

論文 60 年間供用された鉄道 RC 桁の力学的性状

服部 尚道^{*1}・谷村 幸裕^{*2}・仁平 達也^{*3}・蘆谷 譲^{*4}

要旨：昭和 19 年に建設され 60 年間供用された鉄道 RC 桁を対象とし、材料特性や材料劣化を確認するため、外観調査、中性化測定、コンクリートのコア採取による圧縮強度試験および静弾性係数試験、鉄筋採取による腐食減少量測定および引張試験を実施した。さらに、RC 桁の力学的性状を把握するため静的載荷実験を実施した。その結果、実列車相当の軸重載荷時は弾性変形内の挙動を示し、それに相当する断面力は静的載荷実験結果である RC 桁の降伏耐力の 23%程度であった。加えて、通常、設計では考慮されていない地覆が RC 桁の降伏耐力に大きく寄与することを確認した。

キーワード：鉄道 RC 桁、既設構造物、残存耐力

1. はじめに

鉄道で供用されている鉄筋コンクリート構造物では、戦前に建設され、今なお供用されているものも少なくない。本研究で対象とする RC 桁は、昭和 19 年に竣工し、60 年間供用された河川を跨ぐ鉄道構造物である。当時、適用した設計基準は不明であるが、当該構造物の竣工以前の基準としては、昭和 6 年に制定された「土木学会 鉄筋コンクリート標準示方書」¹⁾があり、その後、昭和 11 年²⁾、昭和 15 年³⁾で改訂されている。竣工時期から推定すると、本研究で対象とする RC 桁は前記いずれかの標準示方書に準拠して設計しているものと考えられる。表一

1 に本研究で着目すべき項目について、「土木学会 鉄筋コンクリート標準示方書」の変遷を示す。なお、対象構造物の一般図、配筋図が保管されていたものの、コンクリートの配合や圧縮強度、鉄筋の材質、径およびかぶりなどについては不明である。

本研究では、60 年間供用された鉄道 RC 桁の材料特性や材料劣化を確認するため、外観調査、中性化測定、スラブおよび梁部のコンクリートコア採取による圧縮強度試験および静弾性係数試験、桁の軸方向鉄筋採取による腐食率測定および引張試験を実施した。さらに、RC 桁の力学的性状を把握するため静的載荷実験を実施した。

表一 本研究で着目する項目の鉄筋コンクリート標準示方書の変遷¹⁾²⁾³⁾

刊行年 項目	昭和 6 年	昭和 11 年	昭和 15 年
所要圧縮強度	10.5~17.5N/mm ²		13.5~21.0N/mm ²
単位セメント量	300kg/m ³ 以上		
粗骨材の最大寸法	75mm 以下		50mm 以下
鉄筋の材質	JES 第 20 号 G9 構造用圧延鋼材 抗張力=390~520N/mm ²		JES 第 430 号 G56 一般構造用圧延鋼材 第二種 SS41 抗張力=410~500N/mm ²
鉄筋の標準寸法	JES 第 25 号 G14 標準棒鋼 丸鋼 直径 6,8,10,12,14,16,18, 20,22,24,26,28,30,32mm		JES 第 25 号 G14 標準棒鋼 丸鋼 直径 6~26mm まで 1mm ピッチ 26~42 まで 2mm ピッチ

- *1 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 副主任研究員 工修 (正会員)
- *2 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 主任研究員 博 (工) (正会員)
- *3 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 研究員 工修 (正会員)
- *4 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 研究員 (正会員)

2. 対象構造物の概要

対象構造物の概要を以下に示す。対象構造物は海岸から約3kmの内陸側に位置し、周囲は田園地帯に囲まれている。

位置：長崎県

竣工年：昭和19年（1944年）

撤去年：平成17年（2005年）

実験年：平成17年（2005年）

供用年数：約60年

構造形式：単線鉄筋コンクリート単純二主桁

軌道構造：バラスト

図-1に形状・寸法を示す。なお、試験で用いる際の対象構造物は、現地から試験場所への運搬上の制約から、線路方向に2分割し、上流側桁を鉄筋採取、下流側桁を中性化測定、コア採取および荷重試験に用いた。

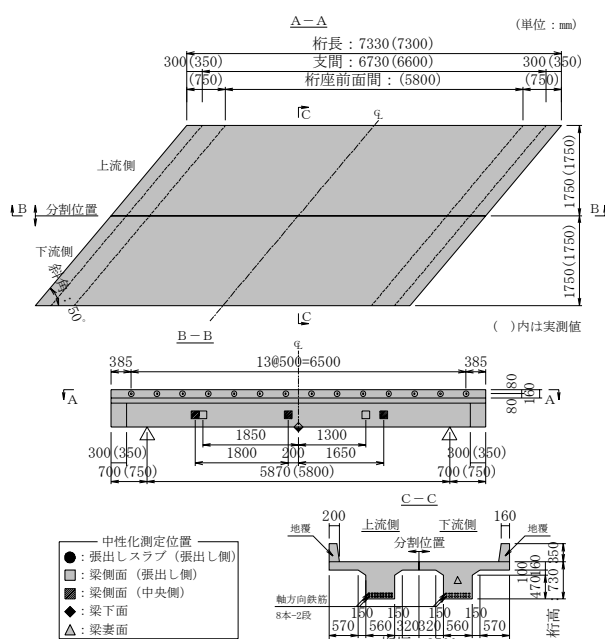


図-1 形状・寸法

3. RC桁の外観調査と材料調査

3.1 外観調査

ひび割れ、断面欠損が確認された桁の支点付近の梁側面で鉄筋のかぶりが不足しており、スターラップの腐食が確認されたことから、軸方向鉄筋も腐食が生じているものと考えられる。また、梁側面で一部補修していた箇所について

は、剥離、剥落、ひび割れ等が起きており、鉄筋の腐食が進行しているものと考えられる。いずれも、その程度は一般の環境下における劣化と推察され、塩害でないものと考えられる。

3.2 中性化深さ

静的荷重試験後の下流側桁を対象とし、中性化深さについて調査した。測定方法は、梁についてはハツリ法を、張出しスラブについてはドリル法を適用した。調査位置を図-1に示す。

①ハツリ法：はつり範囲にフェノールフタレイン1%溶液を吹き付け、発色点までの距離を測定することにより中性化深さを測定した。

②ドリル法：Φ10mmの電動ドリルを用いて構造物表面から深さ方向に穿孔する。フェノールフタレイン1%溶液を染み込ませた試験紙を回転させながら穿孔粉を受け、その試験紙が赤色に変色した瞬間の穿孔深さを中性化深さとした。

測定結果を表-2に示す。梁側面については、最大101.4mmであった。桁の軸方向鉄筋位置（下縁側鉄筋位置は下端から50mm）は完全に中性化している状態にあり、鉄筋の腐食が生じているものと考えられる。梁下面は後述の軸方向鉄筋腐食測定に用いた供試体採取時に測定できたもので、ハツリ深さ39.7mmは全て中性化していた。一方、梁妻側は最大8.9mm、張出しスラブは最大12.1mmと小さかった。

表-2 中性化深さ測定結果

部位	測定方法	中性化深さ
梁側面	ハツリ法	最大101.4mm
梁下面	ハツリ法	39.7mm以上
梁妻面	ハツリ法	最大8.9mm
張出しスラブ	ドリル法	最大12.1mm

3.3 コンクリートの圧縮強度と弾性係数

静的荷重試験後の下流側桁を対象として、コンクリートの圧縮強度と弾性係数を調査した。コンクリートコアの寸法は、直径100mm、高さ250mm（試験時に200mmに整形）、各部位3本

採取した。試験は、JIS A 1107 : 1993「コンクリートからのコア採取方法及び圧縮強度試験方法」、JIS A 1149 : 2001「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じた。なお、後述の地覆部ハツリ作業において発生した粗骨材を無作為に採取したところ、最大寸法 155mm の骨材（ただし、同骨材の最小寸法は 68mm）があり、当時の標準示方書の規定を超える骨材も混入していた。そこで、直径 150mm のコンクリートコアも 2 本採取して試験を実施した。

試験結果を表-3 に示す。ここで、直径 150mm の供試体の高さは 177.7~189.3mm であり、直径の 2 倍より小さかったため、試験で得られた圧縮強度に補正係数を乗じた値を示した。スラブの平均圧縮強度は 21.6N/mm² であり、当時の標準示方書の所要圧縮強度を上回る強度であった。一方、梁の平均圧縮強度は Φ 100 供試体で 8.4N/mm²、Φ 150 供試体で 12.2N/mm² となり、当時の設計標準示方書の所要圧縮強度を下回る結果となった。弾性係数は圧縮強度から推定した弾性係数⁴⁾と比較して著しく小さかった。

表-3 コンクリートの圧縮強度と弾性係数

部位 (供試体直径)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度換算 弾性係数 (kN/mm ²)
スラブ(Φ100)	21.6	11.3	23.8
梁(Φ100)	8.4	2.1	17.2
梁(Φ150)	12.2	3.1	19.1

3.4 コンクリートの単位セメント量

下流側桁の梁部分を対象とし、圧縮強度試験後のコンクリート塊を用いて、セメント協会が定める「硬化コンクリートの配合推定方法」⁵⁾に準じて配合分析を行った。分析の結果、単位セメント量は約 200kg/m³ であり、当時の設計標準で定めるセメントの最小使用量 300kg/m³ より著しく小さい値であった。すなわち、分析結果は、前述の梁の圧縮強度が小さいことを裏付けるものであった。

3.5 桁の軸方向鉄筋の腐食面積率と腐食減少率

上流側桁を対象として、軸方向鉄筋の腐食面積率と重量減少率について調査した。供試体は上流側桁のスパン中央の下縁側軸方向鉄筋から、目視判定の上、腐食の程度が小さい 3 本と腐食の程度が大きい 2 本、支点部付近から腐食の程度が大きい 1 本を採取した。

腐食面積率の測定は、腐食の程度が大きい 3 本についてのみ実施した。測定方法は、鉄筋にビニールシートを巻き付け、腐食部分をトレースし、そのトレース図を画像処理して腐食面積を求め、健全時の鉄筋面積で除したものを腐食面積率とした。ここで、健全時の鉄筋径は、採取した鉄筋のうち、腐食が殆どしていない箇所の測定結果から 25mm とした。試験の結果、3 本の腐食面積率の平均は 93.7% となっており、ほぼ鉄筋の全周が腐食している状態にあった。これは、前述の中性化深さが軸方向鉄筋のかぶり以上に及んでおり、鉄筋が腐食しやすい状態にあったことを裏付けるものである。

腐食減少率の測定に際し、軸方向鉄筋の腐食生成物の除去は、JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価法」⁶⁾に準じて行った。推定腐食前鉄筋重量は、採取した鉄筋のうち腐食が殆どしていない箇所の測定結果から 25mm を直径とし、供試体長さより各供試体の体積を算出し、それに鉄筋の比重 7.85 を乗じた値とした。腐食減少率は、腐食生成物除去後の鉄筋重量と推定腐食前鉄筋重量との差を腐食減少重量として、腐食減少重量を推定腐食前鉄筋重量で除して求めた。試験結果を表-4 に示す。腐食減少率は、No.1 試験片を除き、目視判定と同様な傾向を示した。

表-4 鉄筋の腐食減少率

試験片	腐食の程度*	
	小	大
No.1	5.6%	4.7%
No.2	6.4%	9.3%
No.3	6.0%	13.8%
平均値	6.0%	9.3%

* 目視による判定

3.6 軸方向鉄筋の引張強度とヤング係数

供試体は前述の腐食面積率と腐食減少率で使用した鉄筋を用いた。鉄筋の引張試験は JIS Z 2241 : 1998 「鉄筋材料引張試験方法」により行った。試験結果を表-5に示す。その結果、 $As \times f_{sy}$ または $As \times f_{su}$ の大きさは、腐食状態が小さいと判定したものは大きく、腐食状態が大きいと判定したものは小さくなり、目視判定と同様な傾向を示した。

表-5 鉄筋の機械的性質

腐食の程度*	試験片	断面積 As^{**} (mm^2)	降伏強度 f_{sy} (N/mm^2)	降伏ひずみ ϵ_{sy_exp} ($\times 10^{-6}$)	$As \cdot f_{sy}$ (kN)	破断強度 f_{su} (N/mm^2)	$As \cdot f_{su}$ (kN)	ヤング率 E_s (kN/mm^2)
小	No.1	452.4	316	1477	143	480	217	214
	No.2	460.0	311	1495	143	480	221	208
	No.3	479.2	301	1488	144	459	220	202
	平均	463.9	309	1486	143	473	219	208
大	No.1	460.0	296	1375	136	441	203	215
	No.2	448.6	294	1268	132	441	198	232
	No.3	320.5	318	1283	102	437	140	248
	平均	409.7	303	1309	123	440	180	232

4. RC 桁の静的載荷実験

下流側桁を対象として静的載荷実験を実施した。実験ケースを表-6に示す。

表-6 実験ケース

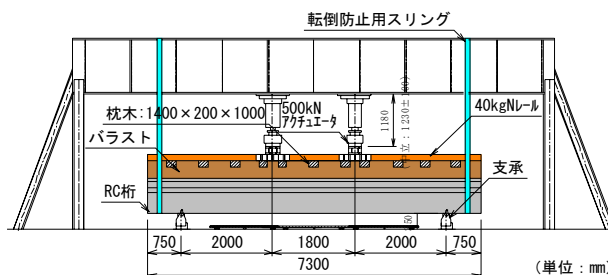
Case	載荷計画	上載荷重条件				等曲げスパン l (mm)	せん断スパン l_a (mm)	支間長 L (mm)
		バラスト	枕木	レール	地覆			
No.1	ひび割れまで	○	○	○	○	1800	2000	5800
No.2	鉄筋降伏まで	-	-	-	○	950	2825	6600
No.3	鉄筋降伏まで	-	-	-	-	950	2825	6600

No.1 は、供用時の上載荷重を模擬するため、バラスト、1/2 長さの枕木 (1400mm×200mm×1000mm)、40kgN レールを 1 本セットした。等曲げスパンは実列車の軸距 1800mm とし、支間長も供用時同様の 5800mm とし、実列車相当の軸重 127.5kN を超え、曲げひび割れが発生するまで載荷した。なお、支点条件は、供用時は斜角桁であることから斜方向で支持していたが、静的載荷実験時は載荷装置の制約から、部材軸直角方向に支承を配置した。No.2 は軸方向鉄筋降伏時の状態を確認するため、載荷試験装置の制約の範囲で等曲げスパンを 950mm、支間長を 6600mm とし、No.3 は No.2 で軸方向

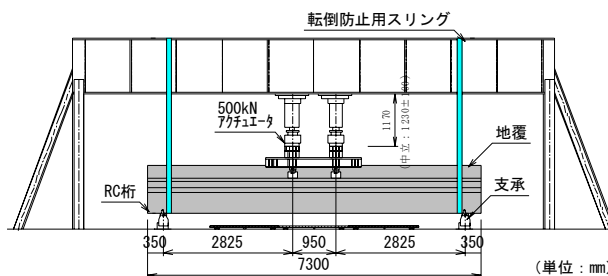
鉄筋が降伏しなかったため、バラスト止め用の地覆を撤去し、再度載荷した。載荷装置は、500kN アクチュエータ 2 基と支承を、桁のスパン中央を中心として対称に配置した。試験体および載荷試験装置を図-2に、載荷試験状況を写真-1に示す。計測項目は、載荷荷重、鉄筋ひずみ、変位である。なお、等曲げスパン中央の下縁側軸方向鉄筋 (2 箇所) に計測用のひずみゲージを貼付けるため、予め鉄筋をハツリ出し、ひずみゲージを貼付け後、無収縮モルタルにて断面修復を行った。

載荷試験実施に先立ち、死荷重によって発生するスパン中央の軸方向鉄筋ひずみについて計測した。死荷重のキャンセル方法は、支間に支持点を増設し、その時点の計測値を初期値として、死荷重および載荷スパンの違いを考慮して計測した。死荷重載荷による発生ひずみ分をキャンセルした腐食の程度が小さい軸方向鉄筋の補正降伏ひずみを表-7に示す。また、表-3に示したスラブ部のコンクリートの圧縮強度、表-5に示した降伏強度と断面積を用いた耐力計算値を表-8に示す。

載荷試験結果を以下に示す。No.1 試験体の荷



(a) No. 1 試験体 (等曲げスパン 1800mm)



(b) No. 2, No. 3 試験体 (等曲げスパン 950mm)

図-2 試験体と載荷試験装置



(a) No. 1 試験体 (b) No. 2 試験体

写真-1 荷重試験状況

表-7 死荷重荷重による発生ひずみ分をキャンセルした軸方向鉄筋の降伏ひずみ

死荷重条件	等曲げ スパン l(mm)	降伏 ひずみ esy_exp ($\times 10^{-6}$)	死荷重時 発生ひずみ es ($\times 10^{-6}$)	補正降伏 ひずみ* esy ($\times 10^{-6}$)
自重+バラスト +枕木+レール +載荷治具	1800	1486	133	1353
自重+載荷治具	950	1486	114	1372

*表-5の腐食の程度が小さい場合の降伏ひずみに対し、死荷重作用時に発生する鉄筋ひずみを差し引いた値 $esy = esy_{exp} - es$

表-8 材料試験結果に基づく耐力計算値

Case	材料諸元			曲げ降伏 荷重 Pyd (kN)	死荷重 相当 荷重 Po (kN)	曲げ降伏 時 載荷荷重 Py=Pyd-Po (kN)	備考
	コンクリート 圧縮強度 σ_{cd} (N/mm^2)	鉄筋 降伏強度 fsy (N/mm^2)	鉄筋 断面積 As (mm^2)				
No.1	-	-	-	-	47	-	
No.2-1	21.6	303	409.7	540	35	505	腐食大
No.2-2	21.6	309	463.9	616	35	581	腐食小
No.3-1	21.6	303	409.7	442	35	407	腐食大
No.3-2	21.6	309	463.9	507	35	472	腐食小

重～変位の関係を図-3、荷重～スパン中央の軸方向鉄筋ひずみの関係を図-4に示す。ここで、荷重はアクチュエータ1基当たりとした。なお、図中に示す降伏ひずみは、表-7に示した値である。実列車相当軸重127.5kNにおいてひび割れは発生せず、載荷荷重135kN時にスパン中央のひずみゲージ貼付け部の補修目地からひび割れが発生し、残留変位は0.2mmであった。従って、実列車相当軸重載荷時は、弾性変形内の挙動を示したと言える。

No.2試験体について、荷重～スパン中央の軸方向鉄筋ひずみの関係を図-5に示す。なお、図中に示す降伏ひずみは、表-7に示した値である。また、曲げ降伏耐力計算値は、表-8に

示した腐食程度が小さい場合の値である。その結果、載荷試験装置の能力の限界を若干超える504kNまで載荷(載荷サイクル5回)したものの軸方向鉄筋は降伏しなかった。

そこで、No.3試験体では地覆部分を撤去し、再度載荷を行うこととした。No.3試験体について、荷重～スパン中央の軸方向鉄筋ひずみの関係を図-6に示す。なお、図中に示す降伏ひずみは、表-7に示した値である。また、曲げ降伏耐力計算値は、表-8に示した腐食程度が小さい場合の値である。その結果、載荷荷重505kNでスパン中央の軸方向鉄筋の片側が降伏したことを確認した。従って、スパン中央の軸方向鉄筋の腐食程度は小さいものと推測される。

表-9に非構造物等の死荷重、せん断スパンを考慮した場合の降伏耐力に対する実列車相当荷重による断面力の割合を示す。その結果、実列車相当軸重による曲げモーメントは、RC桁の曲げ降伏耐力に対して23%程度であった。

また、地覆には桁と連結する2- $\Phi 9$ 相当の鉄筋

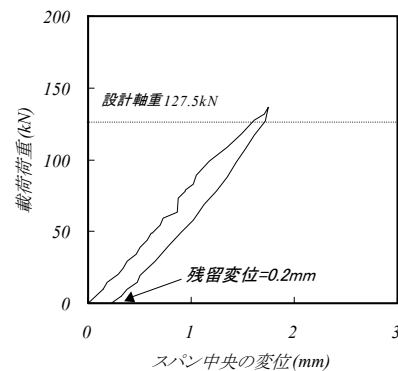


図-3 荷重～スパン中央変位 (No. 1)

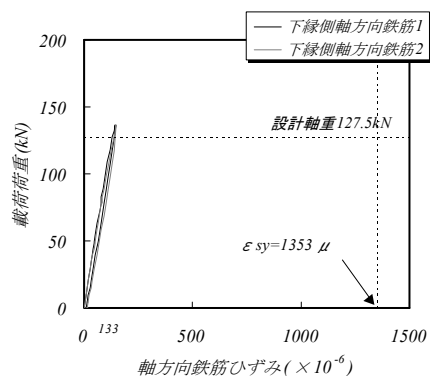
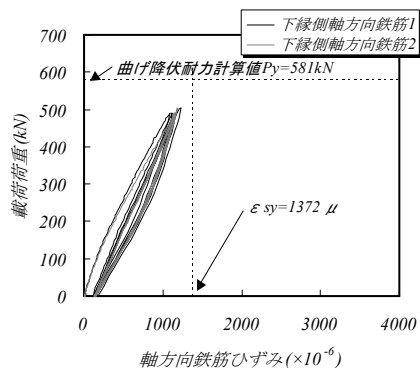
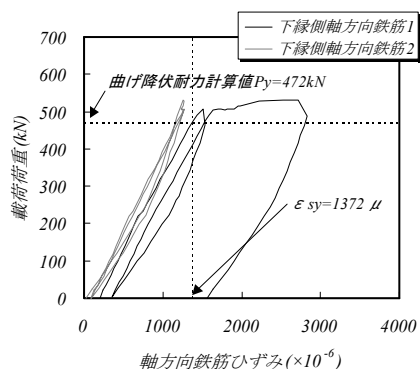


図-4 荷重～スパン中央の鉄筋ひずみ (No. 1)



図－5 荷重～スパン中央の鉄筋ひずみ (No. 2)



図－6 荷重～スパン中央の鉄筋ひずみ (No. 3)

表－9 降伏耐力に対する実列車相当軸重による断面力の割合

Case	実列車相当軸重 または降伏耐力 Pd or Pyd (kN)	死荷重 相当荷重 Po (kN)	死荷重 考慮 P=Pd-Po or Py=Pyd-Po (kN)	せん断 スパン a (mm)	実列車 相当曲げ または降伏曲げ M=P×a or My=Py×a (kNm)	実列車 相当曲げ 降伏曲げ M/My
No.1	127.5	47.0	174.5	2000	349.0	0.23
No.3	505.0	35.0	540.0	2825	1525.5	1.00

がピッチ 200mm で配置されていた。一般に、設計では地覆を構造体として考慮しない。しかし、軸方向鉄筋が No.2 試験体では降伏せず、No.3 試験体で降伏したことから、地覆が降伏耐力に大きく寄与することが確認された。なお、地覆が有る場合の降伏耐力の実験値は不明であるが、表－8 に示した耐力予測値では地覆が有る場合 (No.2) は無い場合 (No.3) に比べて約 1.25 倍程度大きい。従って、対象構造物のように桁と地覆が鉄筋で連結・一体化されている場合の実際の降伏耐力を推定するには、通常、非構造部材として考えられている地覆を構造断面の一部として

考慮する必要があることを示唆するものである。

5. まとめ

昭和 19 年に建設され 60 年間供用された鉄道 RC 桁を対象とし、材料特性や材料劣化について調査した上で、2 分割した下流側桁を対象として静的載荷実験を実施し、以下のことを確認した。

- (1) 外観調査や中性化深さを裏付けるように、軸方向鉄筋は腐食していた。
- (2) スラブ部コンクリートは当時の標準示方書の所要圧縮強度を上回っていたが、梁部コンクリートは当時の設計標準の所要圧縮強度を下回っていた。
- (3) 実列車相当軸重載荷時は弾性変形内の挙動を示し、それに相当する断面力は載荷実験による桁の降伏耐力の 23% 程度であった。
- (4) 地覆が RC 桁の降伏耐力に大きく寄与することを確認した。対象構造物のように桁と地覆が鉄筋で連結・一体化されている場合の実際の降伏耐力を推定するには、通常、非構造部材として考えられている地覆を、構造断面の一部として考慮する必要があることを示唆するものである。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート調査会：昭和 6 年土木学会鉄筋コンクリート標準示方書，昭和 6 年 9 月
- 2) (社) 土木学会：昭和 11 年土木学会 鉄筋コンクリート標準示方書，昭和 11 年 10 月
- 3) (社) 土木学会：昭和 15 年土木学会 鉄筋コンクリート標準示方書，昭和 15 年 3 月
- 4) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説－コンクリート構造物，平成 16 年 4 月
- 5) (社) セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-18 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告，昭和 42 年 9 月
- 6) (社) コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準 (案)，pp.1-4，昭和 62 年 4 月