

平成 24 年度「重点研究課題」調査研究報告書

研究課題名：土木構造物の持続性を考慮した 300 年プロジェクトに関する研究

研究代表者名：上田多門(北海道大学 工学部 環境社会工学科)

(推薦委員会：複合構造委員会)

平成 25 年 3 月

公益社団法人 土木学会

はじめに

複合構造物は、鋼やコンクリートなど種々の建設材料をその特性を生かした形で様々な組み合わせをすることで構成されている。一方で、土木構造物は、設計時点においては、ある耐用年数を設定してはいるものの、実際には、要求される機能を満たす範囲で半永久的に供用されている。また、近年では従来にはなかったFRPなど新しい材料が開発され適用されつつある。このような中、土木構造物の意義を一般の市民にも理解してもらうとともに、土木の魅力を次世代の土木技術者に伝えることを目的に複合構造委員会内に「300年プロジェクト」を立上げた。この中では、すべての建設材料を同一の規格(環境、間隔、試験方法)で北海道から沖縄まで日本各地の大学や研究機関において暴露試験を実施し、その成果を広く周知しようとするものである。このプロジェクトは、現代の土木技術者からの未来へのメッセージとして、壮大で有益な知見が得られると思われ、また、半永久的に供用される土木構造物に対する現代の研究者・技術者の責務とも考えられる。

そこで、「300年プロジェクト」の基本コンセプトをもとに、その実施に向けたプログラム策定を目的とした検討を「土木構造物の持続性を考慮した300年プロジェクトに関する研究」として重点課題に申請し、本研究の趣旨が高く評価され採択にいたった。

上記の背景から、複合構造委員会では2012年6月に「300年プロジェクト小委員会」を設置し、複合構造の専門家に、各種材料の専門家や、材料の耐久性研究に関連する技術者を交え、下記の3つのワーキングに分かれて検討を実施した。

- ・暴露試験方法検討ワーキング
- ・既存情報の調査ワーキング
- ・プロジェクト実施方法検討ワーキング

本報告は、その成果をまとめたもので、1章に暴露試験方法に関する検討結果、2章に既存構造物の耐久性調査結果、3章にプロジェクトの実施に係る検討結果を紹介している。今後、本報告書をもとに「300年プロジェクト」の実現に向けて、他の調査研究委員会も含めた、土木学会全体での議論に発展することを期待する。最後になったが、本報告書をまとめるにあたり、ただいなる尽力をいただいた委員各位、特に古市幹事長、松本主査、大山主査、渡辺主査には謝意を表す。

2013年3月

土木学会複合構造委員
300年プロジェクト小委員会
委員長 上田多門

土木学会 複合構造委員会 300年プロジェクト小委員会 委員

委員長	上田 多門 (北海道大学)
幹事長	古市 耕輔 (鹿島建設)
委員兼幹事	大山 理 (大阪工業大学)
	松本 高志 (北海道大学)
	渡辺 忠朋 (北武コンサルタント)
委員	池田 学 (鉄道総合技術研究所)
	奥井 義昭 (埼玉大学)
	葛西 昭 (熊本大学)
	加藤 真志 (JFE スチール)
	国枝 稔 (名古屋大学)
	小林 朗 (新日鉄マテリアルズ)
	斉藤 成彦 (山梨大学)
	島 弘 (高知工科大学)
	下村 匠 (長岡技術科学大学)
	杉浦 邦征 (京都大学)
	田邊 弘往 (大日本塗料)
	長塩 靖祐 (太平洋マテリアル)
	西崎 到 (土木研究所)
	広瀬 剛 (東日本高速道路)
	溝江 慶久 (川田工業)
	山路 徹 (港湾空港技術研究所)

目 次

第1章 暴露試験方法に関する検討	
1.1 はじめに	1
1.2 方針	1
1.3 試験方法の検討案	1
1.3.1 材料の選定基準	1
1.3.2 材料種別ごとの試験方法	2
1.3.3 試験間隔	2
1.3.4 暴露試験場所の選定基準	2
1.3.5 その他	2
1.4 セメント系の検討案	3
1.4.1 材料候補	3
1.4.2 試験方法	3
1.4.3 試験間隔	4
1.4.4 セメント系の暴露あるいは促進試験基準の現状調査および整理	4
第2章 既設構造物の耐久性調査結果の収集・整理	
2.1 100年以上の実績がある橋の紹介	11
2.2 鉄道橋の長期間供用された事例	13
2.2.1 長期間供用された鉄道橋の事例	13
2.2.2 長期間供用された鉄道橋の材料調査の事例	15
2.3 既設構造物(コンクリート, 合成桁橋)の耐久性に関する調査結果	19
2.3.1 わが国で最初のPC橋(長生橋)の解体調査とPC桁の載荷試験	19
2.3.2 PC橋梁初の有形文化財登録—信楽高原鐵道の第一大戸川鐵道橋—	23
2.3.3 旧神崎橋(活荷重合成桁橋)の力学性状	26
2.4 暴露試験場見学報告	30
2.4.1 寒地土木研究所美々暴露実験場	30
2.4.2 小樽港湾	31

第3章 プロジェクトの実施に係る検討	
3.1 はじめに	33
3.2 検討概要	33
3.2.1 大学や研究機関及び材料を提供していただくメーカーなどで想定される課題	33
3.2.2 実施費用と成果の帰属に対する考え方	33
3.2.3 公募(周知)方法の検討	34
3.2.4 その他	34
3.3 まとめと今後の課題	35
3.3.1 参加機関	35
3.3.2 材料提供者	35
3.3.3 成果の帰属と公表	35
3.3.4 公募の検討	35
3.3.5 今後の課題	35

第1章 暴露試験方法に関する検討

1.1 はじめに

300年プロジェクトの設立目的に従い、実施プログラムにおける暴露試験方法についての検討を行った。本章ではその検討案を以下にまとめる。

1.2 方針

長期暴露試験については、幾つかの組織によりこれまでも実施・継続されてきている。それらは重要プロジェクトに付随して長期暴露試験を行うというものであることが多い。こうした試験を参考にした上で、300年プロジェクトの趣旨に沿った2つの視点を考えた。

1つ目の視点は、300年という超長期耐久性に対する挑戦である。土木構造物には伝統的な材料に加えて新素材の活用も図られてきている。それらの材料において、現在の最高技術を自負するものを選び、300年耐久性を目指すものである。こうした材料は特別な構造物に用いられる品、もしくは特注品のイメージである。

2つ目の視点は、現在の技術への説明責任である。土木構造物が100年を超えて供用される例もある中、現在の材料耐久性に関する知見を将来検証する必要・責任は小さくない。現在使われている普及品の300年に及ぶ超長期劣化に対する検討はこれに答えるものである。材料としては、通常の構造物に用いられている普及品の中でも上級な品のイメージである。

2つの視点は同じく意義のあるものと考え、試験方法においてはグレードを2つ設けることとした。1つ目の視点をグレード1「最も自信のある品」とし、2つ目をグレード2「上級の普及品」とする。以下では2つのグレードを対象とした試験方法の検討案を記す。

1.3 試験方法の検討案

1.3.1 材料の選定基準

- ・グレード1「最も自信のある品」とグレード2「上級の普及品」とする。
 - －グレード1は、特別な構造物に用いられる品もしくは特注品のイメージ。300年耐久性を目指す挑戦的なもの。現在の最高技術を示すもの。
 - －グレード2は、通常の構造物に用いられている普及品の中でもしっかり作られた上級品のイメージ。現在使われている材料の耐久性に関する知見を将来検証するもの。
- ・材料種類は、鋼材、金属、セメント系、FRP、その他（提案があれば）とする。
- ・表面保護は上記のグレードに含めて考える。
 - －材料+表面保護でグレード1「最も自信のある品」とグレード2「上級の普及品」とする。
- ・表面保護に初期損傷を与えない。
 - －試験条件を単純にするために、本プロジェクトでは含めない。
- ・維持管理はしない。

—継続性に困難があるため、塗装の塗り替えなど定期的な維持管理は行わない。

1.3.2 材料種別ごとの試験方法

- 初期試験，促進暴露試験，300年暴露試験を行う。
 - 初期試験により，暴露前の材料組成，製造・養生条件，初期材齢強度，表層状態，寸法・質量などの初期条件を可能な限り調べて残しておく。
 - 促進暴露試験により，後の各種環境での300年暴露試験結果と比較することで促進倍率等のパラメータを同定する。
 - 促進暴露試験の条件は300年暴露試験場所の環境を考慮して決める必要がある。
- 促進暴露試験と300年暴露試験の後には暴露後試験を行う。
 - 材料種別ごとに適した観察・分析・試験を行う。
- 暴露開始後は基本的に定期的な暴露後試験のみ行う。
 - 定期的な維持管理は行わない。

1.3.3 試験間隔

- 試験間隔は材料種別ごとに設定する。
 - 初期試験は，時間単位，日単位，月単位で行う必要のある材料もある。こうした試験間隔は材料ごとに設定する。
- 全材料共通の試験間隔も設定する。
 - 初期試験期間を終了した後は，全材料共通の試験間隔を設定する。
 - 試験体の引継ぎを考慮して，試験間隔30年とする。

1.3.4 暴露試験場所の選定基準

- 日本国内とする。
 - 外国は含まない。
- 現在土木構造物が供用されている環境条件の範囲内とする。
 - 現在，土木構造物が作られないような過酷すぎる場所は選ばない。
 - 例として，北海道（積雪寒冷地域），本州，沖縄（亜熱帯地域）の3地点で，通常環境と塩分環境があり得る。
 - 室内（参照用）として土木学会（四ツ谷）に展示する。
- 環境条件の異なる複数の場所で実施する。
 - 因子：温度，水，光，塩分，等
 - 腐食環境分類法などにより，重なりのない多様な場所を選ぶ必要がある。
- 300年間継続して暴露試験が実施可能な場所とする。
 - 土地用途変更がない場所，管理主体が比較的永続的である場所，などが考えられる。

1.3.5 その他

- 必須項目と選択項目の区分
 - 上記の試験方法は検討案であり，全項目実施ではなく一部項目は選択とする実施形態もあり得る。例え

ば、促進暴露試験は選択項目とすることも考えられる。区分については検討が必要である。

・後世の者による研究の実施は後継組織の判断に委ねる。

－後世の最新技術による調査・分析・試験・維持管理などの提案を基本的には歓迎する。ただし、300年継続を前提として、全数損失する提案は除く。実施の可否は後継組織が判断する。

・供試体形状

－供試体採取するために構造物大の寸法暴露体、もしくは要素試験の供試体程度の小寸法暴露体が考えられる。これについては検討が必要である。

1.4 セメント系の検討案

前節の試験方法の検討案に基づき、材料としてセメント系を例とした検討案を以下に示す。

1.4.1 材料候補

(1) グレード1：高強度コンクリート用セメント

ポルトランドセメントの一部をシリカフェーム等の粉体材料で置換したセメント¹⁾

候補例

①SFC：シリカフェームセメント，SFPC：シリカフェームプレミックスセメント等

②中庸熱ポルトランドセメントもしくは低熱ポルトランドセメントにシリカフェームを7～10%程度内割混合する（基本的には上記①と似たもの）

①や②のセメントを使用し、W/C：20%以下とし、圧縮強度で150～200N/mm²程度を確保（モルタルおよびコンクリートどちらでも可能）

③超高強度繊維補強コンクリートに用いられるマトリックス材料²⁾

（ただし、粉体が既にプレミックス化（骨材含）されているものが多いと考えられ、材料の中身は分からない（明かせない）可能性大）

(2) グレード2：上級の普及品

候補例

①普通ポルトランドセメントもしくは①や②のセメント

普通ポルトランドセメントもしくは①や②のセメントでW/Cにより、所定の目標強度を得る。例えば60～100N/mm²程度：土木学会、コンクリート標準示方書の設計基準強度の範囲内等（これもモルタルおよびコンクリートどちらでも可能）

②ポリマーセメントコンクリート（or モルタル）

ポリマーを使用したモルタルもしくはコンクリート

圧縮強度は60～100N/mm²程度を目標

暴露環境下によっては適した材料になる可能性有

(3) その他

材料は公募だが、一つの考え方として、セメント系は材料を統一し、圧縮強度で最も自信のあるものと上級の普及品を振り分けるという考え方もある。

1.4.2 試験方法

初期試験：材齢 28 日圧縮強度，動弾性係数，供試体の寸法と質量

（ビッカース硬さ試験は初期値が必要であれば実施）

暴露後試験：圧縮試験，ビッカース硬さ試験，表面観察，供試体の寸法と質量（質量変化），動弾性係数，中性化深さ（中性化深さは圧縮強度試験体を使用），EPMA

促進試験：圧縮試験，表面観察，供試体の寸法と質量（質量変化），動弾性係数，中性化深さ，EPMA
（各々の促進試験に合わせて実施）

1.4.3 試験間隔

初期試験：所定の養生（材齢 28 日）が経過した後に 1 回。

促進試験：所定の促進試験後に 1 回実施。

暴露試験：暴露後 1 年に実施（その後の継続試験に問題ないことを検証するため）。

その後は 30 年に 1 回程度（他の建設材料と同程度の間隔になるが，試験体作製の事（本数等）も考慮して決定する必要がある）。

また，試験とは別に定期的な暴露場の確認も必要（暴露場のメンテナンス等）。

1.4.4 セメント系の暴露あるいは促進試験基準の現状調査および整理

日本各地域での暴露試験を想定し，大きな区分けとして暴露環境を一般（通常）環境，塩分環境，寒冷環境，その他として 4 つのグループに区分けし整理した。

促進試験は JIS 等の規格類と，暴露結果と対比した例を，暴露試験は現状の暴露試験の状況とその結果や，暴露環境条件を列記した。コンクリートの長期暴露試験マニュアルが文献 7) に記載されているものの，実状は試験の目的や暴露環境の条件等を考慮し，暴露試験やその場所を選定しているのが現状と思われる。

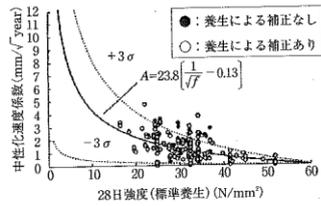
表 1.1 セメント系に関する暴露あるいは促進試験

一般環境（中性化）	一般環境下の耐久性として中性化を対象とした。
促進試験	1) JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法 (温度 20±2℃，相対湿度 60±5%，二酸化炭素濃度 5±0.2%) ⇒ 最も一般的で規格化されている 2) 散水促進試験 ³⁾ 温度 40℃，相対湿度 50%，二酸化炭素濃度 15%の促進中性化の促進試験中に 3 時間/日散水を行う。散水量は毎分 1.5L。屋外暴露と関係を把握するために実施。 ⇒ 屋外暴露との整合性が高いとの報告 3) その他促進試験例 ^{4), 5)} ① ⁴⁾ 温度 20℃，相対湿度 55%，二酸化炭素濃度 0.07，1，10% ⇒ 10%濃度は 0.07%の約 35 倍，1%濃度の約 7 倍相当 (0.07%は屋内自然暴露環境下) ② ⁵⁾ 温度 40℃，相対湿度 50%，二酸化炭素濃度 7% 自然暴露 15 年の結果と比較。 ⇒ 促進結果と自然暴露の相関は有との報告

なお、JIS 規格制定前は各種条件があったが、JIS 規格制定後は、①の条件がほぼ主。また、異なる条件で実施された過去の事例においても、現状では①の条件に補正して評価を行っていることが多い⁶⁾。

暴露試験

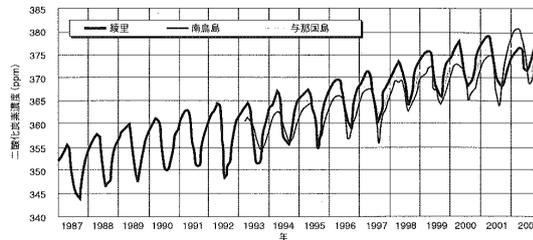
1) 文献 1)より：一般屋外暴露下での中性深さの文献調査結果から、推定式を算出。例えば、今回の 300 年を超える場合には圧縮強度 50N/mm² 以上であればよいことになり、60N/mm² あれば中性化速度係数はほぼゼロ。(かぶり 40mm) また、CO₂ 濃度は場所による影響は少ない傾向(下段左：岩手、東京、沖縄、下段右：神奈川県内の CO₂, O₂, NO₂ 濃度)¹⁴⁾。



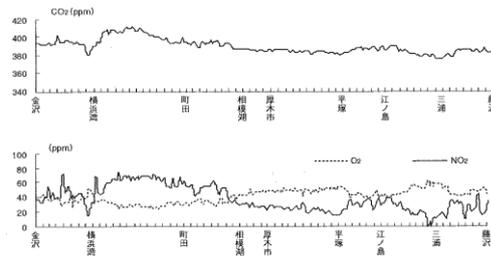
解説図 3.4 28日標準養生の圧縮強度と中性化速度係数の関係⁹⁾
[注] σは、変数係数を0.3と仮定した値

解説表 3.1 中性化深さと圧縮強度の関係

セメントの種類	環境	腐食 率 (%)	設計か ぶり厚さ (mm)	中性化 深さ (mm)	耐用年数 (年)	所要の中性 化速度係数 (mm/√year)	所要の圧縮強度 (N/mm ²)	耐久設計 基準強度 (N/mm ²)
普通ポルトラ ンドセメント	屋外	3.0	40	13.6	200	0.96	34.4	36
					100	1.36	28.5	30
					65	1.69	24.7	24
					30	2.49	18.2	18
			50	18.6	200	1.31	29.2	30



解説図 3.2.1 綾里、南島島および与那国島における二酸化炭素濃度月平均値の経年変化¹⁾



解説図 3.2.2 高度 300~600m での二酸化炭素濃度 (上) と大気汚染物質濃度 (下) の分布 (1998年3月17日 14:00~15:00)²⁾

- 2) 中性化速度係数の特性値； $\alpha_p = -3.57 + 9.0W/B$ (W/B：有効水結合材比，土木学会コンクリート標準示方書設計編，2007年より)。W/B40%以下なら中性化速度係数はゼロ。
- 3) 一般環境下(札幌、北見、仙台、新潟、つくば、茅ヶ崎、広島、福岡、沖縄の10箇所)の暴露12年の中性化深さは暴露地域の影響よりもW/Cの影響が大きく、W/C45%であれば1mm以下。W/C65%では3.0~8.0mm程度⁷⁾。

塩分環境

促進試験

- 1) JSCE-G 571-2010
電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)
電気泳動セルに設置し、塩化物イオンの移動流速が定常状態になるまで通電
⇒ 実効拡散係数を算出
- 2) JSCE-G 572-2010
浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)

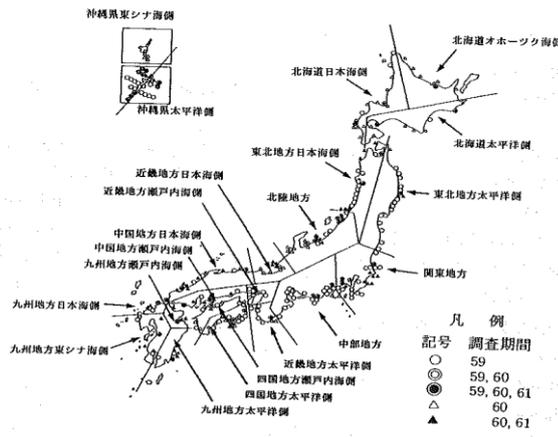
	<p>温度 20±2℃，濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液に浸漬 ⇒ 見掛けの拡散係数を算出 塩化ナトリウムの濃度は海水の 3%の約 3 倍を想定 実際に飛沫帯では 10%塩化ナトリウム溶液相当状態も有とのこと</p> <p>3) 乾湿繰り返し試験の例^{8), 9)}</p> <p>①50℃, 3%塩化ナトリウム溶液に 4 日間浸漬, 50℃の乾燥を 3 日間, 1 日常温下の静置を 1 サイクル⁸⁾ 沖縄 (辺野喜) と北海道 (泊) の 1 年後の結果と上記 20 サイクルの結果を比較 ⇒ 明確な関係は 1 年では見当たらない</p> <p>②海水に 24 時間浸漬, 80℃24 時間乾燥を 1 サイクル⁹⁾ ⇒ 1 サイクルが海水浸漬の 4 年相当と報告している</p> <p>塩分環境下での乾湿繰り返し試験の促進試験は研究者により異なるとともに, 多数あるため, ここでは暴露環境と対比している二例を挙げた. 乾湿繰り返しにより促進効率を高めるためには,</p> <p>① 浸漬する水 (塩分) の濃度を高める ② 浸漬時および乾燥時の温度を高める ③ 浸漬時間と乾燥時間を適切に選択する</p> <p>文献 7) では③を推奨. 予備試験により質量変化を計り, 最も質量変化の大きい条件を見出す必要があるとしている.</p> <p>その他, 内在する塩分による促進試験もあるが, ここでは外部環境からの浸透とした.</p>
<p>暴露試験</p>	<p>1) 海洋暴露環境下 (1 日 2 回の海水を給排水し, 1.5m の潮位差で自然の潮汐作用を模倣した装置を使用) に 20 年暴露¹⁰⁾. 海水は久里浜湾より直接汲み上げ. 海水の平均温度は夏期約 24℃, 冬期 8℃. 海水の化学成分 (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, CO₃, pH) を 20 年間計 68 回調査し記録. W/C : 52~55%, セメント 7 種類. 圧縮強度は材齢 20 年で低下傾向. 塩化物イオンも内部まで侵入.</p> <p>2) 海洋環境下に 20~40 年長期間共用された港湾 RC 構造物を調査. H.W.L (m) と H.W.L からの距離 (m) を記載¹¹⁾. 主として中性化深さはマグネシウムイオンと硫酸イオンの侵入と関係が高く, 劣化深さは中性化深さが表している可能性が高いと報告.</p> <p>3) 塩分環境下 (網走, 留萌, 苫小牧, 新潟, 大井川, 福岡, 沖縄の 7 箇所) の暴露材齢 12 年の結果について報告⁷⁾. W/C : 45~65%のコンクリート. 塩化物イオンの浸透量は地域的な差異は認められないが, 留萌はやや多い傾向. 中性化深さは網走と沖縄が他の地域と比べ大きい. コンクリート内部の鉄筋の腐食は網走, 留萌, 沖縄の 3 箇所が生じており, 網走, 留萌は凍結融解作用との複合劣化, 沖縄は気温の高い厳しい環境下のためと報告.</p> <p>なお, JCI-SC7 「コンクリート供試体の暴露試験場の環境区分に関する基準」では, 以下のように区分している.</p> <p>区分 A : 飛沫帯, あるいはこれに準ずる環境条件 (干満の影響を受ける環境など) 区分 B : 海面下, あるいはこれに準ずる環境条件 区分 C : 海岸線, あるいはこれに準ずる環境条件 区分 D : 内陸部, あるいはこれに準ずる環境条件 区分 E : 海洋環境以外のその他の環境条件の影響が卓越する場合</p>

4) 文献 14)による塩分環境下の区分と飛来塩分量 (海岸 0m の位置における推定値)

表 25.1 飛来塩分量による塩害環境の区分

塩害環境の区分	飛来塩分量 ^① (NaCl)	地域と立地条件の例 ^②
重塩害環境	25 mddを超える	・日本海側、沖縄県全域、伊豆諸島・奄美諸島等の離島部などの地域で、汀線から20 m程度の範囲。
塩害環境	13 mddを超え25 mdd以下	・日本海側、沖縄県全域、伊豆諸島・奄美諸島等の離島部などの地域で、汀線から20~70 m程度の範囲。 ・東北地方の太平洋側の地域で、汀線から20 m程度の範囲。
準塩害環境	4 mdd以上13 mdd以下	・日本海側、沖縄県全域、伊豆諸島・奄美諸島等の離島部などの地域で、汀線から70~150 m程度の範囲。 ・東北地方の太平洋側の地域で、汀線から20~100 m程度の範囲。 ・オホーツク海側、太平洋側、九州地方の東シナ海側の地域で、汀線から50 m程度の範囲。

[注] (1) mddは、飛来塩分量の単位でmg/dm²/dayの意味で、1 dm=0.1 mである。
(2) 建築物が遮蔽物で囲まれて海に面していない場合、重塩害環境は塩害環境に、塩害環境は準塩害環境に、準塩害環境は海水の作用を受けるコンクリートの対象外と考えてよい。



解説図 25.2 飛来塩分量の調査地点^③

解説表 25.1 海岸における飛来塩分量^④

地域	飛来塩分量 (mg/dm ² /day)
北海道日本海側	40
北海道太平洋側	10
北海道オホーツク海側	10
東北地方日本海側	40
東北地方太平洋側	20
関東地方	10
北陸地方	10
中部地方	10
近畿地方日本海側	10
近畿地方瀬戸内海側	1
近畿地方太平洋側	10
中国地方瀬戸内海側	0.4
中国地方日本海側	10
四国地方瀬戸内海側	0.4
四国地方太平洋側	1
九州地方日本海側	1
九州地方太平洋側	10
九州地方瀬戸内海側	1
九州地方東シナ海側	10
沖縄県太平洋側	100
沖縄県東シナ海側	10

寒冷環境

促進試験

1) JIS A 1148

コンクリートの凍結融解試験方法

- ・ A 法：水中凍結融解試験方法
- ・ B 法：気中凍結水中融解試験方法

凍結融解の 1 サイクルは供試体の中心温度が原則+5±2℃から-18±2℃に下がり、-18±2℃から+5±2℃に上がるもの。1 サイクルに要する時間は 3 時間以上、4 時間以内。融解行程に要する時間は A 法の場合 25%以上、B 法の場合 20%以上。試験は 300 サイクルまで実施し、相対動弾性係数 (耐久性指数)、質量減少率を測定。

A 法、B 法の選別はコンクリートが使用される構造物と水の接触を考慮して使い分けるのが良いとしている。

2) RILEM CIF

角柱供試体の下面から水を吸水させ、1 日 2 サイクルの+20℃から-20℃までの凍結融解を 28 日間繰り返す方法。凍結融解の繰り返しによる内部劣化と併せて凍結融解環境下における吸水性状も測定し、限界飽水度も測定。更に相対動弾性係数を測定。

3) ASTM C666

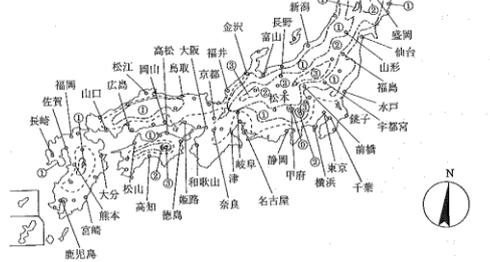
供試体全面 (6 面) から水を吸水させ、1 日 6~8 サイクルの+5℃から-18℃までの凍結融解を 300 サイクル繰り返し、質量および相対動弾性係数を測定。ただし、ASTM C666 では実際の気象条件と比較して冷却速度が急激すぎるため、水圧が急激に増大するという報告も有。JIS A 1148 の A 法とほぼ同等の試験。

	<p>なお、上記 3 試験方法は内部劣化試験.</p> <p>4) RILEM CDF 角柱供試体の下面から塩水 (3%塩化ナトリウム水溶液) を吸水させ、1 日 2 サイクルの +20℃ から -20℃ までの凍結融解を 28 日間繰り返す方法。 RILEM CIF と同様.</p> <p>5) German Cube 角柱供試体の全面から塩水 (3%塩化ナトリウム水溶液) を吸水させ、1 日 1 サイクルの +20℃ から -15℃ までの凍結融解を 56 日間繰り返す方法.</p> <p>その他として、SS 13 72 44 や ASTM C672 等もあるが、試験としては上記 2 方法とほぼ同様。なお、上記 2 方法はスケーリングを対象とした試験 (凍結防止剤の作用を受けたコンクリートを想定).</p>
<p>暴露試験</p>	<p>1) ダムコンクリート配合大型試験体を奥只見 (東北地方山間部) ダムと仙美里 (北海道十勝) ダムに約 40 年間暴露¹²⁾. W/B : 44~50%, 結合材は中庸熟ポルトランドセメントにフライアッシュを 25~30% 置換, 高炉セメントを使用. 大型試験体からコア採取した結果, 表層 5mm 程度付近は劣化していたが, 表層を除いた部分においては劣化しておらず, 凍害劣化の範囲は極表層付近のみと報告. その理由として豪雪地帯で一度積雪に覆われると融雪しないことから, 凍結融解の履歴が少ない可能性があるとも報告.</p> <p>2) 凍害環境下 (札幌, 北見, 網走, 留萌, 釧路, 室蘭, 仙台, 福島, 新潟, つくばの 10 箇所) に 12 年暴露した結果について報告⁷⁾. いずれの暴露地においても相対動弾性係数の低下はほとんど見受けられず, 促進試験で耐凍害性に劣るコンクリートでも健全との報告. 自然環境下での劣化には最低気温や凍結融解回数以上に, 水分の供給・保持条件の影響が大きいとしており, 一般的な促進試験方法は非常に厳しいと報告.</p> <p>なお, 文献 7) では凍害環境下を以下に分類している.</p> <p>①重凍害環境: 最低気温が -10℃ 程度以下の厳しい気象条件で凍結融解作用を受ける環境. ②凍害環境: 最低気温が -5℃ ~ -10℃ 程度の一般的な気象条件で凍結融解作用を受ける環境. ③軽凍害環境: 最低気温が -5℃ 程度以上の穏やかな気象条件で凍結融解作用を受ける環境. ④塩分環境: 海岸地域で海塩の影響と凍結融解作用を同時に受ける環境</p> <p>3) 北海道 (札幌, 旭川, 室蘭) の 3 箇所に 2 年間暴露し, 暴露環境中の内部湿度を測定¹³⁾. コンクリートの凍害は温度だけではなく, 内部の相対湿度が大きく影響しており, 水分条件を適切に評価することがあるとしている.</p> <p>4) 文献 1) による凍害度の危険マップと文献 14) による ASTM C666 換算の各地の年間の相当サイクル数の例.</p> <p>暴露環境下選定の一資料.</p>

1. 〇内の数値は凍害危険度。

凍害危険度	凍害の予想程度
5	極めて大きい
4	大きい
3	やや大きい
2	軽微
1	ごく軽微

2. 凍害凍み係数 f(A)：良質骨材、または A 形剤を使用したコンクリートの場合。
 3. コンクリートの品質が良くない場合には、----- 内の地域でも凍害が発生する。



解説図 26.1 凍害危険度の分布図⁴⁾

解説表 5.4.1 各地の年間の ASTM 相当サイクル数 Ceq (サイクル/年)

(露出している水平面・水掛かり面のコンクリートの場合)

地名	サイクル								
稚内	21	広尾	44	熊谷	3	軽井沢	32	奈良	2
札幌	36	名寄	49	筑波山	11	敦賀	1	松江	2
羽幌	27	北見	57	水戸	5	岐阜	2	境港	2
雄武	39	大船渡	6	秩父	11	名古屋	2	米子	2
留萌	25	新庄	21	東京	1	飯田	13	鳥取	2
旭川	37	金沢	18	横浜	1	甲府	6	津山	7
網走	34	深浦	7	横山	2	河口湖	23	広島	1
小樽	21	青森	20	勝浦	1	浜松	1	福山	2
札幌	33	むつ	23	千葉	1	御前崎	1	岡山	3
岩見沢	40	八戸	10	日光	30	静岡	2	姫路	2
帯広	64	秋田	10	輪島	3	三島	4	山口	3
釧路	40	盛岡	21	相川	2	上野	5	高知	2
根室	26	宮古	8	新潟	3	津	1	剣山	31
寿都	15	酒田	5	金沢	2	尾鷲	5	飯塚	2
室蘭	12	山形	15	伏木	3	四日市	2	日田	5
苫小牧	30	仙台	5	富山	5	豊岡	5	雲山岳	9
浦河	18	石巻	6	長野	13	舞鶴	4	熊本	2
江差	10	福島	6	上越	6	伊吹山	26	阿蘇山	14
森	23	白河	9	福井	3	京都	1	人吉	4
函館	24	いわき	3	高山	29	彦根	3	都城	3
倶知安	42	宇都宮	9	松本	21	神戸	1	宮崎	1
紋別	36	前橋	3	諏訪	21	大阪	1		

その他(化学的腐食環境：酸性土壌等を想定) この環境を想定するかどうかは検討が必要。

促進試験

1) JSTM C 7401 (建材試験センター規格)

溶液浸漬によるコンクリートの耐薬品性試験

所定の濃度の溶液に浸漬し、曲げおよび圧縮強度、質量変化、動弾性係数、長さ変化を測定。浸漬期間は目的に応じて決定する。

塩酸 2%, 硫酸 5%, 硫酸ナトリウム 10%, 硫酸マグネシウム 10% の 4 種類の溶液から試験目的に合わせて選択。

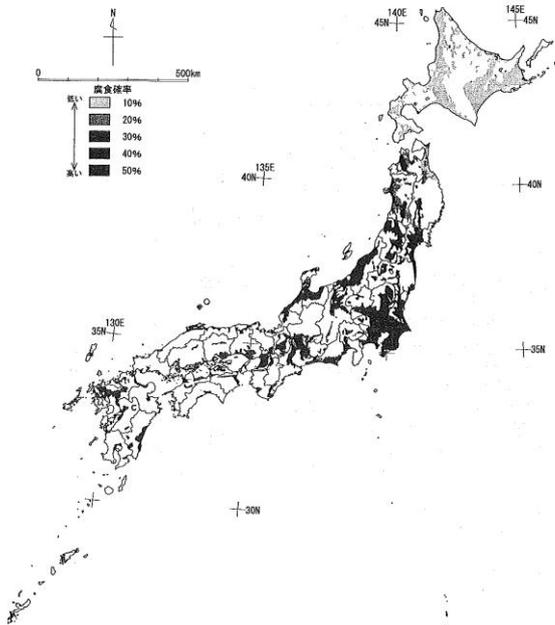
暴露試験

1) 文献 7) では化学的腐食環境下として以下の 4 つとして分類

- ① 常時接触環境：試験体が、腐食物質に常時接触する環境。
- ② 乾湿繰返し環境：試験体が、腐食物質に頻繁に接触する環境。
- ③ 飛沫環境：試験体が、腐食物質にまれに接触する環境。
- ④ その他：上記を除く化学的腐食。

化学的腐食環境下の長期暴露データ少ないのが現状。

右図は海成層起源の硫酸イオンによるコンクリートの腐食確立図⁷⁾



参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）
- 3) 佐伯竜彦, 長瀧重義: 散水促進中性化試験による中性化深さの予測, コンクリート工学年次論文集, Vol. 15, No. 1, pp. 801-806, 1993
- 4) 魚本健人, 高田良章: コンクリートの中性化速度に及ぼす炭酸ガス濃度の影響, 生産研究, 43 巻 6 号, pp. 35-38, 1993
- 5) 大賀広行, 長瀧重義: 促進試験によるコンクリートの中性化深さの予測と評価, 土木学会論文集, 第 390 号, V-8, pp. 225-238, 1988
- 6) 社団法人 建築業協会技術研究部会 材料施工専門部会 中性化抑制評価研究会, 中性化抑制評価研究会, 躯体コンクリートの中性化抑制に寄与する各種仕上材の評価研究会活動報告書, 2009
- 7) 日本コンクリート工学協会: 自然環境とコンクリート性能評価に関するシンポジウム, 委員会報告書, 論文集, 2005
- 8) 高橋英孝, 湯浅昇, 山田義智, 大城武, 松井勇, 笠井芳夫: コンクリート塩化物イオン促進浸透試験方法の検討, 日本建築学会学術講演梗概集 (中国), 材料施工, pp. 797-798, 2008
- 9) 西林新蔵, 宮内克之, 田中英男: 耐海水コンクリートに関する実験的研究-耐海水性の評価-, 土木学会年次学術講演会, pp. 66-67, 1977
- 10) 福手勤, 山本邦夫, 濱田秀則: 海水を練り混ぜ水とした海洋コンクリートの耐久性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 29 号, 第 3 号, pp. 57-93, 1990
- 11) 山路徹, 中野松二, 濱田秀則, 山田一夫: 実海洋環境下に長期暴露されたコンクリートの諸性能に関する調査結果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp. 609-614, 2008
- 12) 佐藤道生, 酒井隆行, 上山邦彦: 凍害環境に暴露した大型コンクリート供試体の物性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 1183-1188, 2009
- 13) 濱幸雄, 胡桃澤清文, 谷口円, 桂修: 寒冷環境下に暴露したコンクリートの内部の温湿度変化と等価積算温度, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 819-824, 2007
- 14) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針 (案)・同解説 2004

第2章 既設構造物の耐久性調査結果の収集・整理

本章では、まず、建設後50年以上の実績がある橋梁(道路橋、鉄道橋)の紹介を行う。つぎに、既設構造物(コンクリート橋、合成桁橋)の耐久性に関する調査結果のまとめを行う。最後に、暴露試験場(寒地土木研究所美々暴露実験場、小樽港湾)の見学についての報告を行う。

2.1 100年以上の実績がある橋の紹介

鋼橋は、100年以上供用されている橋梁はいくつか存在しており、主に、明治時代に造られたもので120年を超えて現在でも健在である。その多くは鉄道橋として海外で造られもので、その後、道路橋や人道橋として再利用された橋梁もある。このように、建設後100年を経過して、現在でも供用されているのは、維持管理が適切に行われ、定期的な点検、補修が実施されているためであると考えられる。

表2.1.1に100年以上使用されている鋼橋の事例を示す¹⁾。

表 2.1.1 100年以上使用されている鋼橋の事例

整理番号	橋梁名	所在地	建造年	供用年数	用途	橋梁形式	橋長[m]	製造	維持管理概要
1	旧揖斐川橋梁 	岐阜県 大垣市	1886年	126年	鉄道橋⇒ 道路橋⇒ 人道橋	ダブル ワーレン トラス	321.7	イギリス	年1回の定期点検を実施。これまでに塗装塗り替え、床版断面修復、伸縮装置の取り替えを実施
2	出島橋 	長崎県 長崎市	1890年	122年	道路橋⇒ 道路橋	プラット トラス	36.7	日本 (鋼材はアメリカ製)	年1回の目視点検、7年に1回の橋梁下からの目視点検
3	岩田橋 	新潟県 長岡市	1898年	114年	鉄道橋⇒ 道路橋	ポニー ワーレン トラス	62.7	イギリス	支承移動制限装置の設置、伸縮装置の取り替え、塗装の塗り替えを10年毎に実施。

4	向野跨道橋 	愛知県 名古屋市	1899年	113年	鉄道橋⇒ 道路橋⇒ 人道橋	プラット トラス	119	アメリカ	耐震補強の実施
5	明治橋 	大分県 臼杵市	1902年	110年	道路橋⇒ 人道橋	プレート ガーダー	32.5	日本	詳細調査により、 床版と高欄の補修 を実施。鋼桁の補 修を計画中。
6	最上川橋梁 	山形県 寒河江市	1885年	127年	鉄道橋⇒ 鉄道橋	ダブル ワーレン トラス	334	イギリス	2年に1回の通常 全般検査、10年に 1回の特別全体検 査を実施して、健 全度を判定してい る。
7	箱根登山鉄道 早川橋梁 	神奈川県 箱根町	1888年	124年	鉄道橋⇒ 鉄道橋	ダブル ワーレン トラス	61	イギリス	2週間に1回の軌 道からの検査と、5 ～6年での補修塗 装
8	中央本線 多摩川橋梁 	東京都 立川市	1889年	123年	鉄道橋	プレート ガーダー	440	イギリス	2年に1回の目視 検査で通常全般検 査、10年に1回の 特別全般検査を実 施。

【参考文献】

- 1) 現役で活躍する 100年橋梁, 日本橋梁建設協会

2.2 鉄道橋の長期間供用された事例

2.2.1 長期間供用された鉄道橋の事例

我が国の鉄道は1872年(明治5年)に新橋－横浜間で開通した。当初は外国人技師が招聘されて鉄道建設が進められ、当時の鉄道橋の鋼材には海外の材料が用いられているものもある。鉄道開通当初の新橋－横浜間(明治5年開業)と大阪－神戸間(明治7年開業)には、木橋が使用された。その数年後からは、錬鉄を用いた鉄製の鉄道橋が架けられている。また、明治40年頃には鉄筋コンクリート構造物、昭和20年代後半にはプレストレストコンクリート、昭和30年代からは合成桁や鉄骨鉄筋コンクリート構造物などの複合構造物も架設された^{2),3)}。

これらの構造物の中には、河川改修、複線化・重量化・速度向上等の機能的要求の変化・向上から、あるいは老朽化の理由から架け替えられた橋梁もあるが、当初の構造物を長期にわたり維持管理して供用されたものも多くある。ここでは、その事例をいくつか紹介する^{3),4)}。

(1) 旧余部橋梁 (JR 西日本 山陰本線)^{5),6)}

本橋は、1912年(明治45年)に完成した長さ310m、高さ41mのトレスル橋である(写真2.2.1)。橋脚はアメリカで製作、桁は日本で製作された「日米混血」の橋梁である。海岸からわずか約70mという厳しい環境状況のもとで約100年間供用された。この背景には「橋守」の存在がある。「橋守」(正式の工種は「工手」)は、余部橋梁の専属の保守員で、塗装の塗り替え(4～5年に1回)や腐食の検査・補修などに尽力された。十分な維持管理を行えば、厳しい環境下でも長期供用が可能であることを示すお手本である。

なお、約100年間供用されたが、強風に対する運行規制強化や腐食対策のため、2010年に5径間連続PC箱桁エクストラドーズド橋に架け替えられた。旧余部橋梁から撤去された部材を用いて種々の実験が行われている⁷⁾。

(2) 最上川橋梁 (JR 東日本 左沢線)⁸⁾

本橋は、1889年(明治22年)に東海道本線天竜川橋梁として架設された橋梁を、一部改造して転用された。英国から輸入した明治18年製のポーナル型(橋長45.7m)の全錬鉄製ダブルワーレントラス橋である(写真2.2.2)。経年90年を超えた頃に取替え計画候補に挙げられたが、現状の活荷重が設計当時の設計荷重と比べて小さく、耐力的に余裕があることが確認され、その後も通常のメンテナンスで十分使用可能との判断で120年が経過した今でも供用されている。

(3) 早川橋梁 (箱根登山鉄道)^{9),10)}

本橋は、1888年(明治21年)に東海道本線天竜川橋梁として架設された橋梁で、1917年(大正6年)に現在の位置に移設された。橋長61mのダブルワーレントラストラス橋であり、弦材に鋼、斜材等は錬鉄が使用された。製造当時は最長の橋梁であった(写真2.2.3)。100年経過した頃に健全度調査が行われ¹⁰⁾、特に、大きな損傷もなく、今後も通常のメンテナンスで使用可能と判断され、120年以上が経過した今も供用されている。



写真 2.2.1 旧余部橋梁



写真 2.2.2 最上川橋梁⁸⁾



写真 2.2.3 早川橋梁⁴⁾

(4) 島田川暗渠 (JR 西日本 山陰本線)

本橋は、日本の鉄道の最初の RC 構造物で、1907 年(明治 40 年)に施工された。径間 1.8m のアーチ型の暗渠である(写真 2.2.4)。建設後約 80 年経過した段階で調査が行われ、コンクリートの充填が不十分な箇所では一部鉄筋の腐食が認められているが、全般に健全であることが報告されている¹¹⁾。100 年以上経過した今でも供用されている。

(5) 山生橋梁 (JR 東日本 内房線)^{12)~14)}

本橋は、日本初期の単線 RC 単純 T 形桁 16 連(支間 9.1m)で、1920 年(大正 9 年)に施工された(写真 2.2.5)。鉄道の RC 構造物として、アーチから桁・梁構造へと進化する記念碑的な意義を持つ構造物である。太平洋に面する海岸線にあり厳しい環境下にありながら、ひび割れや剥離等に対して適切な補修を施しつつ、90 年程度経過した今でも供用されている。

(6) 第一大戸川橋梁 (信楽高原鉄道)¹⁵⁾

本橋は、1954 年(昭和 29 年)に架設された国内発の本格的なポストテンション方式の PC 鉄道橋(支間 30m)である(写真 2.2.6)。建設当時から主桁のクリープ係数の推定が行われており、コンクリートの乾燥収縮等の影響を除くための標準桁が現在でも暴露されている。また、2007 年には、コンクリートの表面品質の評価のため、外観調査、中性化深さ試験および表面含水率測定試験等が行われ、ほとんど中性化が進んでいないことが明らかとなった¹⁵⁾。60 年近く経過しているが今も供用されている。



写真 2.2.4 島田川暗渠⁴⁾



写真 2.2.5 山生橋梁¹⁴⁾



写真 2.2.6 一大戸川橋梁⁴⁾

2.2.2 長期間供用された鉄道橋の材料調査の事例

(1) 鋼鉄道橋

ここでは、鋼鉄道橋で長期間供用された橋梁から試験片を採取して、化学成分や材料強度等の材料特性を調査した事例^{17)~21)}等を紹介する。鋼鉄道橋を年代で分類すると 1850~1880 年は錬鉄橋, 1880~1895 年は錬鉄と鋼の併用橋, そして 1895 年以降が鋼橋と言われている(ここでは、これら全てを鋼鉄道橋とする)。鋼は、材料自体は経時的な材料劣化は生じないため、このような調査結果から、年代毎の材料の特性を把握することが可能である。文献 21)より、調査結果の一例を図 2.2.1~図 2.2.4 に示す。なお、これらのグラフには、道路橋での材料試験結果も一部含まれている。

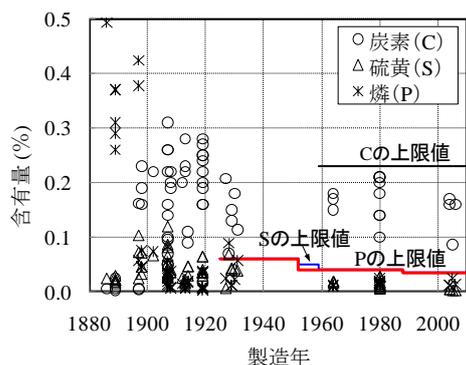


図 2.2.1 主要元素の含有量の分布傾向

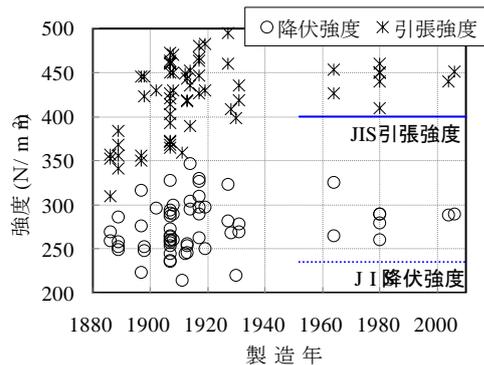


図 2.2.2 製造年と強度の関係

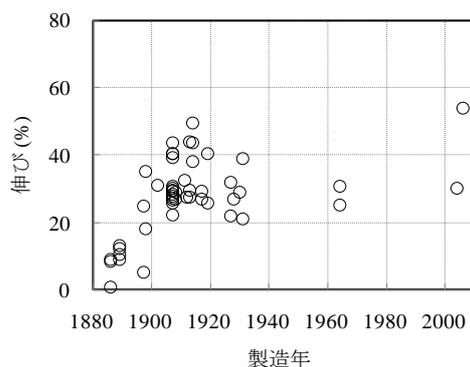


図 2.2.3 製造年と伸びの関係

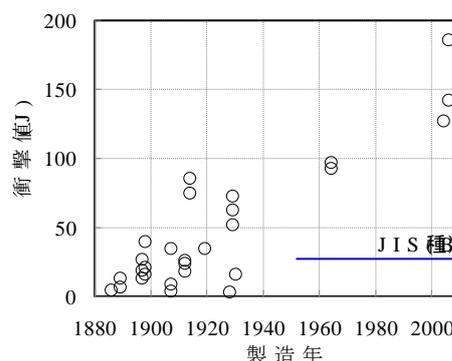


図 2.2.4 製造年と衝撃値の関係

図 2.2.1～図 2.2.4 より、例えば、年代の古い鋼材に着目すると、以下の傾向がわかる。

- ・ 1890 年以前の鋼材は、炭素 C が 0.005%以下と少なく、燐 P の不純物が非常に多い。また、1900 年～1925 年(JES 制定)の鋼材は、炭素 C が多く、硫黄 S や燐 P も多く、JES の規格値(S, $P \leq 0.060\%$)を超えているものも多い。
- ・ 1925 年(JES 制定)以前の鋼材は、強度のばらつきが大きく、現行の 400N/mm^2 級材の JIS の規格値(降伏強度 235N/mm^2 , 引張強度 400N/mm^2)以下のものもある。
- ・ 1890 年以前の鋼材は、引張強度や伸びの低いものが多い。この理由として、炭素 C が 0.005%以下と少なく、不純物が多いことが考えられる。
- ・ 1925 年(JES 制定)以前の鋼材は、全体的に衝撃値が低く、現行の JIS G 3106 の B 種の規格値(27J)以下のものが多い。この理由として、硫黄 S や燐 P の不純物が多いことが考えられる。

(2) コンクリート鉄道橋

ここでは、鉄筋コンクリート橋の変状のうち鉄筋の腐食に着目し、これの原因となるひび割れ、中性化および塩害について、実橋での調査結果の一例^{11), 22)~24)}を紹介する。

a) ひび割れによる鉄筋腐食^{11), 22)}

文献 22)において、国内の一般環境下において 10～60 年経過した鉄筋コンクリート鉄道橋 75 橋について調査した結果が記述されている。その結果から、

- ・ 経年 10 年～40 年の部材は、ひび割れ幅とかぶりが鉄筋腐食に大きく関係する。

- ・ 経年 40 年～60 年の部材は、かぶりと中性化深さが鉄筋腐食に関係し、ひび割れ幅の影響は比較的小さい。

ことなどが確認されている。

b) 中性化による鉄筋腐食^{11), 23)}

文献 23)において、建設後 30 年程度を経過した RC ラーメン高架橋 8 橋を対象に、中性化深さの調査が行われ、中性化速度に関する検討が行われている。中性化深さの調査結果の一例を図 2.2.5 に示す。この図は、2 つの高架橋の柱の高さ方向の中性化深さ分布を示している。

c) 塩化物による鉄筋腐食^{11), 24)}

文献 24)において、海岸線近くに位置する 142 箇所の RC 構造物(建設後 20～97 年経過)を対象に、塩化物イオン濃度の調査が行われ、耐久性の検討に用いる表面塩化物イオン濃度係数に関する検討が行われている。塩化物イオン濃度の調査結果の一例を図 2.2.6 に示す。

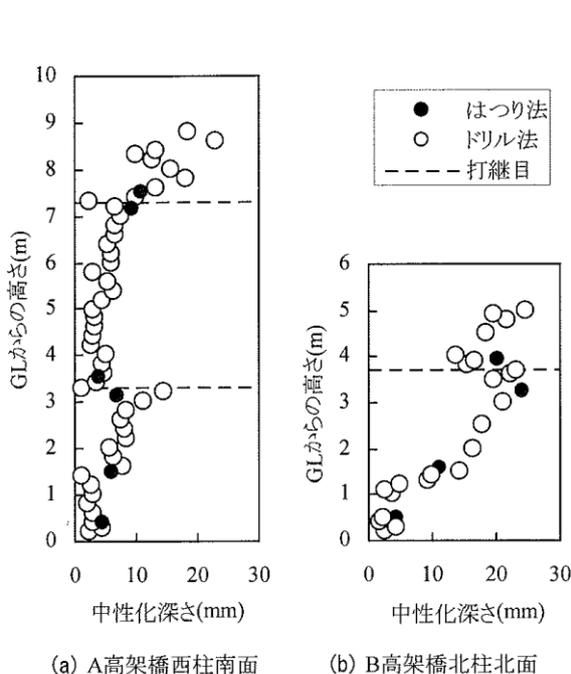


図 2.2.5 柱の中性化の高さ方向分布

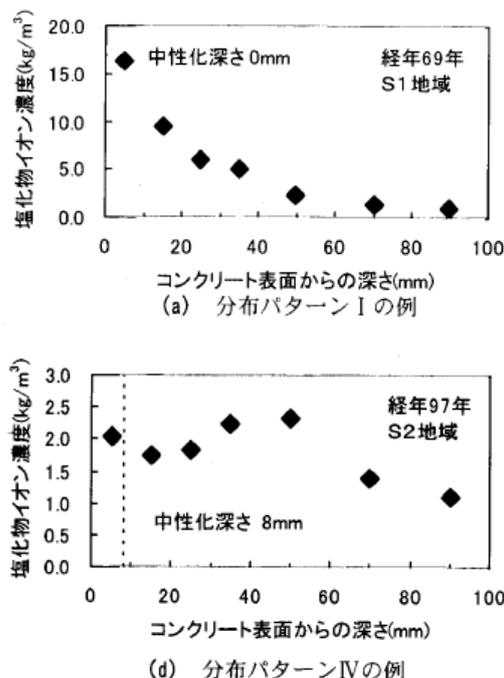


図 2.2.6 塩化物イオンの分布形状

鉄道の歴史は古く、古い年代に開業した鉄道が多く存在する。鉄道構造物は架け替えが困難であるため、適切に維持管理しながら長期間にわたって供用されているものが多い。このような鉄道構造物における調査は、工学上有益な情報を有している。

長期暴露試験は長期にわたる試験体の保管・管理が難しいが、鉄道構造物のように長期間供用された構造物から調査を行うことは、材料特性の経時変化等の情報が得られるだけでなく、構造物の健全度評価にもつながるため、今後有効に活用していくことが望まれる。

【参考文献】

- 2) 構設史編集研究会編：鉄道構造物を支えた技術集団－国鉄構造物設計事務所の足跡－，(社)日本鉄道施設協会，2009.9
- 3) 杉本一郎：鉄道技術来し方行く末 第6回 鋼鉄道橋，Vol.69，No.9，2012.9
- 4) 社団法人日本鉄道施設協会：鉄道施設 50 選，協会 50 周年記念事業，2003.10
- 5) 阿部英彦：卒寿を越えて頑張る余部の鉄道，JSSC，No.54，pp.26-34，2004.10
- 6) 兵庫県香美町：余部鉄橋－余部鉄橋の有終を刻む－，2007.2
- 7) 一般財団法人災害科学研究所：旧余部橋梁撤去部材を用いた調査研究に関するシンポジウム，2012.11
- 8) http://www.pref.yamagata.jp/ou/shokokanko/110001/him/him_07.html
- 9) 奈良一郎：歴史的な橋を訪ねて(第3回)－百歳の鉄道橋－，東骨技報，No.31，1990
- 10) 山内幸政，入部孝夫：箱根登山鉄道早川橋梁の健全度調査，東京鉄骨橋梁技報，No.36，1993
- 11) 仁杉巖監修：鉄道土木構造物の耐久性，山海堂，2002.8
- 12) 石塚剛，箱守和重，保野聡裕，清水保：内房線江見～太海間山生橋りょうの維持管理，日本鉄道施設協会誌，2012.12
- 13) <http://www.chiba-muse.or.jp/SCIENCE/sanko/pages/061.html>
- 14) <http://committees.jsce.or.jp/heritage/node/746>
- 15) 大坪正行：信楽高原鉄道「第一大戸川橋梁」，コンクリート工学，Vol.51，No.2，2013.2
- 16) 土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性評価検証システム研究小委員会(335 委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ 80，2008
- 17) 阿部允，小芝明弘：経年劣化した鋼鉄道橋の材料特性，鉄道総研報告，Vol.5，No.12，pp.34-41，1991.1
- 18) 土木学会：歴史的鋼橋の補修・補強マニュアル，鋼構造シリーズ 14，2006.11
- 19) 日本鋼構造協会：既設鋼橋部材の耐力・耐久性診断と補修・補強に関する資料集，JSSC テクニカルレポート，No.51，2002.1
- 20) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(鋼・合成構造物)，丸善，2007.1
- 21) 池田 学，北 健志，木村元哉，中山太士：鉄道橋に用いられた古い鋼材の予びずみによる材料特性への影響，鋼構造論文集，Vol.19,No.73，2012.3
- 22) 谷内田昌熙，石橋忠良，佐藤勉：鉄筋コンクリート橋梁のひびわれと鉄筋腐食に関する調査・研究，土木学会論文集，第 378 号，V-6，1987.2
- 23) 谷村幸裕，長谷川雅志，曾我部正道，佐藤勉：鉄道 RC ラーメン高架橋の中性化に関する耐久性照査法の適用に関する研究，土木学会論文集，No.760，V-63，pp.147-157，2004.5
- 24) 川村力，谷村幸裕，曾我部正道，東川孝治：鉄道構造物の調査に基づくコンクリート中への塩化物イオン浸透に関する研究，土木学会論文集，No.781，V-66，pp.193-204，2005.2

2.3 既設構造物(コンクリート、合成桁橋)の耐久性に関する調査結果

2.3.1 わが国で最初の PC 橋(長生橋)の解体調査と PC 桁の載荷試験²⁵⁾

(1) はじめに

わが国で最初の PC 橋である長生橋は、1951 年に石川県七尾市を流れる御祓(みそぎ)川に架設された。建設後 50 年間にわたり供用されていたが、河川改修工事にともない撤去・架替えなされることとなり 2001 年 9 月に撤去が完了させた。調査として、撤去後の長生橋の PC 桁を利用して、材料試験および載荷試験が行われた¹⁾。



写真 2.3.1 建設当時の長生橋

(2) 長生橋の構造形式

長生橋は、工場製作したプレテンション方式の逆 T 形桁を敷き並べ、その上に舗装一体の場所打ちコンクリートが施工された橋長 10.600m、桁長 3.840m の 3 径間単純合成床版橋である。

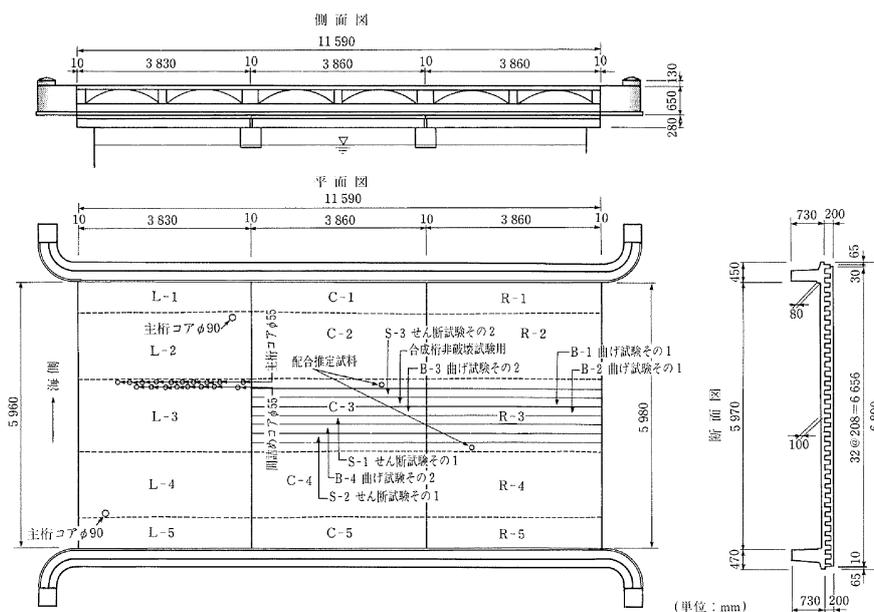


図 2.3.1 長生橋の一般図

(3) 材料試験

a) コンクリート

主桁のコンクリートは設計資料による設計基準強度 50N/mm^2 に対し、試験の平均値は 63.9N/mm^2 であり、十分な圧縮強度を有していた。コンクリートコアの切断面を観察したところ、良質な川砂および玉砂利が使用され、非常に密実なコンクリートであった。

表 2.3.1 コンクリートの力学的性質

項目	長生橋						泰平橋
	主桁部			間詰め部			
圧縮強度 N/mm^2 (平均値)	63.5	55.7	72.5	47.3	43.4	41.4	64.3
	63.9			44.0			
割裂引張強度 N/mm^2 (平均値)	3.42	4.53	3.71	2.49	2.76	3.46	3.80
	3.89			2.90			
静弾性係数 kN/mm^2 (平均値)	33.6	31.5	40.6	32.9	30.8	29.0	46.0
	35.2			30.9			

フェノールフタレイン溶液噴霧後の桁断面は、断面全体において赤色が呈され、中性化領域はほとんど存在しなかった。

桁下面のコンクリート表面部における塩化物イオン濃度が高いが、塩分の最大浸透深さは 15mm 程度と小さなものであった。

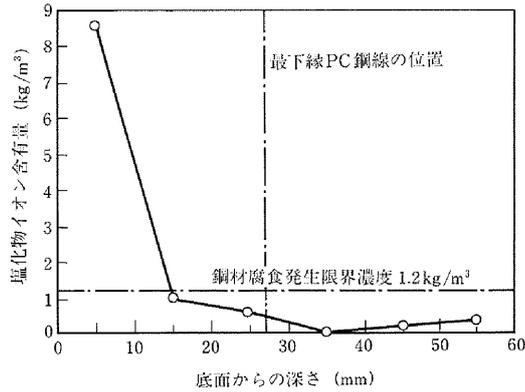


図 2.3.2 主桁の塩分浸透状況

b) PC 鋼材

PC 鋼材の試料をコンクリート中から採取したところ、鋼線表面わずかな発錆が認められたものの、孔食などの有害な腐食は存在しなかった。

(4) 載荷試験

a) 曲げ載荷試験

荷重—変位曲線は、FEM 解析値と近い挙動を示し、曲げ耐力は梁理論による計算値を上回る結果となっていた。桁に鉄筋が配置されていなかったため、塑性域においてひび割れが分散せず、特定のひび割れ部位に開口が集中する性状を示した。

ひび割れ発生までは、各荷重段階ではほぼ直線状態となり、中立軸の位置、線ひずみの値は計算値と比較的良好一致した。

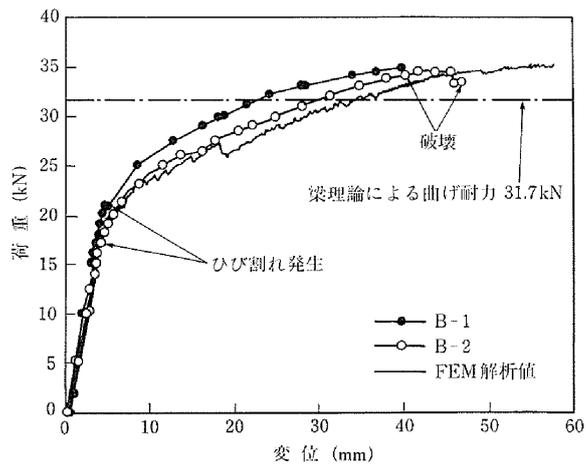


図 2.3.3 曲げ載荷試験(その 1)の荷重—変位曲線

b) せん断載荷試験

破壊性状は、いずれの桁も斜め引張破壊ではなく、PC 鋼材の破断による曲げ引張破壊となり、せん断スパン内に斜めひび割れは見られなかった。

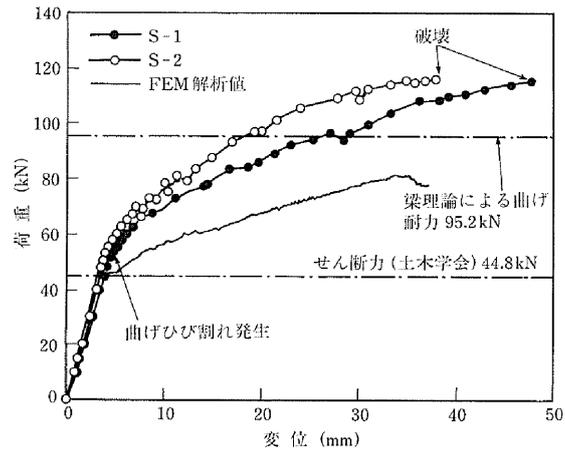


図 2.3.4 せん断載荷試験(その 1)の荷重—変位曲線

(5) まとめ

長生橋の調査により，長期間を経た現在でもなお長生橋は健全が保たれていることが明らかになった。

【参考文献】

- 25) 小門前，西垣，竹腰，鳥居：わが国で最初の PC 橋(長生橋)の解体調査と PC 桁の載荷試験，プレストレストコンクリート，pp.39～46，Vol.44，No.5，2002 年 9 月。

2.3.2 PC 橋梁初の有形文化財登録—信楽高原鐵道の第一大戸川鐵道橋—²⁶⁾

(1) はじめに

平成 20 年 6 月 20 日文部科学省の文化審議会議において、60 箇所 170 件の建造物が登録有形文化財として登録されるよう文部科学相に答申された。信楽高原鐵道の第一大戸川鐵道橋がこの答申に含まれ、PC 橋梁として初の登録有形文化財に加わることとなった。

第一大戸川鐵道橋は、1954 年にスパン 30m のプレストレストコンクリート橋として建設され、国鉄における本格的な PC 鐵道橋の第一号となった。



写真 2.3.2 第一大戸川鐵道橋

(2) 設計・計画

基本設計は、フランス人コバニコ氏によって行なわれ、当時の国鉄設計室長 永友和夫博士を中心に吉田徳次郎博士の指導を仰ぎながら修正改良して最終設計方針が定められた。

(3) コンクリート

コンクリートの設計基準強度は $450\text{kgf/cm}^2(45\text{N/mm}^2)$ であり、スランプ 3cm の個コンクリートを桁断面の隅々まで完全に打ち込むため、同一断面で長さ 2m の試験体を 4 本および長さ 5m の試験体を 1 本についてのコンクリート打設テストを行ない、打ち込み方法について確信が得られた。

表 2.3.2 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ の目標値 (cm)	水セメン ト比 W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
				水 W	セメ ント C	細骨材 S	粗骨材 G
25	3	36	31	162	450	549	1 263

注) セメント：アサノペロセメント（早強セメント）

細骨材：野洲川産天然砂

粗骨材：愛知川産天然砂利

混和材料は用いなかった。

(4) シースの摩擦

PC 鋼材とシースとの間の摩擦力を考慮して緊張力を調整するが、当時、国内実績は少ないため、各種の長さおよび曲げ角を持ったシースを配置した試験体を 3 体作成して、実験式が導かれた。

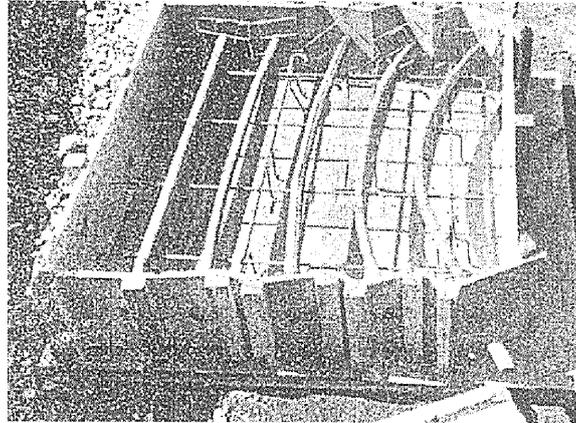


写真 2.3.3 PC 鋼材とシース間の摩擦力の測定用試験

(5) グラウト

当時わが国においては、グラウトについて十分な研究がなされていなかったため、材料、配合、練混ぜ、注入方法に関する試験が行われた。

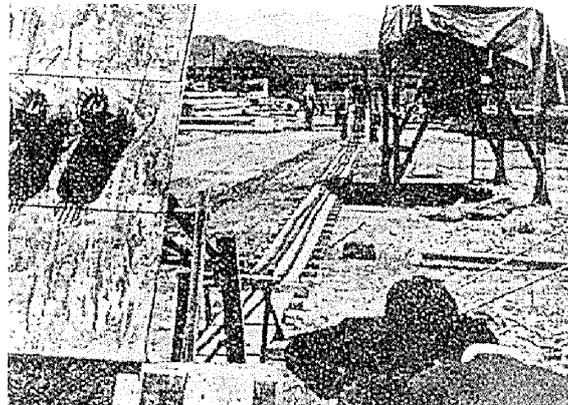


写真 2.3.4 延長 30m の PC ケーブルへのグラウト注入試験

(6) 載荷試験

本橋は、フレシネー方式のケーブルを使用した PC 桁であるが、わが国ではその例がなかったため、安全性を確かめるためにスパン 11m の試験桁を製作して、曲げ載荷試験が行われた。

(7) クリープ

野外環境におけるクリープ・乾燥収縮を予想できるデータが無かったので、2m の試験体を製作して測定が続けられた。コンクリートのクリープ・乾燥収縮の測定値は、橋梁完成の 4 年後にほぼ収束したよう見えたので土木学会に報告した。



写真 2.3.5 クリープ・収縮測定用標準桁



写真 2.3.6 第一大戸川橋梁 PC 桁のクリープ測定

(8) まとめ

旧国鉄信楽線第一大戸川橋梁における各種の実験的研究は、このようにして黎明期のわが国の PC 橋梁発展のさきがけとなったものである。

【参考文献】

- 26) 菅原：PC 橋梁初の有形文化財登録－信楽高原鐵道の第一大戸川鐵道橋－，プレストレストコンクリート，pp.42～46，Vol.50，No.5，2008年9月。

2.3.3 旧神崎橋(活荷重合成桁橋)の力学性状^{27)~30)}

(1) はじめに

神崎橋は、昭和 28 年に架設されたわが国初の活荷重合成桁橋である。架設当初の幅員は 6m の車道部のみであったが、その後、交通量の増加に伴い、上流側に幅員 4m のプレキャスト版を用いて車道部 8m、歩道部 2m に拡幅された。本橋の架設当初の一般図を図 2.3.5 に示す。

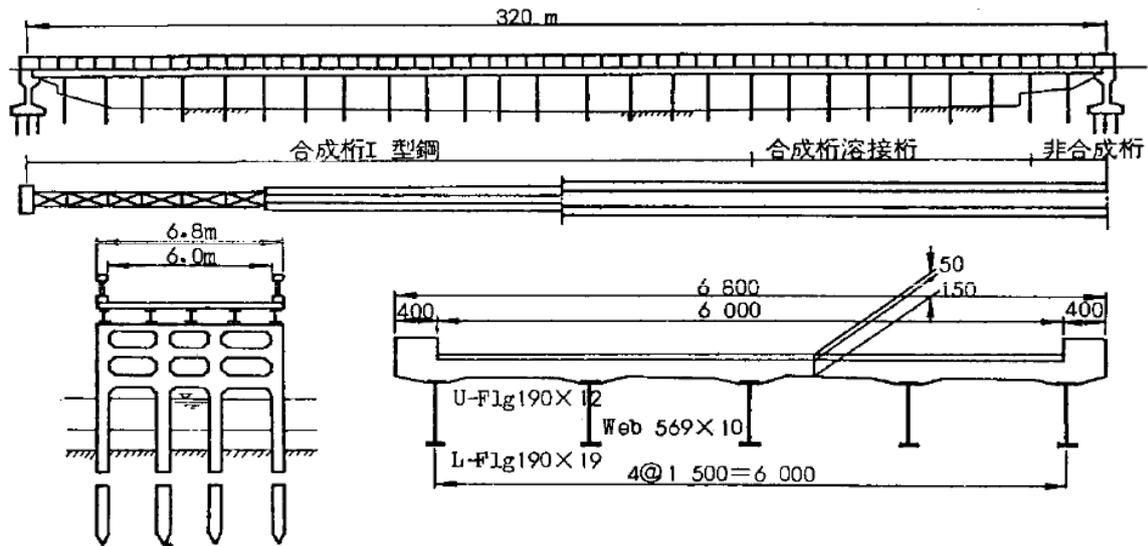


図 2.3.5 神崎橋の一般図

当時、わが国には合成桁の設計指針がなかったため、本橋の設計は、ドイツの道路橋合成桁設計についての暫定示方書に基づいて行われた。また、わが国初の試みであることから、ジベルの押し抜き試験などの基礎実験がなされた。そして、それらの成果が設計に反映にされ、昭和 28 年 4 月には、実物大の単桁の載荷試験を行い、安全性が確認されている。

ここでは、架け替え工事により撤去された桁を用い、25 年経過した合成桁の力学性状や耐荷力に関する調査が行われた結果について報告する。

(2) 材料試験

a) 鋼材

支間中央付近の鋼桁各部およびコンクリート床版中の鉄筋から試験片を採取し、引張試験が行われた。その結果、得られた試験値は、いずれも規格値を満足しており、25 年経年による材料の劣化は、ほとんど無いものと考えられた。

b) コンクリート

試験片は、支間中央ならびに桁端付近から採取し試験が行われた。その結果を、表 2.3.3 に示す。同表より、コンクリートは、25 年間の経年により劣化しているとは認めがたいとの結果が得られた。

表 2.3.3 コンクリートの圧縮強度試験

採取位置	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割線弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)
支点	334	2.64
支間中央	377	3.05
全平均値	357	2.86
架設時 (工事報告書より)	253	

また、フェノールフタレイン溶液による中性化試験を実施した結果、コンクリート床版上下面とも、表面より数ミリ程度、わずかに中性化していることがわかった。

c) ジベル

試験片は、実橋から切り出し、図 2.3.6(b)に示すように、腹板を高力ボルトで添接し、かつ、コンクリート底部に 5cm のモルタルを打継ぎ製作された(図 2.3.6(a)は、設計時に実施されたジベルの押し抜き試験に用いられた供試体である)。

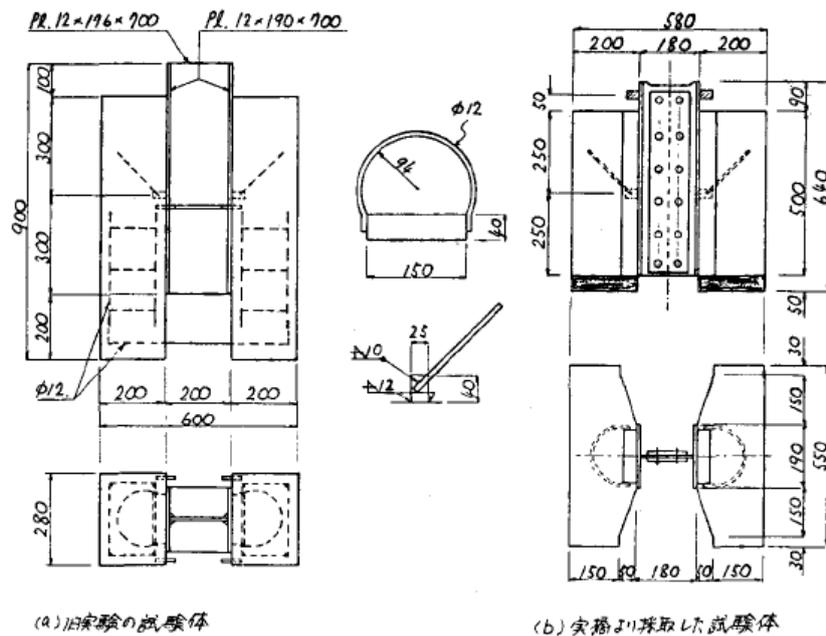


図 2.3.6 試験体の形状寸法

静的押し抜き試験の結果、コンクリートの強度と形状の違いを考慮して、25年経過した実橋から採取した試験体から得られた破壊荷重は、設計時に実施されたジベルの押し抜き試験から得られた値とほぼ一致する結果が得られた。なお、破壊形態は、すべて、ジベルブロック部前面でのコンクリートの支圧破壊と断定された。

d) 単桁による静的破壊実験

25年間供用された合成桁の力学特性および耐荷力を把握するために、静的破壊実験が行われた。試験桁の形状を図 2.3.7 に示す。

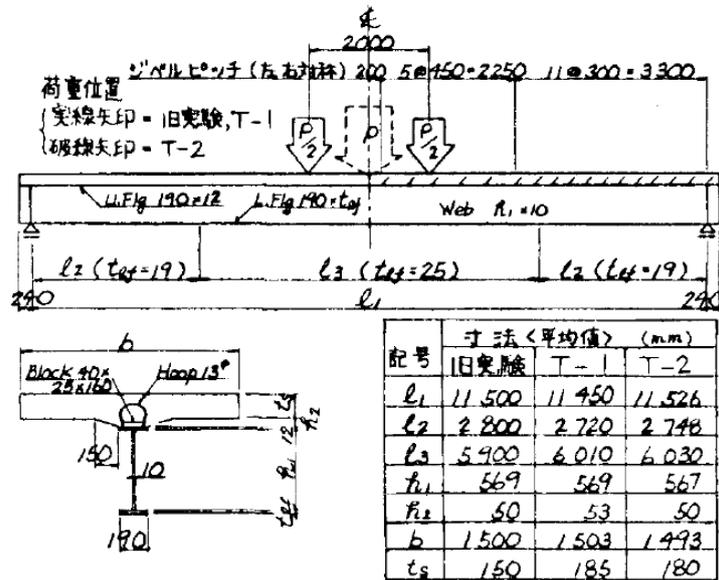


図 2.3.7 試験桁の形状寸法

図 2.3.8 に、支間中央の荷重-たわみ曲線を示す。同図より、弾性範囲内において、たわみは、計算値より大きな値を示していた。その要因として、コンクリート床版内に発生したひび割れが考えられる。

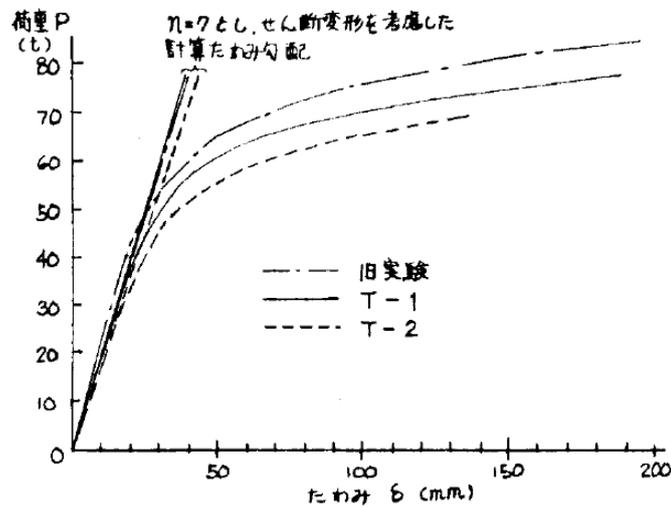


図 2.3.8 支間中央の荷重-たわみ曲線

T-1 の場合、 $P = 78.3t$ で、支間中央より 0.6m の位置で圧壊が生じ、T-2 の場合、 $P = 69.8t$ で支間中央に床版の厚さ方向に斜めひび割れが発生して破壊した。以上より、耐荷力には大きな変化が認められなかった。

【参考文献】

- 27) 遠藤 港, 村松敬一郎, 石崎 茂: 旧神崎橋の単桁による静的破壊実験, 土木学会第 34 回年次学術講演会講演概要集 第 1 部門, pp.264~265, 1979 年 9 月.
- 28) 西堀忠信, 小野精一, 礼場侍郎: 旧神崎橋の 2 主桁による静的破壊実験, 土木学会第 34 回年次学術講演会講演概要集 第 1 部門, pp.266~267, 1979 年 9 月.
- 29) 亀井正博, 春元靖弘, 前田幸雄: 旧神崎橋とその荷重履歴について, 土木学会第 34 回年次学術講演会講演概要集 第 1 部門, pp.268~269, 1979 年 9 月.
- 30) 川上睦二, 栗田章光, 梶川靖治: 旧神崎橋の材料およびジベルの強度試験, 土木学会第 34 回年次学術講演会講演概要集 第 1 部門, pp.284~285, 1979 年 9 月.

2.4 暴露試験場見学報告

2.4.1 寒地土木研究所美々暴露実験場

- ・ 見学日時：2013年2月21日(木) 13:15～13:45
- ・ 見学場所：寒地土木研究所 美々暴露実験場
- ・ 見学者：小林， 齊藤， 島， 下村， 西崎， 松本， 渡辺， 古市

(1) 見学概要

寒地土木研究所美々暴露実験場では、いくつかの供試体の長期暴露試験が行われている。そのうち、今回は初代十勝大橋の解体の際に実橋から切り出したコンクリート桁の長期耐久性試験状況を見学した。1941年から1996年まで55年間供用された後、一部の桁をこの実験場において暴露し、長期耐久性試験が続けられている。解体時に行われた調査では、中性化、凍害による劣化はほとんど認められなかった。150年間の暴露試験プログラムが生まれ、定期的にコアを採取し、強度、物理化学試験を行うこととなっている。

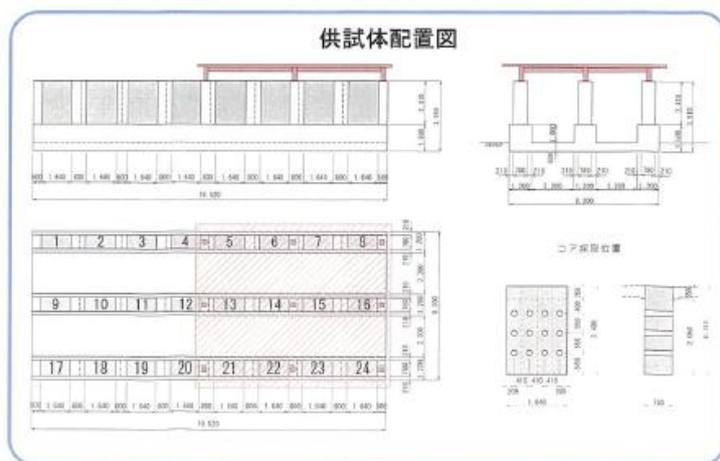


図 2.4.1 初代十勝大橋からのコンクリート長期耐久性試験用供試体の採取



写真 2.4.1 初代十勝大橋から切り出したコンクリート桁の長期耐久性試験状況

(2) 所感

150年暴露試験(供用期間とあわせると200年)を実行した英断と先見性に敬服する。150年は一人の人間の一生よりもはるかに長く、管理組織、行政システムすらも変わっている可能性が高い。インフラの時間スケールはそれらよりも長いことを認め、長期耐久性試験を引き継ぐ姿勢は、小樽港から続く北海道の伝統であろうか。

AE コンクリートでないのに、凍害で劣化していないことは意外であった。水が直接かからなかったからとのことである。

供用地点が飛来塩分の作用を受けない内陸部であり、また、スパイクタイヤが禁止されるまでは凍結防止剤は散布されなかったので塩害を受けていないことも、本橋が55年間に健全を保つことができた理由であろう。

2.4.2 小樽港湾

- ・見学日時：2013年2月21日(木) 15:30~17:00
- ・見学場所：国土交通省 小樽港湾事務所
- ・見学者：上田，小林，斉藤，島，下村，西崎，松本，渡辺，古市

(1) 見学概要

小樽港湾事務所において廣井勇博士と小樽港北防波堤に関する中村氏の講演を聴講した。続いて、展示室において、防波堤の模型、北防波堤の築造時に作製されたモルタルブリケット、その作製と載荷試験のための機器などを見学した。その後、モルタルブリケットを空調管理のもと保管している倉庫を見学した。

小樽港築造以前には、横浜港で海中のコンクリート防波堤の崩壊する事例があり、耐久的なコンクリート構造物を建設することが求められていた。工事にあつた廣井勇博士は、火山灰を使用したコンクリートを用いて防波堤を建設し、同時に多数のモルタルブリケットを作製し50年の長期耐久性試験を開始した。小樽港防波堤はブロックの組み合わせ方にも工夫が凝らされている。

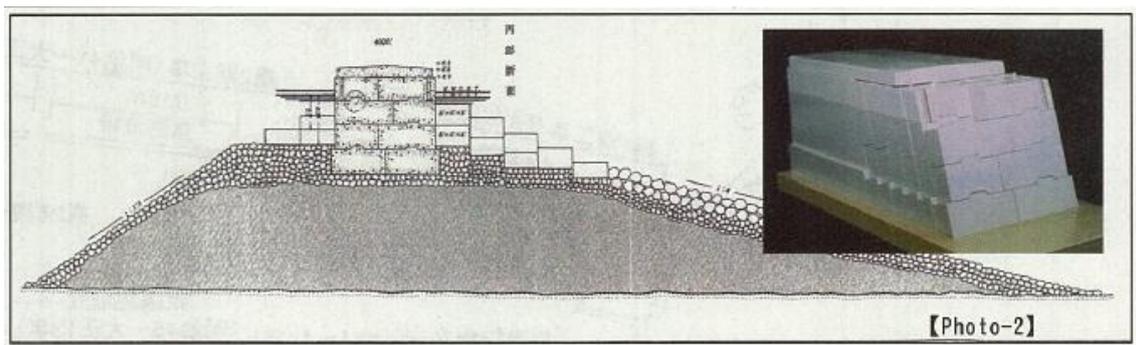


図 2.4.2 小樽港北防波堤



写真 2.4.2 小樽港防波堤に築造時に作製されたモルタルブリケット

(2) 所感

中村氏によると、廣井勇博士は建設時点で小樽港北防波堤の長期耐久性を確信していたのであろうとのことである。予定の耐久性試験が終了した 50 年以降もモルタルブリケットは小樽港湾事務所において丁重に保管されている。理由は何であろうか。理由のひとつは、技術的にまだ意義があるということ、もうひとつはこれだけ社会的に重要な意味をもってしまうと、自分たちの代で捨てられなくなるからではないか。

300 年試験を行うには、試験体製作者が不在となっても、試験体と精神が継承されなければならない。その仕掛けのヒントになるのではないだろうか。

第3章 プロジェクトの実施に係る検討

3.1 はじめに

300年プロジェクトの実施へ向けて、以下の事項に対して事前ヒアリングを実施した。その概要を以下に示す。

- ① 大学や研究機関および材料を提供していただくメーカーなどの課題
- ② 実施費用と成果の帰属
- ③ 募（周知）方法の検討

3.2 検討概要

3.2.1 大学や研究機関および材料を提供していただくメーカーなどで想定される課題

(1) 大学関係

- ・大学自体は存続しても、工学部建設系学科の300年継続性が危惧される。
- ・特に、敷地については、学部学科ではなく大学に属しているため、勝手に物を置いておくのは困難であるため、プロジェクトとして大学に認めさせること重要。
- ・存続している大学が、どの程度あるか危惧される。

(2) 研究機関

- ・港空研など、暴露試験の経験豊富な機関が最も頼りになる暴露場所の一つ。
- ・300年使い続けるであろうインフラの管理地などに設置を打診する。
- ・たとえば、原子力廃棄物格納施設等が考えられ、当プロジェクトの主旨に合致した施設と考える。

(3) 材料メーカー

- ・材料メーカーについては、300年もたすというより、耐用年数を設定して、その期間もてばよいという条件で参加依頼する。
- ・担当者が変わっても、事業を引き継ぐことができる環境があるか確認が必要である。

(4) その他

- ・すでに300年以上継続している実績があるところが望ましい。
- ・防災上の観点から、喪失しないようにする必要があります。
- ・暴露試験のリスク回避のため、公的な敷地を確保し、引継ぎを明確にすることが必要。
- ・土木分野に限らず設置場所を考えた場合、わが国の歴史を鑑みれば、神社仏閣など宗教施設などが最も適している設置場所と考えることもできる。

3.2.2 実施費用と成果の帰属に対する考え方

(1) 実験費用

実施にかかる費用は以下の項目などが考えられる。

- (a) 初期の材料・施工費
- (b) 計測用センサーの設置費用
- (c) 暴露試験場所への運搬費
- (d) 定期的な計測・破壊試験等の費用
- (e) 定期的なメンテ（必要あらば）
- (f) 撤去・廃棄費用

原則として、

- (a) (b) (c)は、メーカー負担、
- (d) (e) (f)は、暴露試験実施機関が負担する。

ただし、定期的な計測や試験については、安価な分析を頻繁にし、高価な分析は50年に1回とか、工夫していく必要がある。しかし、試験方法そのものも最終的には、実施機関に委ねるとの考えもある。

(2) 成果の帰属

成果の帰属は、メーカーと暴露試験実施機関の共同事業とする。

もし、場所だけ提供している機関があれば、その場合は、成果の帰属を協議する。

複合構造委員会（土木学会）は、300年後に存続していないかもしれないため成果に関する権利は当初から放棄する。もし存続していれば、せいぜい謝辞か序論に記載する程度がよい。

(3) 成果の公表

成果の公表に対する合意を、関係者（設置機関、材料提供者、土木学会等）で合意を事前に確認する必要がある。

なお、300年どころか長期間もつ材料が一つもなかった場合は、マイナスイメージとなるが、その現実を社会に情報公開することが本プロジェクトの主旨の一つでもあるため、種々のケースを想定した合意形成が重要である。

3.2.3 公募（周知）方法の検討

学会誌等で、土木学会のプロジェクトとして宣伝する方が、各機関は参加しやすいと考える。

3.2.4 その他

基本方針として、維持管理をしなければならないような材料を後世に残すのかどうかなど、暴露期間中にメンテを必要とするか否かに関係するため条件設計を明確にする必要がある。

3.3 まとめと今後の課題

3.3.1 参加機関

本プロジェクトの性格上、設置場所に関しては、300年に渡る長期の存続性が最重要である。

我が国において教育機関が消滅することは想像できないものの現状の大学という機関の性格上、設置場所として供試体管理の観点から必ずしも適していないとの意見が大多数であった。そのため、わが国歴史的経緯を踏まえて、神社仏閣等宗教団体や長期に渡り施設を存続させる必要がある機関と連携して検討するのが現時点では妥当と考えられる。

3.3.2 材料提供者

材料提供者に関しては、暴露試験の条件によって参加者が左右される可能性があるため、暴露試験要件とともに検討し、試験条件や参加後の経済的負担等の環境を整備することが肝要であると考ええる。

たとえば、材料提供者は、300年の品質を保証することを絶対条件とせず、明確な品質保証期間の設定を参加条件とすることなどがある。

3.3.3 成果の帰属と公表

成果の帰属と公表については、3.2.2節に基本的な考え方を示した。ただし、成果の公表にあたっては、材料提供者の想定と異なる事態になった場合でも、情報を開示を妨げないこと等を事前に合意形成することが重要である。

3.3.4 公募の検討

本プロジェクトの性格上、複合構造委員会単独で企画実施する場合には限界があるため、学会のプロジェクトとして計画し、周知を図り公募するのがよいと考える。また、このことは参加試験期間や材料提供者にとっても、重要な事項であると考ええる。

3.3.5 今後の課題

WGでは、300年プロジェクトの実施について、各位の立場から個々に種々の想定のもとに自由に意見を出し合った。今回の報告は、今後、本プロジェクトを進める上で、種々の議論が出てくることを想定し、それらを概略でとりまとめるに留めた。

今後は、本検討結果を勘案して、より具体的な実施方針を検討し立案する必要がある。

本プロジェクトの実現のためには、大きな課題が存在するが、現在の研究者や技術者の責務と考え、前向きな思考で検討することが最も重要と考える。