラウトの充てん状況 (PC 構造物)
	電気化学的方法	自然電位法 分極抵抗法 四電極法	① コンクリート中の鉄筋の腐食傾向 ② コンクリート中の鉄筋の腐食速度 ③ コンクリートの電気抵抗
	光ファイバースコープを用いる方法		① コンクリート内部の状況 ② シース内のグラウトの充てん状況 (PC 構造物)
局部的な破壊を伴う方法	コア採取による方法 はつりによる方法 ドリル削孔粉を用いる方法 鋼材を採取する方法	① ひび割れ深さ ② コンクリートの圧縮強度, 引張強度, 弾性係数 (載荷試験) ③ コンクリートの中性化深さ ④ コンクリートの分析 (化学分析, 蛍光 X 線分析, X 線回折, 熱分析, 光学顕微鏡, 偏光顕微鏡, 走査電子顕微鏡, EPMA) ⑤ 塩化物イオンの状況 (塩化物イオン濃度および濃度分布) ⑥ 配合分析 ⑦ コンクリートの解放膨張量および残存膨張量 ⑧ コンクリートの透気性, 透水性 ⑨ 細孔径分布 ⑩ コンクリートの気泡分布 ⑪ 鉄筋の腐食状況 (はつりによる方法) ⑫ 鉄筋の引張強度 (鉄筋の採取による方法)	
車両の走行による方法	線形, 車上感覚試験 載荷試験および振動試験	① 部材の断面剛性 (静的, 動的) ② 振動特性	
環境作用, 荷重等を評価するための調査方法	既往の記録に基づく方法 気象情報 (AMeDAS など) に基づく方法 直接測定する方法 (センサの利用など) モニタリングによる方法	① 気象条件 (気温, 最低気温, 湿度, 降水量, 日射量) ② 水分の供給 (雨掛りの状況, 地盤からの水の供給条件, 防水層や排水設備の状況) ③ 塩分の供給 (飛来塩分量, 海水の影響, 凍結防止剤の散布量) ④ 風 (向き, 速さ, 頻度) ⑤ 二酸化炭素濃度 ⑥ 酸性度の高い河川水等の pH ⑦ 下水道関連施設における水質 ⑧ 酸性雨, 酸性霧の発生状況 ⑨ アルカリの供給状況 ⑩ 荷重条件 (車両等の状況, 振動, 水圧など) ⑪ 災害に関する外力 (地震, 火災など)	

表-5.1.2.4 劣化機構と対応する調査の方法の例⁵⁴⁾

調査の方法	具体的な内容など	劣化機構						
		中性化※2	塩害	凍害	化学的 侵食	アルカリ シリカ反応	疲労	すり減り
書類などによる方法	設計・施工に関する情報、既往の維持管理・対策に関する情報	●	●	●	●	●	●	●
目視による方法※1	肉眼、双眼鏡、カメラ	●	●	●	●	●	●	●
たたきによる方法	浮き、はく離、空洞	●	●	●	●	●	●	●
反発度に基づく方法	鋼材腐食状況(鋼材露出時)	●	●	●	●	●	●	—
電磁誘導を利用する方法	テストハンマー強度	△	△	▲	▲	△	△	▲
弾性波を利用する方法	鋼材位置、径	△	△	△	△	△	△	△
電磁波を利用する方法	電磁波レーダ法	△	△	△	△	△	△	△
	鋼材配置	△	△	△	△	△	△	△
	空隙	—	—	—	△	—	△	△
	かぶり	△	△	△	△	—	△	△
赤外線法(サーモグラフィ法)	表面はく離	△	△	△	△	△	△	—
	X線法	△	△	△	△	△	△	—
電気化学的方法	鋼材配置、径、空隙、ひび割れ	△	△	△	△	△	△	—
	自然電位法、分極抵抗法	△	△	△	△	△	—	—
光ファイバスコープを用いる方法	四電極法	△	△	△	△	△	—	—
	コンクリート内部の状況、シーす内のグラウトの充てん状況	—	△	—	—	△	—	—
局所的な破壊を伴う方法 ・コア採取による方法 ・はつりによる方法 ・ドリル削孔粉を用いる方法	外観、ひび割れ深さ	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	中性化深さ、中性化残り	▲	▲	△	▲	△	△	—
	塩化物イオン浸透深さ	△	▲	△	△	△	△	—
	塩化物イオン含有量	△	▲	△	△	△	—	—
	圧縮強度、引張強度、弾性係数	△	△	△	△	▲	△	△
	配合分析	△	△	△	△	△	—	—
	アルカリ量	—	—	—	—	△	—	—
	骨材の反応性	—	—	—	—	△	—	—
	解放膨張量、残存膨張量	—	—	—	—	△	—	—
	細孔径分布	△	△	△	△	△	—	—
	気泡分布	—	—	△	—	—	—	△
	透気(水)性試験	△	△	△	△	—	—	△
	熱分析(TG・DTA) ^{※3}	△	—	—	△	—	—	—
	X線回折(水和物等の同定)	△	—	—	△	△	—	△
EPMA ^{※4}	△	△	—	△	△	—	—	
走査型電子顕微鏡観察	—	—	—	△	△	—	△	
局所的な破壊を伴う方法 ・はつりによる方法 ・鋼材を採取する方法	鋼材腐食状況	△	△	△	△	△	△	—
	鋼材引張強度	△	△	△	△	△	△	—
線形、車上感覚試験	道路線形、走行快適性	△	△	△	△	△	●	△
載荷試験(静的、動的)	ひび割れ発生、剛性	△	△	—	—	△	△	—
振動試験	固有振動数、振動モード	△	△	—	—	△	△	—
応力測定法	載荷時のひずみ測定	△	△	△	△	△	△	—
変形測定法	載荷時の変形測定	△	△	△	△	△	△	—

凡例 ●：標準調査として実施する項目の例
▲：標準調査として必要に応じて実施する項目の例
△：詳細調査として必要に応じて実施する項目の例
—：当該の劣化には関係がないか不明

※1：変形、変色、スケーリング、ひび割れなどの項目を含む。

※2：コンクリートの中性化による鋼材腐食を指す。

※3：TG(熱重量分析)、DTA(示差熱分析)とも、水和生成物や炭酸化合物などを定性、定量分析を行う。

※4：電子線マイクロアナライザーの略称。コンクリート中の元素の定性、定量分析を行う。

5.1.2.5 中性化に対する調査

中性化の影響を受ける構造物において、調査すべき項目とそこから判断される点検時および将来の構造物の状態について得られる情報の一例を表-5.1.2.5に示す。

表-5.1.2.5 評価項目の例⁵⁴⁾

測定項目	調査によって得られる情報	情報から予測できる評価項目
温度、湿度、二酸化炭素濃度、降雨のかかり方、日射	温度、湿度、含水状態	中性化速度、腐食速度
ひび割れ（幅、深さ、密度）	腐食グレード、美観	腐食グレード、美観
コンクリートの強度、弾性係数	コンクリート強度、剛性	
中性化深さ	中性化深さ	中性化速度、腐食開始時期
含水率	含水率	腐食速度
鋼材の位置と腐食状況（面積、量）、錆汁	腐食グレード、腐食量、耐荷力	腐食速度、耐荷力
電気化学的指標（自然電位、分極抵抗、電気抵抗など）	腐食グレード、腐食速度	腐食グレード、腐食速度、耐荷力
たわみ、変位	剛性、耐荷力	

注) 腐食グレードは解説 表 9.3.3 参照のこと

以下に、主な調査項目についてその測定の概略を示す。

① 中性化深さ

中性化領域は、フェノールフタレイン溶液をコンクリート割裂面に吹き付けたときの非発色部分とし、コンクリート面から発色部と非発色部の境界までの深さを数箇所求め、その平均値を中性化深さとする。測定は、コアを採取した後、速やかに行う必要がある。なお、最近ではドリル削孔により採取した粉体を用いた測定方法も提案されている。

② ひび割れ

ひび割れは、物質移動性を増大させることにより中性化や鋼材腐食の進行を速める。許容ひび割れ幅以下である場合は問題となることは少ないが、過大なひび割れの存在は劣化および構造物の性能の低下を著しく加速する可能性がある。またひび割れの程度によって、劣化の要因や程度が推定できる場合もある。したがって、その位置、間隔、パターン、幅、深さなど、劣化の判定と今後の劣化予測のためのデータを収集する必要がある。

③ 鋼材の腐食

鋼材の腐食は、構造物の性能に直接影響を及ぼす場合が多いので、調査ではかぶりコンクリートをはつり、腐食の有無、位置、面積、重量、孔食深さなどを直接測定することが重要である。簡便な方法として、鋼材の腐食状態を表-5.1.2.6のようにグレード分けして評価を行ってもよい。

なお、このグレード分けは、表-5.1.2.7の構造物の外観上のグレードⅠ-1、Ⅰ-2、Ⅱ、Ⅲにおおよそ対応すると考えてよい。

④ 構造物の外観

コンクリートおよび鋼材の状態が必ずしも構造物の性能と直接結びつかない場合には、外観の変状が性能の評価のための有力な情報となる。中性化によって劣化した構造物の

外観上のグレードは、表-5.1.2.7に示すとおりである。

表-5.1.2.6 腐食のグレードと鋼材の状態⁵⁴⁾

腐食グレード	鋼材の状態
I	黒皮の状態、またはさびは生じているが全体的に薄い緻密なさびであり、コンクリート面にさびが付着していることはない。
II	部分的に浮きさびがあるが、小面積の斑点状である。
III	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。
IV	断面欠損が生じている。

表-5.1.2.7 構造物の外観上のグレードと劣化の状態⁵⁴⁾

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態 I-1 (潜伏期)	外観上の変状が見られない、中性化残りが発錆限界以上
状態 I-2 (進展期)	外観上の変状が見られない、中性化残りが発錆限界未満、腐食が開始
状態 II-1 (加速期前期)	腐食ひび割れが発生
状態 II-2 (加速期後期)	腐食ひび割れの伸展とともに離・はく落が見られる、鋼材の断面欠損は生じていない
状態 III (劣化期)	腐食ひび割れとともに離・はく落が見られる、鋼材の断面欠損が生じている

5.1.2.6 塩害に対する調査

塩害の影響を受ける構造物において、調査すべき項目とその結果から判断される点検時および将来の構造物の状態について得られる情報の一例を表-5.1.2.8に示す。

表-5.1.2.8 詳細調査の項目と評価項目の例⁵⁴⁾

調査項目	調査によって得られる情報	情報から予測できる評価項目
温度、湿度、降雨のかかり方、日射	温度、湿度、含水状態	定性的な腐食速度
飛来塩分量	飛来塩分量	表面における塩化物イオン濃度
ひび割れ（幅、深さ、密度）	腐食グレード、美観	腐食グレード、美観
コンクリート強度、弾性係数	コンクリート強度、剛性	-
中性化深さ	中性化深さ、中性化速度	将来の中性化深さ
塩化物イオン濃度の分布	塩化物イオンの見かけの拡散係数、表面における塩化物イオン濃度、初期含有塩化物イオン濃度、鋼材位置の塩化物イオン濃度	鋼材位置の塩化物イオン濃度
含水率	含水率	定性的な腐食速度
鋼材の位置と腐食状況（面積、量）、錆汁	腐食グレード、腐食量、耐荷力	腐食速度、耐荷力
電気化学的指標（自然電位、分極抵抗、電気抵抗など）	腐食発生の有無、腐食速度	将来の腐食グレード、腐食速度
たわみ、変位	剛性、耐荷力	-

以下に、主な調査項目についてその測定方法の概略を示す。

① 塩化物イオン濃度

コンクリート中の塩化物イオン濃度分布を測定するため、構造物からコンクリートコアあるいはコンクリートドリル微粉末試料を採取する方法ならびに、これらを用いたコンクリート中の全塩化物イオン濃度分布の測定方法については、JSCE-G 573-2003「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法」によるものとする。

② 鋼材の腐食

鋼材の腐食は、構造物の性能に直接影響を及ぼす場合が多いので、調査ではかぶりコンクリートをはつり、腐食の有無、位置、面積、重量、孔食深さなどを測定することが望ましい。また、簡便な評価方法として、鋼材の腐食状態を表-5.1.2.9のようにグレード分けして評価を行ってもよい。

表-5.1.2.9 腐食のグレードと鋼材の状態⁵⁴⁾

腐食グレード	鋼材の状態
I	黒皮の状態、またはさびは生じているが全体的に薄い緻密なさびであり、コンクリート面にさびが付着していることはない。
II	部分的に浮きさびがあるが、小面積の斑点状である。
III	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。
IV	断面欠損が生じている。

なお、この表の腐食グレード I, II, III, IVはそれぞれ、表-5.1.2.10 の構造物の外観上のグレード I-1, I-2, II, IIIにおおよそ対応すると考えてよい。

③ 構造物の外観

コンクリートおよび鋼材の状態が必ずしも構造物の性能と直接結びつかない場合には、外観の変状が性能の評価のための有力な情報となる。塩害によって劣化した構造物の外観上のグレードは、表-5.1.2.10 に示す通りである。

表-5.1.2.10 構造物の外観上のグレードと劣化の状態⁵³⁾

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態 I-1 (潜伏期)	外観上の変状が見られない、腐食発生限界塩化物イオン濃度以下
状態 I-2 (進展期)	外観上の変状が見られない、腐食発生限界塩化物イオン濃度以上、腐食が開始
状態 II-1 (加速期前期)	腐食ひび割れが発生、錆汁が見られる
状態 II-2 (加速期後期)	腐食ひび割れが多数発生、錆汁が見られる、部分的なはく離・はく落が見られる、腐食量の増大
状態 III (劣化期)	腐食ひび割れが多数発生、ひび割れ幅が大きい、錆汁が見られる、はく離・剥落が見られる、変位・たわみが大きい

5.2 性能評価および健全度評価

本項は「コンクリート標準仕様書（維持管理編）」⁵³⁾および「臨海コンクリート設備の塩害に関する維持管理手引き」³⁾に基づき記載している。

5.2.1 性能評価

構造物の診断では、初期点検、日常点検、定期点検あるいは臨時点検において常に実施される標準調査と、必要に応じて実施される詳細調査によって劣化状況の現状を把握するとともに劣化の将来予測（劣化予測）を行い、これらの結果をもとに、点検時および予定供用期間終了時の構造物や部位・部材の性能をできるだけ定量的に評価し、対策の可否を判定することが基本となる。ただし、実施される点検によって得られる構造物の状態に関するデータの質や量が異なるため、その評価方法にも違いがある。また、構造物の性能の評価にあたっては、構造物を構成する部位・部材によって要求性能が異なることにも注意しなければならない。桜井ら⁴⁾はコンクリート構造物の耐用年数評価のために室内実験及び既往の研究のデータ等を解析して得られた劣化予測式を暴露実験結果と比較しその精度を検討するとともにその信頼性を高めるための方法について考察を行っている。

なお、第三者影響度や美観・景観など、現状においては用いる評価式が確立されていないものもあり、また、安全性や使用性についても、評価式は提案されているがその精度は必ずしも十分でないために定量的な評価を行うことが難しい場合も多い。この場合には、より現実的な方法として、構造物の劣化状態を想定してあらかじめいくつかのグレードに分類しておき、点検結果とその結果に基づいて予測される残存供用期間中の構造物の劣化状態を、あらかじめ分類されたグレードと比較することにより劣化の進行状態を評価するような方法も考えられる。

「臨海コンクリート設備の塩害に関する維持管理手引き」³⁾には、塩害による劣化の程度をグレーディングする評価基準が下表の通り示されている。ここではひび割れ、浮き・はく離、鉄筋露出、錆汁などの劣化の程度が、位置、長さ、大きさ、最大ひび割れ幅、断面減少率などの点検項目により定量的にグレーディングされている。

表-5.2.1.1 点検結果の評価基準（項目別グレード分け）³⁾

外部状況		項目別グレード			備考
点検項目		ii	iii	iv	
ひび割れ ・位置 ・長さ ・最大ひび割れ幅	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋に沿ったひび割れがあり、その最大ひび割れ幅が0.5 mm未満である。	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋に沿ったひび割れがあり、その最大ひび割れ幅が0.5mm以上2.0mm未満、あるいはその総延長が鉄筋（部材）全長の1/2未満である。	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋に沿ったひび割れがあり、その最大ひび割れ幅が2.0mm以上で、かつその総延長が鉄筋（部材）全長の1/2以上である。	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋とは、はり、柱部材等における主鉄筋、スラブ等における主鉄筋・配力筋のことを言う。	
浮き・はく離 ・位置 ・大きさ ・断面減少率	・浮き・はく離があるが、耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋上ではない。	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋上に浮き・はく離があるが、鉄筋に沿った大きさが鉄筋（部材）全長の1/2未満、あるいは鉄筋の断面減少率が5%未満である。	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋上に浮き・はく離があり、鉄筋に沿った大きさが鉄筋（部材）全長の1/2以上で、かつ鉄筋の断面減少率が5%以上である。		
鉄筋露出 ・長さ ・断面減少率	・鉄筋が露出しているが、耐荷性能を維持する上で重要でない鉄筋である。	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋が露出しており、露出した鉄筋の断面減少率が5%未満、あるいは露出した鉄筋の総延長が鉄筋（部材）全長の1/2未満である。	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋が露出しており、露出した鉄筋の断面減少率が5%以上、かつ露出した鉄筋の総延長が鉄筋（部材）全長の1/2以上である。		
錆汁	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋に沿った錆汁がある。				

内部状況		項目別グレード			備考
点検項目		ii	iii	iv	
鉄筋の腐食程度 ・断面減少率	・部分的な浮き錆があるが断面欠損はみられない。	・断面減少率が5%未満である	・断面減少率が5%以上である		
鉄筋位置での全塩化物イオン量*1)	0.05% ≤ C I ⁻ < 0.16%	0.16% ≤ C I ⁻		*1) コンクリートに対する(C I ⁻) wt%	

なお、地中工作物である杭は基礎コンクリートの直下に埋設されているため、施工後に調査孔を設けずに各種の点検・調査を実施することが困難である。地中工作物の非破壊健全度調査手法としてインテグリティ試験が挙げられるが、基礎コンクリート上からの調査では、基礎コンクリートの影響が大きく実用的とは言い難い。そこで、基礎コンクリートの影響を解消するために建設時に予め測定孔を設けることを提案し、その実証を行っている例もある⁷¹⁾。

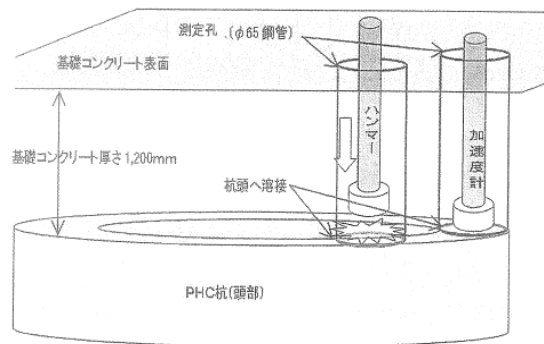


図-5.2.1.1 測定孔構造の概要⁷¹⁾

構造物の性能の評価は、点検時と予定供用期間終了時において行うことが基本であるが、残存予定供用期間が長い場合などでは、残存予定供用期間の中で設定可能な時点とその時点までに構造物に要求される性能を設定した上で、その設定時点までの構造物の性能評価を行い、これを繰り返すことで供用期間中の性能を評価することも可能である。

対策の要否は、それぞれの診断においてなされる構造物や部位・部材の性能の評価結果に基づき、合理的な維持管理が実施できるように適切に判定しなければならない。点検時の構造物の性能が要求性能を下回っている場合には、対策が必要とされる。

点検時の構造物の性能については対策の必要がないと判定された場合でも、予定供用期間終了時までには性能が要求性能を下回ると評価された場合には、評価された性能低下の程度とともに、構造物の残存予定供用期間、重要度、維持管理区分、構造物群や地域全体の維持管理計画などを総合的に考慮して、対策の要否を判定する必要がある。RC構造物の劣化機構のうち、鉄筋腐食を伴う塩害による経時的な構造物の性能の変化について、既往の文献等に示される塩害劣化メカニズムに基づく評価手法を参考にして、建設当初からの経時的な性能の変化を潜伏期、進展期、加速期・劣化期の3つの状態に分けて評価を行っている例もある¹⁵⁾。

5.2.2 定期点検に基づく評価

定期点検による診断は、維持管理計画で設定された点検を数ヶ月から数年程度の間隔で行うもので、点検結果とそれ以前の点検結果とを比較することにより、点検時の性能や、その変化の程度が定められた維持管理計画通りであるか否かを定量的に評価することができる。

定期の診断は維持管理計画に基づいて構造物あるいはその部位・部材の状態を定期的に確認するためのものであることから、点検結果が計画通りであることを確認し、計画との違いなどに基づいて性能を評価すればよい。なお、性能の評価にあたっては、異なる複数の時点における点検結果が入手できることから、それらの結果を比較することによって、性能の低下速度が確認できれば、残存供用期間の性能を定量的に評価することもある程度可能となる。

定期点検の特徴は、異なる複数の時点において、日常点検よりもより広範囲に点検結果を入手できることである。また、必要に応じて足場を設置することによって接近して点検を行うことができるため、目視やたたきによる調査だけではなく、必要に応じて非破壊検査機器を用いる方法やコアの採取なども組み合わせた調査も可能であり、日常点検に比べ、より詳細かつ定量的な点検結果を得ることもできる。

なお、新たな手法を用いることにより、より簡便に調査を実施する例もある。例えば、谷口⁶⁴⁾は電磁誘導加熱によりコンクリート内部に配置された鉄筋に対して強制加熱を行い、鉄筋からの熱伝導により変化するコンクリート表面温度を赤外線サーモグラフィで測定することによって、かぶり部分に存在する空洞・剥離を診断する非破壊検査手法について検討を行った。

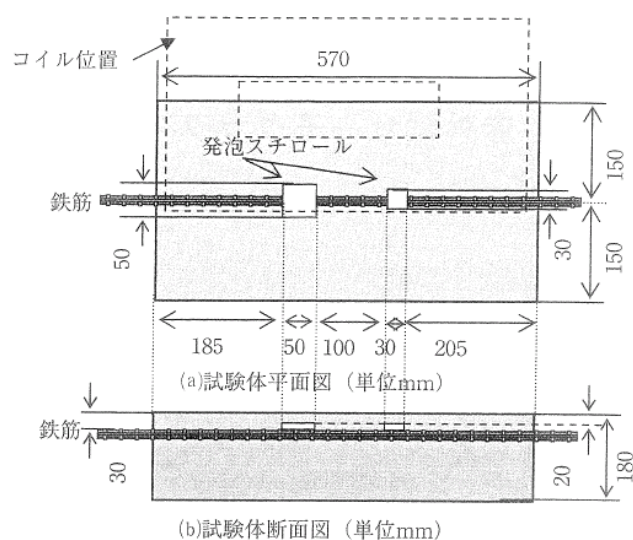


図-5.2.2.1 模擬空洞試験体⁶⁴⁾

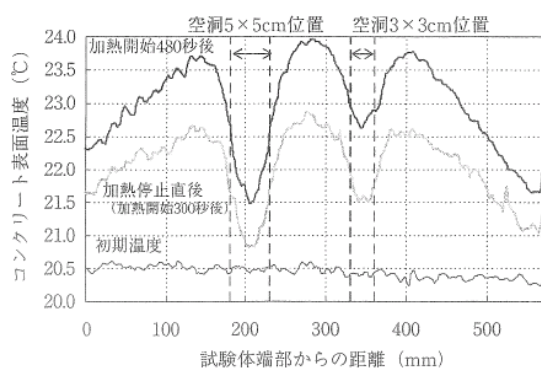


図-5.2.2.2 コンクリート表面の温度分布⁶⁴⁾

また、コンクリート構造物の表面に発生したひび割れの評価方法として、庄野ら⁶⁵⁾

は、カメラをひび割れに直接あてがい詳細なひび割れ幅を測定する方法、デジタルカメラで撮影した画像からひび割れを自動抽出するソフトウェアに対して、損傷（コールドジョイント、ジャンカ、剥離、補修跡等）の形状を描画し、その長さや面積を算出する方法を実用化している。

定期点検によって変状が確認された場合には、変状の原因を推定して劣化、損傷、初期欠陥のいずれに該当するかを判断した上で、その変状の程度をできるだけ定量的に評価するのがよい。また、変状が劣化である場合には、点検結果を過去の結果と比較することにより劣化機構の推定や劣化予測を行い、その上で、点検時および残存予定供用期間における構造物の性能をできるだけ定量的に評価するものとする。

R C部材の劣化機構のうち、鉄筋腐食を伴う塩害、中性化に着目し、劣化状態を点検結果及び劣化予測を基に評点によって表現する手法について検討を行い、点検時及びそれ以降についてのコンクリート構造物の劣化状態を合理的に各性能評価に関連づける手法の構築を試みている。また、構築した手法を実構造部材の性能評価に適用し、その有用性と課題を検討しながら寿命の評価を行っている例もある¹¹⁾。

定期点検に基づいた劣化に対する対策の要否の判定は、点検時および予定供用期間終了時の構造物あるいはその部位・部材の性能評価の結果ならびに、構造物の重要度、維持管理区分、構造物群や地域全体の維持管理計画などの上位計画や経済性などを総合的に考慮して、対策の要否を判定しなければならない。

5.2.3 臨時点検に基づく評価

臨時点検は、主に自然災害や火災等の偶発的な外力の作用を受けた構造物に対して行われる点検であり、あらかじめ計画された点検ではなく、また、多くの場合、迅速性が求められる。したがって、それぞれの点検の目的に応じて適切な方法を用いて、できるだけ速やかに評価および判定を行うことが大切である。

なお、供用期間中に設計基準などが改訂された場合に実施される臨時の点検においては、構造物の現状での性能の基準適合性を評価するとともに、予定供用期間終了時まで問題が生じないことを確認する必要がある。

臨時点検で詳細調査を実施する場合でも、対策の選定などに資するために行う構造物の耐荷力や剛性などの評価は、緊急性の観点から、できるだけ迅速に行わなければならない。一方、応急的に対策を実施した構造物に対して、その後の安全な供用のために詳細な調査を実施する場合には、その結果から、復旧後の通常の使用時を想定した構造物の性能評価が必要となる。

地震などの偶発荷重により被災した構造物は、地域の復旧にあたって重大な使命を担う場合が多い。その一方で、損傷により構造物が倒壊することで周囲の多くの人に危害を及ぼす可能性もあることから、被災地域の構造物に対して応急的な対策を講じることの必要性は非常に高い。したがって、コンクリートの表面状態の目視点検のみからでも

対策の検討が可能な場合には、直ちに適切な補修や補強を実施するものとする。また、いかなる対策を行っても果たすべき機能が確保されないと判断される場合などでは、早急に供用制限もしくは解体・撤去などの対策を行い、円滑に代替機能の確保が講じられるよう対応することも重要となる。

臨時の診断においては、迅速性を最優先にして構造物の評価・判定が行われることから、点検時の構造物の性能に特に問題がないと評価された場合には、当面の対策を行う必要はないと判定してよい。ただし、状況に応じて、偶発的な外力の影響が収束した後の適切な時点で改めて詳細調査などを実施して、点検時から予定供用期間終了時までの性能を評価し、通常の使用を考慮した場合の対策の可否を判定するのがよい。

また、設計基準などが改訂された場合に実施される臨時点検において、点検時あるいは予定供用期間終了時までの性能が既存不適格と判断された場合には、状況に応じて適切な対策をとらなければならない。

自然災害や設計基準改訂に際しての臨時点検ではないが、北陸電力はコンクリート構造物の劣化原因を明らかにし、設備全体を俯瞰的に捉えることによって、維持管理の高度化を図ることを目的として、劣化診断手法の検討も含め、水力発電設備の劣化実態調査を進めてきている⁵⁸⁾。

5.2.4 詳細調査に基づく評価

詳細調査は、日常点検や定期点検等で実施される標準調査の結果からでは現状の把握と劣化予測が困難な場合に、これらに必要な情報を入手するために実施するものであり、対象構造物について、より詳細な情報を得るために行われるため、その結果に基づく評価および判定もまた、定量的に行うことが基本となる。しかし、性能によっては、それを定量的に評価するための評価式がないものがあり、また、評価式は提案されているがその精度が必ずしも満足できないものもあるなど、必ずしもすべての性能が定量的に評価できるわけではない。その場合には、構造物の外観上のグレードから構造物の性能を半定量的に評価する方法などを基本とし、これに詳細調査の結果を考慮に入れてできるだけ定量的に判定することになる。

例えば、「土木学会⁶²⁾」では、詳細調査に基づいた劣化予測により評価（グレーディング手法）を行い、必要に応じて、耐震性能照査を行った上で、対策の可否を判定する。

性能の具体的な評価手法としては、例えば、点検結果から得られた材料の力学的性質を構造計算式に代入することによって耐荷力などを求め、安全性や使用性を照査する方法がある。「土木学会エネルギー委員会³⁾」では、許容応力度法による評価方法が示されており、限界状態設計法と併せて紹介する。

5.2.4.1 許容応力度法による耐力評価の例

供用期間中に作用する荷重に着目して断面力を求める。また、実際の配筋および形状寸法、構造物のコンクリート強度・鉄筋強度および鉄筋の腐食減量などの調査結果を基に作用応力度を求め、コンクリートあるいは鉄筋の許容応力度との比較を行う。

許容応力度法による耐力の評価基準を下表に示す。

表-5.2.4.1 許容応力度法による評価基準³⁾

評価項目		劣化グレード		備 考
		iii以下	iv	
耐 力	コンクリート 応 力 度	作用応力度が圧縮強度の[1/2]以下である。	作用応力度が圧縮強度の[1/2]を超えている。	作用応力度は実作用荷重を基に計算する。
	鉄 筋 応 力 度	作用応力度が許容応力度以下である。	作用応力度が許容応力度以下である。	鉄筋の許容応力度は降伏点応力度の0.6倍とする。

鉄筋腐食によるひびわれが発生している場合、構造物は設計当初の耐力を有していないが、このような劣化があっても構造物には影響の大きな変状が見られない場合が多い。

例えば「電力中央研究所⁸⁰⁾」の実規模のRCボックスカルバート供試体（高さ 3.8m × 幅 3.0m, 部材厚 60cm, 主筋の芯かぶり 100mm）を用いて、鉄筋の腐食状態を実験パラ

メータにした研究では、以下の様な報告がされている。

載荷で得られた荷重-変位関係によれば、主筋の最大腐食量が約 15%であった腐食程度の大い供試体では、腐食がない場合と比較して、曲げ耐力の低下割合は、数%の範囲に収まっていた。これは、RCボックスカルバートでは、隅角部付近で鉄筋降伏や斜めひび割れなどの損傷が生じて、塑性ヒンジが形成され荷重が再分配されるので、局所的な鉄筋腐食が構造系の耐荷力に及ぼす影響は小さいことを示している。

このように、実際にはかなりの残留耐力がある場合がある。これは、設計時の耐力は、設計計算上の仮定、施工精度、荷重条件、長期的な劣化、構造物の重要度、将来の不確実性などを考えて、構造物に十分な安全が確保できるように定められているためである。しかし、既設構造物では、施工精度、荷重条件、構造物の状態を十分に確認できるため、その時点での耐力はかなりの精度で評価できると考えられる。上記基準は、このような観点に基づき設定されている。

すなわち、コンクリートの設計時の許容応力度は設計基準強度の 1/3 としているが、これは施工時などのばらつきが考慮されていることから、ここでは作用応力度が調査結果で確認できた圧縮強度の 1/2 以下か、超えるかで劣化程度を分けた。また、鉄筋の設計時の許容応力度は降伏点応力度の 0.55~0.6 倍としているが、鉄筋の強度についてはコンクリートほどばらつきが大きくないため、ここでは設計時と同様に作用応力度が調査結果で確認できた降伏点応力度の 0.6 倍以下か、超えるかで劣化程度を分けた。これは、塩害によりコンクリートにひびわれが発生した場合、鉄筋腐食の進行が加速されるため、鉄筋の許容応力度は安全側の評価とした方が良いとの判断による。

一方で、塩害環境下のコンクリート構造物に関しては、多くの場合、鉄筋腐食によりひびわれが生じるが、鉄筋腐食状況は塩害環境、構造物のかぶり厚さ、コンクリートの含水比などにより大きく異なる。また、一般的に用いられている塩害劣化モデルから求められる限界塩化物イオン量に達していても、空気の供給がされない水中では、鉄筋の腐食が予測ほど進行していないケースも見られる。詳細は 5.4.2 を参照されたい。

5.2.4.2 限界状態設計法による耐力評価の例

限界状態には、終局限界状態、使用限界状態および疲労限界状態の 3 つがある。このうち、疲労限界状態は、繰り返し荷重により疲労破壊を生じる状態であり、火力発電所のコンクリート構造物には、橋梁の様に大きな繰り返し荷重が作用する構造物はないことから、対象となる構造物はほとんどない。

許容応力度法と同様に、実配筋および形状寸法など基に断面力を求め、限界状態に対する検討を実施する。調査結果などを基に、適切な安全係数を設定することを基本とする。標準的な安全係数の値を下表に示す。

表-5.2.4.2 標準的な安全係数の値³⁾

安全係数 限界状態	材料係数 γ_m		部材係数 γ_b	構造解析係数 γ_a	荷重係数 γ_f	構造物係数 γ_i
	コンクリート γ_c	鉄筋 γ_s				
終局限界状態	1.3	1.0	1.15	1.0	1.0	1.0

限界状態設計法による耐力評価は、断面力 S_d の断面耐力 R_d に対する比により行う。限界状態設計法による耐力の評価基準を下表に示す。既設構造物の施工精度、荷重条件、材料強度などを十分に確認した上で、断面力と断面耐力の比が 1.0 以下か、超えるかで劣化程度を分ける。

表-5.2.4.3 限界状態設計法による評価基準³⁾

評価項目	劣化グレード		備 考
	iii以下	iv	
耐 力	$S_d/R_d \leq 1.0$	$S_d/R_d > 1.0$	S_d : 断面力 R_d : 断面耐力

構造物の予定供用期間終了時における諸性能の評価は、現時点における性能の評価結果に劣化予測の結果を加味して行うことになるが、これを十分な精度で評価することは難しい場合が多い。このため、予測手法の選定には十分な検討が必要であり、さらに適切な安全度を見込むことが重要である。

例えば、「土木学会⁶²⁾」では、断面耐力に劣化の影響を考慮する方法として、断面耐力に低減係数を乗じる方法を提案している。

表-5.2.4.4 劣化による限界値の低減係数⁶²⁾

κ_{cr}		劣化グレード	潜伏期 (I-1)	進展期 (I-2)	加速期前期 (II-1)	加速期後期 (II-2)	劣化期 (III)
		曲げ	曲げ耐力 κ_{crm}	1.0	1.0	0.95	0.90
破壊	曲げ変形 κ_{crf}	1.0	0.90	0.80	0.60	適用外	
せん断	コンクリート分担力 κ_{crc}	1.0	0.90	0.85	0.80	適用外	
破壊	せん断補強分担力 κ_{crs}	1.0	1.0	0.90	0.80	適用外	

5.2.5 健全度および措置程度判定の考え方

定期点検等で実施された調査から得られた評価結果を基礎資料として、構造物の健全度と設備の重要度に基づき、総合的に措置程度を判定する。

鉄筋コンクリート構造物の健全度は、各評価項目毎の劣化グレードを総合的に評価して判定する必要がある。設備の重要度は、施設の中における設備、設備の中における構造部材は、各々に役割の重要度が異なる。このため、構造部材に施す措置を検討する場合、全ての構造部材を同じ重要度で扱う必要はないことから、評価対象の構造部材毎の設備全体への影響度合いを勘案して、設備の重要度判定を行う必要がある。

以下に、「土木学会エネルギー委員会³⁾」の健全度、重要度、措置程度判定の考え方を示す。

5.2.5.1 健全度判定

構造物の健全度は、以下の5つの評価項目の劣化程度に基づき判定する。表面上の劣化・変状ばかりでなく、構造部材内部状況や構造物の耐力検討結果等を勘案し、総合的に判断することが必要である。

- ①構造部材毎のグレード分け結果
- ②構造物の耐力評価結果
- ③構造物全体に及ぼす劣化部位の影響
- ④劣化の進行性
- ⑤コンクリート内部の精密調査結果

以上の5項目を総合的に評価して、対象構造部材の健全度を以下の4段階に判定する。

- I：劣化・変状が認められないもの。
- II：軽微な劣化・変状であり、かつそれらの進行が認められないもの。
- III：中程度の劣化・変状が認められる。あるいは、軽微な劣化・変状であっても進行性が認められるもの。
- IV：大きな劣化・変状があるもの。

「土木学会⁶²⁾」では、構造健全度を求めていくにあたり、構造物の耐荷性能の経時変化を念頭におき、下記に示すように供用期間を通じて一定である設計時点の照査用限界値と詳細調査時点の照査用限界値の大小関係で評価している。

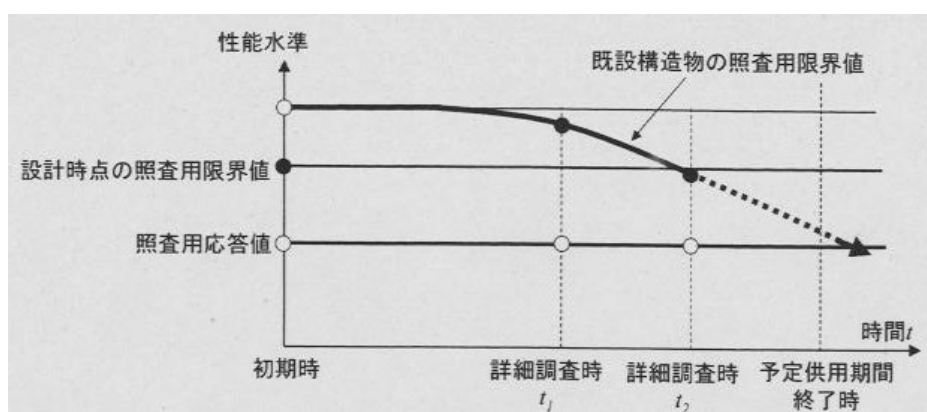


図-5.2.5.1 屋外重要土木構造物の性能の経時変化に関する概念図⁶²⁾

5.2.5.2 重要度判定

設備の重要度判定は、以下の7項目を総合的に検討し3段階で評価する。

①対象設備の運転・防災機能への影響

対象設備の運転機能・防災機能に与える影響を考慮して、影響の大・小の2段階に区分。

②環境保全等の配慮

環境保全，法的規制，地域社会協調に対して早期措置実施等の配慮の必要性の有無により区分。

③美観

対象設備の一部あるいは全体の美観を重視するか否かで区分

④供用年数に対する残存年数の長さ

塩害発生予測や耐力評価結果に基づき，耐力低下が供用年数内に許容限界以下と予測されるか否かで区分

⑤経済性

定期点検等使用停止時や他設備の関連工事実施時に合わせて早期措置をとる事が経済的あるか否かで区分。

⑥対象設備の使用状態

対象設備の使用頻度の高低，将来の使用計画における役割の大小で区分。

⑦設備特有の条件

設備特有の制約条件があるか否かで区分。

以上の7項目を総合的に評価して，対象構造部材の重要度を高い，標準，低い，の3段階に区分する。

5.2.5.3 措置程度判定

各設備に対する今後の措置程度は，設備の健全度と重要度に応じて以下の4段階で評価する。

措置①（無措置）：措置を必要としないもの。

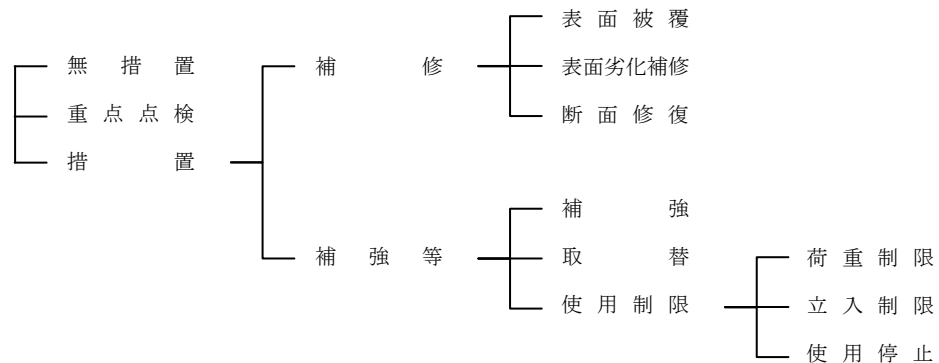
措置②（重要点検）：特別な措置は必要としないが，定期点検の際に重点的に点検するもの。

措置③（補修）：時期をみて適切な補修を必要とするもの。

措置④（補強等）：補強，取替，使用制限を必要とするもの。

措置程度の判定とその実施内容のイメージを下記に示す。

表-5.2.5.1 措置程度判定³⁾



措置程度は、設備健全度、設備重要度から判定する。具体的措置を下表に示す。

表-5.2.5.2 措置程度判定基準³⁾

健全度 \ 重要度		H	M	L
		高い	標準	低い
I	健全	措置1 (無措置)	措置1 (無措置)	措置1 (無措置)
II	軽微な劣化・ 変状	措置3 (補修)	措置2 (重点点検)	措置2 (重点点検)
III	中程度の劣化・ 変状	措置3 (補修)	措置3 (補修)	措置2 (重点点検)
IV	大きな劣化・ 変状	措置4 (補強等)	措置4 (補強等)	措置3~措置4 (補修~補強等)

- 措置程度の判定の考え方は、重要度が標準で、健全度がⅠ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳである構造部材，または部材に対し，措置程度をそれぞれ措置1，措置2，措置3，措置4と判定することを基本とする。なお，健全度判定は点検・調査結果に基づく技術面の判定であり，措置程度判定は，当該設備の重要度，制約条件，環境条件(飛沫帯や干満帯などの)を考慮した設備の要求水準を示す情報からの判定とする。
- 重要度が高い設備については，健全度Ⅱの劣化・変化に対して，措置程度は措置3を基本とする。
- 重要度が低い設備については，健全度ⅢおよびⅣの劣化・変状に対して，措置程度はそれぞれ措置2および措置3~4を基本とする。
- 措置の時期は，設備の供用年数内で最も経済的に性能を維持・強化する時期とするが，現状では，原則として措置程度判定を行ってから2~3年以内実施する。
- 設備ごとの供用年数については，設備管理者が維持管理実績等を鑑みて，個別に定める。
- 劣化・変化の進行速度については，前回の定期点検結果等を参考として判断する。

5.3 補修方法

5.3.1 補修順序の決定

補修順序の決定においては、まず、土木工作物の点検調査結果をもとに劣化の進行状況の把握、進行予測を行う。

構造物の性能を評価する点検項目を表-5.3.1.1に示す。

表-5.3.1.1 構造物の性能を評価する点検項目⁵³

性能	評価項目	点検項目
(注) 耐荷性能	曲げ,せん断耐力	コンクリート強度, 鋼材量, 断面諸元, 外観変状, 鋼材腐食
	作用外力	供用条件
使用性能	振動性状, 変形	固有振動数, たわみ
	防水性など	漏水, エフロレッセンス
第三者影響度 に関する性能	はく離・はく落	外観変状
耐久性能	劣化外力	環境, 使用条件
	外観変状	ひび割れ, はく離・はく落
	コンクリートの性状	圧縮強度, 弾性係数, 中性化, 塩分量, 膨脹量, 表面侵食
	鋼材の腐食	かぶり, 鋼材腐食, 錆汁の発生

(注) ここでは安全性能のうち、一般的に評価される頻度の高い耐荷性能に着目して整理した。

次にその構造物の要求性能を確認する。一般的な構造物に対して維持管理上求められる要求性能は、図-5.3.1.1に示すように安全性、使用性、第三者影響度、美観・景観及び耐久性に分類され、それぞれの具体的な内容は以下のとおりである。

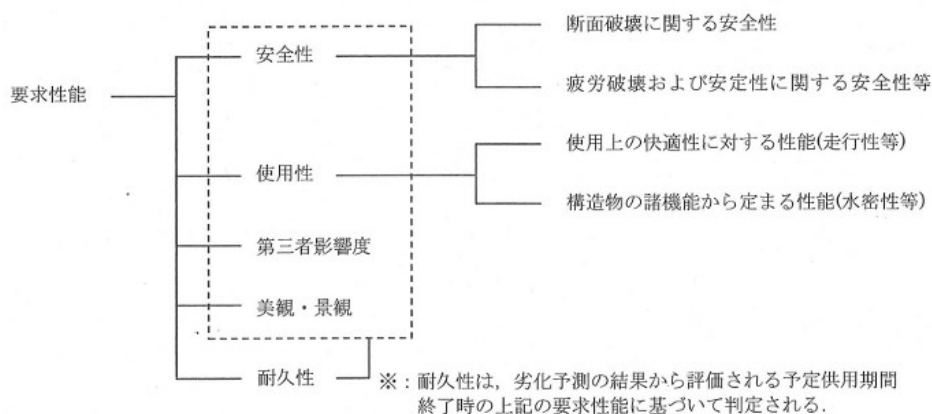


図-5.3.1.1 要求性能の分類⁵⁴⁾

- ・ 安全性能；耐荷性能（含耐震性能），その他転倒や滑動等
- ・ 使用性能；使用性（変形，振動，防水性等），機能性（供用における満足度）
- ・ 第三者影響度に関する性能；コンクリート片落下の防止等

- ・ 美観・景観；ひび割れ，錆汁，エフロレッセンス等による汚れの防止等
- ・ 耐久性性能；供用期間中，要求性能を満足する性能

点検による劣化状況と構造物の要求性能が，①平常時の構造物の要求性能を下回っている場合，②地震時の構造物の要求性能を下回っている場合，③塩害，中性化等により将来，構造物の要求性能を下回ると予測される場合のいずれの状態にあるかを考慮し，かつ費用対効果を勘案して施工の時期，順番を決定する．

補修順序についての参考文献を紹介する．

日本コンクリート工学協会の「コンクリート診断技術‘09⁷⁴⁾」には，点検（変状の発見）→調査（劣化状態の把握，劣化原因の推定）→劣化予測・評価→対策の判定→対策の実施といった構造物維持管理の基本的な流れが記載されている．

また，東京電力(株)は，「電力土木 308 号²⁴⁾」において，点検，補修記録に基づき，鉄筋コンクリート部材の劣化速度とばらつきを評価し，設備の要求性能が維持できなくなる確率，費用，期待費用を劣化リスクとして定量化している．この劣化リスクがリスクマトリックス上，設備管理者が許容でき，かつ，トータルコストが最小なものを最適な補修オプション（補修時期，補修方法）とする最適化手法とその適用結果を紹介している．

5.3.2 補修工法の選定

補修の目的は，劣化した設備の要求性能を回復することであり，補修構造物の劣化機構を推定し，その劣化機構をどこまで回復させるかにより補修内容を決定する．

表－5.3.2.1 劣化機構と要因，指標，現象の関連⁵⁴⁾

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標の例
中性化	二酸化炭素	二酸化炭素がセメント水和物と炭酸化反応を起こし，細孔溶液中のpHを低下させることで，鋼材の腐食が促進され，コンクリートのひび割れやはく離，鋼材の断面減少を引き起こす劣化現象．	中性化深さ 鋼材腐食量 腐食ひび割れ
塩害	塩化物イオン	コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンにより促進され，コンクリートのひび割れやはく離，鋼材の断面減少を引き起こす劣化現象．	塩化物イオン濃度 鋼材腐食量 腐食ひび割れ
凍害	凍結融解作用	コンクリート中の水分が凍結と融解を繰り返すことによって，コンクリート表面からスケーリング，微細ひび割れおよびポップアウトなどの形で劣化する現象．	凍害深さ 鋼材腐食量
化学的侵食	酸性物質 硫酸イオン	酸性物質や硫酸イオンとの接触によりコンクリート硬化体が分解したり，化合物生成時の膨張圧によってコンクリートが劣化する現象．	劣化因子の浸透深さ 中性化深さ 鋼材腐食量
アルカリシリカ反応	反応性骨材	骨材中に含まれる反応性シリカ鉱物や炭酸塩岩を有する骨材がコンクリート中のアルカリ性水溶液と反応して，コンクリートに異常膨張やひび割れを発生させる劣化現象．	膨張量 (ひび割れ)
床版の疲労	大型車通行量	道路橋の鉄筋コンクリート床版が輪荷重の繰返し作用によりひび割れや陥没を生じる現象．	ひび割れ密度 たわみ
はり部材の疲労	繰返し荷重	鉄道橋梁などにおいて，荷重の繰返しによって，引張鋼材に亀裂が生じて，それが破断に至る劣化現象．	累積損傷度 鋼材の亀裂長
すり減り	磨耗	流水や車輪などの磨耗作用によってコンクリートの断面が時間とともに徐々に失われていく現象	すり減り量 すり減り速度

点検によって劣化機構の推定を行う場合の参考として、劣化機構ごとに、劣化要因、劣化現象、劣化指標の関係を整理したものを表-5.3.2.1に示す。劣化指標とは、劣化の進行や劣化度を評価するための指標となるものである。

中性化、塩害、凍害、化学的侵食、アルカリシリカ反応の劣化機構ごとに補修・補強に期待する効果と工法について、表-5.3.2.2～表-5.3.2.6に示す。

表-5.3.2.2 補修、補強に期待する効果と工法の例（中性化）⁵⁴⁾

期待する効果	工法例
中性化の進行の抑制	表面処理、ひび割れ注入
中性化深さを0にする	断面修復（防錆処理、被覆を含む）、再アルカリ化
鋼材の腐食進行の抑制	表面処理、（電気防食）、断面修復、再アルカリ化、防錆処理、水処理
耐荷力の回復、向上	（鋼板・FRP接着）、（外ケーブル）、（巻立て）、（増厚）

()：塩化物イオン濃度などが高いことにより、鉄筋腐食速度が速い場合、腐食量が大きい場合に選定する

表-5.3.2.3 補修、補強に期待する効果と工法の例（塩害）⁵⁴⁾

期待する効果	工法例
鋼材の腐食因子の供給量を低減	表面処理
鋼材の腐食因子の除去	断面修復、電気化学的脱塩
鋼材の腐食進行の抑制	表面処理、電気防食、断面修復、防錆処理
耐荷力の向上	FRP接着、断面修復、外ケーブル、巻立て、増厚

表-5.3.2.4 補修、補強に期待する効果と工法の例（凍害）⁵⁴⁾

期待する効果	工法例
水の供給を抑制	表面処理、ひび割れ注入、排水処理
劣化部を取り除く	断面修復、ひび割れ注入
耐荷力の向上	増厚、打換え、巻立て

表-5.3.2.5 補修、補強に期待する効果と工法の例（化学的侵食）⁵⁴⁾

期待する効果	工法例
化学的侵食の進行の抑制	表面処理（樹脂ライニング、シートライニング）、FRP接着、埋設型枠、換気・洗浄
鋼材の腐食進行の抑制	表面処理、断面修復、防錆処理
耐荷力の向上	FRP接着、増厚、巻立て

表-5.3.2.6 補修、補強に期待する効果と工法の例（ASR）⁵⁴⁾

期待する効果	工法例
ASRの進行を抑制	水処理（止水、排水処理）、ひび割れ注入、表面処理（被覆、含浸）
ASRの膨張を拘束	プレストレスの導入、鋼板・PC・FRP巻立て
劣化部を取り除く	断面修復
鋼材の腐食抑制	ひび割れ注入、ひび割れ充てん、表面処理（被覆、含浸）
第三者影響度の除去	はく落防止
耐荷力の回復・向上	鋼板・FRP接着、プレストレスの導入、増厚、鋼板・PC・FRP巻立て、外ケーブル

表-5.3.2.7 は、劣化機構別に、補修の方針、補修工法の構成、及び目標とする性能を満たすために考慮すべき要因の例をまとめたものである。

表-5.3.2.7 劣化機構に基づく耐久性能の回復もしくは向上を目的とした補修の方針と工法⁵⁴⁾

劣化機構	補修の方針	補修工法の構成	目標とする性能を満たすために考慮すべき要因
中性化	・ 中性化したコンクリートの除去 ・ 補修後の CO ₂ 、水分の浸入抑制	・ 断面修復工 ・ 表面処理工 ・ 再アルカリ化	・ 中性化部除去の程度 ・ 鉄筋の防錆処理 ・ 断面修復材の材質 ・ 表面処理材の材質と厚さ ・ コンクリート中のアルカリ量のレベル
塩害	・ 浸入した Cl ⁻ の除去 ・ 補修後の Cl ⁻ 、水分、酸素の浸入抑制	・ 断面修復工 ・ 表面処理工 ・ 脱塩	・ 浸入部除去の程度 ・ 鉄筋の防錆処理 ・ 断面修復材の材質 ・ 表面処理材の材質と厚さ ・ Cl ⁻ 量の除去程度
	・ 鉄筋の電位制御	・ 陽極材料 ・ 電源装置	・ 陽極材の品質 ・ 分極量
凍害	・ 劣化したコンクリートの除去 ・ 補修後の水分の浸入抑制 ・ コンクリートの凍結融解抵抗性の向上	・ 断面修復工 ・ ひび割れ注入工 ・ 表面処理工	・ 断面修復材の凍結融解抵抗性 ・ 鉄筋の防錆処理 ・ ひび割れ注入材の材質と施工法 ・ 表面処理材の材質と厚さ
化学的侵食	・ 劣化したコンクリートの除去 ・ 有害化学物質の浸入抑制	・ 断面修復工 ・ 表面処理工	・ 断面修復材の材質 ・ 表面処理材の材質と厚さ ・ 劣化コンクリートの除去程度
アルカリシリカ反応	・ 水分の供給抑制 ・ 内部水分の散逸促進 ・ アルカリ供給抑制 ・ 膨張抑制 ・ 部材剛性の回復	・ 水処理 (止水、排水処理) ・ ひび割れ注入工 ・ 表面処理工 ・ 巻立て工法	・ ひび割れ注入材の材質と施工法 ・ 表面処理材の材質と厚さ
疲労 (道路橋鉄筋コンクリート床板の場合)	・ ひび割れ進展の抑制 ・ 部材剛性の回復 ・ セン断耐力の回復	・ 水処理 (排水処理) ・ 床版防水工法 ・ 接着工法 ・ 増厚工法	・ 既設コンクリート部材との一体性
すり減り	・ 減少した断面の復旧 ・ 粗度係数の回復・改善	・ 断面修復工 ・ 表面処理工	・ 断面修復材の材質 ・ 付着性 ・ 耐摩耗性 ・ 粗度係数

日本コンクリート工学協会の「コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書⁵⁾」には、塩害や下水による劣化を受けたコンクリート構造物の性能を回復させる補強、補修技術について記載されている。表-5.3.2.8 は、各性能水準の低下に対応した補修工法の適用性を示している。

表-5.3.2.8 各性能水準の低下に対応した補修工法の選定⁵⁾

性能	水密性				対人安全性				耐震性(じん性)				たわみ性				耐荷性(最大耐力)				耐疲労性				
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
性能低下グレード	0	I	II	III	0	I	II	III	0	I	II	III	0	I	II	III	0	I	II	III	0	I	II	III	
工 法 選 定	ひび割れ補修工法	①	◎	○		①	○	○																	
	表面処理工法	①	◎	◎	○	①	◎	◎	○																
	断面修復工法			○	◎			◎	◎			○				○	○			○	○			○	○
	電気化学的脱塩工法																								
	電気防食工法																								
	鋼板・FRP接着工法								○	①	◎	◎		①	◎	◎		①	◎	◎		①	◎	◎	
	補強(ワイヤー増厚・打換え・カッター工法など)									①	◎	◎		①	◎	◎		①	◎	◎		①	◎	◎	

注) ①: 記号の説明

◎: 主工法として適用可能

○: 補助工法として、主工法の性能を保持するために適用

△: 補助工法として、構造物の劣化状況などに応じて適用

- ② グレード 0 あるいは I の(◎)は、初期欠陥がある場合あるいは予防保全を目的とする。
- ③ 断面修復工法を「鋼材を保護する性能」に主工法として適用する場合には、鋼材に腐食を発生させる有害な量の塩化物はすべて取り除くことを基本とする。補助工法としてあるいはその他の性能に対して適用する場合には、浮き剥離などの劣化が見られる部分のみの補修となる。なお、断面積が減少した鉄筋に対しては、補強筋によって断面を補うことも考慮する。
- ④ 過酷環境下の構造物では、表-3.3.20 に示した「鉄筋腐食の進行を抑制する工法」は常に選定されなければならない。力学特性やその他の性能の回復も必要な場合には、このために選定された工法と「鉄筋腐食の進行を抑制する工法」との組み合わせを考慮に入れ、要求される性能を全て満足する工法が最終的に選定されなければならない。

5.3.3 補修工法の設定および施工

補修の目的別に補修工法を詳細検討し、具体的な施工計画を立案する。施工計画は、各工法の適用効果、工法の特徴、設備環境を十分把握して立案することが重要である。また、劣化状況と設備環境を勘案し、先行事例の施工実績と効果も確認して補修工法を立案する必要がある。

火力発電所土木設備で発生する劣化に対し、補修の目的別に各工法を紹介している文献を示す。

(1) 表面からの浸透による腐食防止

【クラック補修】

日本コンクリート工学協会の「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2009 -⁸⁰⁾」には、現場コンクリートに生じたひび割れの調査、原因推定、評価、補修方法及び事例が記載されている。

【表面被覆工法】

土木学会の「表面保護工法 設計施工指針(案)³⁶⁾」には、表面に被覆または含浸層を施す工法について一般的な事項が記載されており、施工の実務に用いるマニュアルも作成されている。

東京電力(株)は「電力土木 316 号³⁴⁾」で、東京電力(株)が保有する各種設備の補修・調査データを活用して、塩害を受ける構造物に対して一般的に用いられている表面被覆工法の補修効果の定量化を図るとともに、補修効果を考慮した塩化物イオン拡散予測の解析結果を紹介している。

中部電力(株)は「電力土木 329 号⁵⁷⁾」で、各種表面保護材の塩化物イオン拡散係数を室内試験により求め、表面保護効果を考慮した実構造物の塩化物イオンの拡散予測を行うことにより、表面保護工法による塩害抑制効果を定量的に評価している。また、表面保護による鉄筋腐食促進試験を行い、表面保護工法による鉄筋腐食抑制効果について報告している。図-5.3.3.1 は、表面保護材 A, D, F を塗布した場合と保護材なしの場合の塩化物イオン混入側の鉄筋腐食減量率の比較図である。表面保護材 A, D の効果が大きく、表面保護材の鉄筋腐食抑制効果が示されている。表面保護材 F では塩化物イオンに対する効果が、保護材なしとほとんど違いがない結果となっており、材料特性、使用条件、施工環境等を勘案して保護材を選定する必要があり、場合によっては試験施工も必要である。

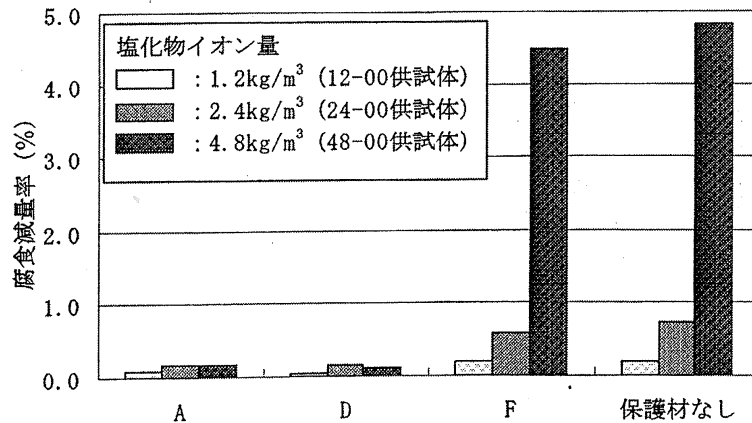


図-5.3.3.1 鉄筋腐食減量率の比較⁵⁷⁾

(2) コンクリート，鉄筋断面の復元，補強

土木学会の「コンクリート構造物の補強指針（案）⁴⁹⁾」では，耐震およびその他一般の補強を対象として，外ケーブル工法，接着・巻立て工法，増厚・巻立て工法による構造物の補強方法を現状の技術に基づき記載している。

飛鳥建設(株)は「電力土木 332 号⁵¹⁾」において，中性化や塩害などにより劣化したコンクリート構造物の補修工法として，無機系プレミックスモルタルに硬化促進剤を添加させて吹き付ける新たな断面修復工法を開発し，室内試験による材料選定，試験吹付けによる性能評価，及び鉄道高架の補修並びに水路トンネルの補強工事への適用事例について紹介している。

四国電力(株)は「電力土木 246 号²⁾」で，海水の電着技術を利用した新しい鉄筋コンクリート構造物の補修方法（電着工法）の開発と，各種室内試験及び実構造物への実証試験により，海洋コンクリート構造物の維持補修工法として電着工法が有効であることを紹介している。電着工法の有効性を示す一例として図-5.3.3.2 に塩化物イオン (Cl^-) の除去効果を示す。電着工法の電流の通電前に比べ，3ヶ月および5ヶ月通電後のコンクリート中 Cl^- 量は確実に減少している。

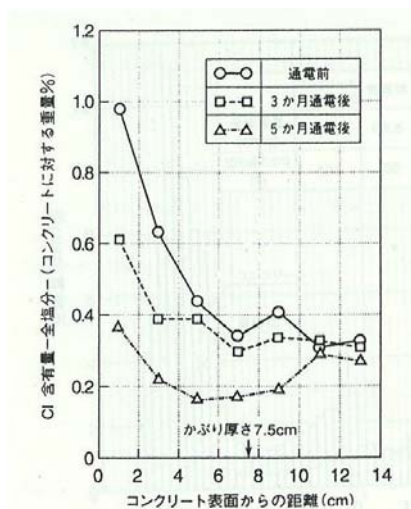


図-5.3.3.2 電着通電に伴うコンクリート中の Cl^- 量分布の経時変化²⁾

(3) 鉄筋、鋼材の塩害による腐食防止

土木学会の「電気化学的防食工法 設計施工指針（案）¹⁶⁾」には、塩害、中性化を対象とした電気防食工法、脱塩工法、再アルカリ化工法、電着工法に関する設計施工の指針が記載されている。

また、大井埠頭棧橋での補修実績で得られた補修技術や新材料、新工法をマニュアルとして取りまとめたものとして、東京埠頭公社（現在 東京港埠頭株）の「棧橋劣化調査補修マニュアル³¹⁾」がある。

中部電力株は「電力土木 294 号¹⁴⁾」において、海面上における鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化補修工法として、棧橋上部工での電気防食工法の適用事例を紹介し、塩化物が深い範囲まで浸透した場合の補修方法として電気防食工法は、防食の確実性とコストの面から有効であることを報告している。

中国電力株は「電力土木 308 号²⁵⁾」において、鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化補修として、臨海域にある鉄塔基礎に点状陽極方式の電気防食を採用した事例を紹介し、良好な結果を得たことを報告している。

図-5.3.3.3 は、点状陽極方式による電気防食による通電直後及び6ヶ月後の陽極材周辺の復極量の分布状況を示す。通電開始直後は、陽極材周辺の復極量は高い値を示していたが、6ヶ月後の計測結果では還元反応等により均一化し、良好な結果となっている。

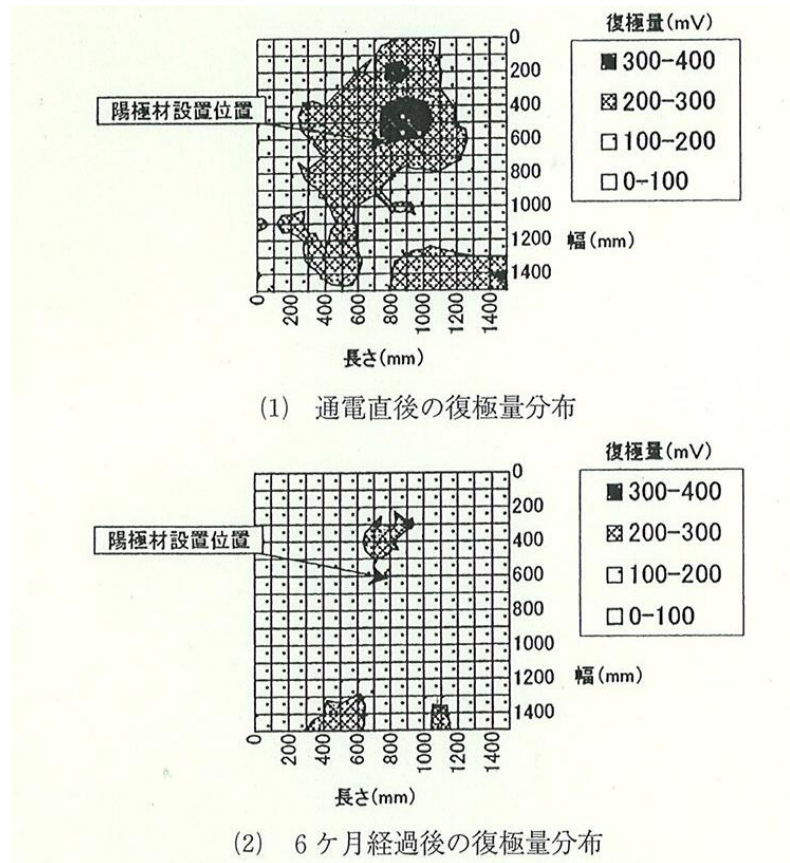


図-5.3.3.3 陽極材周辺の復極量試験結果²⁵⁾

東亜建設工業㈱は「電力土木 332 号⁵⁰⁾」において、電気防食工法の維持管理支援ツールとして、計測データと電気防食システムの異常発生時の具体的な対処方法を、インターネットを介して構造物所有者に提供するシステムを開発し、栈橋上部工 P C 桁に適用された電気防食工法の維持管理に導入した事例を紹介している。

5.4 劣化予測方法

5.4.1 劣化予測方法

(1) 概要

劣化予測は、推定される劣化機構に対して、点検結果に基づき劣化の将来の状態を予測することであり、リプレースユニットの予定供用期間終了時点までの構造物の性能評価および対策の要否の判定において欠くことができないものである。

劣化予測は、既往の研究や知見に基づく適切な劣化予測モデルを用い、このモデルに点検によって得られた構造物の形状や配筋状態、コンクリートの品質ならびに鋼材の状態のデータを加味して、定量的に行うことが望ましい。しかし、劣化機構の種類によっては、劣化予測モデルが確立されていないまたはその精度が必ずしも十分でないものあり、このような場合等には、劣化の程度をいくつかの段階（グレード）に区分し、それぞれの長さを予測できるような半定量的な予測モデルを用いて劣化予測を行うこともある。

なお、火力発電所のリプレースに伴う既設土木構造物の流用可否の判定等を行う場合の劣化予測をあたって、予測対象構造物の過去の維持管理データを用いることができれば、より効率的かつ精度の高い予測を行うことが可能となる。

(2) 劣化機構毎の予測方法

火力発電所の既設土木構造物について想定される主な劣化機構としては、塩害、中性化、凍害、アルカリシリカ反応などが挙げられる。

以下では、それぞれの劣化機構における劣化予測モデル構築の基本的な考え方を「コンクリート標準示方書（維持管理編）⁵³⁾」に基づいて紹介するとともに、次節以降に、それぞれの劣化予測モデルの具体的な適用方法を示す。

塩害および中性化では、補強鋼材の腐食が大きな問題となる。これらの劣化予測では、鋼材腐食が発生するまでの段階で問題となる二酸化炭素や塩化物イオンの鋼材腐食要因のコンクリート中への侵入については、すでに比較的精度の良い予測モデルが提案されている。しかし、現実の構造物では、鋼材が腐食し、これに伴いコンクリートにひび割れや剥離が生じているような場合も多く、鋼材腐食の進行予測も重要となるが、その予測モデルは、二酸化炭素や塩化物イオンの侵入予測モデルに比べて一般に精度は劣る。それでも、火力発電所のリプレースに伴う既設土木構造物の流用可否の判定等においては、同一使用条件下での鋼材腐食についての生データを用いることもできるので、このデータを有効に利用することにより、予測の精度をある程度まで高めることは可能である。

凍害では、コンクリートの表面から内部に劣化が進行する。この劣化機構では、劣化の進行速度が十分に把握されているとは言い難い現状にあるが、建設時点から点検までの経過期間と点検によって得られた劣化深さの関係を参考とし、それ以降の劣化予測を行うことができる。

アルカリシリカ反応による劣化では、ひび割れなどが確認された時点では既にある程度の反応が進行している。この劣化機構では、点検時で反応がほぼ終了しているのか、それともそれ以降も反応がさらに進行するのかを把握することが重要となる。このような検討を行うために、コンクリートの試料を採取して試験を実施するのが一般的であるが、まだ反応が進む可能性があると判明した場合におけるそれ以降の反応速度の把握は困難な場合が多い。

なお、劣化をどの程度の精度で予測できるかは、構造物あるいは部位、部材の劣化状況や評価の対象となる性能によっても異なることに注意を要する。また、複数の要因により劣化が複合して生じている場合もあり、このような複合劣化の予測を行う場合には、作用する劣化機構が単独で生じた場合の劣化状況を単純に足し合わせたものとは必ずしもならないことにも注意を要する。

5.4.2 塩害

(1) 概要

コンクリート構造物に生じる塩害とは、コンクリート中における塩化物イオンの存在により、コンクリート中の鋼材の腐食が進行し、腐食生成物の体積膨張によるコンクリートのひび割れや剥離、あるいは鋼材の断面減少が生じ、ひいては構造物の性能低下につながる現象のことをいう。

塩害を受ける構造物の性能の低下を予測するためには、構造物を構成する材料の劣化すなわち、コンクリート中の鋼材腐食や鋼材腐食に伴うコンクリートの劣化の進行を定量的に予測する必要がある。しかしながら、構造物を構成するコンクリートおよび鋼材の劣化を予測し、その結果を組み合わせることで構造物の各種性能を評価する場合であっても、現時点の技術レベルでは定量的な予測を行うことは必ずしも容易であるとはいえない。

このため、塩化物イオンのコンクリート中への浸透と鋼材腐食の進行を考慮して、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の期間を予測することが現実的である。ここで、潜伏期の長さは塩化物イオンの拡散や初期含有塩化物イオン濃度、進展期の長さは腐食速度とひび割れ発生時の鋼材の腐食量、加速期の長さは腐食ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度、および劣化期の長さは腐食ひび割れを有する場合の腐食速度と耐荷力が低下する時の腐食量からそれぞれ計算されることとなる。

なお、潜伏期から進展期に移行する時期は、鋼材表面における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達した時点とすることが一般的であり、「示方書（維持管理編）⁵³⁾」をはじめとする多くの基準等で腐食発生限界濃度を 1.2 kg/m^3 としている。しかしながら、火力発電所のリプレースに関する技術分科会の論議においては、「構造物の健全性調査の結果、鋼材表面における塩化物イオン濃度が 1.2 kg/m^3 以上であっても鉄筋の腐食が認められない例が多い」との発言が多数あり、この腐食発生限界濃度については実情に即した調査データを採取することが、より精度の高い予測や合理的な対策立案に大

大きく貢献することとなるものと考えられる。

(2) 塩化物イオンの拡散予測

塩化物イオンの拡散予測は、潜伏期間を正確に推定するためにも重要である。

「示方書（維持管理編）⁵³⁾」によると、塩化物イオンの拡散予測の方法としては、コンクリート中の塩化物イオンの移動を拡散過程と考えて、式-5.4.2.1 に示すフィックの第2法則として知られる拡散方程式を、構造物表面における塩化物イオン濃度を一定として解いた場合の解である式-5.4.2.2 が最も一般的に用いられるとしている。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad \dots \dots \text{式-5.4.2.1}$$

ここに、 C ：液相の塩化物イオン濃度
 D_c ：塩化物イオンの拡散係数
 x ：コンクリート表面からの距離
 t ：時間

$$C(x,t) = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \quad \dots \dots \text{式-5.4.2.2}$$

ここに、 $C(x,t)$ ：深さ x (cm) ，時刻 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m³)
 C_0 ：表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)
 D_{ap} ：塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm²/年)
 erf ：誤差関数
 γ_{cl} ：予測の精度に関する安全係数

塩化物イオンの見かけの拡散係数については、点検によって得られた塩化物イオン濃度分布を式-5.4.2.2 で回帰して求める方法が一般的であるが、「示方書（維持管理編）⁵³⁾」にはセメント種別毎に塩化物イオンの見かけの拡散係数を水セメント比の関数として算定する式が示されている。なお、点検によって得られた塩化物イオン濃度に初期塩化物イオンが含まれる場合には、実測の塩化物イオン濃度から初期塩化物イオン濃度を差し引いた値を回帰分析することとなる。

塩化物イオン濃度に関する実測値がない場合については、「示方書（維持管理編）⁵³⁾」に示される推奨値（表-5.4.2.1 参照）が示されている。

表-5.4.2.1 表面における塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m³)

		飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
			汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
飛来塩分が 多い地域	北海道, 東北, 北陸, 沖縄	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が 少ない地域	関東, 東海, 近畿, 中国, 四国, 九州		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

「栗本ら⁴²⁾」は、塩害対策として表面保護工を実施した場合、表面保護工の耐用年数までは劣化因子の侵入を遮断する（同期間は拡散係数を0と設定）が、その後は徐々に表面保護機能を失い一定期間後（耐用年数の2倍）には拡散係数の低減効果が失われるとして構造物の塩化物イオンの拡散予測を行っている。また、「河村ら⁴⁷⁾」は、表面保護材を施したコンクリート供試体の通電試験結果に基づき、表面保護材の塩化物イオンの拡散係数を同定した拡散予測を行っている。

また、「栗本ら⁴²⁾」は、塩害対策として鉄筋位置までコンクリートを取り除き新しいコンクリートを打ち替える断面修復を実施した構造物について、置き換えられたコンクリートは塩化物イオンを含まず、その後の経過により補修部分に塩化物イオンの浸透が始まるとの境界条件の下で、式-5.4.2.1により塩化物イオンの拡散予測を行っている。

上記拡散方程式を適用する方法以外の塩化物イオン拡散予測方法としては、促進試験や数値解析を実施する方法などもあり、その詳細については「参考文献^{36), 53), 70)}」を参照されたい。

(3) 鋼材腐食の研究事例

鋼材腐食に関する研究事例として、「松村ら⁷⁹⁾」は干満帯のなかでも厳しい条件を模擬した環境における鉄筋コンクリート試験体の鉄筋腐食実験を約1.5年間行っており、その結果として以下の報告がなされている。

①鉄筋腐食発生時の塩化物イオン濃度

普通セメントを使用したコンクリートでは、コンクリートのW/Cによらず、腐食面積率が急増する塩化物イオン濃度はほぼ一定であり、干満環境下における鉄筋腐食発生時の塩化物イオン濃度は3.0kg/m³程度であると考えられた。この値は気中環境下の構造物で一般的に用いられている濃度(1.2kg/m³)と比較して大きい値であり、含水率の高いコンクリート中では酸素が鉄筋に到達しにくいためと考えられた。干満環境下では、鉄筋腐食の発生を評価するための塩化物イオン濃度の限界値を気中環境下よりも高く設定できることが分かった。

一方、フライアッシュセメントの場合は、鉄筋腐食発生時の塩化物イオン濃度は1.2kg/m³程度であり、コンクリート標準示方書に示される鉄筋腐食発生の限界塩化物イオン濃度と同程度であった。

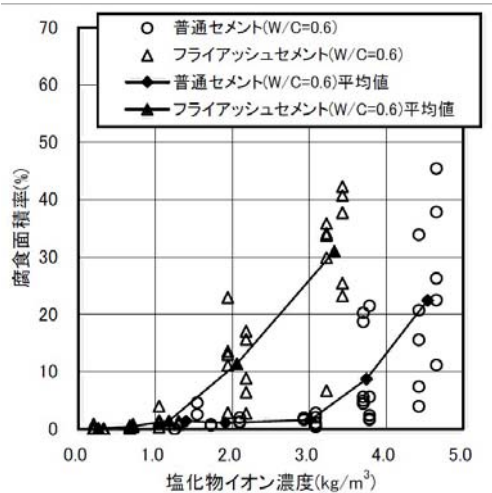


図-5.4.2.1 塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係
(普通セメントとフライアッシュセメントの比較)

② 鉄筋腐食によるひび割れ存在下のコンクリート中の鉄筋腐食速度

試験体には最大で 0.8mm の幅のひび割れが生じた。鉄筋の腐食量と経過時間の関係から、鉄筋腐食によるひび割れ存在下のコンクリート中の鉄筋の腐食速度は、セメント種類によらず概ね一定であり、0.06mm/年程度であった。「港湾の施設の技術上の基準・同解説⁴⁸⁾」で示されている、鋼材の腐食速度の標準値を以下に示す。

表-5.4.2.2 鋼材の腐食速度の標準値

腐食環境		腐食速度 (mm/年)
海側	H.W.L.以上	0.3
	H.W.L.~L.W.L.-1m まで	0.1~0.3
	L.W.L.-1m~海底部まで	0.1~0.2
	海底泥層中	0.03
陸側	陸上大気中	0.1
	土中 (残留水位以上)	0.03
	土中 (残留水位以下)	0.02

(4) 鋼材腐食の進行予測

「示方書(維持管理編)⁵³⁾」によると、塩害による鋼材の腐食に影響を及ぼす要因として、鋼材位置の細孔中に存在する水中の塩化物イオン濃度や pH、酸素の供給量、コンクリートの含水量などがあるが、これらの要因と腐食速度の関係については、ある程度体系的に整理されているものの、現状では定量化されるまでには至っていないとしている。

通常、鋼材の腐食は、鋼材位置の塩化物イオンが腐食発生限界塩化物イオン濃度を超過して存在すると開始するとされており、腐食発生限界塩化物イオン濃度は、対象構造物の鋼材の腐食状態と鋼材位置における塩化物イオン濃度から求めることが原則となる。なお、「示方書(維持管理編)⁵³⁾」においては、実測データから腐食発生限界塩化物イ

オン濃度を求めることができない場合は、腐食発生限界塩化物イオン濃度を 1.2 kg/m^3 とみなしてもよいとしている。

「示方書（維持管理編）⁵³⁾」では、腐食ひび割れ発生前の鋼材腐食の進行予測手法として、「点検により得られた腐食量に基づく方法」や「鋼材の腐食反応速度に基づく方法」を挙げている。前者は、詳細調査によって腐食量の経時変化が把握できている場合に、その結果から腐食量の経時変化曲線を仮定しその後の予測を行うものである。また、後者は、塩化物イオンの拡散に加え酸素供給量などもパラメータとして鋼材の腐食反応速度を推定する方法であり、詳細調査などによってモデル中のパラメータを適切に設定できれば、予測の精度は高まる。

また、「示方書（維持管理編）⁵³⁾」では、腐食ひび割れ発生の予測手法として、「腐食量から推定する方法」と「力学モデルを用いる方法」を挙げているが、いずれの方法もひび割れ発生時の腐食量を定めることに帰着するとしている。

さらに、「示方書（維持管理編）⁵³⁾」では、腐食ひび割れ発生後の鋼材腐食の進行を定量的に予測する手法として確立されたものではなく、現実的な対応として、腐食ひび割れの無い場合を対象として提案されている各種腐食モデルのパラメータの中で、塩化物イオンの見かけの拡散係数、酸素移動速度や水分移動速度などを腐食ひび割れがある場合と置き換えて予測を行うのがよいとしている。

以下、鋼材腐食の進行予測に関する研究事例を紹介する。

「田中ら⁴⁶⁾」においては、進展期（腐食ひび割れ発生前）の鋼材の腐食速度は、コンクリートの品質（塩化物イオンの見かけの拡散係数で評価）、かぶり位置での塩化物イオン濃度および温度に支配されるとして、式-5.4.2.3 で表現されるモデルを提案している。

$$R(D,C,T) = C_D(D) \cdot R(C,T) \quad \dots \text{式-5.4.2.3}$$

ここに、

$R(D,C,T)$: 鉄筋の腐食速度

$C_D(D)$: コンクリートの品質の影響を表す項であり、コンクリート中の見かけの拡散係数の関数として定式化されている。

$R(C,T)$: 塩化物イオンと温度の影響を表す項であり、鋼材位置での塩化物イオン濃度と温度の関数として定式化されている。

また、本研究事例では、実験結果に基づき、ひび割れ発生時の限界腐食量をかぶり量（もしくは鉄筋間隔）と鉄筋径の関数として式-5.4.2.4 のとおり定式化するとともに、加速期（腐食ひび割れ発生後）における鋼材の腐食速度を進展期（腐食ひび割れ発生前）のそのの 3.7 倍としている。

$$M_{CR} = 44.2 (C_d / \phi)^{0.721} \quad \dots \text{式-5.4.2.4}$$

ここに

M_{CR} : ひび割れ発生時の限界腐食量 (mg/cm^2)

C_d : かぶりまたは隣合う鉄筋間距離の半分 (mm)

ϕ : 鉄筋径 (mm)

他方、「網野ら⁶⁶⁾」においては、進展期(腐食ひび割れ発生前)における鋼材の腐食速度に影響を及ぼす要因としてかぶりと塩化物イオン濃度に着目し、式-5.4.2.5および式-5.4.2.6を提案している。

$$i = 0.025 \times C(d,t)^{1.5} \quad \dots \text{式-5.4.2.5}$$

ここに、

i : 鉄筋の腐食速度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

$C(d,t)$: かぶり $d(\text{cm})$, 時刻 $t(\text{年})$ における塩化物イオン濃度(kg/m^3)

$$W_{\text{spe}} = i / (2F) [\text{Fe}(\text{OH})_3^-] \times t_{\text{corr}} \quad \dots \text{式-5.4.2.6}$$

ここに、

W_{spe} : 腐食量 (g/cm^2)

F : ファラデー定数 (=96500 C/mol)

$[\text{Fe}(\text{OH})_3^-]$: 酸化鉄(III)の分子量 (=106.9 g/mol)

t_{corr} : 腐食発生限界塩化物イオン濃度を上回った時点からの経過年数

また、本研究事例では、式-5.4.2.6がかぶり 2.5 cmの供試体を用いた実験式であることに鑑み、対象構造物の鉄筋径とかぶりをパラメータとした式-5.4.2.6の補正式が提案されている。

さらに、式-5.4.2.5を用いてライフサイクルコストを算定するにあたっては、腐食速度の不確実性が正規分布に従うものとした確率論的アプローチを行っている。

5.4.3 中性化

(1) 概要

コンクリート構造物に生じる中性化とは、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し、水酸化カルシウムなどのセメント水和物と炭酸化反応を起こすことにより、コンクリートの空隙中の水分のpHを低下される現象である。これにより、内部の鋼材表面の不動態皮膜が失われ、酸素と水分の供給により腐食が進行する。さらに鋼材の腐食により、ひび割れの発生、かぶりの剥離、耐荷力の低下などが起こる。

「示方書(維持管理編)⁵³⁾」によると、中性化を受ける構造物の性能の低下を予測するためには、材料の劣化の進行を定量的に予測する必要があるが、構造物を構成するコンクリートおよび鋼材の劣化を予測し、その結果を組み合わせることで構造物の各種性能を評価する場合であっても、現時点の技術レベルでは定量的な予測を行うことは必ずしも容易であるとはいえないとしている。

このため、「示方書(維持管理編)⁵³⁾」では、中性化による構造物の性能低下を、中性化深さが鋼材の腐食発生限界に達するまでの潜伏期、腐食開始から腐食ひび割れが生じるまでの進展期、ひび割れの存在によって腐食速度が増大する加速期、鋼材腐食の進

行によって耐荷力等の低下が顕著な劣化期に区分し、各劣化過程が基本的には構造物の状態（性能）に対応していることを考慮して、それぞれの期間の長さを予測することで劣化進行予測に置き換えることが現実的であるとしている。この場合、潜伏期の長さは中性化速度で、進展期の長さは鋼材の腐食速度と腐食ひび割れ発生時の腐食量で、加速期の長さは腐食ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度で、劣化期の長さは腐食ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度と耐荷力が低下する腐食量から、それぞれ計算されることとなる。

(2) 中性化の進行予測

中性化の進行速度の予測は、潜伏期間を正確に推定するためにも重要である。

中性化の進行速度は、コンクリート中における二酸化炭素の移動速度と空隙中の水分の pH 保持能力によって決まるが、多くの研究から、中性化深さは式-5.4.3.1 のように中性化期間の平方根に比例することが確かめられており、中性化の進行予測には \sqrt{t} 則として知られる同式を用いることが一般的である。

$$y = b\sqrt{t} \quad \dots \text{式-5.4.3.1}$$

ここに、 y : 中性化深さ (mm)

t : 中性化期間 (年)

b : 中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

中性化速度係数については、複数の中性化深さの測定値から最小二乗法により算出することが一般的である。

中性化深さに関する実測値がない場合、「示方書（維持管理編）⁵³⁾」は、式-5.4.3.2 を用いてよいとしている。

$$y = (-3.57 + 9.0 W/B) \sqrt{t} \quad \dots \text{式-5.4.3.2}$$

ここに

W/B : 有効水結合材比 (= $W / (C_p + k \cdot A_d)$)

W : 単位体積あたりの水の質量

B : 単位体積あたりの有効結合材の質量

C_p : 単位体積あたりのポルトランドセメントの質量

A_d : 単位体積あたりの混和材の質量

k : 混和材の影響を表す係数

フライアッシュの場合 : $k = 0$

高炉スラグ微粉末の場合 : $k = 0.7$

上記の \sqrt{t} 則を適用する方法以外の中性化の進行予測方法としては、促進試験や物理化学モデルを利用する方法などもあり、その詳細については「参考文献 36)・53)・70)」を参照されたい。

なお、中性化は二酸化炭素と水酸化カルシウムが反応し炭酸カルシウムを生成し、コンクリートがアルカリ性から中性へ変化するために生じるものがあるため、「栗本ら⁴²⁾」は、中性化を水酸化カルシウムの濃度で判定するとし、式-5.4.3.3 および式-5.4.3.4により中性化深さの予測を行っている。

$$\frac{\partial C_O}{\partial t} = \frac{\partial^2 C_O}{\partial x^2} - kC_O C_a \quad \dots \text{式-5.4.3.3}$$

$$\frac{\partial C_a}{\partial t} = -kC_O C_a \quad \dots \text{式-5.4.3.4}$$

ここに C_O : 二酸化炭素濃度
 C_a : 水酸化カルシウム濃度
 k : 反応速度定数

(3) 鋼材腐食の進行予測

鋼材の腐食は周囲の pH の低下によって生じるが、pH が高アルカリ領域にあっても腐食速度は厳密には 0 でない。したがって、腐食開始を判定する指標を定義することは難しい。しかし一般に、中性化による腐食については、中性化深さが鋼材位置に到達する以前に開始することが多くの研究および実構造物の調査から明らかになっている。

「示方書（維持管理編）⁵³⁾」によると、腐食開始時期は、かぶりと中性化深さの差である中性化残りによって整理されている場合が一般的であり、中性化残りが 10mm 以下になると腐食しているとの事例が多いとされている。

「示方書（維持管理編）⁵³⁾」では、腐食ひび割れ発生前の鋼材腐食の進行予測手法として、「点検結果で得られた腐食量に基づく方法」や「鋼材の腐食反応速度に基づく方法」を挙げている。

また、腐食ひび割れ発生の予測手法としては、「腐食量から推定する方法」と「力学モデルを用いる方法」を挙げており、いずれの方法もひび割れ発生時の腐食量を定めることに帰着するとしている。

さらに、腐食ひび割れ発生後の鋼材腐食の進行予測は、ひび割れが物質移動性に及ぼす影響を適切に評価して予測する必要があるとしている。

5.4.4 その他の劣化

(1) 凍害

凍害とは、コンクリート中の水分の凍結膨張によって発生するものであり、長年にわたる凍結と融解の繰り返しによってコンクリートが徐々に劣化する現象である。

「示方書（維持管理編）⁵³⁾」では、凍害に関する劣化予測について以下のとおりとしている。

コンクリートは凍害を受けることにより、組織がゆるみ、結果として圧縮強度の低下や塩化物イオン浸透速度や中性化速度の増加などが起こる。そのため、コンクリート組織の変化した部分の深さや量を予測する必要がある。ただし、現時点では、凍害深さを時間軸で予測するシミュレーションモデルは開発されていないため、現実的には構造物から採取したコア試験体を測定・分析して、その後の進行予測や近隣地区の構造物の劣化予測に適用するのが有効である。

(2) アルカリシリカ反応

ある種のシリカ鉱物を含有する骨材は、コンクリート中の高いアルカリ性の水溶液と反応して、コンクリートに異常な膨張およびそれに伴うひび割れを発生させることがある。このような反応はアルカリ骨材反応（アルカリシリカ反応（以下、「ASR」という）とアルカリ炭酸塩岩反応に大別される）と総称されているが、わが国で被害が主に報告されているのはASRである。

「示方書（維持管理編）⁵³⁾」では、ASRに関する劣化予測について以下のとおりとしている。

ASRの影響を受ける構造物の性能の低下を予測するためには、構造物を構成する材料の劣化の進行を定量的に予測する必要がある。しかしながら、構造物を構成するコンクリートおよび鋼材の劣化を予測し、その結果を組み合わせることで構造物の各種性能を評価する場合であっても、現時点の技術レベルでは定量的な予測を行うことは必ずしも容易であるとはいえない。

このため、コンクリートのASRの進行を考慮して、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の期間を予測することが現実的である。

なお、ASRによる劣化進行のモデルは、コンクリートが有する膨張性によって異なるのが特徴である。骨材中に含まれる反応性鉱物の量が比較的多く、生成したアルカリシリカゲルの膨張性が高い場合には、ASRによるコンクリートの膨張が長期にわたって生じ、膨張量も大きいので著しい劣化が生じる恐れがある。一方で、骨材中に含まれる反応性鉱物の量が比較的少ない場合には、ASRによるコンクリートの膨張がある程度進行した段階で収束し、その後十分に長い期間を経ても変化が見られない場合もある。すなわち、ASRによる劣化では、必ずしもすべての構造物が劣化期に至るものではない。しかし、構造物の調査結果等から部材の性能低下曲線を定めることは必ずしも容易ではなく、また、特にASRによる残存膨張量の予測には大きな誤差が生じるので、膨張の可能性が低いと予想された構造物でも、ASRにより生じた変状に特に注意した調査を行うなど適切な対応が必要である。

(3) その他の劣化

火力発電所の既設土木構造物について想定されるその他の劣化機構としては、化学的侵食や疲労などが考えられる。

これらの劣化についても、構造物の性能の変化を把握するため、既往の研究や知見に

基づいて適切な劣化モデルを構築するなどにより,合理的な劣化予測を行う必要がある.

5.5 ライフサイクルコストの評価方法

5.5.1 ライフサイクルコストおよびアセットマネジメントの概要

土木構造物を含む社会インフラ施設のライフサイクルマネジメントのうち、特に、経済性に着目してマネジメントを行うための指標としてライフサイクルコスト（以下、LCC）がある。LCCを利用したマネジメントは、「施設のライフサイクルにわたる総費用を最小にするアセットマネジメントを行う」という明確な目標を持っていると「ライフサイクルマネジメントによる電力施設の維持管理（第3回）⁷⁶⁾」で紹介している。

アセットマネジメントの定義は、様々な解釈があるが「アセットマネジメント導入への挑戦 - 新たな社会資本マネジメントシステムの構築に向けて - ²³⁾」では、「アセットマネジメントは、一般的に、預金、株式、債権などをはじめとする個人の金融資産を、リスク、収益性などを勘案して、適切に資産配分を行う行動を指し、近年、この考え方を社会資本に適用することが国際的にも注目されている」と紹介している。

また、「アセットマネジメント導入への挑戦³⁹⁾」では、「アセットマネジメントは、限られた予算条件の下で、効率的かつ効果的な社会資本の管理・運営ができるマネジメントである。」と紹介している。

「実践 土木のアセットマネジメント⁴³⁾」では、ライフサイクルコストの最小化を図るだけでなく、「長寿命化」や「安全の強化」などの便益を確保するための投資も選択できる「やりくりマネジメント」を提唱しており、「予防保全」で構造物の寿命を延ばす、資金の制約を克服して利用者の便益を確保するなど、豊富な事例を交え、アセットマネジメントを成功に導く方法を具体的に解説している。

「土木技術者のためのアセットマネジメント⁵⁹⁾」では、社会基盤構造物のアセットマネジメントとは図-5.5.1に示すように①点検、劣化予測、性能評価・照査、対策 ②構造物（資産）マネジメント ③資産会計マネジメントの3項目により構成されると解釈している。

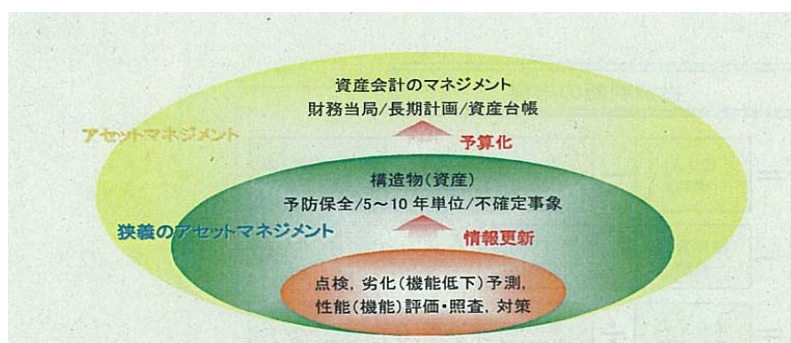


図-5.5.1 「社会基盤構造物のアセットマネジメントの基本概念⁵⁹⁾」

5.5.2 アセットマネジメントにおける投資判断の指標

アセットマネジメントには、建設に関わる各フェーズで様々なステークホルダーが関係するため、情報を共有できる環境のもとで建設的な議論を可能にする情報源としての役割がある。そのためにだれもが理解できかつ客観的な数値指標が必要となる。代表的な投資判断の指標がアセットマネジメントフローの中のどこで用いられているのかを示したのが、図-5.5.2である。（「土木技術者のためのアセットマネジメント⁵⁹⁾」）

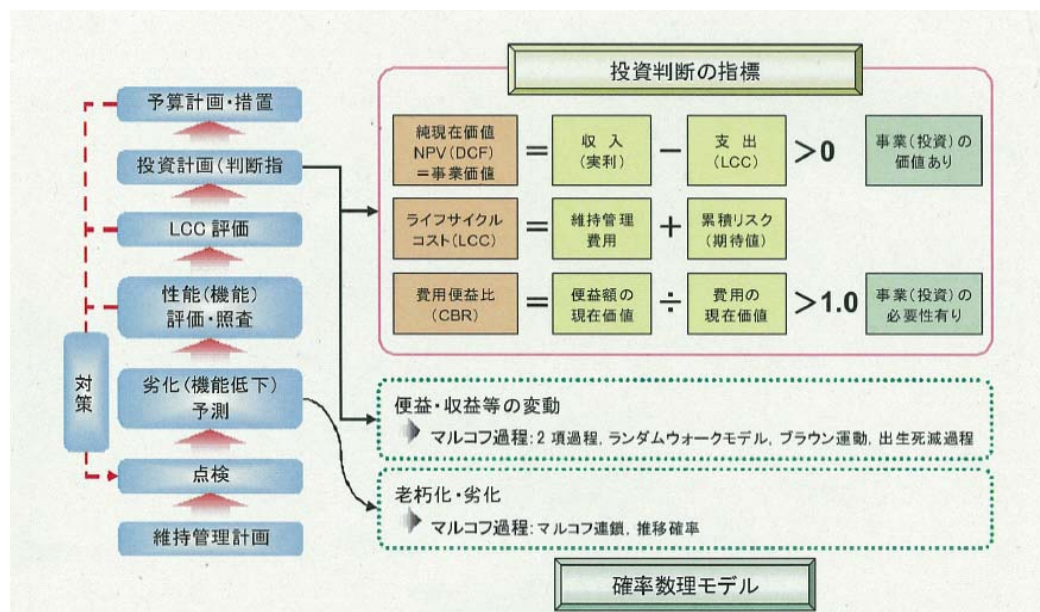


図-5.5.2 「アセットマネジメント全体の一般的な流れにおける投資判断指標と確率数理モデル⁵⁹⁾」

以下に、よく用いられる指標および関連する文献を紹介する。

5.5.2.1 ライフサイクルコスト (LCC)

LCCを利用したマネジメントは、「掛かる費用を最小化することで達成される」という明快な考え方をベースとしている。この点では分かりやすく、民間資本、社会資本を問わず、有形資産を対象とした様々なマネジメントのためのツールとして利用されている。（「土木技術者のためのアセットマネジメント⁵⁹⁾」）

しかしながら、LCCを算定する方法は画一されたものではなく、一般的に、①計画・設計や施工に関する初期費用、運用・維持管理のための光熱費・点検費用、および併用後の処理費用に加え、②経年劣化に伴う不具合発生頻度によって変動する修繕・部分更新費用、および期せずして発生する火災や事故、自然災害による損失費用なども考慮される。このうち、①は支出がほぼ一定な固定費用であるが、②は確率的な変動を伴う期待費用であり、リスク費用と呼ばれる。（「ライフサイクルマネジメントによる電力施設の維持管理（第3回）⁷⁶⁾」）

「経済的寿命を考慮した最適修繕政策²⁶⁾」では、社会基盤施設の物理的劣化と経済的劣化の双方を同時に考慮した最適アセットマネジメントモデルを提案している。施設管理者が施設の経済便益とライフサイクル費用の双方を考慮しながら、施設の転用タイミングを決定する最適運営政策と施設の劣化状態を回復する最適修繕政策を同時に決定するための最適アセットマネジメントモデルを定式化している。つまり、社会基盤施設の供用年数は物理的劣化だけではなく、経済的寿命に到達した時に更新・転用のために破棄されると述べている。

「土木施設維持管理マニュアル³⁰⁾」では、埠頭設備の維持管理を戦略的にライフサイクルコストを考慮に入れて、経済的で効率的な維持管理を実践する手順を示している。(図-5.5.2.1)

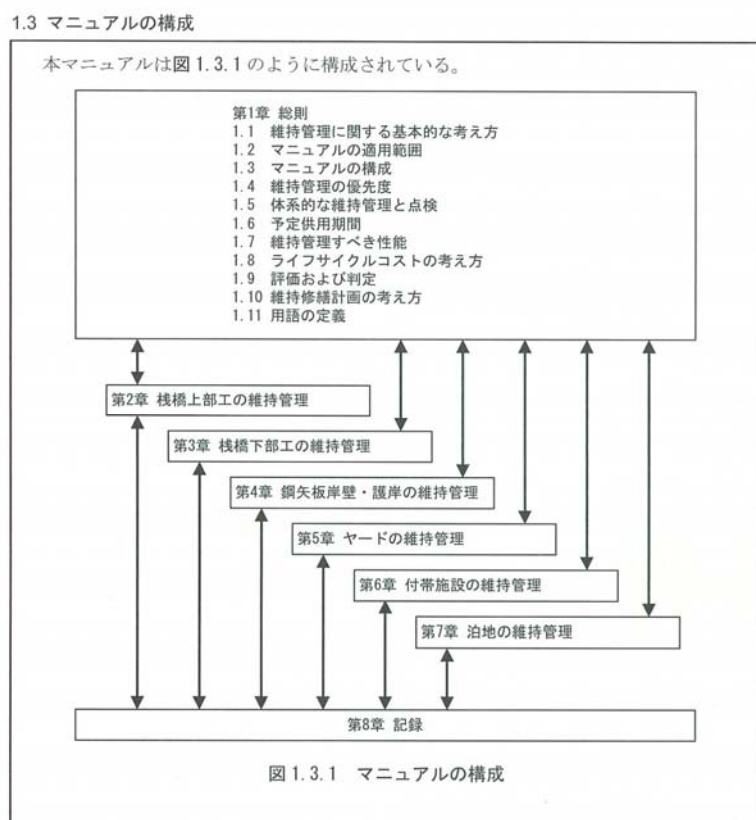


図-5.5.2.1 「マニュアルの構成³⁰⁾」

図-5.5.2.2は、早期劣化を受ける構造物に対し、予定供用期間として100年間管理する場合の維持管理シナリオを表している。早期劣化により性能低下が大きくなる前に小まめに補修を行い、性能低下によるリスク発生を抑えることにより、耐久年数を延ばし事業費の平準化を実現するものである。

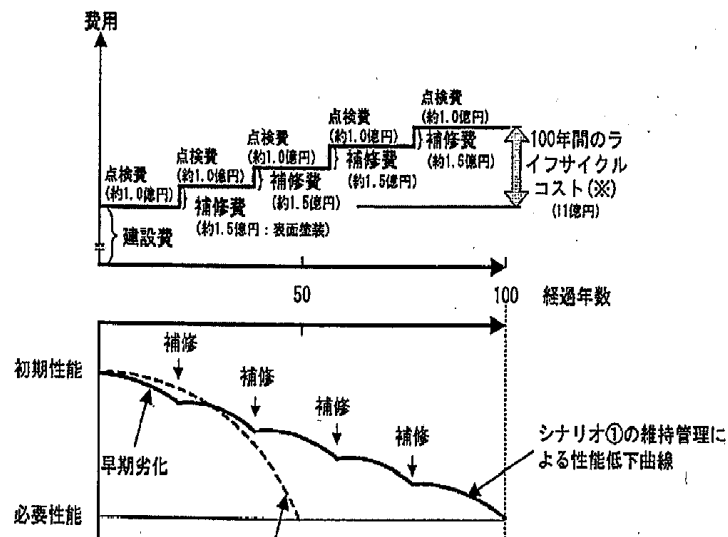


図-5.5.2.2 「維持管理シナリオ①の概念図³⁰⁾」

5.5.2.2 割引現在価値

現在の1万円と将来得ることができる1万円とでは同じ額でも評価は異なる。価値の増加率を利子率で示すと、現在の1万円の価値は将来(1年後)に1万円×(1+r)となる。逆に将来得られる1万円の現在価値は、割引率によって1万円÷(1+r)となる。現在から将来への価値の変換を割戻し、将来から現在への価値の変換を割引と呼ぶ。

このように、将来の費用支出については、その現在価値を評価し、最小化を目指す必要がある。これを割引現在価値と呼ぶ。割引率の与え方によって割引現在価値が異なることになる点は注意が必要である。(「土木技術者のためのアセットマネジメント⁵⁹⁾」)

5.5.2.3 純現在価値

純現在価値は、事業や資産への投資判断に利用される指標である。純現在価値が正であれば投資額より将来得られる利益の現在価値が上回っていることとなり、投資の正当性が説明される。(「土木技術者のためのアセットマネジメント⁵⁹⁾」)

5.5.2.4 DCF法

一定期間後に資産を売却、あるいは元金を償還するなど、資産の運用期間が設定されている場合で、さらに金額が期において変化する場合には、DCF (Discounted Cash Flow)

法によって割引現在価値を求めることができる。LCCは支出に着目しているが、DCF法はLCCに収入や実利を考慮したものと解釈すれば分かりやすい。DCF法により求められた割引現在価値はその資産や事業の価値そのものになる。（「土木技術者のためのアセットマネジメント⁵⁹⁾」）

5.5.3 アセットマネジメントにおける確率数理モデル

アセットマネジメントにおける課題の多くは、不確実性下における意思決定問題として扱われる。このため、確率・統計論をベースとした、いわゆる確率数理モデルが不可欠となる。事実、ファイナンスリスクのマネジメントでは、確率論が主要な数理として位置づけられている。また、自然災害リスクの評価では、確率・統計論をベースとした信頼性工学の技術が広く利用されており、構造物の劣化推計にはマルコフ過程がよく利用されている。

効果的なアセットマネジメントを実施するためには、将来の不確実な現象を定量的に記述する必要があり、その基本となる数理が確率過程である。確率過程を記述する様々なモデルが存在する中で、適切なモデルを選定することが重要である。表-5.5.3は時間に依存するリスク事象を記述する確率過程と主なモデルを示している。（「土木技術者のためのアセットマネジメント⁵⁹⁾」）

表-5.5.3 「リスク事象と主な確率過程⁵⁹⁾」

リスク事象	確率過程	主な確率分布やモデル
地震	ポアソン過程	ポアソン分布, 指数分布
	長周期の再起過程	BPT 分布, 対数正規分布, ワイブル分布
豪雨・風水害	ポアソン過程	ポアソン分布, 指数分布
火災・爆発	ポアソン過程	ポアソン分布, 指数分布
機器故障	ポアソン過程	指数分布 (指数ハザードモデル)
	非定常ポアソン過程	時依存の指数分布
老朽化・劣化	マルコフ過程	マルコフ連鎖, 推移確率
		2 項過程, ランダムウォークモデル, ブラウン運動, 出生死滅過程
便益・収益等の変動性	マルコフ過程	2 項過程, ランダムウォークモデル, ブラウン運動, 出生死滅過程

5.5.4 電力土木設備への適用事例

「ライフサイクルマネジメントによる電力施設の維持管理（第 2 回）⁷⁵⁾」では、コンクリート設備の維持管理の手順とコンクリート設備のライフサイクルマネジメントにおける要素技術（点検技術・劣化予測技術・評価および判定技術・対策技術）について紹介して

おり、東京電力㈱火力土木部門における維持管理の事例を紹介している。電力設備においては、膨大な設備、多岐に亘る環境、急速な高経年化といった特徴があり、効率的に維持管理を行うためには、設備がおかれた状況を踏まえた管理方法が求められ、設備は経年と共に劣化が進行するが、その劣化に対し実施する費用について、設備の供用期間中にかかる総費用として定量することをLCC評価の基本とし、種々の補修案に対してLCCを試算し、その相対評価により一つの案を選択するとしている。また、劣化リスクもLCCに含めて評価を行うことを提案している。

5.6 その他

5.6.1 残置方法

火力リプレースにおいては、何らかの理由で既設設備を流用できない場合、その既設設備を残置するケースがある。既設設備を残置した事例としては、リプレースではないが、北陸電力(株)大井ら⁶¹⁾により福井火力発電所1号機廃止工事における循環水ポンプピットおよび放水口の閉塞工事が報告されている。

当該発電所の循環水ポンプピットについては、ピットの前面に型枠を併用した角落しを挿入後、フライアッシュモルタルなどにより閉塞用擁壁を設け、砂によりピット内部の埋め戻しを実施している。なお、既設スラブ下の埋め戻しについては、充填性や長期的な安定性を考慮し、フライアッシュモルタルが用いられている。(図-5.6.1.1)

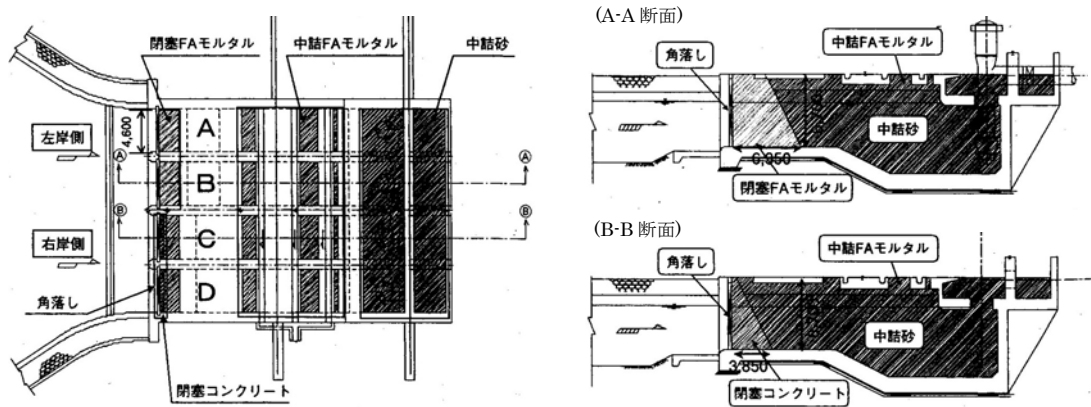


図-5.6.1.1 循環水ポンプピット閉塞図⁶¹⁾

また、放水口については、ボックスカルバート構造であったため、カルバート内に発電所構内の雨水・廃水処理水の排水配管を埋設した上で、管路の上下流部にコンクリートを打設し、カルバート内にフライアッシュモルタルを充填することにより閉塞工事を実施している。(図-5.6.1.2,3)

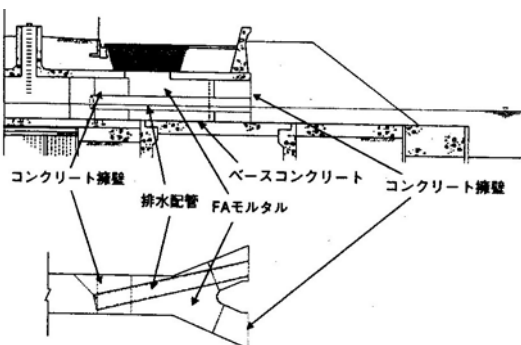


図-5.6.1.2 放水口閉塞図⁶¹⁾



図-5.6.1.3 放水口閉塞状況⁶¹⁾

5.6.2 環境対策

(1) 環境影響評価

火力リプレースにおいては、新設同様、環境影響評価が重要な課題として挙げられており、近年、環境影響評価における温排水拡散や海浜変形の予測手法について、3次元モデルの適用性などが報告されている。

1) 温排水拡散の予測手法¹⁸⁾

近年、発電所の増設や隣接する発電所の影響のため、温排水の水中放流方式と表層取水方式等が混在するような地点が増加している。このような状況から、水中放流された温排水等の3次元的な拡散・希釈特性を高精度に予測可能な3次元温排水拡散モデルが開発されている。本モデルを現地に適用した結果、観測結果をほぼ再現できることが確認(図-5.6.2.1)されているが、計算に乱流モデルを用いていること、計算メッシュが細かいことから、現状ではスーパーコンピュータを用いても多大な計算時間が必要となっている。

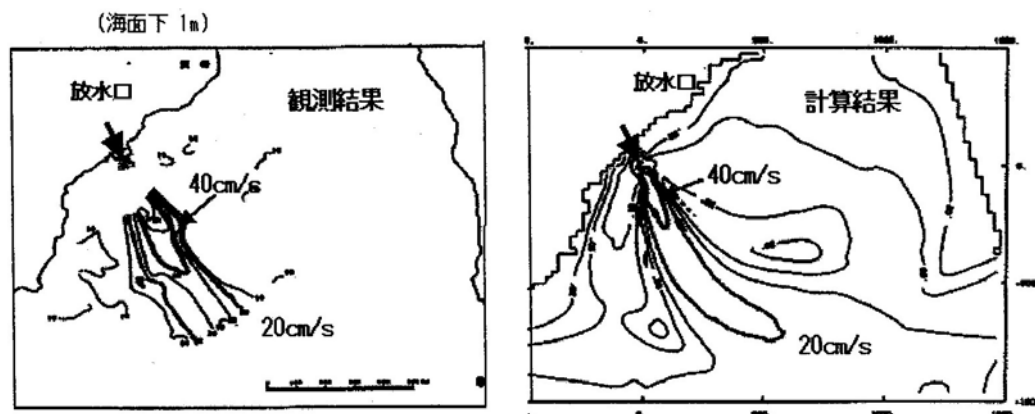


図-5.6.2.1 水中放水に対する適用事例(計算結果と水理実験結果との比較)¹⁸⁾

2) 海浜変形の予測手法¹⁸⁾

海浜変形の予測は、①マクロ的手法による検討、②汀線変化の歴史的データの検討、③漂砂の現地調査による検討、④水理模型実験、⑤数値モデルによる検討を組み合わせて総合的に実施されている。

この中で、数値モデルとしては、波の多方向不規則性と浮遊漂砂を考慮し、汀線変化だけでなく海底砂面地形の変化が計算できる3次元海浜変形モデルが開発されている。

(2) リプレース工事に伴う騒音対策・廃棄物処理など

リプレース工事においては、近接する施設や民家への騒音・振動低減や既設構造物撤去時に発生するコンクリート殻の廃棄物処理などの各種環境対応が課題となる。このため、リプレース工事の実施にあたっては、「環境影響評価法」及び「電気事業法」に基づく環境影響評価を行い「環境影響評価書」を作成するのが一般的となっている。本評価書には、工事の実施ならびにリプレース工事完了後における各種環

境への影響予測とその評価結果が取り纏められている。

リプレース工事における各種環境対策の実施事例としては、東北電力(柵羽鳥ら⁵²⁾により、仙台火力発電所リプレース工事の実績が報告されている。

当発電所における工事中の騒音対策としては、杭打ち工事へのプレボーリング工法の採用や低騒音型機械の使用などを行うとともに、民家側の敷地境界付近に防音シートを設置するなど騒音低減対策を実施している。また、動植物対策としては、煙突に手摺を設置することにより、貴重種であるハヤブサのパーチが可能な構造とするなどの対応を行っている。

さらに、撤去工事などにより発生するコンクリート殻については、発電所構内で破碎処理し、路盤材や埋め戻し材料として全量有効利用するとともに、アスファルト殻については、再生アスファルト合材や再生路盤材として全量有効利用する計画としている。

同様な事例として、電源開発(株)川村ら³³⁾により、磯子火力発電所撤去工事における環境対策の実績が報告されている。

当発電所における工事中の騒音・振動対策としては、大型ブレーカーによる破碎の際に、防音シートの設置による防音対策を講ずるとともに、運転中の既設設備への悪影響を回避するため、鋼矢板打設に無振動工法を採用している。

また、廃棄物処理対策としては、撤去した取・送・放水管をスクラップとして再利用するとともに、コンクリート殻については、自走式破碎機(図-5.6.2.2)により細かく砕いて(40mm以下)埋戻し材や構内道路の路盤材として有効利用することにより、高いリサイクル率(約99%)を達成している。(表-5.6.2.1)



図-5.6.2.2 自走式破碎機による破碎状況³³⁾

さらに、工事エリアについては、土砂やコンクリート再生砕石で埋め戻した状態であるため、工事期間中は粉塵防止の観点から頻繁に散水を実施している。なお、撤去工事完了から新2号機建設工事着工までは、約1年半あることから、土壌固化剤を全面的に散布することにより、抜本的な粉塵防止対策を実施している。

表-5.6.2.1 撤去発生品目一覧表（発生量，リサイクル率）³³⁾

屋外ヤード撤去工事			
発 生 品 目		数 量	リサイクル率
有価物	鉄屑，機械類，非鉄屑	13,145t	100%
安定型	コンクリート殻	埋戻し材	48,073t 100%
	アスファルト殻	アスコンガラ	981t 100%
	雑材	耐火キャスト，コンパベルト等	500t 70%
		ガレキ	17t 100%
	一般保温材		94t 100%
管理型	雑材	石膏ボード(再利用)	8t 100%
		石膏ボード，煙突ライニング	762t 0%
		木くず	21t 100%
特別管理型	アスベスト含有保温材	廃石綿，タイベックス	118t 100%
合 計		63,719t	98.6%

（上表は取放水設備の撤去が含まれる「屋外撤去工事ヤード」の実績）

電力施設解体コンクリートの有効利用については，平成13～16年度に実施された電力共同研究³⁵⁾の成果として「電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリートの設計施工指針（案）（土木学会コンクリート委員会）」が発刊されている。同施工指針においては，撤去コンクリートから簡易処理のみで製造した再生骨材を用いたコンクリートの各種性能試験を行った結果，通常のコンクリートと比較して若干性能は落ちるものの，通常のコンクリート構造物に要求される性能を確保できることが示されている。

また，東京電力(株)館ら⁸⁶⁾は，再生骨材コンクリートの構造用コンクリートへの適用拡大を図るため，発電所の事務所建物の解体に伴って発生したコンクリート塊から再生骨材を製造（図-5.6.2.3,4）し，実構造物への適用を図るとともに長期性状を含む品質確認を行っている。

その結果，再生粗骨材のみを使用した場合，適切な品質管理により普通コンクリートと同様に実構造物へ適用可能であること，再生細骨材を用いた場合でも一定の置換率であれば所定の品質を得ることが可能であることを確認している。

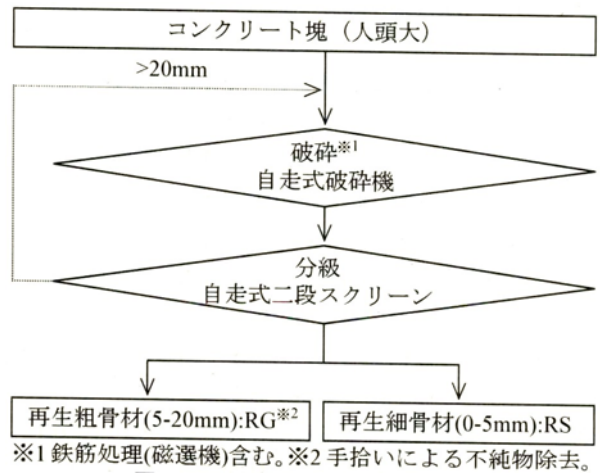


図-5.6.2.3 再生骨材の製造フロー⁸⁶⁾

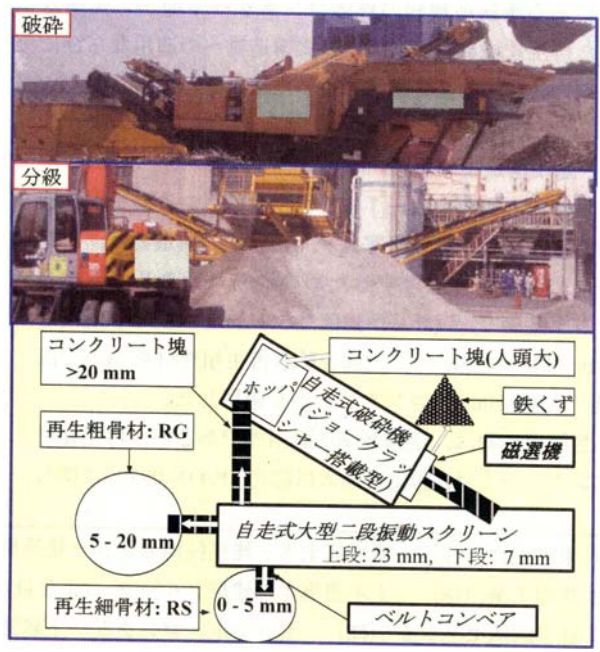


図-5.6.2.4 再生骨材製造状況⁸⁶⁾

5.6.3 耐震設計に関する基準類の変遷

土木構造物の設計基準類については、昨今、性能照査型基準への移行が図られつつあるなど年代とともに変遷してきている。このような状況から、火力リプレース計画においては、発電所土木設備の流用の可否を検討する際、建設当時における設計基準類の確認および最新の設計基準類による照査（特に、耐震照査）の実施方法が課題となる。

現在、火力発電所における土木構造物の耐震設計に適用されている主な設計基準を表-5.6.3.1に示す。

なお、頻度は非常に少ないが、原子力発電所屋外土木構造物の耐震性能照査指針³⁷⁾、原子力発電所屋外土木構造物の構造健全性に関するガイドライン⁶²⁾なども準用する場合がある。

表-5.6.3.1 主な技術基準類

名 称	出版年月	出版元
2007年制定 コンクリート標準示方書（設計編） ⁵⁴⁾ " " (維持管理編) ⁵³⁾	2007.12	(社)土木学会
道路橋示方書・同解説（V耐震設計編） ¹⁷⁾	2002. 3	(社)日本道路協会
港湾の施設の技術上の基準・同解説 ⁴⁸⁾	2007. 7	(社)日本港湾協会
火力発電所の耐震設計規程 JEAC3605-2009 ⁸⁵⁾	2010. 3	(社)日本電気協会 火力専門部会

(1) 道路橋の耐震設計基準の変遷^{6,17)}

現行の道路橋に関する耐震設計基準は、1923年（大正12年）の関東地震における被害を契機に1926年に制定された「道路構造に関する細則案 第2章 橋梁」を、その後に発生した地震被害の経験をもとに改訂を重ねたものである。（表-5.6.3.2）

なお、本基準に規定されている「震度法」は、動的に作用する地震力を、静的な慣性力に置き換えて構造設計を行うものであるため、その概念の単純明快さと計算の簡便さから、耐震設計の中心的な計算方法として現在まで用いられてきている。

表-5.6.3.2 耐震設計基準の変遷（道路橋）

制改定年	名 称	耐震設計の概要
1926年	道路構造に関する 細則案 第2章 橋梁	<ul style="list-style-type: none"> 耐震計算法と設計震度：最強地震を考慮（具体的な計算法の規定なし） 液状化対策：規定なし
1939年	鋼道路橋設計示方書案	<ul style="list-style-type: none"> 耐震計算法と設計震度：水平加速度 0.2g, 鉛直加速度 0.1g を標準 液状化対策：規定なし
1956年	鋼道路橋設計示方書	<ul style="list-style-type: none"> 耐震計算法と設計震度：水平震度 0.1～0.35 とし，地盤別，地域別に9種類に分類して規定 液状化対策：規定なし
1971年	道路橋耐震設計指針	<ul style="list-style-type: none"> 耐震計算法と設計震度：震度法（地盤別，地域別，重要度補正係数を考慮）による耐震計算，応答を考慮した修正震度法，設計水平震度 0.1～0.3 液状化対策：液状化に対する抵抗率 FL による判定，液状化の程度に応じて土層の土質定数を低減
1980年	道路橋示方書 V 耐震設計編	<ul style="list-style-type: none"> 耐震計算法と設計震度：震度法（地盤別，地域別，重要度補正係数を考慮）による耐震計算，応答を考慮した修正震度法，設計水平震度 0.1～0.3 液状化対策：液状化に対する抵抗率 FL による判定，液状化の程度に応じて土層の土質定数を低減
1990年		<ul style="list-style-type: none"> 耐震計算法と設計震度：震度法（地盤別，地域別，重要度別，固有周期補正係数を考慮）による耐震計算，設計水平震度 0.1～0.3，地震時保有水平耐力の照査を規定（設計震度 0.7～1.0） 液状化対策：液状化に対する抵抗率 FL による判定，液状化の程度に応じて土層の土質定数を低減（細粒分の影響を考慮し判定を高度化）
1996年		<ul style="list-style-type: none"> 耐震計算法と設計震度：これまでに加え，動的解析による兵庫県南部地震に対する安全性の照査などを追加 液状化対策：これまでの判定方法に対し，液状化の判定範囲を拡大（礫質土等）するとともに，流動化の影響を考慮
2002年		<ul style="list-style-type: none"> レベル1，レベル2地震動の設定

(2) 港湾構造物の耐震設計基準の変遷^{6,48,68)}

港湾構造物の最初の設計指針は、1950年5月に刊行された「港湾工事設計示方要覧」であるが、1979年の「港湾法」改正において、“港湾施設は法律上、必要な技術基準に適合すべきである”ことが定められたことから、これを受けて、現行の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」が発刊されている。

なお、同基準は、1995年1月の兵庫県南部地震における被災事例や国際規格への対応の観点から、近年、従来の仕様規定型から全く新しい性能規定型へ移行するなど、適宜、改正されている。(表-5.6.3.3)

表-5.6.3.3 耐震設計基準の変遷（港湾構造物）

制改定年	名 称	耐震設計の概要
1950年	港湾工事設計示方要覧	・地盤の良否、構造物の重要度、地理的条件を考慮した設計震度(0.05～0.30)
1967年	港湾構造物設計基準	・設計震度は地域別震度(0.05～0.15)、地盤種別(0.8～1.2)、重要度(0.5～1.5)の積 ・液状化の予測法を記載
1979年	港湾の施設の 技術上の基準・同解説	・地域別震度の見直し、4ランクの重要度(0.5～1.5)
1999年		・限界状態設計法の導入 ・耐震強化施設の対象を拡大
2007年		・信頼性設計手法の導入 ・地震動の周波数特性や構造物の変形量を考慮した新しい耐震設計手法の規定

(3) 火力発電所の耐震設計規程の変遷⁸⁵⁾

火力発電所の耐震設計規程は、「火力発電所の耐震設計指針」として1983年12月に初版発行され、その後、兵庫県南部地震の反映により改正された法令や基準との整合を図り、第10回日本電気技術企画委員会(1999年7月)において民間自主規格として承認され発刊されたものである。なお、同規程は、その後改正された法令や技術基準との整合を図るため、改正が行われている。(表-5.6.3.4)

表-5.6.3.4 耐震設計規程の変遷（火力発電所）

制改定年	名 称	耐震設計の概要
1999年	火力発電所の耐震設計 規程 JEAG 3605-2009	・震度法、修正震度法 ・応答変位法（地震時の地盤変形の影響を大きく受ける構造物）
2004年		・レベル1、レベル2地震動の設定
2009年		・性能規程型の設計手法の導入 ・地震動設定手法の充実

6章 今後の技術検討に関する提言

6 今後の技術検討に関する提言

6.1 はじめに

5章までに、リプレースの事例、ならびに関連する諸技術についての調査結果を示した。ここでは、これらの知見ならびに分科会委員の経験等を踏まえ、今後のリプレースにおいて参考となると考えられる主要な事項について、分科会で議論した結果をとりまとめ、「現状」と「今後の方向性」として以下に示す。

6.2 現状

(1) 既設土木構造物の性能について

公衆災害の可能性や発電設備の重要度を考慮して、設備所有者は構造物に対する要求性能を決定している。構造物に対する要求性能は、①常時使用できる状態を保持、②レベル1の地震動まで使用できる状態を保持の2つに大別される。

(2) 耐久性照査における各種設定値について

コンクリート構造物の健全性に対する調査及び試験方法は様々な方法が提案、実用化されている。調査・試験内容はコンクリート構造物毎に設定する必要はあるものの、調査・試験の項目及び数量、評価方法は全て設備管理者の裁量に委ねられている。

(3) ライフサイクル評価について

ライフサイクル評価で必要となる劣化予測手法は統計的予測モデルの手法、塩害等劣化機構をモデル化した手法が提案されているが、リプレースの検討において、試行的な検討に留まっている。実用化に至っていない要因として、統計的予測モデル手法の場合、外観調査結果に基づき各部材を劣化状況に応じて複数の劣化度に分類し、各劣化度の割合を算定し、将来における各劣化度の割合を推定する手法であるが、割合の数値と構造物の性能確保の関係が直接的ではないため、どの段階で補修を行なうこととするか決めることが難しいこと等が挙げられる。劣化モデル手法の場合、部材毎に塩化物イオン濃度のバラツキが大きいこと、限界塩分濃度が異なること、鉄筋腐食速度が異なる等が挙げられる。その結果、ライフサイクルコスト評価も試行的な検討に留まっている。

6.3 今後の方向性

(1) 既設土木構造物の性能について

既設土木構造物の性能は、各設備毎に公衆災害や発電に及ぼす影響を把握した上で、設備管理者の判断で設定する必要がある。また一般に構造物に要求される性能としては、耐久性、安全性、使用性、耐震性などが挙げられるが、設備によっては、地震により被災した場合、低下した性能を短期間にかつ安価に回復させ、継続的に使用しなければならない場合があると考えられる。よって例えば復旧性などを視野に入れた性能を設定するなど、今後は既設構造物の性能設定の方向性について検討する必要があると

考えられる。

(2) 耐久性照査における各種設定値について

耐久性照査における一般的な限界塩分濃度(1.2kg/cm²)を超えても錆が生じていない事例があることから、限界塩分濃度は、既設構造物において、現地調査にて設定するのが望ましいと考えられる。また既設構造物の場合は、限界塩分濃度に加えて、現地調査にて表面塩分濃度や塩化物イオンの拡散係数などを設定することが合理的な照査をする上で重要と考えられる。

(3) ライフサイクルコスト評価について

ライフサイクルコストの評価においては、予定供用期間を設定し、確保すべき性能とそのレベルを設定した上で、具体的なライフサイクルコストを算出することになる。これに必要な劣化予測方法（補修の効果および補修した構造物の劣化予測を含む）や補修工法の選定方法に関する諸技術の研究、開発を重点的に行い、方法を確立していくことが必要である。このためには、劣化や補修に関する調査データを蓄積するとともに、成果を積極的に公表していくことが必要であると考えられる。また、劣化と構造物の性能の関係を明らかにしていく研究も必要である。さらには、補修や維持管理に係わるコストについての情報をデータベース化し、共有していくことも有効な方法であると考えられる。

(4) 廃棄物の有効利用について

火力発電所リプレース時に土木および建築工事において、残土やコンクリート塊などの廃棄物が大量に発生する。これに対し、例えば建築建屋を解体した場合に発生するコンクリート塊を、マット基礎等の構造物の再生骨材コンクリート・路盤材・液状化対策の盛土材などに活用するなど、土木・建築一体となって廃棄物を極力構内で有効利用すべきであると考えられる。

火力発電所リプレースに関する文献調査：概要

番号	年月	題名	著者	雑誌名	出版元
1	1988	コンクリート構造物の耐用年数評価のための劣化予測式の検討と考察	北見工業大学 桜井 宏	年次論文集	日本コンクリート工学協会
2	1993.07	電着工法を利用した海洋コンクリート構造物の補修と防食について	四国電力(株) 武山他2名	電力土木(246号)	電力土木技術協会
3	1995.02	臨海コンクリート設備の塩害に関する維持管理手引き			土木学会
4	1995.09	荻田発電所新1号機再開発に伴う取水設備の健全度診断	九州電力 橋本氏ほか	電力土木	電力土木技術協会
5	1998.01	コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書	—		日本コンクリート工学協会
6	1999.08	阪神・淡路大震災調査報告⑤-土木構造物の被害原因の分析-第3章 耐震設計基準の変遷			土木学会
7	2000	塩害劣化を受けるRC構造物の劣化予測	東電設計 中川貴之	年次論文集	日本コンクリート工学協会
8	2000	劣化メカニズムを考慮した鉄道コンクリート構造物の維持管理技術に関する基礎的研究	鉄道総研 佐々木孝彦	鉄道輸送機構	鉄道輸送機構
9	2000.03	川崎火力発電所リフレッシュ計画における取水口・放水口の形状設定	東京電力(株) 榊原ほか	電力土木	電力土木技術協会
10	2000.06	実務者のためのコンクリート構造物の維持管理マニュアル	土木工事技術委員会 コンクリート構造物維持管理マニュアル作成ワーキンググループ		日本土木工業協会

火力発電所リプレースに関する文献調査：概要

番号	年月	題 名	著 者	雑誌名	出版元
11	2001	鉄筋腐食劣化を考慮したRC部材の性能評価の評点化手法	片山ストラテック(株) 岸 雅之	年次論文集	日本コンクリート工学協会
12	2001.05	海岸コンクリート構造物の劣化診断技術	九州電力 古賀氏ほか	電力土木	電力土木技術協会
13	2001.06	社会資本マネジメント[維持管理・更新時代の新戦略]	笠原 篤ほか		森北出版
14	2001.07	海面上における鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化補修工法（電気防食工法の適用）	中部電力(株)西尾他2名	電力土木(294号)	電力土木技術協会
15	2002	鉄筋コンクリート橋の塩害劣化を考慮した性能評価に関する一考察	(株)建設技術研究所 澤田 吉孝	年次論文集	日本コンクリート工学協会
16	2002.01	電気化学的防食工法 設計施工指針（案） （コンクリートライブラリー107）	—		土木学会
17	2002.03	道路橋示方書・同解説（V 耐震設計偏 など）			日本道路協会
18	2002.3～ 2003.1	【講座】電力土木技術者のための環境影響調査・評価手法 第1回～第6回	(財)電中研 宮永ほか	電力土木	電力土木技術協会
19	2002.11	社会基盤のメンテナンス	石井 一郎		理工図書
20	2003.01	塩害および化学的侵食により劣化した護岸（直立型消波ブロック式）の補修対策	九州電力 前川氏ほか	電力土木	電力土木技術協会
21	2003.03	導水路コンクリート構造物の劣化度診断に関する研究	九州電力 大坪 重幸	電力土木	電力土木技術協会

火力発電所リプレースに関する文献調査：概要

番号	年月	題名	著者	雑誌名	出版元
22	2003.06	コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2003-			日本コンクリート工学協会
23	2003.08	アセットマネジメント導入への挑戦ー新たな社会資本マネジメントシステムの構築に向けてー	土木学会建設マネジメント委員会 アセットマネジメント研究小委員会		土木学会
24	2003.11	劣化リスクの定量的な評価に基づく土木設備の補修時期および補修方法の最適化	東京電力(株)福本他1名	電力土木(308号)	電力土木技術協会
25	2003.11	電気防食(点状陽極)による鉄筋コンクリート塩害劣化補修工法	中国電力(株)末次他2名	電力土木(308号)	電力土木技術協会
26	2004.01	経済的寿命を考慮した最適修繕政策	織田澤利守・石原克治・小林潔司・近藤佳史	論文集	土木学会
27	2004.03	社会基盤メンテナンス工学	土木学会建メンテナンス工学連合小委員会		東京大学出版
28	2004.03	電力流通設備におけるライフサイクルマネージメントの動向と将来展望	電気協同研究会 研究討論会	第59巻 第2号	電気共同研究
29	2004.03	材料劣化を考慮したコンクリート構造物の構造安全性能評価手法の開発	東京大学 加藤佳孝		新エネルギー・産業技術総合開発機構
30	2004.06	土木施設維持管理マニュアル	—		東京埠頭公社
31	2004.06	栈橋劣化調査・補修マニュアル	—		東京埠頭公社

火力発電所リプレースに関する文献調査：概要

番号	年月	題名	著者	雑誌名	出版元
32	2003. 3	既設放水路の流用検討と内部補修の施工	東京電力(株) 田中ほか	電力土木(286号)	電力土木技術協会
33	2004. 11	磯子火力発電所 撤去工事の概要 (土木工事の環境対策)	電源開発(株) 河村ほか	電力土木	電力土木技術協会
34	2005. 03	塩害劣化した鉄筋コンクリートに対する補修効果の定量評価	東京電力(株)堤他1名	電力土木(316号)	電力土木技術協会
35	2005. 03	電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリート設計施工指針(案)の概要	日本原子力発電(株) 高橋ほか	電力土木	電力土木技術協会
36	2005. 04	表面保護工法 設計施工指針(案) (コンクリートライブラリー-119)	—		土木学会
37	2005. 06	原子力発電所屋外土木構造物の耐震性能照査指針			土木学会
38	2005. 11	塩害環境下におけるコンクリート構造物の維持管理	北海道開発土木研究所		北海道開発土木研究所
39	2005. 11	アセットマネジメント導入への挑戦	土木学会建設マネジメント委員会 アセットマネジメント研究小委員会		土木学会
40	2006. 03	アセットマネジメントのための港湾構造物の劣化に対応した維持・補修(補強)工法の選定手法の検討	東洋大学工学部環境建設学科 福手 勤	平成16年度(財)港湾空港建設技術サービス研究開発助成報告書	港湾空港建設技術サービスセンター
41	2006. 03	土木構造物のライフサイクル総合評価システムの開発「LCアシスト」	前田建設工業(株) 伊藤氏他	電力土木	電力土木技術協会
42	2006. 03	コンクリート耐久性診断・評価システムの開発	(株)奥村組 栗本氏他	電力土木	電力土木技術協会
43	2006. 08	実践 土木のアセットマネジメント 「やりくり」で防ぐ社会資本の荒廃	阿部 充		日経BP社

火力発電所リプレースに関する文献調査：概要

番号	年月	題名	著者	雑誌名	出版元
44	2007	取放水系鉄筋コンクリート構造物の健全性評価手法の構築	電力中央研究所 松村卓郎	研究概要	地球工学研究所 環境科学研究所
45	2007	鉄筋コンクリート構造物の塩害評価	電力中央研究所	研究報告書	電力中央研究所
46	2007.05	外部塩害を受ける海岸部鉄筋コンクリート構造物の腐食劣化進行予測の高度化	四国電力(株) 田中氏他	電力土木	電力土木技術協会
47	2007.05	表面保護工法による鉄筋コンクリート構造物の塩害抑制効果に関する検討	中部電力(株) 河村氏他	電力土木	電力土木技術協会
48	2007.07	港湾の施設の技術上の基準・同解説			日本港湾協会
49	2007.07	コンクリート構造物の補強指針(案) (コンクリートライブラリー95)	—	土木学会	土木学会
50	2007.11	電気防食工法の維持管理支援システムと栈橋上部工PC桁への適用	東亜建設工業(株)網野他2名	電力土木(332号)	電力土木技術協会
51	2007.11	新しいコンセプトの断面修復湿式吹付け工法の開発と補修・補強工事への適用	飛島建設(株)名倉他2名	電力土木(332号)	電力土木技術協会
52	2007.11	仙台火力発電所リプレース計画	東北電力(株) 羽鳥ほか	電力土木	電力土木技術協会
53	2007.12	コンクリート標準示方書(維持管理編)			土木学会
54	2007.12	コンクリート標準示方書(設計編)			土木学会
55	2007.5	表面保護工法における鉄筋コンクリート構造物の塩害抑制効果に関する検討	中部電力(株)河村他1名	電力土木(329号)	電力土木技術協会
56	2008	塩害環境下にあるコンクリート構造物の鉄筋腐食性状に関する研究	東京大学生産技研 横田 弘	生産研究	東京大学

火力発電所リプレースに関する文献調査：概要


番号	年月	題名	著者	雑誌名	出版元
57	2008.01	鉄筋コンクリート構造物の劣化・耐久性診断方法	湯浅 昇	日本コンクリート工学協会	日本コンクリート工学協会
58	2008.01	電力土木コンクリート構造物の劣化実態調査	北陸電力(株) 参納 千夏男	電力土木	電力土木技術協会
59	2008.02	土木技術者のためのアセットマネジメントーコンクリート構造物を中心としてー	宮川豊章・保田敬一・岩城一郎・横田弘・服部篤史	論文集	土木学会
60	2008.03	高経年期を迎える電力流通設備の円滑な取替えに備えてー高度成長期に建設された設備のアセットマネジメントー	電気協同研究会 研究討論会	第63巻 第5号	電気協同研究
61	2008.05	福井火力発電所1号機廃止措置に係る土木工事の概要	北陸電力(株) 大井ほか	電力土木	電力土木技術協会
62	2008.07	原子力発電所屋外土木構造物の構造健全性に関するガイドライン			土木学会
63	2008.09	光学センサーを用いたコンクリート構造物の健全度評価法の提案	OSMOS協会 門 万寿男		土木学会
64	2008.11	赤外線サーモグラフィによるコンクリート劣化診断システム	五洋建設(株) 谷口 修	電力土木	電力土木技術協会
65	2008.11	コンクリート表面のひび割れ幅評価方法	(株)間組 庄野 昭	電力土木	電力土木技術協会
66	2008.11	栈橋上部の塩害劣化要因の不確定性を考慮した劣化進行予測および将来価値評価システムの開発	東亜建設工業(株) 網野氏他	電力土木	電力土木技術協会
67	2008.11	コンクリート構造物のアセットマネジメント支援システム	清水建設(株) 石井氏他	電力土木	電力土木技術協会

火力発電所リプレースに関する文献調査：概要

番号	年月	題名	著者	雑誌名	出版元
68	2008.11	港湾基準改正について（第4回）-新しい耐震性能照査法-	国土技術政策総合研究所 長尾	電力土木	電力土木技術協会
69	2008.12	火力・原子力発電所コンクリート構造物の維持管理に関する研究-ひび割れ診断エキスパートシステムの開発-	北海道電力 水口 洋北ほか	研究年報	北海道電力
70	2009.01	コンクリート診断技術'09	—		日本コンクリート工学協会
71	2009.01	基礎構築後における既製コンクリート杭の健全度調査手法	東北電力(株) 佐々木 牧夫	電力土木	電力土木技術協会
72	2009.01	ライフサイクルマネジメントによる電力施設の維持管理（第1回）-概論および鋼構造設備の維持管理-	(財)電力中央研究所 山本氏	電力土木	電力土木技術協会
73	2009.02	経年劣化した鉄筋コンクリート製地中構造物の構造性能評価に関する検討（その2）	電力中央研究所 松尾豊史		電力中央研究所
74	2009.03	コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2009-	—		日本コンクリート工学協会
75	2009.03	ライフサイクルマネジメントによる電力施設の維持管理（第2回）-コンクリート設備の維持管理-	東京電力(株) 堤氏	電力土木	電力土木技術協会
76	2009.05	ライフサイクルマネジメントによる電力施設の維持管理（第3回）-保全履歴データベースの活用技術-	(財)電力中央研究所 朱牟田氏	電力土木	電力土木技術協会
77	2009.06	コンクリート表面のひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定手法	地球工学研究所 西内氏	研究報告書	電力中央研究所
78	2009.07	ライフサイクルマネジメントによる電力施設の維持管理（第4回）-ライフサイクル環境分析・評価-	横浜国立大学 本間 祐樹	電力土木	電力土木技術協会

火力発電所リプレースに関する文献調査：概要

番号	年月	題 名	著 者	雑誌名	出版元
79	2009.07	経年劣化した鉄筋コンクリート製地中構造物の構造性能評価に関する検討（その5）	電力中央研究所 松村卓郎	研究報告書	電力中央研究所
80	2009.07	経年劣化した鉄筋コンクリート製地中構造物の構造性能評価に関する検討（その3）	電力中央研究所 松尾豊史	研究報告書	電力中央研究所
81	2009.07	経年劣化した鉄筋コンクリート製地中構造物の構造性能評価に関する検討（その4）	電力中央研究所 宮川義範	研究報告書	電力中央研究所
82	2009.07	経年劣化した鉄筋コンクリート製地中構造物の構造性能評価に関する検討（その6）	電力中央研究所 松尾豊史	研究報告書	電力中央研究所
83	2009.09	電力設備のマネジメント	東京電力 堤 知明		日本コンクリート工学協会
84	2009.09	経年劣化した鉄筋コンクリート製地中構造物の構造性能評価に関する検討（その1）	電力中央研究所 松尾豊史	研究報告書	電力中央研究所
85	2010.03	火力発電所の耐震設計規程 JEAC 3605-2009			日本電気協会火力専門部会
86	2010.07	骨材置換による再生骨材コンクリートの実構造物への適用	東京電力(株) 館ほか	年次論文集	日本コンクリート工学協会



既設火力発電所リプレースにおける 土木構造物に係わる技術検討 報告書

平成22年12月

土木学会 エネルギー委員会 新技術・エネルギー小委員会
火力発電所のリプレースに関する技術分科会

1



背景と目的

背景

- ・火力発電所は、最大出力合計が発電設備全体の約6割を占める主要な電源設備。
- ・2000年代に入り、既設のユニットを撤去して新たなユニットを設置する、いわゆるリプレースの計画が検討、実施される例が増加。
- ・リプレースに伴う土木構造物の取扱いの実態や検討内容が整理された例は少ない。

目的

火力発電所のリプレースおよびその検討に要する諸技術について、既存の技術や最新の技術動向を調査するとともに、今後の方向性についての議論を行う。

2

火力発電所のリプレースに関する技術分科会委員構成

主査 松村 卓郎（電力中央研究所）
 幹事 中野 修（東京電力） 幹事 寺浦 努（電源開発）
 委員 田島 陽一（北海道電力） 委員 佐藤 智（東北電力）
 委員 中本 利正（北陸電力） 委員 菊地 宏（中部電力）
 委員 村本 荒喜（関西電力） 委員 山村 淳一（中国電力）
 委員 中廣 政之（四国電力） 委員 丸山 光浩（九州電力）
 <退任委員>
 委員 田中 則和（北海道電力） 委員 大宮 宏之（東北電力）
 委員 舘 宏樹（北陸電力） 委員 野口 幹夫（北陸電力）
 委員 鈴木 英治（中部電力） 委員 菊池 憲司（中部電力）
 委員 審 浩年（関西電力） 委員 西川 亨（関西電力）
 委員 角田 秀昭（中国電力） 委員 杉本 達弘（四国電力）
 委員 立川 貴重（四国電力）

3

検討スケジュール

項目	平成20年度		平成21年度				平成22年度			
小委員会	▲ 7/30 第1回	▲ 1/21 第2回	▲ 7/2 第3回	▲ 1/19 第4回					▲ 9/8 第5回	
委員構成 の検討	—————									
分科会 の開催	◆ 9/30 第1回	◆ 12/9 第2回	◆ 3/10 第3回	◆ 6/18 第4回	◆ 9/17 第5回	◆ 12/15 第6回	◆ 3/9 第7回	◆ 5/25 第8回	◆ 7/29 第9回	◆ 10/14 第10回
検討方針 の策定	—————									
現状把握 課題分析		—————	—————	—————	—————	—————	—————			
取り纏め						—————	—————	—————	—————	

平成20年度，平成21年度は，3か月に1回，平成22年度は2か月に1回の頻度で分科会を開催し，検討を行った。

4

活動の概要

(1) 検討の概要

- ・火力発電所のリプレースの検討手順や項目の洗い出しを行い、主要な構成を抽出。
- ・これらについて、電気事業者へのアンケートを行い、リプレースの事例を収集、整理するとともに、文献調査により関連技術についても情報を収集し、整理。
- ・事例や関連技術の情報、さらには分科会委員の経験等を踏まえて、今後のリプレースの方向性についても議論。

(2) 報告書の作成

- ・記録が残っているリプレースの事例は予想したよりも少なく、検討の詳細が不明なものが多かったものの、現状としてのリプレースの検討内容を事例として整理、掲載。
- ・最新の関連する諸技術を広範囲に収集、整理、掲載。
- ・現状を踏まえた今後の方向性についての議論をとりまとめ、提示。

5

報告書 目次 (1 / 2)

1章	既設火力発電所の現状	← 電気新聞記事等の分析
2章	既設火力発電所のリプレース事例	
2.1	リプレースの理由	各社へのアンケート調査
2.2	流用した土木設備	
2.3	残置した土木設備	
3章	流用する主要土木構造物の評価・技術対策	
3.1	既設構造物の健全度評価	}
3.2	補修および補強工法	
3.3	劣化予測	
3.4	ライフサイクルコスト評価	}
4章	残置する土木設備の残置方法	
5章	関連する諸技術	}
5.1	維持管理および点検・調査	
		文献調査

6

報告書 目次 (2 / 2)

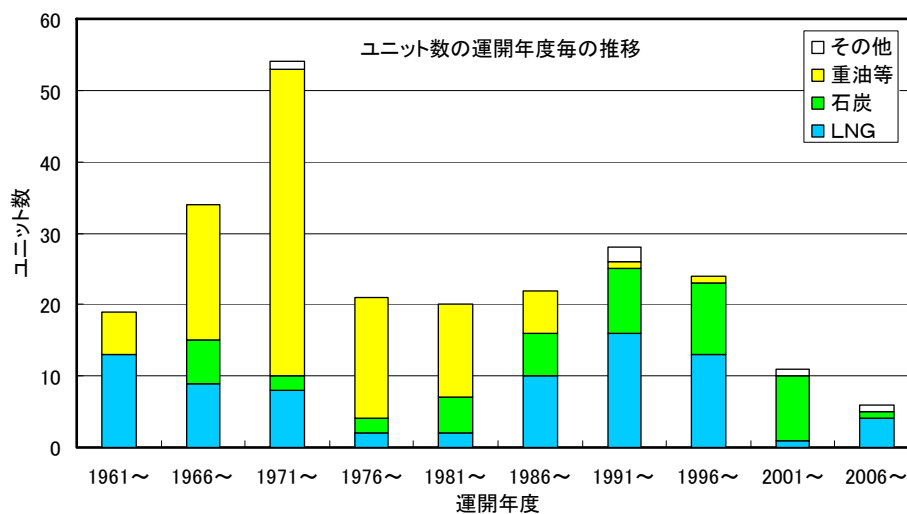
5.2 性能評価および健全度評価	}	文献調査
5.3 補修方法		
5.4 劣化予測方法		
5.5 ライフサイクルコストの評価方法		
5.6 その他(残置方法, 環境対策, 耐震設計基準類の変遷)		
6章 今後の技術検討に関する提言	}	分科会での議論
6.1 はじめに		
6.2 現状		
6.3 今後の方向性		

文献一覧

7

1章 既設火力発電所の現状

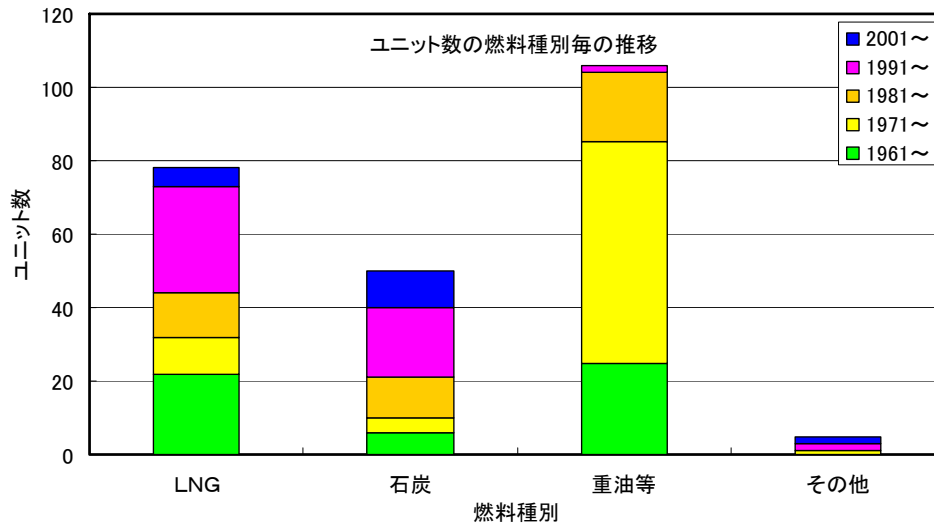
- 現状：営業運転中88発電所，建設中9発電所，計画中10発電所
(沖縄電力・共同火力除く，平成20年9月22日付け電気新聞より)
- 1970年代前半：重油火力がピーク
- 1980年代後半以降：重油火力が激減し，LNG火力・石炭火力が急増



8

1章 既設火力発電所の現状

- 燃料種別では、重油火力が最も多く、石炭火力が最も少ない。
 - LNG火力、石炭火力は、1990年代以降に運開したものが多く。
 - 重油火力は、1980以前の経過年数30年を超えた火力が多い。
- 今後リプレース火力発電所の増大の可能性



9

2章 既設火力発電所のリプレース分析

- 電力10社にリプレース火力発電所に関するアンケート調査を実施。
- 基本事項として、リプレースの理由、流用・残置した設備の種類、設定した要求性能の種類、健全度調査の項目、LCC評価や再生骨材使用の実施有無、今後の課題など。
- 詳細事項として、検討の具体的な内容を自由形式で。

↓

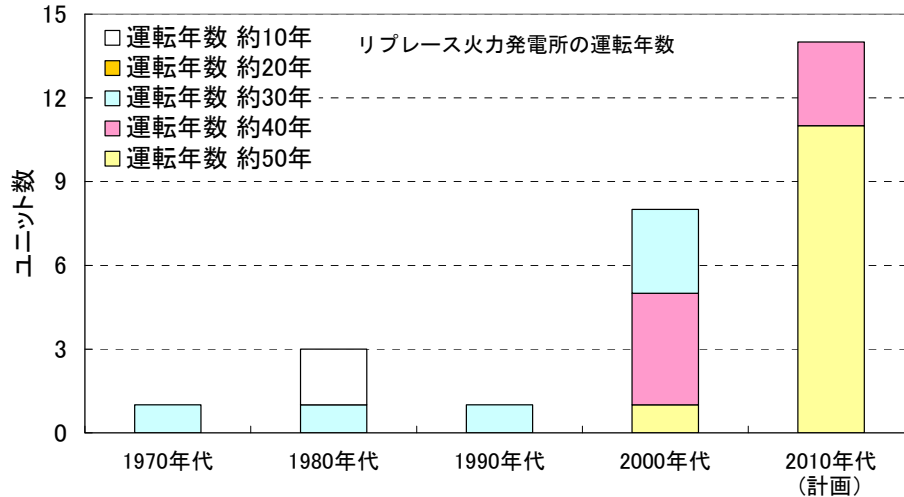
- リプレースの実施数は13ユニット、計画が14ユニット。
- リプレースの理由、流用・残置した設備の種類などを把握。
- 詳細な流用検討記録が残っていたのは2ユニット（3章に記載）。
- LCC評価や再生骨材コンクリート使用実績はほぼ皆無。
- 劣化予測の精度向上、鉄筋腐食発生の限界塩分濃度の合理化、LCC評価のためのデータ蓄積等が課題。

10

2章 既設火力発電所のリプレース分析

2.1 リプレースの理由

- 電力10社にリプレース火力発電所に関するアンケート調査を実施.
- 1970～1990年代：運転年数30年程度のリプレースが多い.
- 2000年代以降：運転年数30～50年のリプレースが多い.

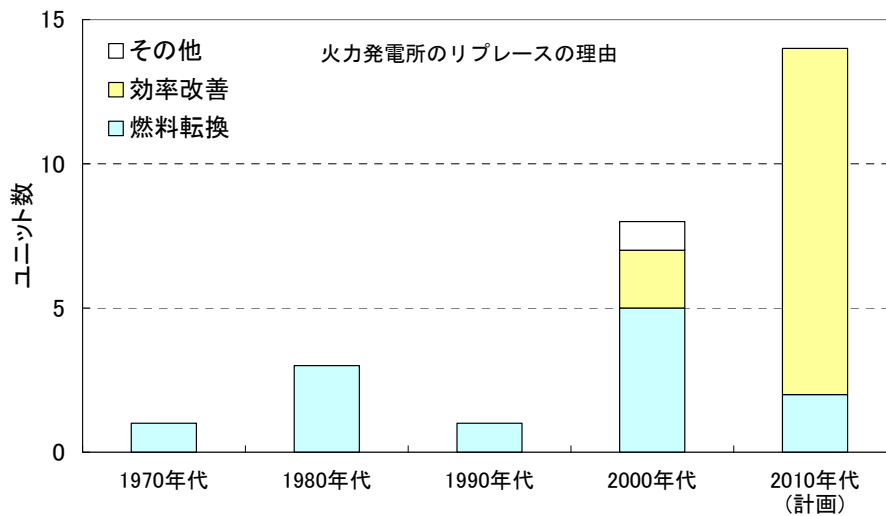


11

2章 既設火力発電所のリプレース分析

2.1 リプレースの理由

- 1970～1990年代：燃料転換
- 2000年代以降：効率改善が急増し、燃料転換が減少
→ 火力発電所の高経年化に起因していると推察



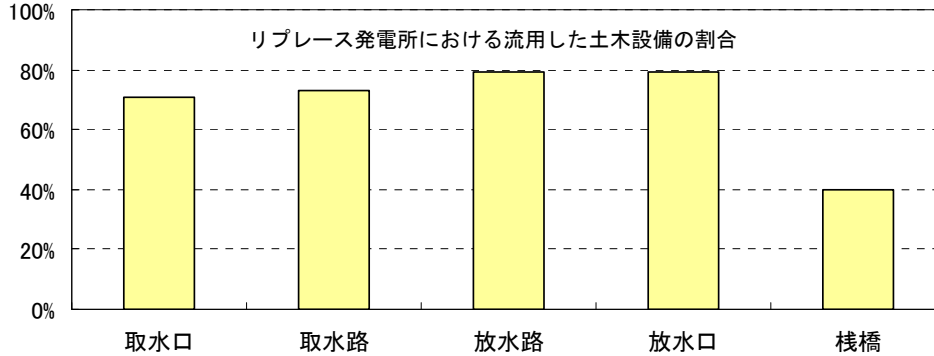
12

2章 既設火力発電所のリプレース分析

2.2 流用した土木設備

○リプレースで何らかの土木設備を流用した発電所の割合は9割を超えていた。

○復水器冷却用水路では、放水路、取水路の順に流用した割合が多い。



2.3 残置した土木設備

○リプレースで土木設備を残置した発電所の割合は50%程度。

○残置した設備：復水器冷却用水路、棧橋

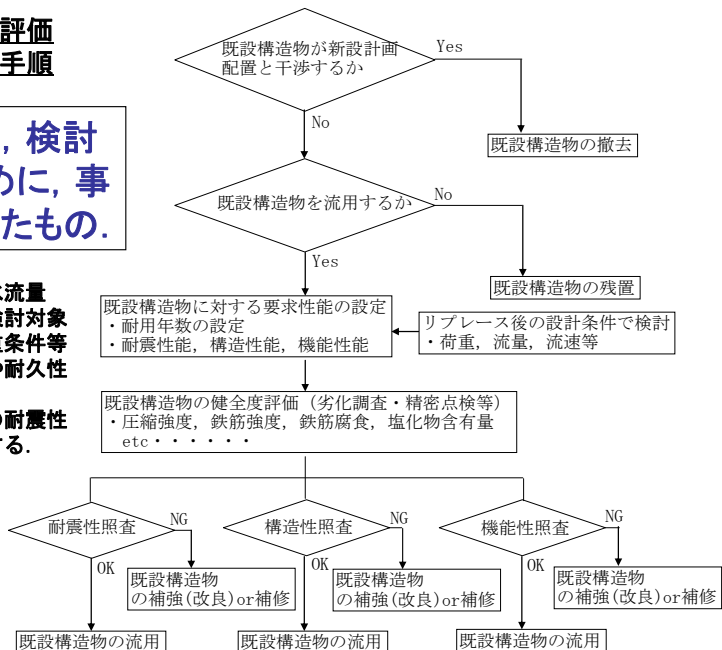
3章 流用する主要土木構造物の評価・対策技術

3.1 既設構造物の健全度評価

3.1.1 基本的な検討の手順

アンケート実施前に、検討項目を洗い出すために、事例を参考に、作成したもの。

- 機能性：リプレースにより取水流量が増加した場合等が検討対象
- 構造的：リプレースにより荷重条件等が変更になった場合や耐久性等が検討対象
- 耐震性：流用設備にどこまでの耐震性を付与するのか設定する。



土木設備流用フロー

3章 流用する主要土木構造物の評価・対策技術

3.1.3 照査例①（品川火力発電所，放水路）

「既設放水路の流用検討と内部補修の施工，電力土木，No.286，2003.3，p52-55」より一部抜粋

※要求性能

- ・機能性：放水流量 $26.86\text{m}^3/\text{s}$ （リプレース前 $14\text{m}^3/\text{s}$ ）
- ・構造的性：鉄筋の腐食進行を抑制する
- ・耐震性：常時・L1地震時 → 弾性範囲内の状態を保持（耐震性能1）
L2地震時 → 靱性も考慮した耐震性の保持（耐震性能2）

1. 機能性の照査

放水流量 $Q=26.86\text{m}^3/\text{s}$ （リプレース前 $Q=14\text{m}^3/\text{s}$ ）に対し，流速と損失水頭の照査を実施し，通水可能と判断。

- 制限流速： $V=0.54\sim 2.23\text{m/s}<3.0\text{m/s}$
（流水によるキャビテーションの制限）
- 損失水頭： $h_f=2.11\text{m}<2.35\text{m}$
（放水路上下流の水面高低差以内）

15

3章 流用する主要土木構造物の評価・対策技術

3.1.3 照査例①（品川火力発電所，放水路）

「既設放水路の流用検討と内部補修の施工，電力土木，No.286，2003.3，p52-55」より一部抜粋

2. 構造的性(耐久性)の照査

コンクリート中の塩化物イオン含有量が多いが，塩化物イオンによる鉄筋腐食の進行を将来に亘り防止できれば，概ね健全であると考え，流用可能と判断。

品川放水路調査項目

調査項目	点検内容	数量	点検結果
外観目視調査	目地，ひび割れ，漏水状況等の調査	放水路全体	放水路全体に錆汁は散在してみられるが，骨材露出が10数箇所見られる程度であり，ひび割れからの漏水は滲む程度である。
圧縮強度試験(コア)	圧縮強度測定	17ヶ所	平均 $34.6\text{N}/\text{mm}^2(>24\text{N}/\text{mm}^2)$
圧縮強度試験(シュミットハマ)	圧縮強度測定	79ヶ所	反発硬度による推定値 平均 $35.3\text{N}/\text{mm}^2(>24\text{N}/\text{mm}^2)$
塩化物イオン含有量	塩分量測定	11ヶ所	0.29wt% (※)
中性化試験	中性化深さの測定	20ヶ所	平均中性化深さ5.3mm(理論値22.0mm)
鉄筋腐食量調査	鉄筋の腐食状況の調査	20ヶ所	被りが確保されている箇所では腐食なし。
被り試験(実測)	被り深さの実測	20ヶ所	被りは平均で焼く71mm確保されている。
被り試験(RCレーダー)	被り深さの実測	90ヶ所	被りは平均で焼く87mm確保されている。
鉄筋引張試験	内部鉄筋引張強度測定	5ヶ所	平均降伏強度 $294\text{N}/\text{mm}^2$ (SR24と推定)

(※)塩化物イオン含有量が多くても，酸素が供給されない環境であるため，発錆は抑制されている。

16

3章 流用する主要土木構造物の評価・対策技術

3.1.3 照査例①（品川火力発電所，放水路）

「既設放水路の流用検討と内部補修の施工，電力土木，No.286，2003.3，p52-55」より一部抜粋

3. 耐震性の照査（準拠基準：コンクリート標準示方書）

a. 検討条件

設計設定値と根拠

項目	設定値	設定根拠
コンクリート設計基準強度	23.3N/mm ²	圧縮試験結果の統計処理に基づき95%信頼区間の平均強度で設定.
鉄筋降伏強度	235N/mm ²	引張試験結果から使用鉄筋をSR24と推定し，降伏強度に設定.
コンクリート材料係数 γ_c	1.1	設計基準強度を圧縮試験結果のばらつきから評価したことおよび鋼材の材料係数 ($\gamma_s=1.0\sim 1.05$) を下回らないことを考慮して設定.
鉄筋材料係数 γ_s	1.0	降伏強度を引張試験結果以下に設定したため.
耐震設計用地震動	別表	新設構造物と同様に設定

設定入力地震動

地震動レベル	入力加速度	保有すべき耐震性能	遭遇する可能性	再現期間
レベル1	150gal	・液状化させない ・構造物の健全性の確保	構造物の供用期間中に起こり得る大きさの地震動	30～40年程度
レベル2	290gal	・要求機能の維持の確保	構造物の供用期間中にまれに発生する大きさの地震動	300年程度

17

3章 流用する主要土木構造物の評価・対策技術

3.1.3 照査例①（品川火力発電所，放水路）

「既設放水路の流用検討と内部補修の施工，電力土木，No.286，2003.3，p52-55」より一部抜粋

3. 耐震性の照査

b. 限界状態設計法による照査

(a) 使用限界状態の照査

通水確保という放水路の要求性能から，耐久性に影響を及ぼすひび割れ照査が対象であるが，次の理由から使用限界照査を省略。

- コンクリート中塩化物含有量は大きい，内部鉄筋が腐食していない。
- 水路内部：海水満水，躯体外側：地下水位以下のため，酸素が供給されない。

(b) 終局限界状態の照査

常時，レベル1地震時，レベル2地震時におけるそれぞれの照査を実施。すべての照査項目を満足することを確認。

照査結果

照査項目	常時	レベル1	レベル2	備考
曲げ	0.66<1.00	0.55<1.00	0.50<1.00	荷重条件が最も厳しい最深部の断面
せん断	0.95<1.00	0.80<1.00	0.95<1.00	



既設放水路は，将来に渡り現状のまま供用できるため，耐震補強は実施しない。

18

3章 流用する主要土木構造物の評価・対策技術

3.1.3 照査例②（苅田火力発電所、取水設備）

「苅田発電所新1号機再開発に伴う取水設備の健全度診断，電力土木，1995.9」より一部抜粋

2. 調査項目

調査項目	取水口		取水路	取水ピット	
	気中・干満部	水中部	水中部	気中・干満部	水中部
外観調査	227㎡	1,297㎡	2,390㎡	503㎡	1,108㎡
反発硬度	494点	18点	38点	38点	14点
非破壊鉄筋腐食診断	—	6箇所	6箇所	1箇所	6箇所
コア採取	15箇所47本	2箇所8本	3箇所12本	3箇所10本	2箇所8本
はつり調査	11箇所	2箇所	2箇所	1箇所	3箇所
鉄筋採取	8箇所14本	1箇所1本	—	—	—
コンクリート圧縮強度試験	13箇所39本	2箇所6本	2箇所9本	3箇所9本	2箇所6本
中性化試験	同上	同上	1箇所3本	3箇所7本	2箇所6本
塩化物含有量試験	8箇所8本	2箇所2本	2箇所3本	1箇所1本	2箇所2本
鉄筋成分分析	1本	—	—	—	—
鉄筋腐食評価試験	1本	1本	—	—	—
鉄筋引張試験	8箇所8本	—	—	—	—

19

3章 流用する主要土木構造物の評価・対策技術

3.1.3 照査例②（苅田火力発電所、取水設備）

「苅田発電所新1号機再開発に伴う取水設備の健全度診断，電力土木，1995.9」より一部抜粋

3. 調査項目

b. 項目別結果集約（構造性の照査）

③応力度照査

調査対象		作用応力度 (kgf/cm ²)	許容応力度 (kgf/cm ²)	備考
取水口	左岸側 (常時)	$\sigma_c = 33.6$ $\sigma_s = 1400.1$ $\tau = 3.94$	$\sigma_{ca} = 70.0$ $\sigma_{sa} = 1600.0$ $\tau_a = 7.20$	作用応力度は全て 許容応力度以内となる。
	中央部 (常時)	$\sigma_c = 36.7$ $\sigma_s = 1191.6$ $\tau = 4.16$	$\sigma_{ca} = 70.0$ $\sigma_{sa} = 1600.0$ $\tau_a = 7.20$	作用応力度は全て 許容応力度以内となる。
取水路	常時	$\sigma_c = 65.3$ $\sigma_s = 1308.5$ $\tau = 6.37$	$\sigma_{ca} = 70.0$ $\sigma_{sa} = 1600.0$ $\tau_a = 7.20$	作用応力度は全て 許容応力度以内となる。
	PFBF 格納容器 搬入時 (短期)	$\sigma_c = 55.0$ $\sigma_s = 1539.4$ $\tau = 5.51$	$\sigma_{ca} = 105.0$ $\sigma_{sa} = 2400.0$ $\tau_a = 10.80$	作用応力度は全て 許容応力度以内となる。
取水ピット (常時)	$\sigma_c = 28.6$ $\sigma_s = 723.6$ $\tau = 3.64$	$\sigma_{ca} = 70.0$ $\sigma_{sa} = 1600.0$ $\tau_a = 7.20$	作用応力度は全て 許容応力度以内となる。	

コンクリートの最大作用応力度は65kgf/cm²，鉄筋の最大作用応力度は1400kgf/cm²となっており，どちらも許容応力度以内であった。

また，限界状態設計法による評価においても耐力に余裕があることから，当該構造物は耐力的に健全であると評価した。

→将来の劣化を予防するための対策および部分的な補修を実施。

20

3章 流用する主要土木構造物の評価・対策技術

3.2 補修及び補強工法

補修事例

構造物	部位	補修工法	施工手順
取水口	上床版	スラブ打替工法	①所定の位置までコンクリート版を除去し、洗浄、清掃する。 ②既存の鉄筋を露出させ、錆落としをおこない防錆剤を塗布する。 ③既存の鉄筋に新しい鉄筋を定着させる。 ④既存コンクリートに穿孔し、新旧鉄筋に添え筋をおこなう。 ⑤中間版から立ち上げた、支保工・型枠により新設コンクリートを打設する。 ⑥定着長は鉄筋径の30倍とする。 ⑦穿孔し、添え筋を挿入した後は埋戻し材で埋戻す。
取水口 取水ピット	気中部 干満部	打継工法	①鉄筋が完全露出するまではつる。 ②鉄筋の錆落とし。 ③鉄筋・はつり面の洗浄・清掃。 ④塩害防除剤塗布。 ⑤鉄筋補強。 ⑥鉄筋防錆処理。 ⑦埋戻し整形。
取水口 取水ピット 取水路	水中部	表面被覆工法	[劣化部の処理・下地処理]①ひびわれ、コールドジョイントおよびジャンカ等の手当てを先行させる。 ②全面50mm厚にはつりを行なう。 ③鉄筋が露出したものについては、錆落とし、洗浄、塩害防除剤塗布を行なう。 ④はつり面の洗浄、清掃。 ⑤埋戻し整形 ①上記処理完了後、表面被覆を行なう。 [表面被覆：4層]
		電気防食工法	流電陽極方式 鉄筋防食 モニタリング装置有
その他		シーリング工法	コールドジョイント部は削孔を行い、シーリング材を充填。

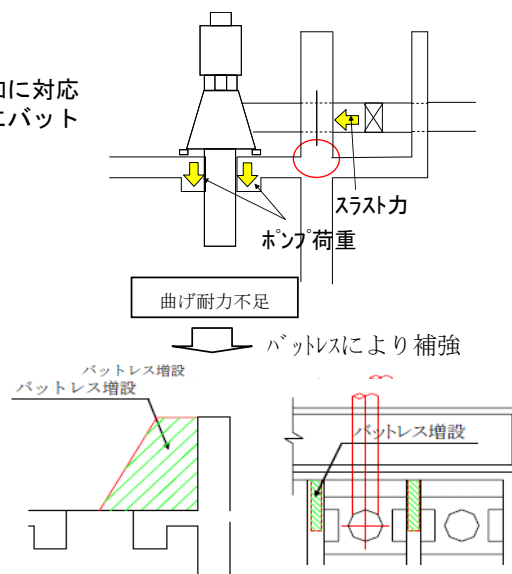
補修工法の例（荻田発電所）

3章 流用する主要土木構造物の評価・対策技術

3.2 補修及び補強工法

補強事例

ポンプ能力増大によるスラスト力の増加に対応するため、一部の構造物（クレーン梁）にバットレスを設置して補強を行なった事例

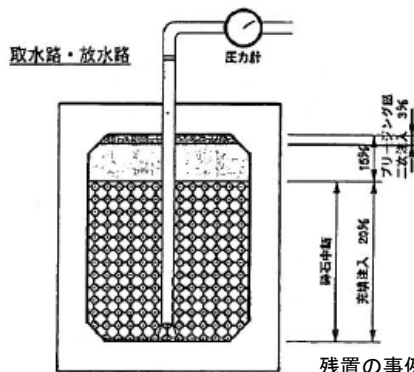


補強工法の事例（堺港発電所）

4章 残置する土木設備の残置方法

～ 取水路、放水路等の空洞を有する設備に中詰め工を用いた残置の事例 ～

- 発生したコンクリートガラを構内設置したクラッシャーにより0～40mmにクラッシング
- ↓
- 碎石送水設備により空洞内の85%の中詰めを実施
- ↓
- 空隙部の残り15%及び碎石中詰め間隙部の20%に対して、固定混練りプラントで製造したセメントベントナイトミルクの充填注入を実施。
(ブリージングにより発生する空隙については、移動式車上プラントにて全体中詰め数量の3%に対し、再度セメントベントナイトミルクの充填注入を実施)



23

5章 関連する諸技術

5.2 性能評価および健全度評価 5.2.1 性能評価

構造物の診断の基本 (「土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】」より)

- ・標準調査(初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検)
- ・詳細調査(必要に応じて実施)

- ・劣化状況の現状を把握
 - ・劣化の将来予測(劣化予測)
- 点検時および予定供用期間終了時の構造物や部位・部材の性能をできるだけ定量的に評価

対策の要否の判定

留意事項

- ◆実施される点検によって得られるデータの質・量が異なるため、評価方法にも違いがある
- ◆構造物を構成する部位・部材によって要求性能が異なる
- ◆評価式が確立されていない、もしくは評価式は提案されているが精度が十分で無いなど、定量的な評価が難しい場合も多い
⇒劣化状態を予めグレード分類しておき、このグレード分類により劣化の進行状況を評価

24

5章 関連する諸技術

5.2 性能評価および健全度評価 5.2.1 性能評価

点検結果の評価基準（項目別グレード分け）の例

「臨海コンクリート設備の塩害に関する維持管理手引き(土木学会エネルギー土木委員会)」より

外部状況		項目別グレード			備考
点検項目		ii (劣化が軽微な状態)	iii (劣化が中程度の状態)	iv (劣化が著しい状態)	
ひび割れ ・位置 ・長さ ・最大ひび割れ幅		・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋に沿ったひび割れがあり、その最大ひび割れ幅が0.5mm未満である。	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋に沿ったひび割れがあり、その最大ひび割れ幅が0.5mm以上2.0mm未満、あるいはその総延長が鉄筋(部材)全長の1/2未満である。	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋に沿ったひび割れがあり、その最大ひび割れ幅が2.0mm以上で、かつその総延長が鉄筋(部材)全長の1/2以上である。	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋とは、はり、柱部材等における主鉄筋、スラブ等における主鉄筋・配力筋のことを言う。
浮き・はく離 ・位置 ・大きさ ・断面減少率		・浮き・はく離があるが、耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋上ではない。	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋上に浮き・はく離があるが、鉄筋に沿った大きさが鉄筋(部材)全長の1/2未満、あるいは鉄筋の断面減少率が5%未満である。	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋上に浮き・はく離があり、鉄筋に沿った大きさが鉄筋(部材)全長の1/2以上で、かつ鉄筋の断面減少率が5%以上である。	
鉄筋露出 ・長さ ・断面減少率		・鉄筋が露出しているが、耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋ではない。	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋が露出しており、露出した鉄筋の断面減少率が5%未満あるいは露出した鉄筋の総延長が鉄筋(部材)全長の1/2未満である。	・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋が露出しており、露出した鉄筋の断面減少率が5%以上、かつ露出した鉄筋の総延長が鉄筋(部材)全長の1/2以上である。	
錆汁		・耐荷性能を維持する上で重要な鉄筋に沿った錆汁がある。			
内部状況					
点検項目		ii (劣化が軽微な状態)	iii (劣化が中程度の状態)	iv (劣化が著しい状態)	備考
鉄筋の腐食程度 ・断面減少率		・部分的な浮き錆があるが断面欠損はみられない。	・断面減少率が5%未満である。	・断面減少率が5%以上である	
鉄筋位置での全塩化物イオン量*1)		$0.05\% \leq Cl^- < 0.16\%$	$0.16\% \leq Cl^-$		*1)コンクリートに対する $(Cl^-)_{wt}\%$

ひび割れ、浮き・はく離、鉄筋露出、錆汁などの劣化の程度が、位置、長さ、大きさ、最大ひび割れ幅、断面減少率などの点検項目により定量的にグレーディング

25

5章 関連する諸技術

5.2 性能評価および健全度評価 5.2.4 詳細調査に基づく評価

5.2.4 詳細調査に基づく評価

定量的評価が基本とされているが、必ずしもすべての性能が定量的に評価できるわけではないため、グレーディング手法が提案されている。

耐力評価例

- ・許容応力度法
- ・限界状態設計法

評価項目	劣化グレード		備考
	iii以下	iv	
耐力	$Sd/Rd \leq 1.0$	$Sd/Rd > 1.0$	Sd:断面力 Rd:断面耐力

「臨海コンクリート設備の塩害に関する維持管理手引き(土木学会エネルギー土木委員会)」より

26

5章 関連する諸技術

5.2 性能評価および健全度評価 5.2.4 詳細調査に基づく評価

構造物の調査時点および将来における性能評価例

劣化による低減係数(照査用限界値の低減)の設定例

劣化係数		劣化グレード				
		潜伏期	進展期	加速期 前期	加速期 後期	劣化期
曲げ 破壊	曲げ耐力	1.0	1.0	0.95	0.90	適用外
	曲げ変形	1.0	0.90	0.80	0.60	適用外
せん断 破壊	コンクリート分担力	1.0	0.90	0.85	0.80	適用外
	せん断補強分担力	1.0	1.0	0.90	0.80	適用外

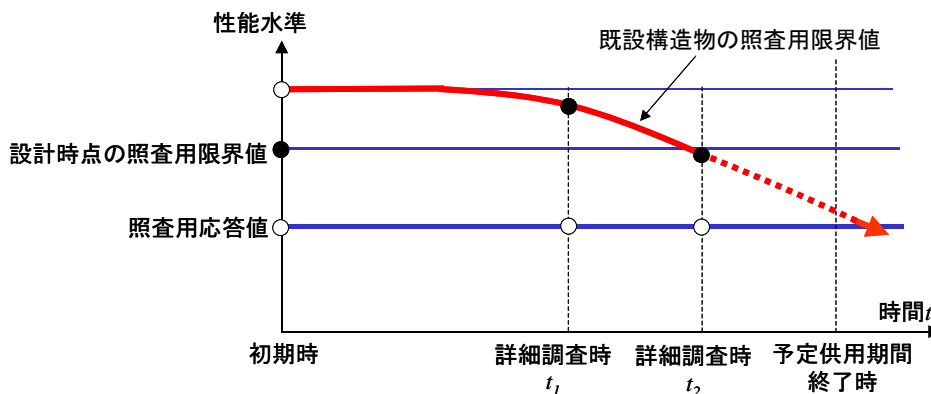
「原子力発電所屋外重要土木構造物の構造健全性評価に関するガイドライン(土木学会原子力土木委員会)」より

27

5章 関連する諸技術

5.2 性能評価および健全度評価 5.2.5健全度および措置程度判定の考え方

屋外重要土木構造物の性能の経時変化に関する概念



「原子力発電所屋外重要土木構造物の構造健全性評価に関するガイドライン(土木学会原子力土木委員会)」より

28

5章 関連する諸技術

5.2 性能評価および健全度評価 5.2.5健全度および措置程度判定 の考え方

5.2.5 健全度および措置程度判定の考え方

各種調査から得られた評価結果を基礎資料として、構造物の健全度と設備の重要度に基づき、総合的に措置程度が判定される。

措置程度判定基準例

健全度		重要度		
		H 高い	M 標準	L 低い
I	健全	措置1 (無措置)	措置1 (無措置)	措置1 (無措置)
II	軽微な劣化 ・変状	措置3 (補修)	措置2 (重点点検)	措置2 (重点点検)
III	中程度の劣化 ・変状	措置3 (補修)	措置3 (補修)	措置2 (重点点検)
IV	大きな劣化 ・変状	措置4 (補強等)	措置4 (補強等)	措置3～措置4 (補修～補強等)

「臨海コンクリート設備の塩害に関する維持管理手引き(土木学会エネルギー土木委員会)」より

29

5章 関連する諸技術

5.3 補修方法

5.3.2 補修工法の選定

補修構造物の劣化機構を推定し、その劣化機構をどこまで回復させるかにより、補修内容を選定

【劣化機構】

中性化、塩害、凍害、化学的浸食、アルカリシリカ反応他

各性能水準の低下に対応した補修工法の選定例

性能	水密性				対人安全性				耐震性(じん性)				たわみ性				耐荷性(最大耐力)				耐疲労性				
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
劣化過程																									
性能低下グレード	0	I	II	III	0	I	II	III	0	I	II	III	0	I	II	III	0	I	II	III	0	I	II	III	
構 造 材	ひび割れ補修工法	(◎)	◎	○		(◎)	◎	○																	
	表面処理工法	(◎)	◎	○		(◎)	◎	○																	
	断面修復工法			○	◎			○	◎			○	◎			○	◎			○	◎			○	◎
	電気化学的脱塩工法																								
	電気防食工法																								
鋼板・FRP接着工法								○	(◎)	◎	◎		(◎)	◎	◎		(◎)	◎	◎		(◎)	◎	◎		
腐蝕防止剤の打込み(埋込み)工法(打込み工法など)									(◎)	(◎)	◎		(◎)	(◎)	◎		(◎)	(◎)	◎		(◎)	(◎)	◎		

注) ①: 記号の説明

◎: 主工法として適用可能

○: 補助工法として、主工法の性能を保持するために適用

△: 補助工法として、構造物の劣化状況などに応じて適用

「コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書(日本コンクリート工学協会)」より

30

5章 関連する諸技術

5.3 補修方法

5.3.3 補修工法の設定および施工

火力発電所土木設備を対象とした劣化に対する各種工法を紹介

【文献例】

- (1)「表面保護工法における鉄筋コンクリート構造物の塩害抑制効果に関する検討」(中部電力株 電力土木NO.329号)
 - ・表面保護工法による塩害抑制効果を定量的に評価
- (2)「電着工法を利用した海洋コンクリート構造物の補修と防食について」(四国電力株 電力土木NO.246号)
 - ・海洋コンクリート構造物の維持補修工法として、海水の電着技術を利用した補修方法(電着工法)を開発、その有効性を報告
- (3)「電気防食(点状陽極)による鉄筋コンクリート塩害劣化補修工法」(中国電力株 電力土木NO.308号)
 - ・臨海域にある鉄塔基礎への点状陽極方式電気防食の採用事例

31

5章 関連する諸技術

5.4 劣化予測手法

5.4.1 劣化予測手法

- 劣化予測は、点検結果に基づき将来の劣化状態を予測すること。劣化機構には、塩害、中性化、凍害、アルカリシリカ反応などがある。
- 劣化予測は、適切な劣化予測モデルを用い、点検によって得られた構造物の状態(形状、配筋状態、コンクリートの品質、鋼材の状態)を加味して、定量的に行うことが必要。
- 劣化機構の種類によっては、劣化予測モデルが確立されていないまたはその精度が必ずしも十分でないものがあり、劣化の程度をいくつかの段階(劣化グレード)に区分し、それぞれの長さを予測する半定量的な予測モデルを用いることも提案されている。
- 劣化予測に構造物の過去の維持管理データを用いることができれば、より効率的かつ精度の高い予測を行うことが可能と考えられる。

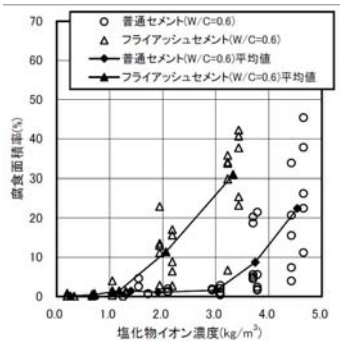
32

5章 関連する諸技術

5.4 劣化予測手法

5.4.2 塩害

■ 鋼材腐食の研究事例



鋼材の腐食速度の標準値の例

腐食環境		腐食速度 (mm/年)
海側	H.W.L. 以上	0.3
	H.W.L. ~ L.W.L. -1m まで	0.1~0.3
	L.W.L. -1m ~ 海底部 まで	0.1~0.2
	海底泥層中	0.03
陸側	陸上大気中	0.1
	土中(残留水位以上)	0.03
	土中(残留水位以下)	0.02

「港湾の施設の技術上の基準・同解説(日本港湾協会)」より

干満環境における塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係の例

「原子力発電所屋外重要土木構造物の構造健全性評価に関するガイドライン(土木学会原子力土木委員会)」より

33

5章 関連する諸技術

5.5 ライフサイクルコストの評価方法

5.5.1 ライフサイクルコストおよびアセットマネジメントの概要

■ 目的、構成および解釈についての文献紹介

- 文献No.83 「ライフサイクルマネジメントによる電力施設の維持管理(第3回)」
 - 土木構造物を含む社会インフラ施設のライフサイクルマネジメントのうち、特に、経済性に着目してマネジメントを行うための指標としてライフサイクルコストがあり、(以下、LCCという) LCCを利用したマネジメントは、「施設のライフサイクルにわたる総費用を最小にするアセットマネジメントを行う」という明確な目標を持っていると記載。
- 文献No.40 「アセットマネジメント導入への挑戦」
 - 「アセットマネジメントは、限られた予算条件の下で、効率的かつ効果的な社会資本の管理・運営ができるマネジメントである。」と紹介。
- 文献No.44 「実践 土木のアセットマネジメント」
 - ライフサイクルコストの最小化を図るだけでなく、「長寿命化」や「安全の強化」などの便益を確保するための投資も選択できるなど、豊富な事例を交え、アセットマネジメントを成功に導く方法を具体的に解説。
- 文献No.61 「土木技術者のためのアセットマネジメント」
 - 社会基盤構造物のアセットマネジメントとは ①点検、劣化予測、性能評価・照査、対策 ②構造物(資産)マネジメント ③資産会計マネジメントの3項目により構成されると解釈。

34

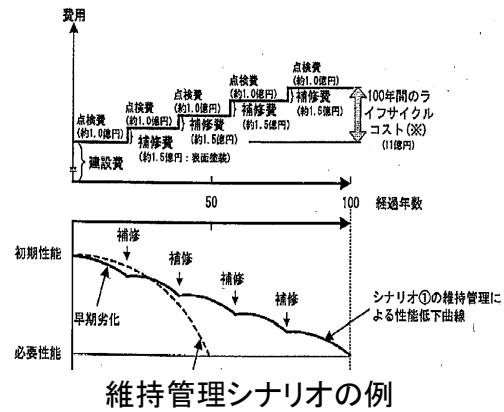
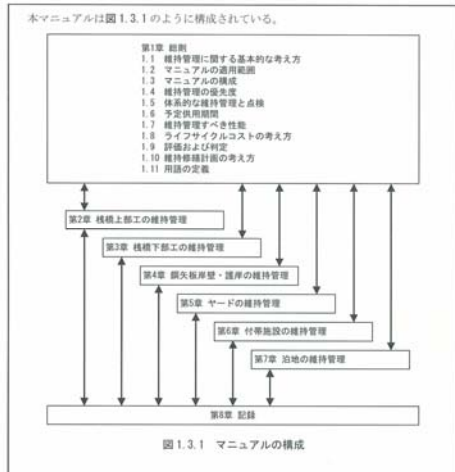
5章 関連する諸技術

5.5 ライフサイクルコストの評価方法

5.5.2 アセットマネジメントにおける投資判断の指標

「土木施設維持管理マニュアル(東京埠頭公社)」では、埠頭設備の維持管理を戦略的にライフサイクルコストを考慮に入れて、経済的で効率的な維持管理を実践する手順を示している。

1.3 マニュアルの構成



5章 関連する諸技術

5.5 ライフサイクルコストの評価方法

5.5.4 電力土木設備への適用事例

- 「ライフサイクルマネジメントによる電力施設の維持管理(第2回)」
 - 東京電力(株)火力土木部門における維持管理事例として、コンクリート設備の維持管理の手順とコンクリート設備のライフサイクルマネジメントにおける要素技術(点検・劣化予測技術・評価および判定技術・対策技術)について紹介。
 - 効率的に維持管理を行うためには、設備の供用期間中にかかる総費用として定量化することをLCC評価の基本とし、種々の補修案に対してLCCを試算し、その相対評価により一つの案を選択するとしている。
 - また、劣化リスクもLCCに含めて評価を行うことを提案している。
- 電力土木設備への適用した文献事例は少ない

5章 関連する諸技術

5.6 その他

5.6 その他

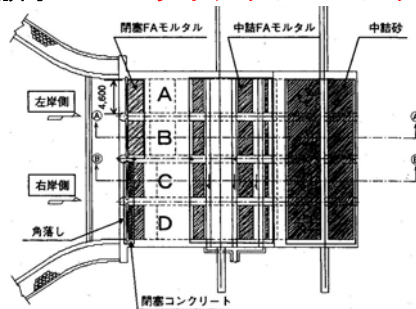
5.6.1 残置方法

火力発電所の廃止工事において充填工事を実施した例がある。

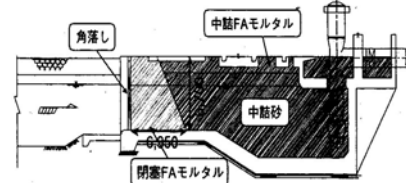
例) 北陸電力(株) 福井火力発電所1号機廃止工事

循環水ポンプピット：砂+フライアッシュモルタルの充填

放水口：フライアッシュモルタルの充填（排水管路埋設）



循環水ポンプピット平面図



循環水ポンプピット断面図(A-A)

37

5章 関連する諸技術

5.6 その他

5.6 その他

5.6.2 環境対策

リプレースにおいて、騒音・振動低減や産業廃棄物処分などの各種環境対策の事例があった。

環境対策の取組み（東北電力(株)仙台火力、電源開発(株)磯子火力等）としては以下の事例がある。

- 騒音・振動低減対策
 - ・杭打工：プレボーリング工法の採用
 - ・鋼矢板工：無振動工法の採用
 - ・敷地境界部：防音シートの設置
- コンクリート殻等の有効利用
 - ・路盤材，埋め戻し材として利用（構内破碎）
 - ・再生骨材として実構造物へ適用
- その他
 - ・貴重種対策
 - ・粉塵防止対策

38

5章 関連する諸技術

5.6 その他

5.6 その他

5.6.3 耐震設計に関する基準類の変遷

火力リプレースにおいては、発電所土木設備の流用の可否を検討する際、建設当時の設計基準類の確認および最新の設計基準類による照査の実施方法の把握が必要。



現在、火力発電所における土木構造物の耐震設計に適用されている主な設計基準は、

○2007年制定コンクリート標準示方書（設計編，維持管理編）

○道路橋示方書・同解説（V耐震設計編）

○港湾の施設の技術上の基準・同解説

○火力発電所の耐震設計規程（JEAC3605-2009）

などがある。

これらのうち、道路橋示方書、港湾の施設の技術上の基準・同解説、火力発電所の耐震設計規定の変遷を紹介。

39

5章 関連する諸技術

5.6 その他

○道路橋の耐震設計基準の変遷

現行の道路橋に関する耐震設計基準は、1923年（大正12年）の関東地震における被害を契機に1926年に制定された「道路構造に関する細則案 第2章 橋梁」を、その後に発生した地震被害の経験をもとに改訂を重ねたものである。なお、本基準に規定されている「震度法」は、動的に作用する地震力を、静的な慣性力に置き換えて構造設計を行うものであるため、その概念の単純明快さと計算の簡便さから、耐震設計の中心的な計算方法として現在まで用いられてきている。

【至近年の改訂実績】

改訂年	主な改訂内容
1990年	地震時保有水平耐力の照査を規定，液状化判定の高度化
1996年	兵庫県南部地震による安全性照査の追加，液状化判定範囲の拡大と流動化の考慮
2002年	レベル1，レベル2地震動の設定

40

6章 今後の技術検討に関する提言

6.2 今後の方向性

(1) 既設土木構造物の性能について

既設土木構造物の性能は、**各設備毎に公衆災害や発電に及ぼす影響を把握した上で、設備管理者の判断で設定する必要がある**。また一般に構造物に要求される性能としては、耐久性、安全性、使用性、耐震性などが挙げられるが、設備によっては、地震により被災した場合、低下した性能を短期間にかつ安価に回復させ、継続的に使用しなければならない場合があると考えられる。よって**例えば復旧性などを視野に入れた性能を設定するなど、今後は既設構造物の性能設定の方向性について検討する必要がある**と考えられる。

(2) 耐久性照査における各種設定値について

耐久性照査における一般的な限界塩分濃度(1.2kg/m³)を超えても錆が生じていない事例があることから、限界塩分濃度は、既設構造物において、**現地調査にて設定するのが望ましい**と考えられる。また既設構造物の場合は、限界塩分濃度に加えて、現地調査にて表面塩分濃度や塩化物イオンの拡散係数などを設定することが合理的な照査をする上で重要と考えられる。

41

6章 今後の技術検討に関する提言

6.2 今後の方向性

(3) ライフサイクルコスト評価について

ライフサイクルコストの評価においては、予定供用期間を設定し、確保すべき性能とそのレベルを設定した上で、具体的なライフサイクルコストを算出することになる。これに必要な劣化予測方法(補修の効果および補修した構造物の劣化予測を含む)や補修工法の選定方法に関する諸技術の研究、開発を重点的に行い、方法を確立していくことが必要である。このためには、**劣化や補修に関する調査データを蓄積するとともに、成果を積極的に公表していくことが必要である**と考えられる。また、劣化と構造物の性能の関係を明らかにしていく研究も必要である。

(4) 廃棄物の有効利用について

火力発電所リプレース時に土木および建築工事において、残土やコンクリート塊などの廃棄物が大量に発生する。これに対し、例えば建築建屋を解体した場合に発生するコンクリート塊を、**マット基礎等の構造物の再生骨材コンクリート・路盤材・液状化対策の盛土材などに活用するなど、土木・建築一体となって廃棄物を極力構内で有効利用すべきである**と考えられる。

42