

論文 供用 40 年が経過した RC 栈橋上部工の劣化と構造性能

横沢 篤^{*1}・加藤 絵万^{*2}・横田 弘^{*3}・下村 匠^{*4}

要旨 : RC 栈橋上部工より切り出した劣化程度の異なるスラブ試験体を用いて, 劣化実態調査を行った。各試験体の圧縮強度と塩化物イオン浸透性はほぼ同程度であったが, コンクリートのヤング係数は劣化度が大きいものほど低下が顕著であった。また同試験体に対して行った曲げ載荷試験の結果から, 実構造物においても主筋の平均的な質量減少率を用いることで, 概ね部材の耐荷力を評価できることを確認した。

キーワード : RC 栈橋上部工, 塩害, 鉄筋腐食, ASR, 耐荷性

1. はじめに

塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物は, 鉄筋腐食, コンクリートの劣化などの影響を受けて, その構造性能を次第に低下させていく。そのため, 材料劣化と構造性能の低下の関係を把握することは, 構造物の適切な性能評価を行う上で重要である。劣化した部材の構造性能低下に関する研究は, これまでに多々行われているが, 実環境下で劣化した既設構造物を対象とした検討については, 知見の蓄積が少ないのが現状である。このような背景のもと, 本研究では, 約 40 年間供用した RC 栈橋上部工よりスラブ試験体を切り出した後, 劣化実態調査および曲げ載荷試験を実施し, 実環境における材料劣化が構造性能の低下に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本研究で用いたスラブ試験体は, RC 栈橋上部工より環境条件が陸側と海側で劣化程度の異なる 3 体を切り出したものである。栈橋は, 昭和 39~41 年に建設されており, 約 40 年間供用されている。表-1 に試験体概要, 図-1 に栈橋標準断面図と試験体採取位置を示す。

表-1 試験体概要

試験体番号	No.1	No.2	No.3	
劣化度	II	III	V	
環境	陸側	海側	海側	
断面高さ h (mm) *2)	270	370	310	
断面幅 b (mm) *2)	1520	1490	1500	
主筋 1	鉄筋径	D13	D13	D13
	上段鉄筋本数 (本)	4	4	4
	下段鉄筋本数 (本)	8	7	7
	上段有効高さ d2 (mm) *2)	100	200	190
下段有効高さ d1 (mm) *2)	220	310	310	
主筋 2	鉄筋径	D13	D13	D13
	上段鉄筋本数 (本)	4	4	4
	下段鉄筋本数 (本)	8	8	8
	上段有効高さ d2 (mm) *2)	110	210	200
下段有効高さ d1 (mm) *2)	200	290	310	
かぶり厚さ (mm) *2)	60	60	0	
舗装の厚さ (mm) *2)	—*1)	86	71	
鉄筋降伏強度 (N/mm ²)	386	—	—	
鉄筋引張強度 (N/mm ²)	544	—	—	
鉄筋ヤング係数 (kN/mm ²)	192	—	—	

*1) No.1 試験体の舗装は運搬中に剥離したもので, 同表には示していない
*2) 平均値を示す

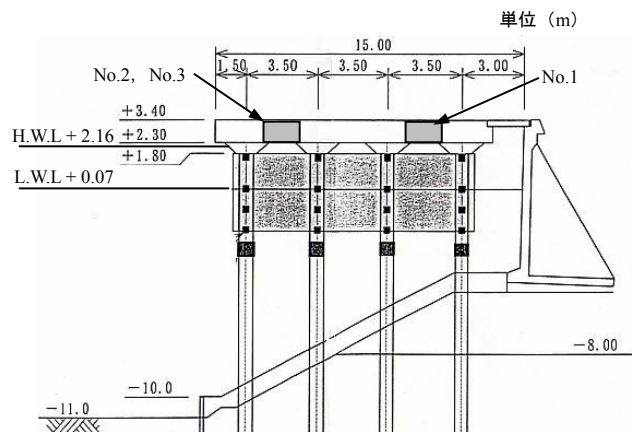


図-1 栈橋標準断面図と試験体採取位置

*1 長岡技術科学大学 工学部 建設工学課程 (正会員)

*2 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 研究官 博 (工) (正会員)

*3 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室長 博 (工) (正会員)

*4 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系助教授 博 (工) (正会員)

2.2 劣化実態調査概要

(1) 外観調査

試験体の側面および下面のひび割れ状況を確認し、それぞれの劣化度を港湾構造物の維持・補修マニュアル¹⁾に示されている劣化度判定基準に基づき判定した。その結果は、表-1に示したとおりである。また、かぶりコンクリートが剥落している No.3 試験体を除いた No.1 および No.2 試験体について、点検用ハンマーを用いた打音検査を実施し、かぶりコンクリートの浮きを確認した。

(2) コンクリートの圧縮強度試験と塩分分析

コンクリートの力学特性を測定するため、曲げ載荷試験（後述）終了後、試験体に損傷がないとみられる支点外側でコアを採取し、圧縮強度試験を実施した。これらのコアは、表層部分の劣化を考慮し、表層から 10~15mm の部分を除いて直径 100mm、高さ 200mm に成形した。また、No.1、No.2 の試験体について、支点内側より全塩分量測定用コアを採取した。圧縮強度試験用と塩分分析用コアの採取位置は後述図-3に示したとおりである。分析試料は、コア表層部を 1~2mm ほどを除き、深さ 100mm まで 20mm 毎に切断して作製し、JCI-SC5²⁾に準拠した電位差測定法により全塩化物イオン量を測定した。

(3) 鉄筋の腐食量測定と引張試験

曲げ載荷試験後の試験体から曲げスパン中央部の主筋 2 を約 200mm は取り出し（図-2、図-3 参照）、腐食状況を観察した。No.1、No.2 試験体のほとんどの主筋 2 は、腐食による断面減少が見られず健全な鉄筋であると判断できるため、質量減少率を 0.0% と評価した。したがって、上段鉄筋の質量減少率測定は、No.3 試験体についてのみ行った。腐食の見られる鉄筋は、約 100mm 毎に切断し、サンドブラスト処理および 10% クエン酸水素二アンモニウム水溶液浸せきにより、腐食生成物を完全に除去した。この除錆した鉄筋の単位長さあたりの質量を測定し、質量減少率を算出した。また、載荷による損傷と腐食の影響が無いと思われる No.1 試験体の主

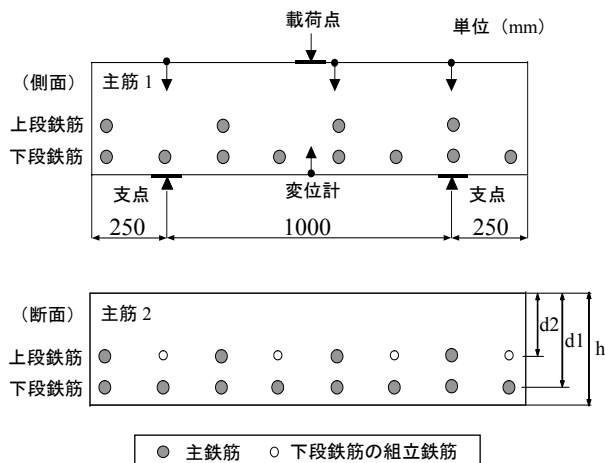


図-2 配筋と載荷試験の概要

筋 1 を取り出し、引張試験を実施した。引張試験結果は表-1に示したとおりである。なお、本研究ではすべての試験体に同じ鉄筋が使用されたとして取り扱うこととする。

2.3 曲げ載荷試験

試験体の耐荷性を検討するため、曲げ載荷試験を行った。配筋と載荷試験の概要を図-2に示す。支点間中央は、鉄筋の圆心位置より決定し、支点間距離は 1000mm とした。載荷時の計測項目は、載荷荷重、載荷点変位、支点変位である。また、鉄筋の見かけの降伏荷重は、載荷時に試験体の載荷点変位が急激に増加した際の荷重値とした。なお、No.3 試験体は、モルタルキャッピングにより支点を補強した。

3. 実験結果および考察

3.1 外観調査結果

試験体下面の外観調査結果、コア採取位置および内部鉄筋の位置を図-3に示す。No.1 試験体には浮きが数箇所認められたが、ひび割れは確認されなかった。また No.2 試験体では、ひび割れおよび浮きが多数確認された。No.3 試験体においては、かぶりコンクリートが下段の鉄筋に沿って全面剥落しており、下段鉄筋に著しい断面欠損が観察された。また No.3 試験体のコンクリートには、目視観察により粗骨材周囲に白色ゲルの滲出が見られた。

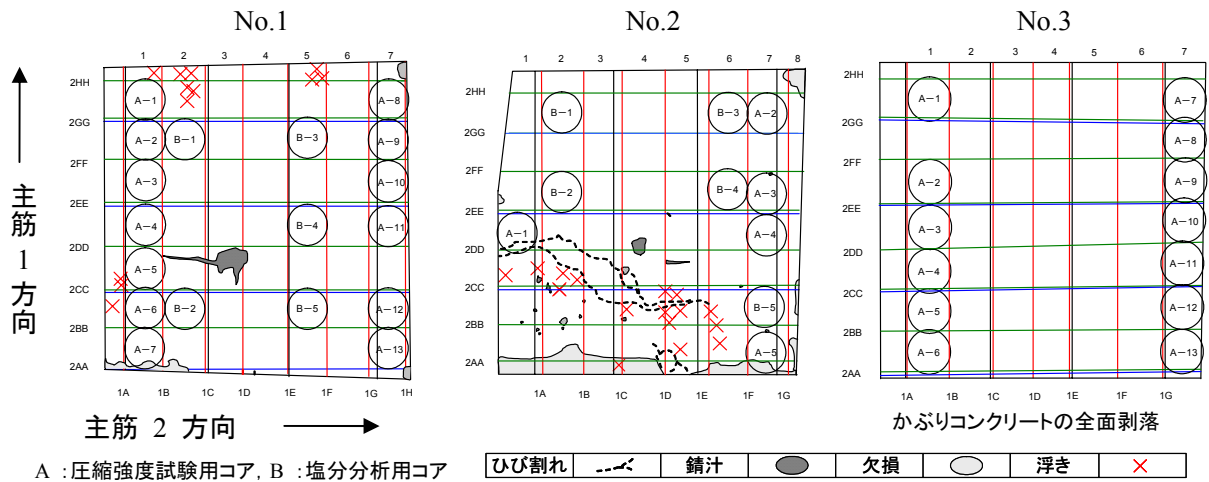


図-3 試験体下面の外観調査結果とコア採取位置

3.2 圧縮強度とヤング係数

圧縮強度とヤング係数と圧縮強度の比の関係を図-4に示す。実験値は、健全なコンクリートを示す曲線³⁾を全て下回った。また、特にヤング係数のばらつきが顕著であった。海側に位置し、特に鉄筋腐食の激しかったNo.3試験体では、他の試験体に比べて、ヤング係数の低下が顕著であった。この理由として、ASRによるコンクリートの劣化が考えられる⁴⁾。目視調査より確認された白色ゲルを、走査電子顕微鏡（SEM）で観察したところ、アルカリカルシウムシリカ型のゲルが見られ、ASRの発生が認められた。写真-1にアルカリ骨材反応により生成したゲルを示す。

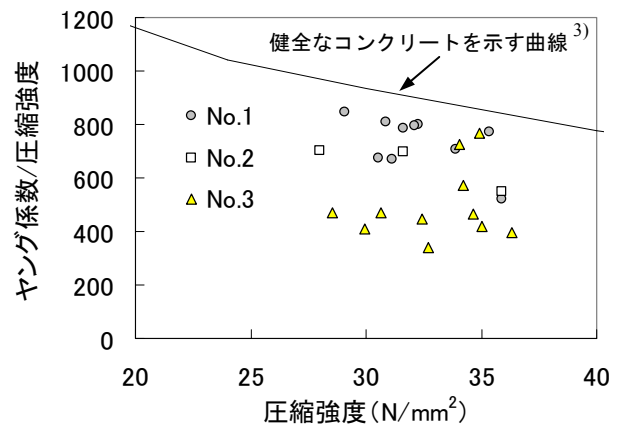


図-4 圧縮強度-ヤング係数/圧縮強度関係

3.3 塩化物イオン量測定結果

塩化物イオン量分布を図-5に示す。No.1とNo.2試験体の塩化物イオン量分布は、特に表面近傍において大きなばらつきが見られ、深くなるにつれて、その傾向は見られなくなった。また、鉄筋位置での塩化物イオン量は、腐食発生限界濃度を超える量が検出された。同図に見かけの拡散係数と表面塩化物イオン量の平均値を用いてFickの拡散式から求めた塩化物イオン量分布の平均値を示す。表面塩化物イオン量、拡散係数は、両試験体ともほぼ同じ結果となり、異なる劣化度での塩化物イオン量の差異は見られなかった。

コンクリート標準示方書⁵⁾に基づいて求めた

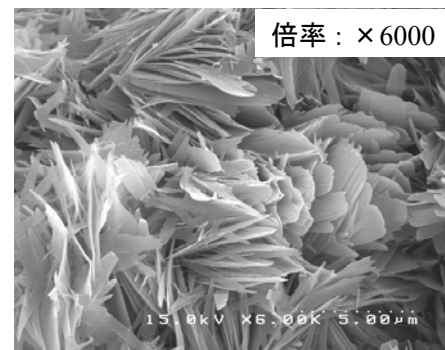
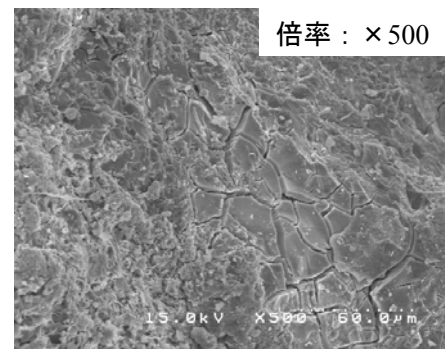


写真-1 アルカリ骨材反応により生成したゲル

塩化物イオン量分布の計算値を同図に合わせて示す。計算値の算出にあたり、表面塩化物イオン量は栈橋の設置環境から 13kg/m^3 と設定した。見かけの拡散係数は、両試験体に普通ポルトランドセメントが使用されたことを仮定し、以下の式(1)⁵⁾により求めた。これに際し、水セメント比はコア圧縮強度の平均値から式(2)⁶⁾により求めた。なお、3.2より、各試験体の圧縮強度平均値はほぼ同程度であったことから、アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化の影響は考慮しないこととした。

$$\log D = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (1)$$

$$F = A/B^{W/C} \quad (2)$$

ここで、 D : コンクリートの拡散係数の予測値 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 F : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)
 A, B : $A \cong 100, B \cong 20$, W/C : 水セメント比

このようにして求めた計算値は、実験結果と概ね一致したが、下段鉄筋位置においてはほぼ全ての分析試料が計算値を上回り、危険側に実験値を評価した。ASRにより発生したコンクリートの微細ひび割れや波浪の影響も含めた環境条件が、実験値に影響していることが要因と考えられる。

3.4 鉄筋の腐食量測定結果

鉄筋の質量減少率を表-2に示す。主鉄筋番号と鉄筋の位置番号は、図-3に対応している。3.3より下断鉄筋位置には、腐食発生限界以上の塩化物イオン量が侵入していたが、No.1試験体の下段鉄筋は、表面に錆びが見られるものの健全な鉄筋であると判断できたため、質量減少率0.0%と評価した。また、No.2試験体は、外観調査、打音検査において、ひび割れおよび浮きを確認できた位置の鉄筋に質量減少が見られたが、他の位置では健全な鉄筋であった。No.3試験体は、下段鉄筋の質量減少率は最大で70.2%、平均でも44.8%と高い値を示した。また、上段鉄筋の質量減少率は、平均2.8%であった。

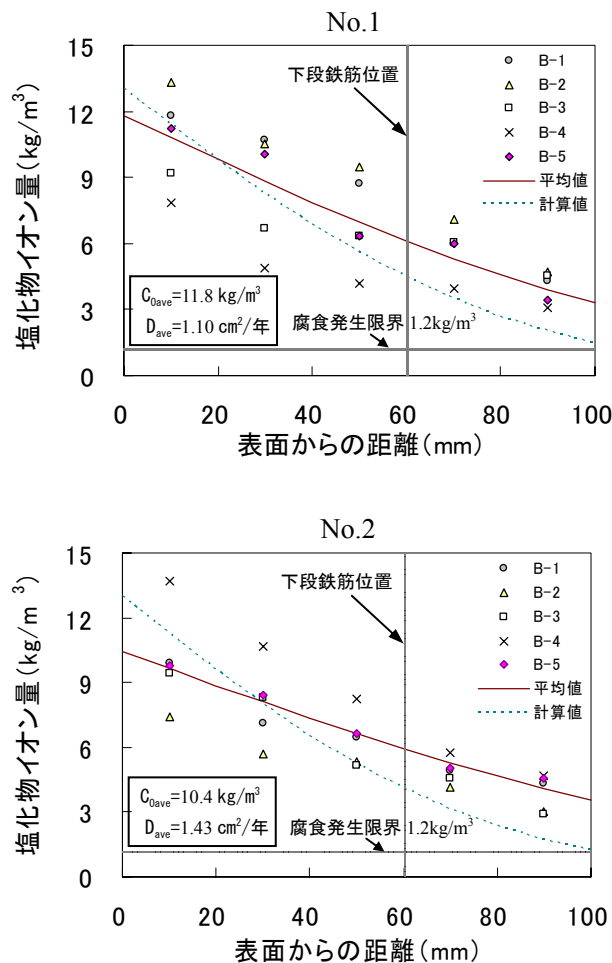


図-5 塩化物イオン量分布

表-2 鉄筋の質量減少率

主鉄筋番号	位置番号		下段鉄筋			上段鉄筋
			No.1	No.2	No.3	No.3
2AA	4	①	0.0	39.2	24.5	11.4
		②	0.0	21.9	26.7	11.4
2BB	4	①	0.0	31.9	70.2	—
		②	0.0	28.3	47.7	—
2CC	4	①	0.0	0.0	55.0	0.0
		②	0.0	0.0	31.2	0.0
		③	0.0	—	31.7	—
2DD	4	①	0.0	0.0	56.8	—
		②	0.0	0.0	51.7	—
2EE	4	①	0.0	0.0	44.3	0.0
		②	0.0	0.0	53.5	0.0
2FF	4	①	0.0	0.0	61.8	—
		②	0.0	0.0	64.9	—
		③	—	0.0	—	—
2GG	4	①	0.0	0.0	22.0	0.0
		②	0.0	0.0	43.0	0.0
2HH	4	①	0.0	0.0	37.9	—
		②	0.0	0.0	38.4	—
平均質量減少率(%)			0.0	7.1	44.8	2.8

※0.0%は目視により判定

4. 曲げ載荷試験

4.1 ひび割れ・破壊状況

曲げ載荷試験後のひび割れ・破壊状況を図-6に示す。図中の主鉄筋番号は、図-3に対応している。試験体のひび割れ発生本数は、全試験体において、1本または2本であった。また、No.2 試験体は、載荷時に外観調査より浮きを確認された場所から、かぶりコンクリートの剥落が見られた。

4.2 荷重-変位関係

スラブ試験体の荷重-変位関係を図-7に示す。各試験体の断面高さが異なるため、直接比較することはできないが、載荷初期における試験体の見かけの剛性は、劣化度が大きい試験体に、概ね低い傾向が見られた。この理由として、No.2, No.3 試験体には、載荷試験前に既に引張側コンクリートに腐食による多数のひび割れが生じていたこと、また鉄筋腐食による鉄筋とコンクリート間の付着劣化の影響などが考えられる⁷⁾。

No.2, No.3 試験体では、コンクリートの圧縮破壊前に鉄筋の破断が確認され、その結果、急激に耐力が失われた。一方、No.1 試験体は、コンクリートの圧縮破壊が見られた後も、断面破壊することなく荷重と変位の増加が見られ、他の試験体と異なる破壊形態となった。したがって、以降では No.2 と No.3 試験体の実験結果により鉄筋腐食と耐荷力の関係を考察した。

4.3 耐荷力

鉄筋の質量減少率とスラブ試験体の降伏荷重比関係を図-8に、鉄筋の質量減少率とスラブ試験体の最大荷重比関係を図-9に示す。図中の実験値は、各試験体の上段鉄筋降伏荷重および最大荷重の、健全試験体の計算値に対する比を示している。なお、計算値の算出にあたり、上段鉄筋に長さ約700mmの重ね継手が2本ほど見られたため、計算値は上段の鉄筋本数を5本として算出した。また、検討には平均質量減少率を用いた。これより、試験体の降伏荷重、最大荷重は、質量減少率に応じて低下しているこ

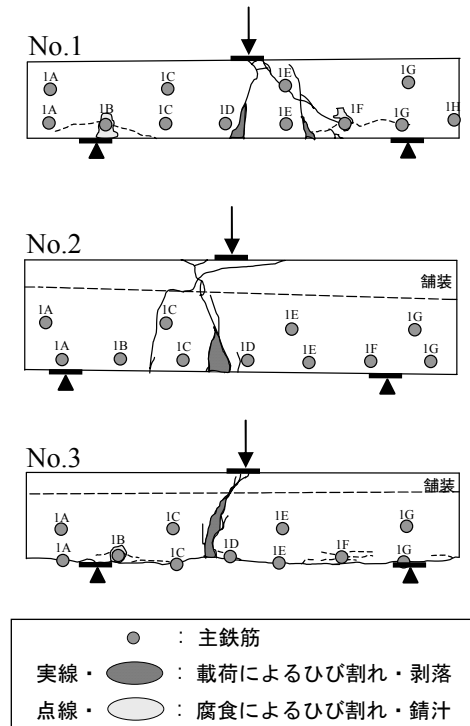


図-6 ひび割れ・破壊状況(側面図)

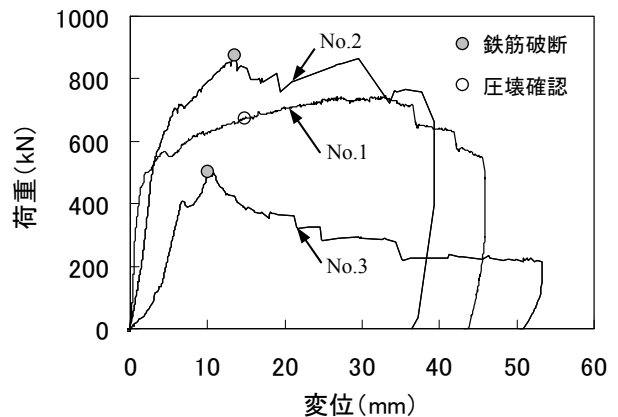


図-7 荷重-変位関係

とが確認された。

鉄筋腐食が耐荷力に及ぼす影響を評価するため、図中に、質量減少率に応じて鉄筋断面積を減少させた場合、また、それに加えて見かけの降伏点低下を考慮した場合における降伏荷重および最大荷重の計算値を算出し、同様に健全試験体との計算値との比を示した。ここで、見かけの降伏点低下は、十数%までの質量減少率について評価された降伏点残存率の回帰式⁷⁾を用いて考慮しており、これを超える質量減少率については、図中に一点鎖線で示してある。これ

によると、主筋の断面減少を考慮して計算することにより、降伏荷重、最大荷重ともに概ね評価することができた。しかしながら、かぶりコンクリートが剥落した No.3 試験体に見られるように、劣化程度の大きなものについては、危険側に耐荷力を評価する恐れもある。したがって、鉄筋の見かけの降伏点低下を考慮したもので評価する、あるいは鉄筋とコンクリート間の付着劣化の影響を考慮するなど別途検討が必要であると思われる。

5. まとめ

供用 40 年が経過した RC 栈橋上部工の劣化の現状および構造性能について調べ、次のような知見を得た。

- (1) 各試験体の圧縮強度と塩分浸透性はほぼ同程度であったが、劣化度に応じたコンクリートヤング係数の低下がみられた。これはアルカリ骨材反応の影響と考えられる。
- (2) 塩化物イオン量の計算値は、鉄筋位置において、実験値を危険側に評価した。
- (3) 劣化度Ⅱの試験体において、鉄筋位置に腐食発生限界以上の塩化物イオンが侵入していたが、腐食は見られなかった。
- (4) スラブ試験体の荷重-変位関係から、劣化の程度に応じた見かけの初期剛性の低下がみられた。
- (5) 鉄筋の平均質量減少率を用いて、主筋の断面減少を考慮することにより、スラブ試験体の耐荷力を概ね評価することができた。

謝辞

本研究を実施するにあたり、独立行政法人港湾空港技術研究所構造強度研究室、材料研究室の皆様にご多大なるご指導を頂きました。ここに皆様に対して感謝の意を表します。

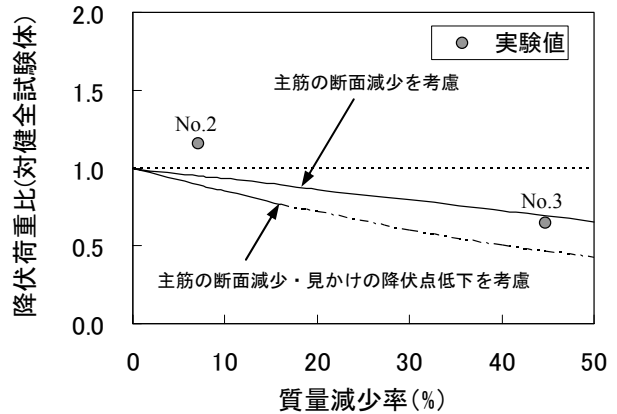


図-8 質量減少率と降伏荷重比

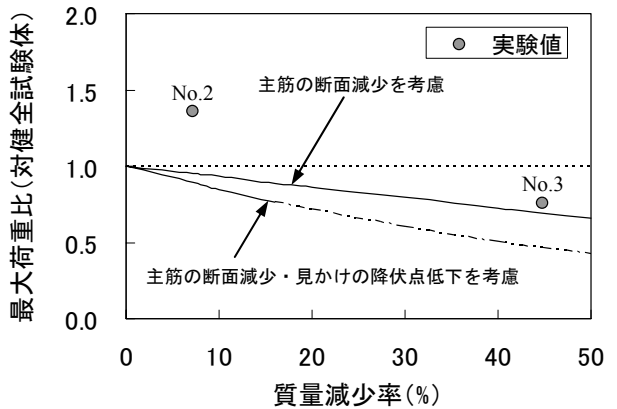


図-9 質量減少率と最大荷重比

参考文献

- 1) 運輸省港湾技術研究所編著：港湾構造物の維持・補修マニュアル，沿岸開発技術研究センター，pp95-97，1999
- 2) 日本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），pp51-55，1987
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，pp28-29，2002
- 4) 小林一輔ほか：圧縮載荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法，土木学会論文集 No.460/V-18，PP.151～154，1993.2
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕，2002
- 6) D.A.Abrams：Design of concrete mixtures，Bulletin 1S.M.R.L.Lewis Institute Chicago，1925
- 7) 日本コンクリート工学協会：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，1998