

論文 塩害により著しく劣化した実橋から切り出した鉄筋コンクリート桁の載荷実験と残存耐力の試算

久米 仁司*1・下里 哲弘*2・淵脇 秀晃*3・砂川 章次*4

要旨：本論文は、厳しい塩害環境で約56年間供用された鉄筋コンクリートT桁(以下RCT桁と示す)橋の撤去に際し、桁を切り出して静的載荷実験を行い、残存耐力がどの程度あるかについて研究した。対象とした桁は劣化の程度が大小の中間桁、劣化の進んだ鉄筋コンクリート製の高欄を有する側部桁である。その結果、静的な残存耐力は著しい劣化状況の桁であっても鉄筋コンクリート梁の計算が適用でき、劣化が進み鉄筋とコンクリートの付着が完全に切れている状態の場合には、桁の外側の鉄筋が有効に働かない場合があり、耐力が低下するが、コンクリートが剥落していない桁は、概ね設計時に想定した耐力は残存すると考えられる。

キーワード：塩害、劣化、残存耐力、載荷実験

1. はじめに

橋梁構造物の維持管理に対して、国土交通省では平成19年4月に「長寿命化修繕計画策定事業補助制度」を制定している。長寿命化修繕計画は、点検結果に基づいて補修・補強を計画的に実施し、橋梁の維持管理コストの縮減を目指すものである。地方公共団体の道路管理者においても、長寿命化修繕計画に基づいて維持管理が進められている。沖縄県の人口は中南部地域に集中している。そのため交通量が多く重要度の高い路線が多い。維持管理計画で劣化が激しく重要度の高い橋は架け替えが選択される。ところが、人口の少ない地域は劣化が激しく、架け替えが相当であると判定されても、架け替えの優先度は低くなる。そのような場合に、どのような劣化度合いで重量制限等の処置を取るのか？どのような劣化度合いで補修・補強の対策を適用するのか？どのような劣化度合いで更新すべきか？外観の劣化度と耐荷性や耐久性との関係はどう評価するのか、などの高度な判断が必要になる。しかし、劣化した橋梁は、外観上の劣化度が、その橋梁の耐力と必ずしも一致するわけではなく、その評価は困難である。このような課題を解決するためには、劣化した橋梁に対する調査・研究を行い、その因果関係を明らかにする必要がある。このような観点で、著者らは、土木学会西部支部沖縄会橋梁長寿命化小委員会の研究活動の一環として、塩害により著しく劣化した橋梁に対して調査・研究を行っている。

沖縄県は、高温・多湿で周りを海に囲まれた島嶼県であるため、コンクリート橋梁の塩害による劣化現象が復帰前(1972年)から既に現れている¹⁾。昭和50年度に沖縄県内で4橋の劣化橋の耐力試験(現橋載荷試験)が

行われた²⁾。その後、上記4橋のうち、1橋の架け替え工事が行われ、その橋梁から実験供試体として2本の主桁を切り出し、耐力実験が行われた³⁾。この研究での成果としては、劣化した供試体の発生応力は、実交通荷重の実態や荷重分配等を考えると一定の余裕があること、終局モーメントは、設計時より大きいこと、外観上の劣化は著しいが、耐力には大きな影響を及ぼしていない等の結論が得られている。しかし、上記の研究対象橋梁は昭和29年に米軍により建設されたものであり、耐力実験までは僅か20年程度しか供用されていなかった。

そこで、本研究では、昭和31年に建設され、沖縄県那覇市の西海岸線から約300m離れた厳しい塩害環境で約56年間供用されたRCT桁橋を対象として、劣化度と残存耐力に関する調査及び実験的研究を行った。

2. 対象橋梁の概要

2.1 撤去前の橋梁の概要

図-1に示すように、研究対象橋梁は2径間の単純RCT桁橋であり、橋長15.20m、支間長7.245m、有効幅員8.18mである。本橋は旧軍道1号線の橋梁として建設された1等橋(TL-20)であると推測される。本橋は計5本のRCT桁で構成され、側部桁は鉄筋コンクリート製の高欄と一体化されて造られている。供用中の外観を写真-1に示す(平成22年度撮影)。

2.2 外観の劣化状況

本橋は、写真-2に示すように、浮き、剥離・鉄筋露出が広範囲で確認され、主鉄筋の断面欠損、支点部付近の帯筋の破断及びコンクリートの劣化による耐荷力不足や橋梁の脆性破壊が懸念され、厳しい塩害環境で56年間の供

*1 株式会社 南伸 技術部 (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科准教授 博士(工学)

*3 琉球大学 工学部 技術部 (正会員)

*4 株式会社 中央建設コンサルタント 第一設計部 (正会員)

用後、本橋梁は平成 23 年度に撤去された。

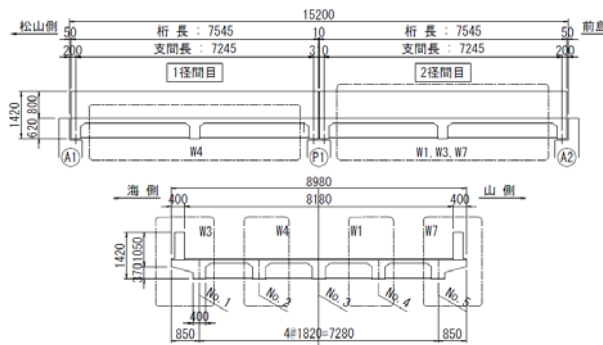


図-1 対象橋梁の側面図(上)及び断面図(下)



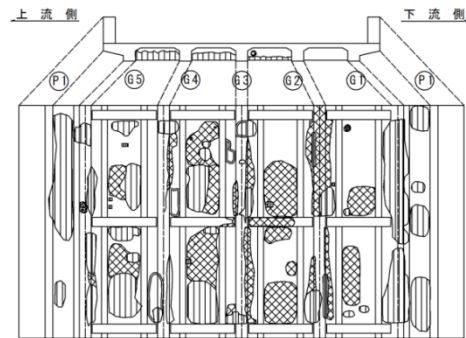
写真-1 対象橋梁の側面写真(撤去前)

図-2 は、橋梁を撤去する前に行われた詳細調査で得られた橋梁の劣化状況を示したものである。コンクリートの剥離や浮きの多くは床版下面に発生している。桁の下面は下流側の側部桁の鉄筋が露出している。下流側の側部桁の隣の上流側の中桁も劣化が大きくコンクリートに浮きが生じている。載荷実験に用いた桁は 4 本でそれらの概要を表-1 に示す。W-1 及び W-4 は中桁で W-3 及び W-7 は側部桁で鉄筋コンクリート製の高欄を有している。劣化の程度は、W-1 と W-7 の桁が鉄筋の露出がなく、コンクリートに浮きが生じている程度の軽度の劣化で、W-4 と W-3 が、鉄筋が露出し、鉄筋が激しく腐食している。

実験は中桁については劣化の軽い W-1 と W-4 の比較と側部桁については劣化の激しい W-3 と劣化の軽い W-7 を比較する。側部桁は、RC 製高欄の効果を確認するために、劣化の小さい W-7 の高欄を切り取って実験を行った。写真-2, 3, 4, 5 に各々の桁の写真を示す。

写真-2 の W-1 は、コーナー部の主鉄筋に沿ってコンクリートが剥離し、床版下面にも局部的にコンクリートが剥離していた。ただし、載荷実験を行った桁の中で W-1 桁の劣化状態は最も軽微なものとなっている。写真-3 の W-4 は、スパン中央から約半分面積のコンクリートが剥離していたが、残りはコンクリートに浮きが発生してい

る状態であった。床版下面にも局部的にコンクリートが剥離していた。



損傷の種類	表示	損傷の種類	表示
ひびわれ	~~~~	豆板・空洞	⊖
浮き	⊖	剥離	⊖
鉄筋露出		湧水	
遊離石灰		その他	⊖

図-2 撤去前の橋梁の劣化状況

表-1 載荷実験を行った桁の概要

番号	W-1	W-4	W-3	W-7
位置	中桁	中桁	側部桁	側部桁
劣化度	軽度	激しい	激しい	軽度
高欄	なし	なし	有り	有り
備考	W-7 は高欄を切取って載荷実験を行った			

写真-4 の W-3 は、海側に面する下流側の側部桁である。この桁の下面のコンクリートは、約 3/4 が剥離し、1 段目の主鉄筋が露出している状況である。また、桁側面のコンクリートも剥離していて、スターラップの大半が破断している。床版下面のコンクリートも局部的に剥離している。更に、写真-4 から分かるように、W-3 はコンクリートの剥離により、主鉄筋の腐食が加速的に進み、露出している主鉄筋の断面欠損が確認できる。写真-6 に桁側面の状況を示す。写真-5 の W-7 は桁下隅角部や桁側面のコンクリートが部分的に剥離し、床版下面のコンクリートも局部的に剥離しているため、外側の主鉄筋が部分的に腐食している。

2.3 材料の劣化状況

(1) コンクリートの圧縮強度等

W-1 桁より載荷実験前にかか所から、載荷試験後に桁腹部の中立軸付近よりコアを 3 本採取し、材料試験に用いた⁴⁾。コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数を表-2 に示す。想定する設計基準強度を 24N/mm² とすれば圧縮強度は、約 1.35 倍で、静弾性係数は、コンクリート標準示方書に示される値に比べて小さくなっている。これは、粗骨

材に琉球石灰岩が使われているため、その影響が現れたと考えられる。



写真-2 W-1 桁の劣化状況



写真-3 W-4 桁の劣化状況



写真-4 W-3 桁の劣化状況



写真-5 W-7 桁の劣化状況



写真-6 W-3 桁の側面の劣化状況

表-2 コンクリートの圧縮強度、静弾性係数の試験結果

桁	載荷前後	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
W-1	載荷前	35.9	23.2
	載荷後	32.6	25.2
	載荷後	29.7	23.4
平均		32.7	23.9

(2) 鉄筋の機械的性質

桁の配筋は、概ね図-3 に示すようになっている。概ねと記したのは、主鉄筋が丸鋼と異形棒鋼が混在して使用されているからである。

載荷試験完了後に W-1 桁から切り出した鉄筋の鉄筋径の計測と引張試験を行った。鉄筋径は、ノギスを用いて数か所を測り、その平均値を径とした。これらの鉄筋の機械的性質を表-3 および表-4 に示す。表から分かるように、異形棒鋼が D25、丸鋼が φ22 使用されており、所定の強度等を有している。

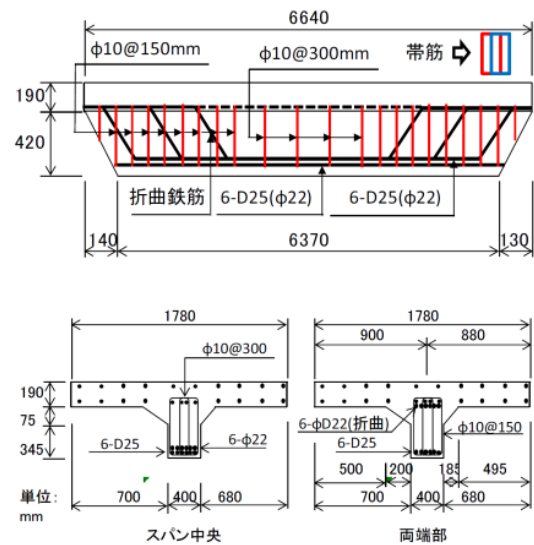


図-3 代表的な桁の配筋図 (W-1 桁)

表-3 異形棒鋼の機械的性質

	径 mm	降伏応力 N/mm ²	破断応力 N/mm ²	伸び %	弾性係数 N/mm ²
SD1	24.1	373	530	10	2.27x10 ⁵
SD2	25.2	351	525	20	1.78x10 ⁵
SD3	25.3	276	467	10	1.80x10 ⁵
平均	24.9	333	507	13	1.95x10 ⁵

表-4 丸鋼の機械的性質

	径 mm	降伏応力 N/mm ²	破断応力 N/mm ²	伸び %	弾性係数 N/mm ²
SR1	22.7	371	514	20	1.99x10 ⁵
SR2	22.9	363	488	20	2.18x10 ⁵
平均	22.8	367	501	20	2.10x10 ⁵

(3) 鉄筋の断面欠損量

RC 高欄付の RCT 桁の載荷試験後にコンクリートから鉄筋をはりだして鉄筋の腐食減量を求めた。腐食した鉄筋の断面欠損は腐食の大きさが一定ではないため、放射線 CT を用いて 0.22 mm ピッチで断面を測定し画像処理 (図-4 参照) によって面積を求め、その範囲の平均値により腐食減量を確認した。放射線 CT 画像より面積を求める方法は、画像を構成する点(ピクセル)の直径と各々の点の色情報が示されるので、画像の上から下方向へ点の色を判定し、鉄筋の外側の黒画像から白画像への変化、白から鉄筋の外側の黒画像に変化する間の点の数を数え、これを横方向に 1 ピクセル分を移動して、鉄筋の内側と判定できる点の数の合計にピクセルの直径×直径の正方形の面積を掛けて鉄筋の面積を算出した。

測定結果の一例を表-5 に示す。腐食の著しい W-3 桁は公称断面積の 4 割程度まで断面が欠損している場所もある。

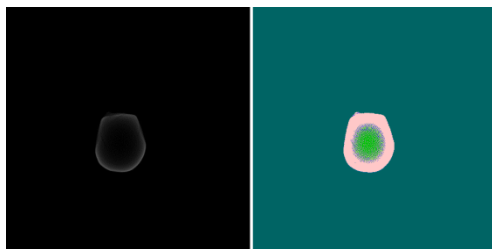


図-4 放射線 CT 画像(左)と画像処理画像

表-5 腐食した鉄筋の断面欠損量の一例

桁	種類	公称断面積 mm ²	断面積 mm ²	断面積比
W-3	D25	506.7	208.7	0.41
W-7	D25	506.7	422.7	0.83

3. RCT 桁の残存耐力

3.1 実験の概要

実橋から切出した RCT 桁をスパン長 1=6.0m の試験桁として端部処理し、対称 2 点集中荷重方式で静的曲げ試験を行った。図-5 に載荷実験の模式図を示す。

3.2 中桁の実験結果

(1) 荷重と鉛直変位の関係

図-6 に W-1、図-7 に W-4 の載荷荷重と鉛直変位の関係を示す。W-1 桁は約 710kN で降伏に達している。この桁は劣化が軽度であるので、後述するように、主鉄筋の断面積を公称断面積として計算しても実験の結果と一致する。一方、著しい劣化状態の W-4 桁は載荷荷重が 640kN 程度

で降伏していて劣化の小さい W-1 桁と比較して小さい耐力となっている。降伏後の変形性能に大きな差はないと言える。

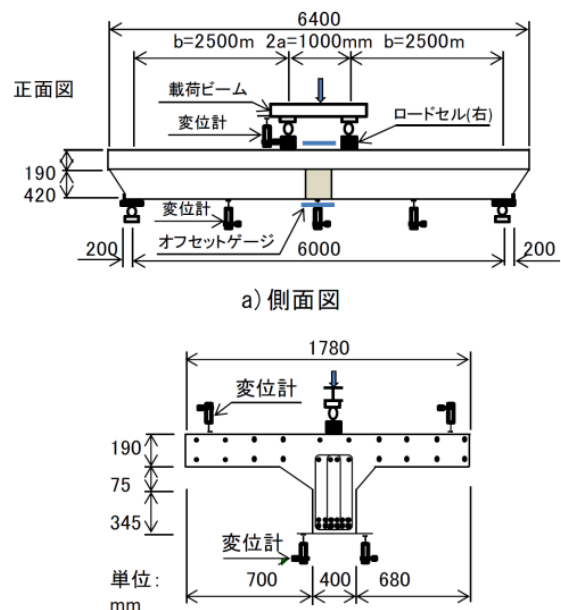


図-5 載荷実験の模式図

(2) 実験値と RC 梁として計算した値の比較

W-1 桁及び W-4 桁に対して RC 梁の T 型梁の計算を行った。支点と載荷点の距離が $b=2.5\text{m}$ の 2 点載荷として曲げモーメントを求めると、W-1 桁の場合の降伏時の載荷荷重が 710kN であるので曲げモーメントは 890kN-m となり、W-4 桁の場合の降伏時の載荷荷重が 640kN であるので曲げモーメントは 800kN-m となる。これに対して RC 梁の計算で下段の主鉄筋がちょうど降伏応力度 (345N/mm^2) になるように曲げモーメントを逆算すると、W-1 桁が 890kN-m となり載荷荷重と一致した。W-4 桁の場合は、W-1 桁と断面寸法や配筋が同程度あるが、W-1 桁の場合より小さな載荷荷重で降伏に達している。W-4 桁の下面の約半分の鉄筋が露出している状態であり、下段鉄筋の端部鉄筋が外側にずれて有効に働かなかったことが考えられる。そこで RC 梁の計算で下段鉄筋を 2 本分の面積を減じて計算を行った。その結果、下段の主鉄筋がちょうど降伏応力度 (345N/mm^2) になるように曲げモーメントを逆算すると、740kN-m となり載荷荷重は 592kN となる。実験での降伏時の載荷荷重は 640kN であるので実験値の方が大きい値となるが、鉄筋の降伏応力が保証値であることを合わせ考えると、このような状態であった可能性がある。

塩害劣化が著しく進行しているが、降伏荷重が大きく高欄の寄与が大きいことがわかる。

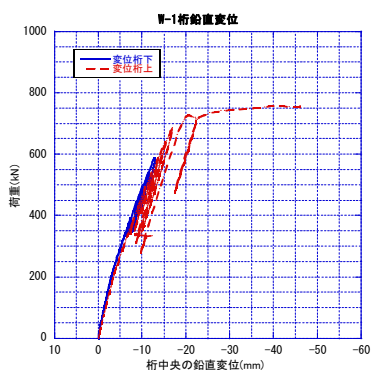


図-6 W-1 桁の荷重と鉛直変位の関係

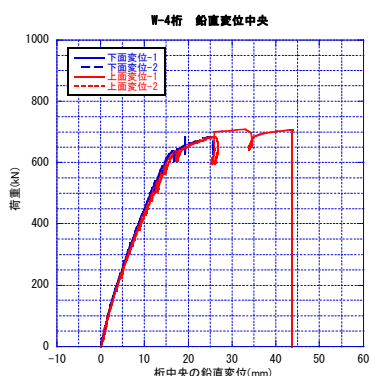


図-7 W-4 桁の荷重と鉛直変位の関係

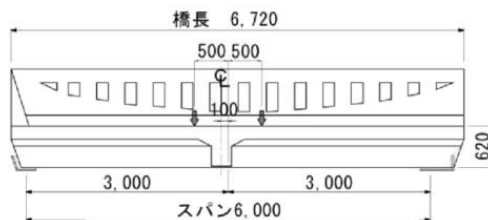


図-8 側部桁の側面図

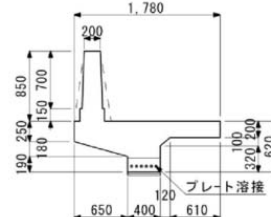


図-9 側部桁の断面図

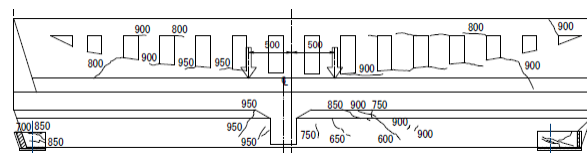


図-10 W-3 桁の載荷時のひびわれ発生状況

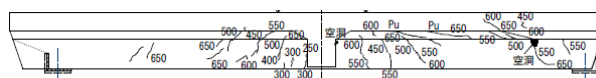


図-11 W-7 桁の載荷時のひびわれ発生状況

3.3 側部桁の実験結果

(1) 載荷試験の方法

本橋の側部桁は鉄筋コンクリート製の高欄が設置され、側部桁と一体構造となっている。W-3 桁は下流側の海側に面しているため、著しい塩害劣化が生じている。実際の橋梁は、劣化が激しいのでこの桁に荷重が作用しないように交通管制が行われていた。側部桁の載荷実験は、鉄筋コンクリート製の高欄が残存耐力に大きく影響するのではないかと考えから実施したものである。W-7 桁は、W-3 桁と同様に高欄を有しているが比較のため高欄を切り取って載荷実験を行った。載荷スパンは、中桁の場合と同様である。図-8 に側部桁の側面図を、図-9 に側部桁の断面図を示す。

(2) 載荷時のひび割れ発生状況の比較

図-10 と図-11 に W-3 桁と W-7 桁の載荷時のひび割れ発生状況を示す。W-3 桁のひび割れが少ないことから高欄の残存耐力へ大きく寄与していることがわかる。

(3) 荷重と鉛直変位の関係

図-13 および図-14 に W-3 桁と W-7 桁の載荷荷重と鉛直変位の関係を示す。W-3 桁は約 950kN 程度で降伏に達し、W-7 桁は約 650kN 程度で降伏に達している。W-3 桁は

(4) 高欄コンクリートの圧縮ひずみ及び桁主鉄筋の引張ひずみ

図-15 に高欄コンクリートの圧縮ひずみ分布を示す。高欄上部の圧縮ひずみが大きく、高欄の柱の水平方向のひずみ（高欄中部）と高欄の基部（高欄基部）のひずみの値は非常に小さな値となっている。高欄基部のひずみは、後述する梁の計算の中立軸付近にあり、ひずみが小さくなったと考えることができ、高欄中部のひずみは、高欄の柱であるため曲げモーメントが小さいと考えられる。高欄上部の高欄の梁は大きな圧縮力を受けていて、耐力向上に大きく寄与していることがわかる。図-16 は荷重と桁の主鉄筋の引張ひずみの関係を示したものである。降伏ひずみが約 1725μ (SD345 とした場合) であるので十分な余裕を有している。

(5) 実験値と RC 梁として計算した値の比較

高欄コンクリートに大きな圧縮ひずみが発生している

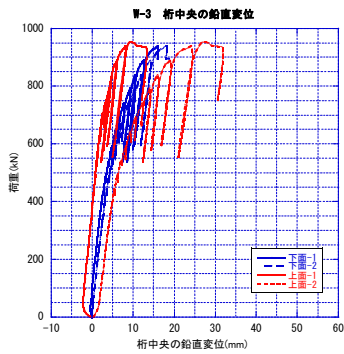


図-13 W-3 桁の荷重と鉛直変位の関係

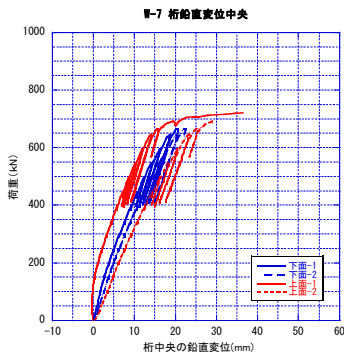


図-14 W-7 桁の荷重と鉛直変位の関係

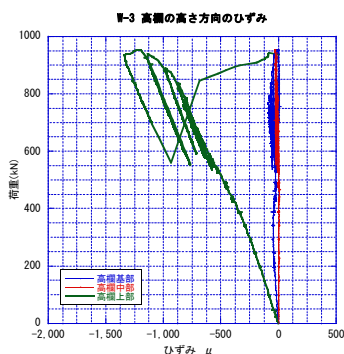


図-15 W-3 桁の高欄コンクリートの圧縮ひずみ

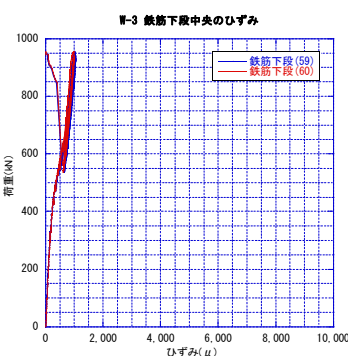


図-16 W-3 桁中央の主鉄筋の引張ひずみ

(5) 実験値と RC 梁として計算した値の比較

高欄コンクリートに大きな圧縮ひずみが発生している
ので高欄コンクリートを考慮した RC 梁の計算を行った
図-17 にモデル図を示す。解析は降伏応力に達していな
いと考えられる載荷荷重 500kN の時について行った。RC

の弾性係数比は試験で得られた $n=8$ を用いた。載荷荷重
500kN の時に桁の中央の曲げモーメントは 650kN-m と
なる。通常の RC 梁の計算は中立軸までコンクリートが
あると仮定するが、RC 製高欄の上部分のみを圧縮領域と
し引張鉄筋との中立軸を求める。高欄上縁の圧縮応力が
圧縮ひずみに高欄コンクリートの弾性係数を乗じて求め
た応力度 13.3MPa となるように中立軸を求め引張鉄筋
の引張応力度を算定すると 81MPa となり、実験で求めた
鉄筋の引張応力度 72MPa とほぼ一致することがわかつた。
これより RC 製高欄付の RCT 桁は、中桁より大きな耐
荷力があると言える

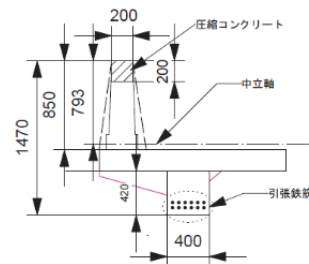


図-17 高欄を考慮した RC 梁モデル

5. まとめ

実橋から切り出した RCT 桁を用いて載荷実験をおこ
なした。鉄筋が露出して著しい塩害劣化の RCT 桁の場合
には、桁の外側の鉄筋が、正規の位置から外にずれてしま
って、残存耐力の低下が見られる。RC 製の高欄を有する
桁は、高欄を考慮すると梁高の大きな梁と見られるよう
になり、高欄を考慮しない場合の鉄筋の応力度が軽減され
、結果的に、鉄筋の断面積が腐食により減少しても発生
応力度は小さくなり、結果的に大きな残存耐力があるこ
とが確認できた。補修方法の一方法として壁高欄を設置
することも有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 大城 武：沖縄における橋梁調査とその問題点（第 1 報），琉球大学農家政工学部学術報告，第 13 号，pp.223～231，1966
- 2) 大城 武，浜田純夫，渡嘉敷直彦，上山秋雄：沖縄県の老朽 RC 橋の耐力試験について，琉球大学理工学部紀要 No.12，pp.91～128，1976
- 3) 大城 武，浜田純夫，上間源蔵，上山秋雄：沖縄県の老朽 RC 橋の曲げ破壊試験について，琉球大学理工学部紀要 No.14，pp.125～137，1977
- 4) 下里哲弘，金田一男，砂川章次，淵脇秀晃，久米仁司，太田清志，玉城喜章，長嶺由智：塩害により著しく劣化した RCT 桁の劣化度と残存耐力，構造工学論文集 Vol.60A，pp.761～770，2014