

腐食劣化した鋼 I 桁橋の残存耐荷力評価と CFRP による補修・補強に関する研究

安鎮熙¹, 貝沼重信², 鄭暎樹³

^{1,2,3} 九州大学工学研究院社会基盤部門

鋼 I 桁橋の支承部において、局所的な高湿度化、土砂・雨水の堆積、および排水型伸縮継手部における凍結防止剤の浸透による腐食事例が多く報告されている。しかし、この損傷に対する維持管理技術は確立されていない。本研究では支承部に腐食を有する鋼 I 桁橋の CFRP を用いた修繕方法を提案した。この方法を支承近傍に局部腐食を有する鋼 I 桁橋に適用し、修繕方法の適用性と有効性について評価した。また、支承の残存支持力評価と、鋼 I 桁橋の破壊モードを明確にするために、腐食損傷を有する鋼 I 桁橋のモデルに有限要素解析を行った。

1. はじめに

我が国では、多くの鋼橋が高度経済成長時に建設されており、15m 以上の長さを持つ橋梁の半数以上が 20 年後には供用から 50 年が経過すると報告されている。しかし、同時期にこれらの橋梁を新設・修繕することは、経済的な面、時間および空間的な制約条件のために非常に困難である。また、鋼橋では、維持管理上疲労や腐食が主な問題であると考えられている。疲労が鋼橋の主な問題と認識されている一方、腐食は深刻な問題と考えられていなかった。そのため、腐食した鋼橋の構造的性能は明確でなく、維持管理手法は確立されていない。しかし、腐食により深刻な損傷を受けた橋梁の事例は多く報告されている。得に、短・中スパンの鋼 I 桁橋において腐食損傷の事例は多く報告されている。

鋼 I 桁橋において、支承付近のウェブ、フランジおよび垂直補剛材に腐食損傷が発見される事例が多く報告されている。腐食損傷の事例を Fig.1 に示す。これらの腐食損傷は、部分的な高湿度化、

土砂・雨水の堆積、および排水型伸縮継手部における凍結防止剤の浸透によるものであると考えられる。これらの腐食損傷は、橋梁の構造的な性能に影響を与え、挙動の不確実性を高める。腐食損傷が鋼 I 桁橋に与える影響をまとめたものを Fig.2 に示す。

このような事例が多く報告されているにも関わらず、既往の研究は、主に腐食現象や防錆塗料についてなされており、腐食した鋼橋の残存支持力や力学挙動については扱われておらず、腐食した鋼橋の修復、補強方法は確立されていない。本研究では、支承近傍に局所的な腐食損傷を有する鋼 I 桁橋の CFRP(Carbon-Fiber-Reinforced-Plastic)を用いた修復方法を提案するために、腐食損傷を有する鋼 I 桁橋に載荷試験を行い、CFRP の適用性について検討した。また、支承近傍のウェブと垂直補剛材に局所的な腐食を有する鋼 I 桁橋の支承の残存支持力を評価するために、腐食の形態や腐食損傷を考慮した解析を行い、臨界座屈荷重と支承の



Fig. 1 Corroded plate girder around support

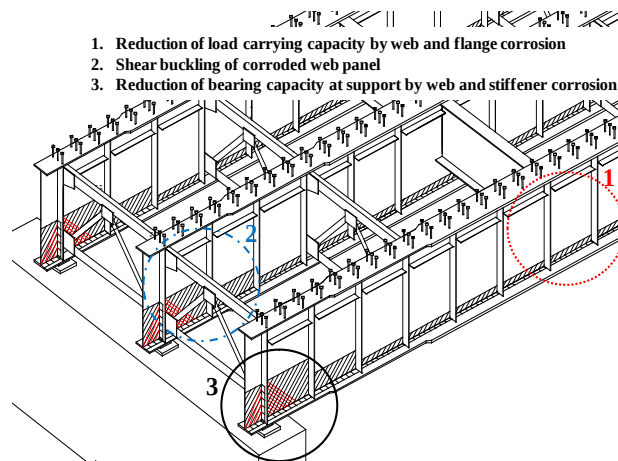


Fig. 2 Structural performance of steel plate girder bridges related to corrosion

支持力について検討を行った。

2.腐食損傷を有する鋼 I 桁橋の修復方法

2.1 CFRP を用いた修復方法

近年、高強度、軽量かつ高い耐食性を持つ CFRP を用いた、鋼構造物の補強に関する研究が多くなされている。CFRP は、引張耐力、曲げ耐力増加のためにさまざまな橋梁に用いられてきた。しかし、CFRP を用いた腐食損傷を有する橋梁の補修の事例はまれであり、支承近傍のウェブや垂直補剛材に腐食損傷を有する橋梁に用いた事例は存在しない。

CFRP は高耐食性、軽量、接着時に溶接やボルトを必要としない等の特性を持つために、腐食した橋梁の部材の補修に適していると考えられる。CFRP を用いた腐食した鋼 I 桁橋の修復の流れを Fig.3 に示す。

2.2 局所的な腐食損傷を支承近傍に有する鋼 I 桁橋の CFRP を用いた修復方法

CFRP を用いた補修方法の適用性と効果について検討するために、支承近傍に局所的な腐食損傷を有する鋼 I 桁橋にこの方法を適用した。この橋梁は高速道路橋で、支間長 23.42 m、3 本の主桁で構成される。橋梁の概略 Fig.を Fig.4 に示す。この橋梁では、伸縮装置からの水分の浸透による支承近傍の腐食損傷が発見された。腐食損傷の状態を Fig.5 (a)に示す。

CFRP を用いた補修の概要と補修の範囲を Fig.6 に示す。本研究では腐食による部材の損失に基づき、3 枚の CFRP をウェブ、垂直補剛材、および下部フランジに装着した。CFRP を用いた補修を Fig.5 (b)~(d) に示す。腐食した領域の腐食生成物と塗膜を除去した後に、エポキシ樹脂を用い鋼素地を平坦にし CFRP の層を形成した。その後、腐食表面の主応力方向にそって炭素繊維を貼り付けた。CFRP の材料成分を Table 1 に示す。

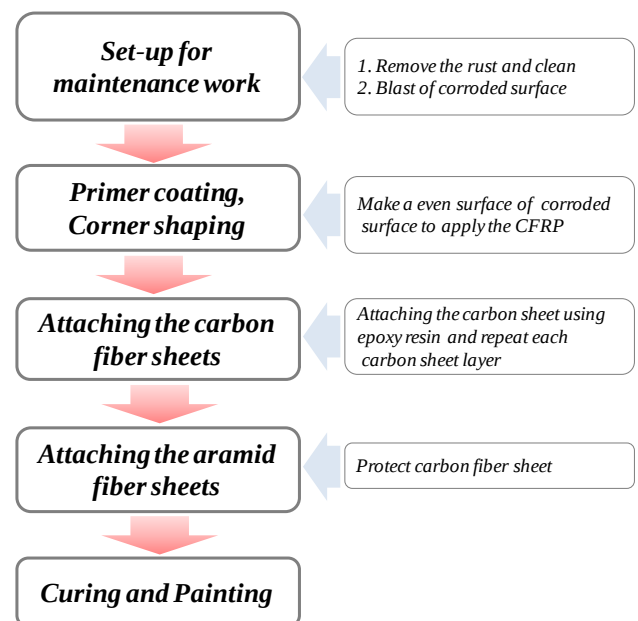


Fig. 3 Flow chart of CFRP repair method for corroded plate girder bridge

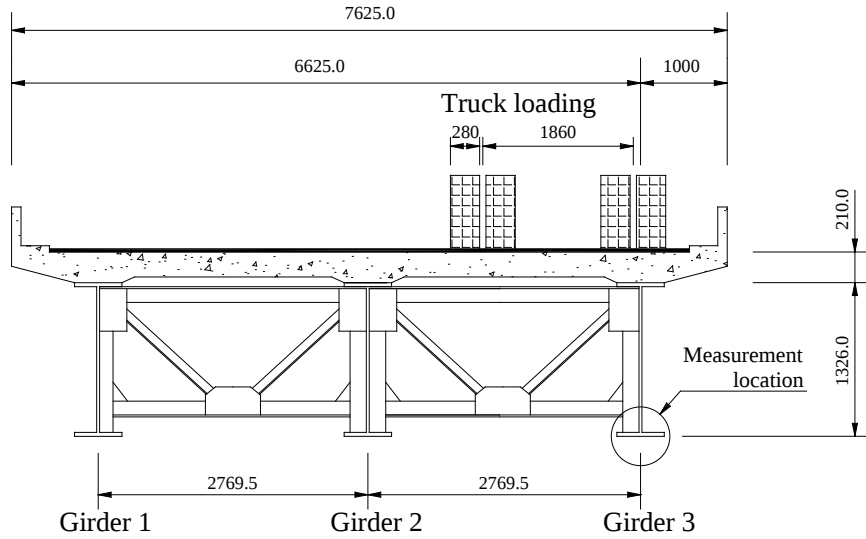


Fig. 4 CFRP repaired plate girder bridge, loading and measurement location



(a) Local corrosion of plate girder



(b) After cleaning



(c) Local corrosion of plate girder



(d) After repair

Fig. 5 CFRP repair process of plate girder bridge

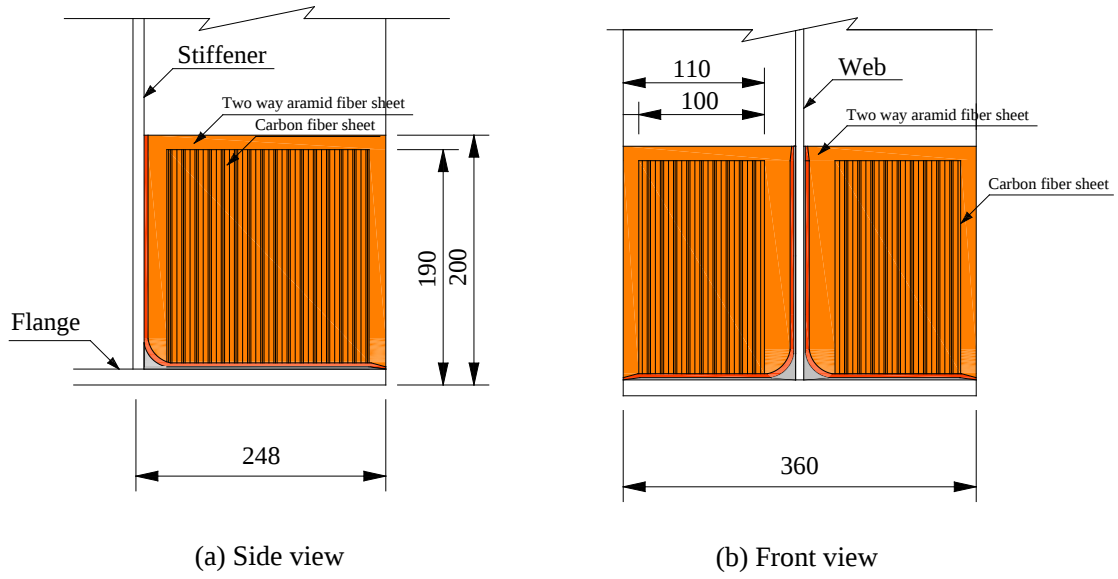


Fig. 6 region and detail of CFRP repair

Table 1 Material properties of CFRP

	Unit weight	Tensile strength	Elastic modulus	Design thickness
Carbon fiber sheet	300g/m ²	1900MPa	640MPa	0.143mm /sheet
Aramid fiber sheet	180g/m ²	2060MPa	118MPa	0.0621mm/sheet

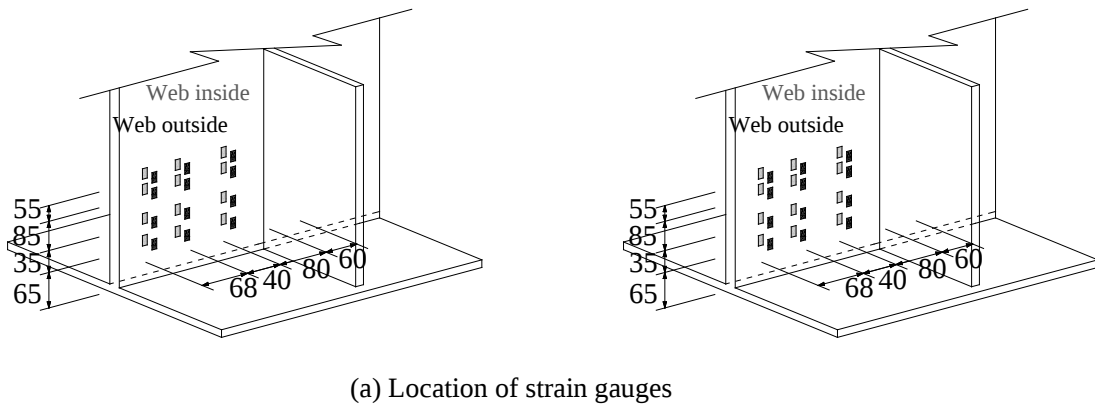


Fig. 7 Loading test and measurement set-up

CFRP の補修効果を評価するために、トラックを用いた載荷試験を行い、ひずみを計測した。トラックの前輪と後輪の距離は 4,200mm で、タイヤの幅は 280mm である。前輪により発生する荷重は 68.0kN、後輪により発生する荷重は 156.5kN であった。トラックの速度は時速 20km であり、3 本目の桁上を走行した。その概略 Fig. を Fig.4 に示す。ひずみゲージの設置箇所、載荷状況およびひずみゲージの設置状況を Fig.7 に示す。

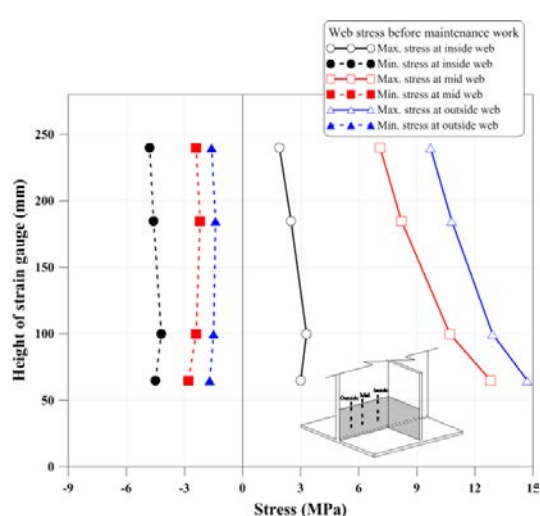
2.3 CFRP による鋼 I 桁の補修後の載荷試験結果

CFRP 補修前の、ウェブ内外面の応力値を Fig.8 に示す。ウェブ内外面の応力分布は計測箇所や計測高さにより変化し 14.9~−4.8MPa を示している。応力値や応力範囲の変動はウェブ外側に比べてウェブ内側が小さな値をとっている。これは垂直補剛材とウェブの影響によるものである。また、CFRP の補修前後の応力値と応力範囲の変化は微小であった。これは、着目部位が桁端部であり、計測された応力値と応力範囲が比較的小さかったためと考えられる。しかし、フランジ上面から 240mm の箇所の応力値を比較すると、わずかに応力値が減少していることが確認できる。これは

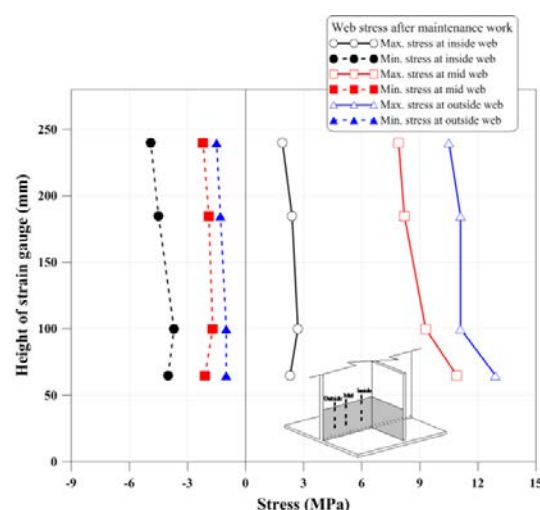
CFRP による部分補強効果であると考えられる。CFRP 補修による応力値の変化の割合を Fig.9 に示す。ひずみゲージの設置位置が 200mm よりも下に位置する箇所においては、応力の比率が 1 を下回っている。

CFRP 補修前後の、補剛材の内外面の応力範囲と応力値の変化の割合を Fig.10 および Fig.11 に示す。補修前の補剛材の内外面の応力値は計測箇所や計測高さにより変化し 1.1~−10.2MPa を示している。計測された補剛材の応力値と応力範囲はウェブと同様の傾向を示し、CFRP の補修前後の応力値と応力範囲の変化は微小であった。また、補修後の応力値がわずかに増加する箇所があるが、これは応力範囲が極端に狭いためであると考えられる。

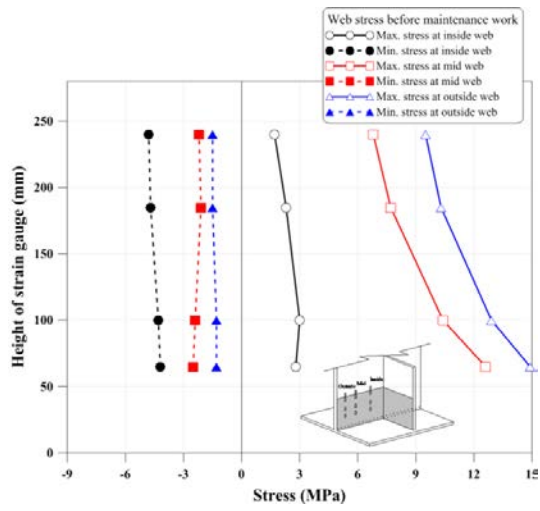
本研究に用いた鋼 I 桁橋の腐食損傷は比較的軽微であったが、CFRP を用いた補修により腐食の進展を防ぐ効果と、部分的な補強効果が確認された。しかし、CFRP を用いた腐食表面の補修による応力低減効果は微小であることが確認された。これは、今回補修した箇所が大きな応力を受けるような部材ではなく、また補修した領域が極端に狭いからであると考えられる。



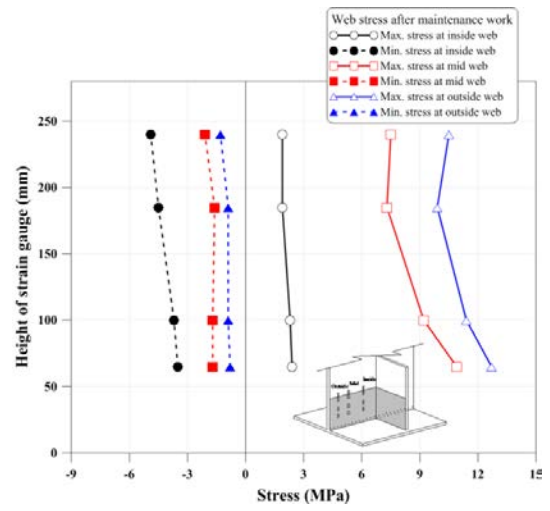
(a) Outer web side before CFRP repair



(b) Outer web side after CFRP repair

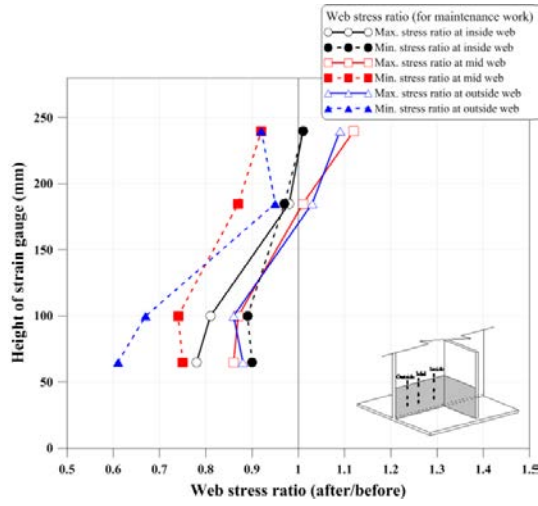


(c) Inner web side before CFRP repair

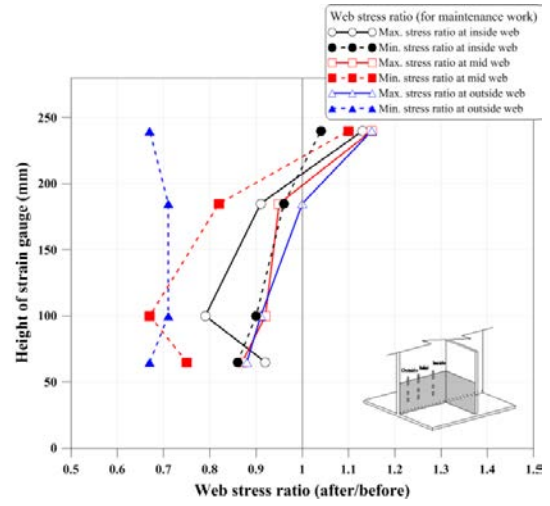


(d) Inner web side after CFRP repair

Fig. 8 Web stress distribution depending on CFRP repair

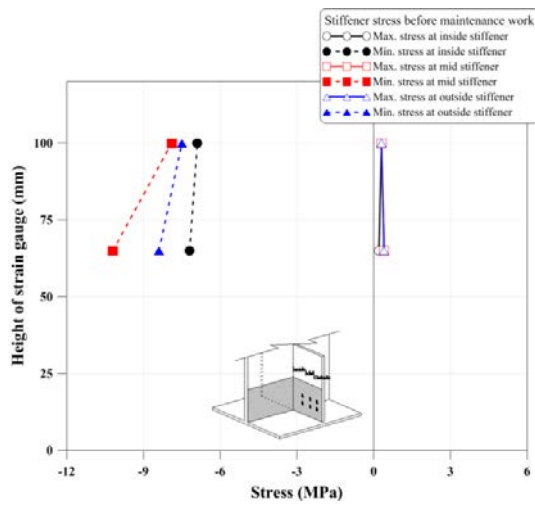


(a) Outer web side

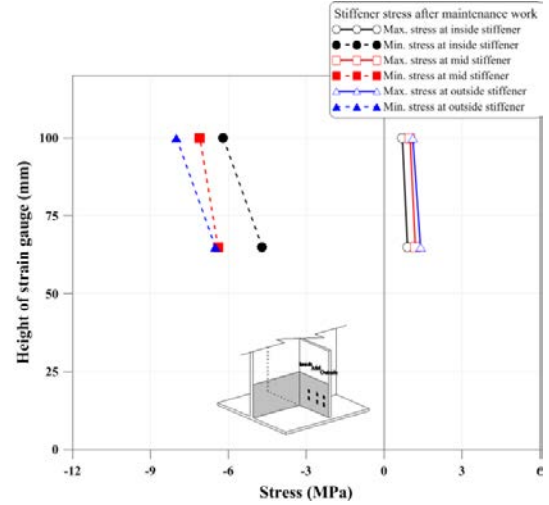


(b) Inner web

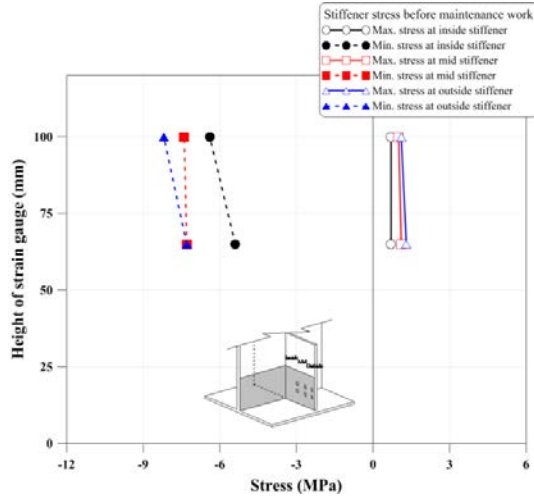
Fig. 9 Web stress ratio depending on CFRP repair side



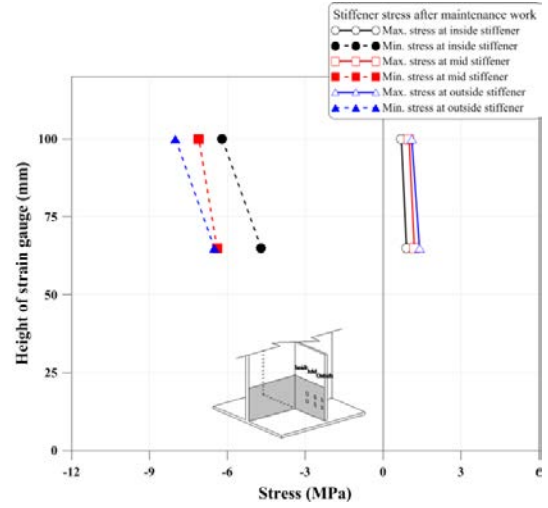
(a) Outer side of outer stiffener before CFRP repair



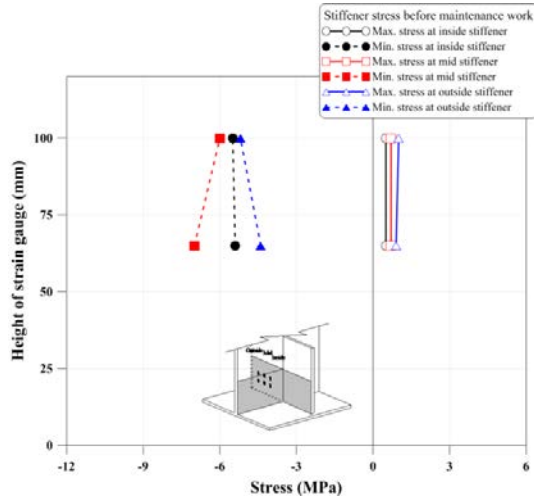
(b) Outer side of outer stiffener after CFRP repair



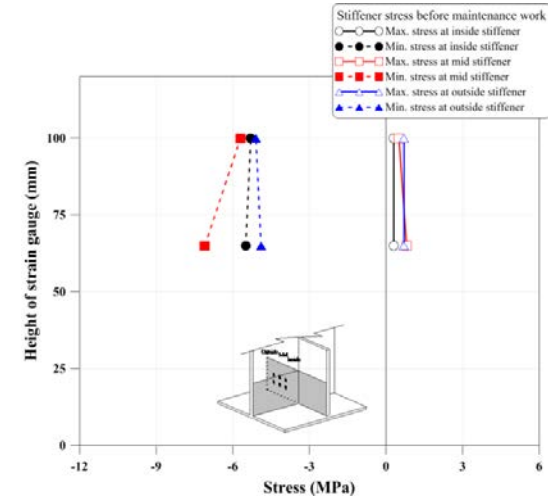
(c) Inner side of outer stiffener before CFRP repair



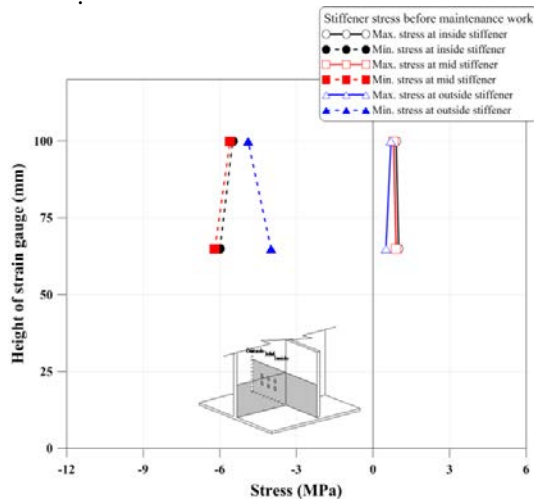
(d) Inner side of outer stiffener after CFRP repair



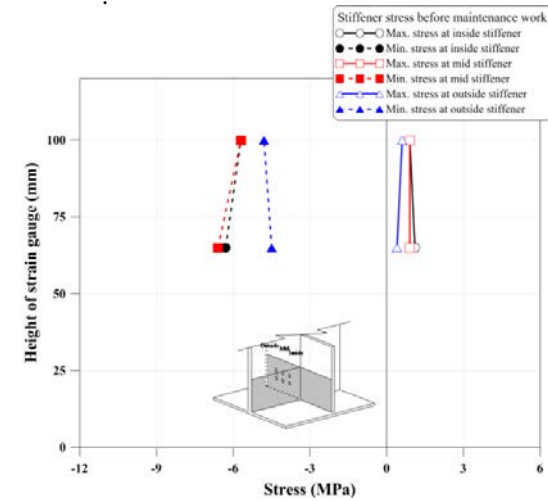
(e) Outer side of inner stiffener before CFRP



(f) Outer side of inner stiffener after CFRP

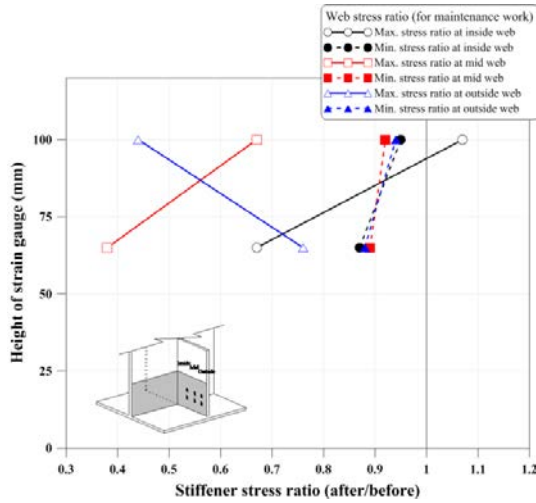


(g) Inner side of inner stiffener before CFRP repair

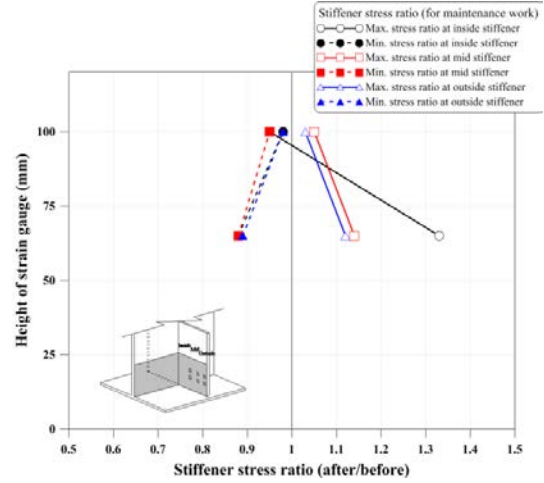


(h) Inner side of inner stiffener after CFRP repair

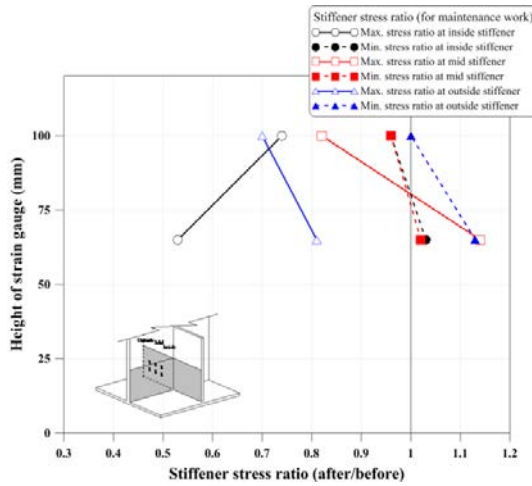
Fig. 10 Stiffener stress distribution depending on CFRP repair



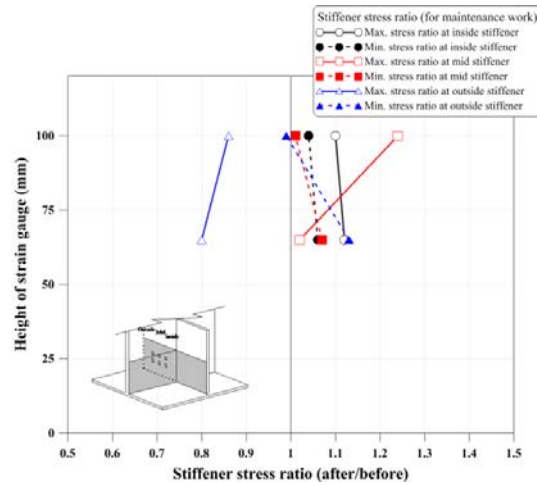
(a) Outer side of outer stiffener



(b) Inner side of outer stiffener



(c) Outer side of inner stiffener



(d) Inner side of inner stiffener

Fig. 11 Stiffener stress ratio depending on CFRP repair

3. 鋼 I 桁橋における残存支承力解析

腐食損傷を有する鋼 I 桁橋の CFRP を用いた補修では、補修部材が大きな応力を受けず、補修箇所も一部の領域のみであった。そのため腐食による構造挙動の変化や補修による構造挙動の効果について考察することは困難であった。本研究では、支承近傍のウェブと補剛材に局所的な腐食損傷を有する鋼 I 桁橋の支承の残存支持力とその破壊形態を明確にするために、腐食損傷を有する鋼 I 桁

橋のモデルを用いた有限要素解析を行った。支承の残存支持力は、腐食形態や腐食損傷の程度によって異なる臨界座屈荷重関係するために、座屈に適した固有値解析と非線形解析を行った。

3.1 幾何学的特長と腐食モデル

本研究で使用したモデルを Fig.12 に示す。鋼 I 桁橋においておよそ 25%を占める腐食形態を Fig.13 (a)に示す。この腐食形態の腐食領域は、他の腐食形態に比して比較的大きいために、本研究

ではこの腐食形態を採用した．本解析で用いた腐食モデルを Fig.13(b)に示す．腐食領域と腐食形態の影響を評価するために，腐食領域をウェブ内側，ウェブ外側，および垂直補剛材の腐食といった 3 つの腐食部位に分類した．腐食状態を Table 2 に示す．腐食領域の部材厚は各腐食モデルを考慮する

ために 10 % ずつ減少させた．よって最終的に 8 つの腐食形態において合計 71 種類の解析モデルを作成した．腐食モデルでは，ウェブの腐食高さ，および腐食幅は鋼 I 桁橋の端部までの長さより 260 mm とした．

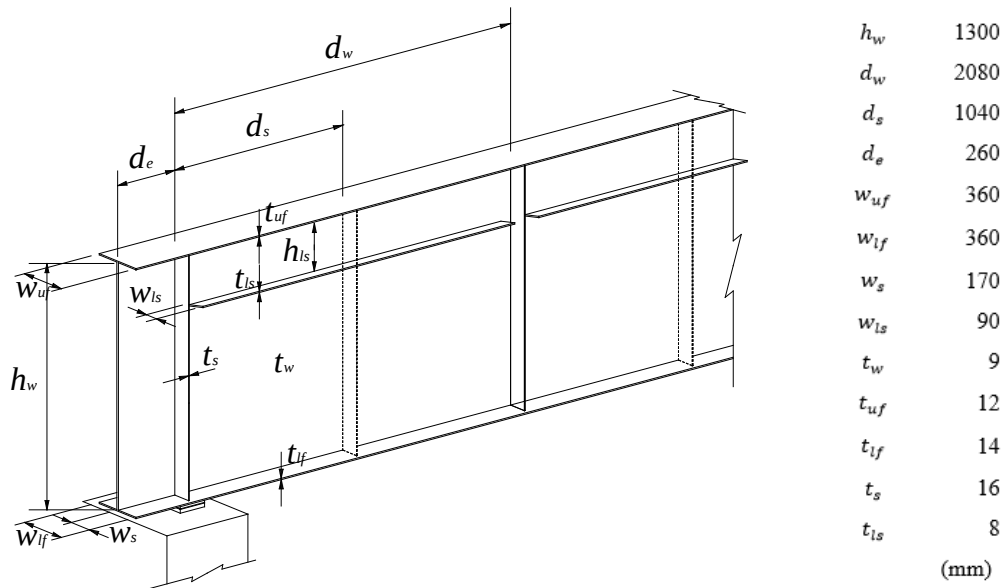


Fig. 12 Dimension of FE analysis model of corroded plate girder

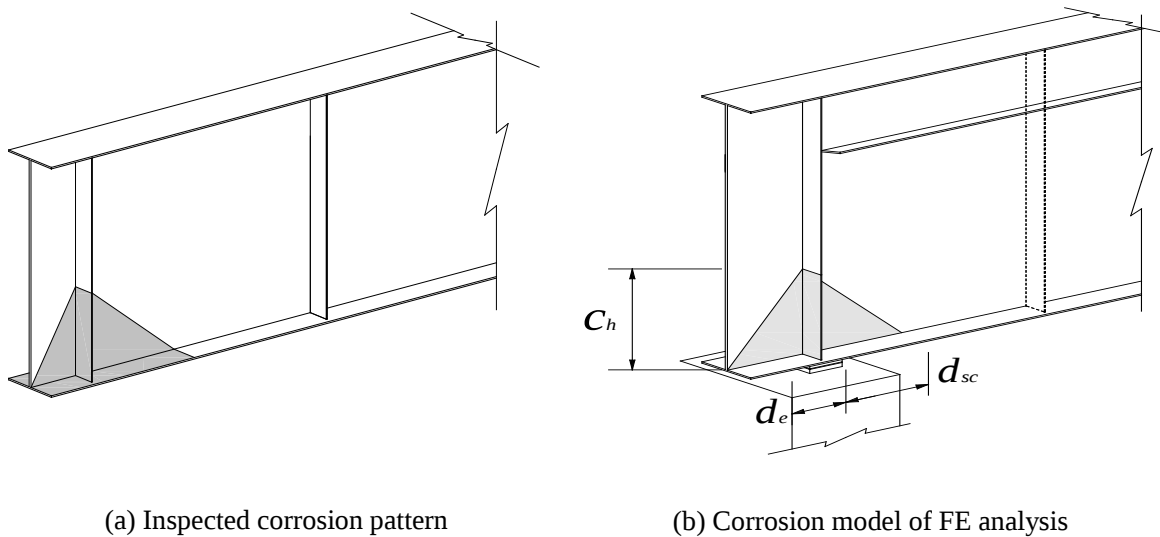


Fig. 13 Corrosion pattern of FE analysis model of plate girder bridges

Table 2 Corrosion model and corrosion condition

Corrosion model (condition)		Corroded area (mm)			Corroded ratio
		c_h	d_e	d_{sc}	$c_r(\%)$
Case1	Un-corroded model	0	0	0	0
Case2	Inner web(triangular)	260	0	260	10~ 100
Case3	Outer web(triangular)	260	260	0	10~ 100
Case4	Stiffener	260	0	0	10~ 100
Case5	Inner and outer web(triangular)	260	260	260	10~ 100
Case6	Inner web(triangular) and Stiffener	260	260	260	10~ 100
Case7	Outer web(triangular) and Stiffener	260	260	260	10~ 100
Case8	Inner, outer web(triangular) and Stiffener	260	260	260	10~ 100

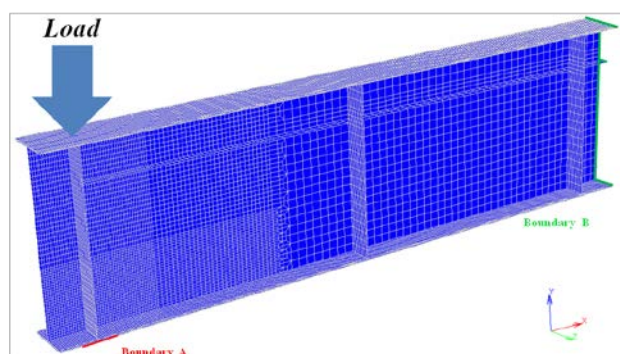


Fig. 14 FE analysis model of plate

Table 3 Boundary conditions of FE analysis model

	u_x	u_y	u_z	r_x	r_y	r_z
Boundary A	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed	Movable
Boundary B	Fixed	Movable	Fixed	Fixed	Fixed	Movable

3.2 鋼 I 桁の FE 解析モデル

支承部近傍のウェブと垂直補剛材に局所的な腐食損傷を有する鋼 I 桁の支承の残存支持力を評価するために、非線形有限要素解析を行った。本解

析は、汎用有限要素解析ソフト Marc 2010 を用いた。有限要素解析では、4 接点シェル要素をウェブおよび水平・垂直補剛材に用い、8 接点ソリッド要素をフランジおよびソールプレートに用いた。

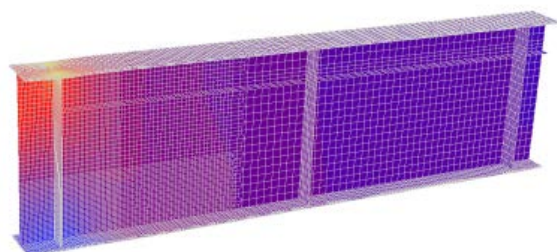
これらの概略図を Fig.14 に示す．解析に用いた境界条件は，Fig.3 に示す実際の橋梁により設定した．鋼種は SM490Y とし，その降伏点を 365MPa，ヤング率を 206,000MPa およびポアソン比を 0.3 とした．なお材料構成則は完全弾塑性体とし，降伏条件には Von Mises の降伏条件を用いた．本解析モデルでは，鋼 I 桁橋の端部の垂直補剛材上の上フランジに荷重を受けるとした．これらの状態を Fig.14 に示す．

3.3 局所的な腐食損傷を有する鋼 I 桁橋の支承の残存支持力評価

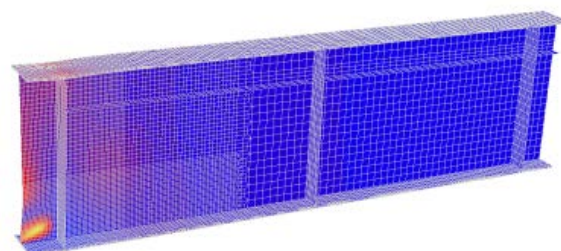
3.3.1 局所的な腐食損傷を有する鋼 I 桁橋の破壊形態

鋼 I 桁橋の端部の垂直補剛材は柱に似た挙動を示し，支承に力を伝達する．それゆえに鋼 I 桁橋の支承の挙動は短柱に似たものとなる．支承部近傍に局所的な腐食損傷を有する鋼 I 桁の支承の破壊形態を解析した結果，多くの場合，圧縮応力によって規定されることがわかった．ケース 2 と 3 において，腐食率が増加するにもかかわらず，それらの破壊形態は腐食部位の局所的な変形に伴う圧縮応力に規定されている．ケース 4 の場合も，破壊形態は腐食率が 40 % まで圧縮応力に規定される．50～80 % で腐食損傷を有する補剛材の局所的な座屈に規定され，90，100 % で腐食損傷を有す

る補剛材の局所的な座屈によるねじれが確認された．これらの腐食部位を重ね合わせたケース 5～7 においても，腐食率が 40% 以下ではその破壊は圧縮破壊により規定される．腐食率が増加すると，破壊形態は腐食損傷を有する部位に発生する局所的な座屈により規定される．すべての部位が腐食しているケース 8 においては，10，20 % といった比較的腐食率が低い場合に，破壊の形態が圧縮力により規定される．腐食率が 30～80 % の場合において，その破壊形態は腐食損傷を有する垂直補剛材の局所的な座屈に規定される．また，腐食率が 90 % の場合の破壊形態は鋼 I 桁橋の支承部の損失によって規定される．支承が受ける力が終局状態になったときの各破壊変形を Fig.15 に示す．ただしこの Fig. の縮尺は実際の 10 倍となっている．Fig.15 (a) および Fig.15 (b) は，腐食率が低く，腐食形態がケース 2，3 の場合に優勢的に発生する，典型的な板桁部の圧縮破壊の状態を示している．Fig.15 (c) は，垂直補剛材が腐食した場合の局所的な座屈による破壊形態を示している．この破壊形態は，圧縮破壊が発生する前に局所的な腐食部分に座屈が発生し，過剰に部材が変形することで発生する．Fig.15 (d) は，腐食した垂直補剛材の局所的な座屈により偏心したねじれの形態を表し，また Fig.15 (e) は，ケース 8 において腐食率が 90 % のときの破壊状態を示している．



(a) Failure mode by compressive stress



(b) Failure mode with local deformation by compressive stress (Mode 2)

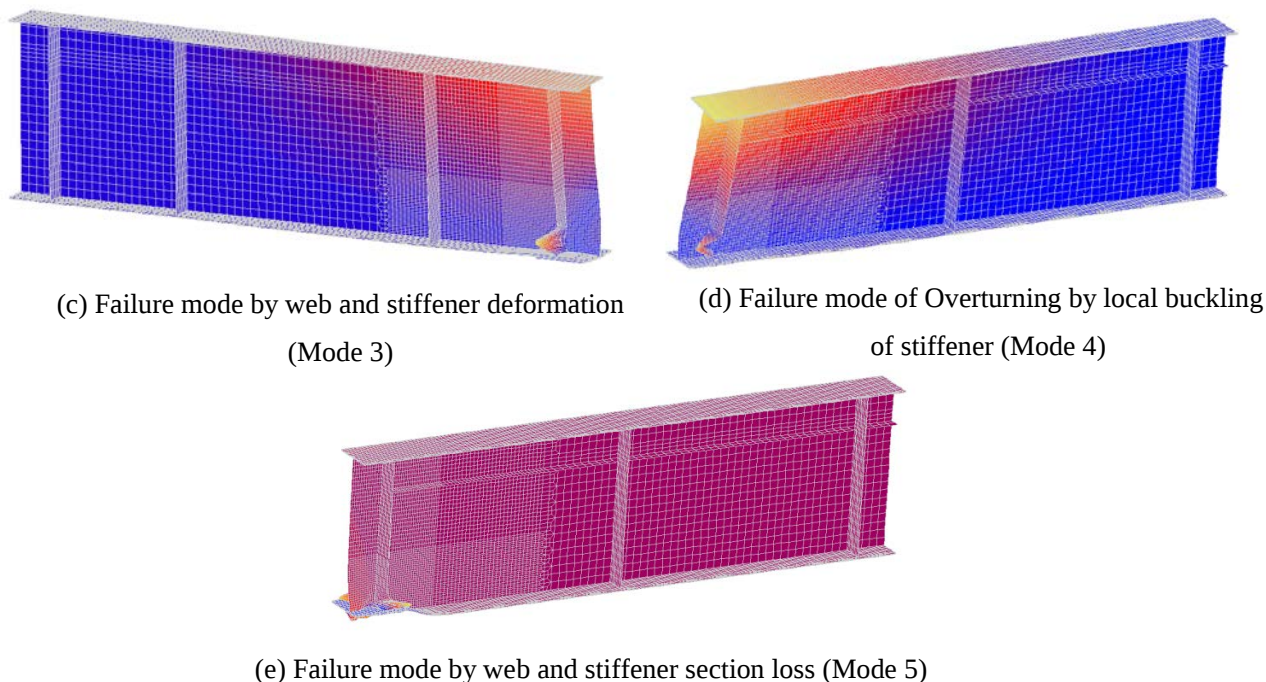


Fig. 15 Failure mode at ultimate bearing strength (deformation scale factor 10)

3.3.2 局所的な腐食損傷を有する鋼 I 桁橋の支承の残存支持力

支承の残存支持力を評価するために、局所的な腐食損傷を有する板桁のモデルを用い、解析によって導出した臨界座屈荷重と終局座屈荷重をまとめたものを Table 4~Table 10 に示す。各腐食率における臨界座屈荷重、終局座屈荷重、および破壊モード比較した結果を Fig. 16 に示す。

臨界座屈荷重 P_{cr} は、すべての腐食モデルにおいてその腐食率の増加に伴い徐々に減少している。また、Table 4~Table 10 に示すように、腐食率が 50 %を超えると P_{cr} は急激に減少する。この現象は、腐食による断面減少による局所的な座屈に依存する。しかし、終局強さに関しては異なる傾向を示し、腐食率ではなく腐食モデルに依存する傾向にある。ケース 2, 3 および 5 では、ウェブに腐食が発生しているにも関わらず、それらの終局強さにはわずかな差しか認められない。また、Fig 16 (a), (b) および (d) より、終局強さの最大減少量は、未腐食の場合に比して 88% となっている。しかし、補剛材が腐食するケース 4 において、終局強さは腐食率が 40% になるまでは徐々に減少しているが、

腐食率が 50% を超えた後に急激に減少し始める。鋼 I 桁橋の端部支承部に位置する垂直補剛材は、支承の反力に抵抗する短柱に似た挙動を示し、Fig 16 (c) に示すように垂直補剛材はウェブにと比べ、部材厚が比較的厚めになっているために、終局強さの挙動の変化は腐食率に応じると考えられる。垂直補剛材の腐食が関与するケース 6~8 では、終局強さとその減少傾向は補剛材のみが腐食しているケース 4 に類似している。しかし、ケース 4 に比すと、ケース 6~8 ではウェブも腐食しているために、終局強さの変化がわずかに大きくなっている。

Table 4~Table 10 より破壊形状を比較すると、臨界座屈荷重は終局圧縮破壊と同等かそれ以上の値をとることが確認できる。局所的な腐食により発生する座屈による破壊モードやねじれが発生する場合、終局強さは板桁の臨界座屈荷重よりも大きい。この破壊形態と支承の支持力の関係は、終局強さと臨界座屈荷重の比を考慮することで明確になる。比が 1 よりも大きい場合その破壊形態は腐食領域での局所的な座屈や回転挙動に規定される。概略を Fig 17 に示す。

Table 4 Bearing strength and failure modes of inner web corroded model

	Corroded ratio (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Critical buckling load (Pcr), (kN)	2,461.0	3,139.0	3,131.0	3,122.0	3,108.0	2,833.0	1,953.0	1,103.0	438.9.0	87.22.0	2,957.0
Ultimate bearing strength (Pu), (kN)	2,419.2	2,419.2	2,419.2	2,419.2	2,457.0	2,440.2	2,440.2	2,457.0	2,419.2	2,419.2	2,419.2
Pu/Pcr ratio	1.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	1.3	2.2	5.5	27.7	0.8
Corroded (Pu)/ Un-corroded (Pcr)	1.0	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	0.8	0.5	0.2	0.0	1.2
Corroded (Pu)/ Un-corroded (Pu)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Failure mode at ultimate state	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode2	Mode2	Mode2	Mode1

Table 5 Bearing strength and failure modes of outer web corroded model

	Corroded ratio (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Critical buckling load (Pcr), (kN)	2,461.0	3,141.0	3,079.0	2,973.0	2,853.0	2,675.0	2,019.0	1,202.0	493.6	96.2	2,911.0
Ultimate bearing strength (Pu), (kN)	2,419.2	2,419.2	2,419.2	2,419.2	2,419.2	2,440.2	2,419.2	2,419.2	2,440.2	2,457.0	2,440.2
Pu/Pcr ratio	1.0	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.2	2.0	4.9	25.5	0.8
Corroded (Pu)/ Un-corroded (Pcr)	1.0	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	0.8	0.5	0.2	0.0	1.2
Corroded (Pu)/ Un-corroded (Pu)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Failure mode at ultimate state	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode2	Mode2	Mode2	Mode1

Table 6 Bearing strength and failure modes of stiffener corroded model

	Corroded ratio (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Critical buckling load (Pcr), (kN)	2,461.0	3,051.0	2,915.0	2,741.0	2,540.0	2,331.0	2,108.0	1,251.0	474.5	92.3	295.2
Ultimate bearing strength (Pu), (kN)	2,419.2	2,440.2	2,457.0	2,457.0	2,419.2	2,360.4	2,121.0	1,700.0	1,539.9	1,160.0	300.1
Pu/Pcr ratio	1.0	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.4	3.3	12.6	1.0
Corroded (Pu)/ Un-corroded (Pcr)	1.0	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0	0.9	0.5	0.2	0.0	0.1
Corroded (Pu)/ Un-corroded (Pu)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.7	0.6	0.5	0.1
Failure mode at ultimate state	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode3	Mode3	Mode3	Mode3	Mode4	Mode4

Table 7 Bearing strength and failure modes of inner and out web corroded model

	Corroded ratio (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Critical buckling load (Pcr), (kN)	2,461.0	3,132.0	3,052.0	2,929.0	2,788.0	2,552.0	1,817.0	1,009.0	393.3	75.8	4,157.0
Ultimate bearing strength (Pu), (kN)	2,419.2	2,419.2	2,419.2	2,419.2	2,419.2	2,419.2	2,419.2	2,299.5	2,200.8	2,139.9	2,139.9
Pu/Pcr ratio	1.0	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.3	2.3	5.6	28.2	0.5
Corroded (Pu)/ Un-corroded (Pcr)	1.0	1.3	1.2	1.2	1.1	1.0	0.7	0.4	0.2	0.0	1.7
Corroded (Pu)/ Un-corroded (Pu)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9
Failure mode at ultimate state	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode3	Mode3	Mode3	Mode3	Mode3	Mode2

Table 8 Bearing strength and failure modes of inner web and stiffener corroded model

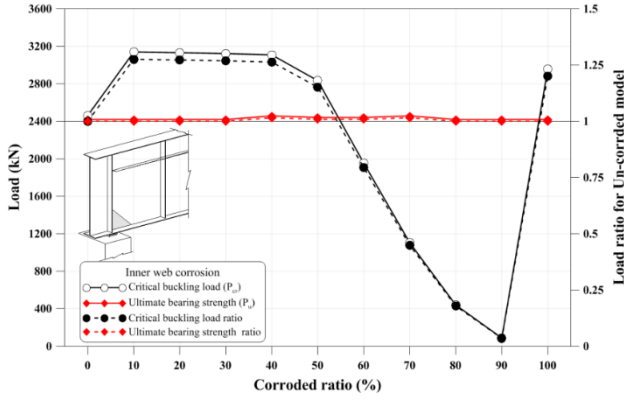
	Corroded ratio (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Critical buckling load (Pcr), (kN)	2,461.0	3,041.0	2,890.0	2,693.0	2,456.0	2,163.0	1,432.0	743.7	263.2	43.6	170.5
Ultimate bearing strength (Pu), (kN)	2,419.2	2,440.2	2,440.2	2,419.2	2,339.4	1,980.1	1,640.1	1,140.1	959.9	800.1	560.1
Pu/Pcr ratio	1.0	1.0	0.8	0.8	0.9	1.0	0.9	1.2	1.5	3.7	18.4
Corroded (Pu)/ Un-corroded (Pcr)	1.0	1.2	1.2	1.1	1.0	0.9	0.6	0.3	0.1	0.0	0.1
Corroded (Pu)/ Un-corroded (Pu)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2
Failure mode at ultimate state	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode3	Mode3	Mode3	Mode3	Mode3	Mode4

Table 9 Bearing strength and failure modes of outer web and stiffener corroded model

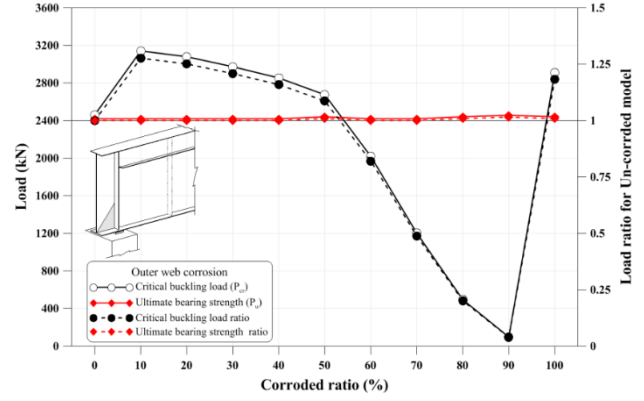
	Corroded ratio (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Critical buckling load (Pcr), (kN)	2,461.0	3,043.0	2,832.0	2,562.0	2,285.0	2,015.0	1,478.0	804.1	295.3	49.2	170.9
Ultimate bearing strength (Pu), (kN)	2,419.2	2,419.2	2,457.0	2,457.0	2,379.3	2,039.9	1,600.0	1,160.0	1,020.0	800.1	220.1
Pu/Pcr ratio	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.4	3.5	16.3	1.3
Corroded (Pu)/ Un-corroded (Pcr)	1.0	1.2	1.2	1.0	0.9	0.8	0.6	0.3	0.1	0.0	0.1
Corroded (Pu)/ Un-corroded (Pu)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.1
Failure mode at ultimate state	Mode1	Mode1	Mode1	Mode1	Mode3	Mode3	Mode3	Mode3	Mode3	Mode3	Mode4

Table 10 Bearing strength and failure modes of inner, outer web and stiffener corroded

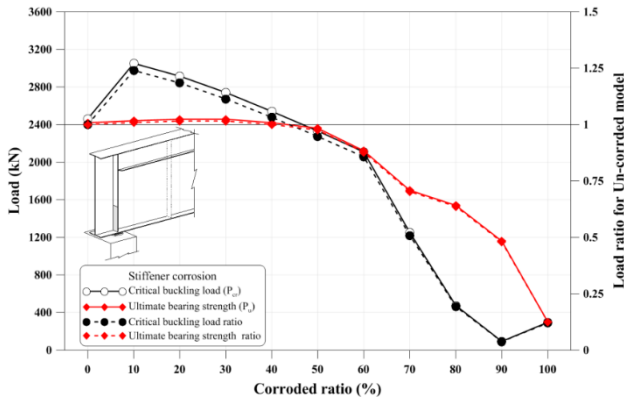
	Corroded ratio (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Critical buckling load (Pcr), (kN)	2,461.0	3,032.0	2,798.0	2,498.0	2,177.0	1,816.0	1,211.0	602.5	195.1	26.1	149.5
Ultimate bearing strength (Pu), (kN)	2,419.2	2,440.2	2,440.2	2,419.2	2,121.0	1,660.1	1,180.0	680.0	320.0	260.0	160.0
Pu/Pcr ratio	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1	1.6	10.0	1.1
Corroded (Pu)/ Un-corroded (Pcr)	1.0	1.2	1.1	1.0	0.9	0.7	0.5	0.2	0.1	0.0	0.1
Corroded (Pu)/ Un-corroded (Pu)	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1
Failure mode at ultimate state	Mode1	Mode1	Mode1	Mode3	Mode3	Mode3	Mode3	Mode3	Mode3	Mode5	Mode4



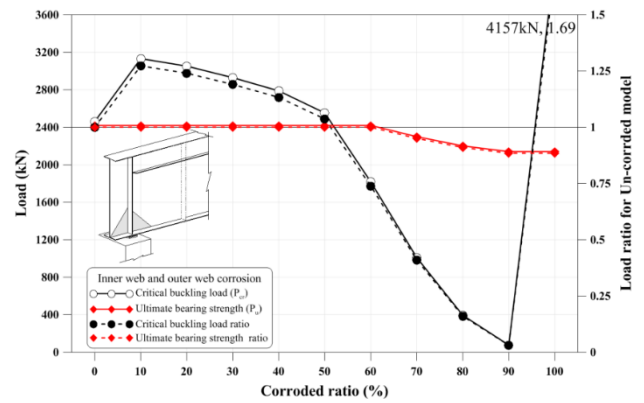
(a) Inner web corrosion (Case2)



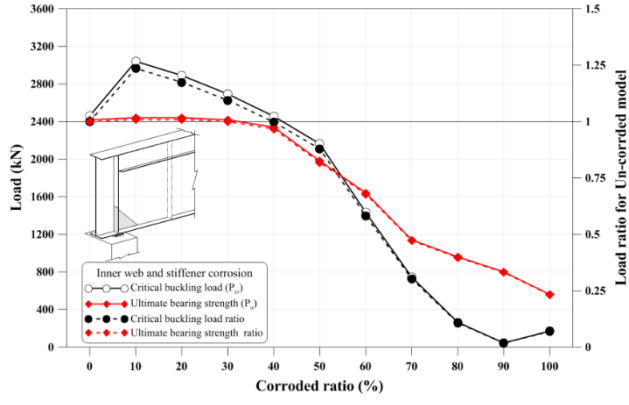
(b) Outer web corrosion (Case3)



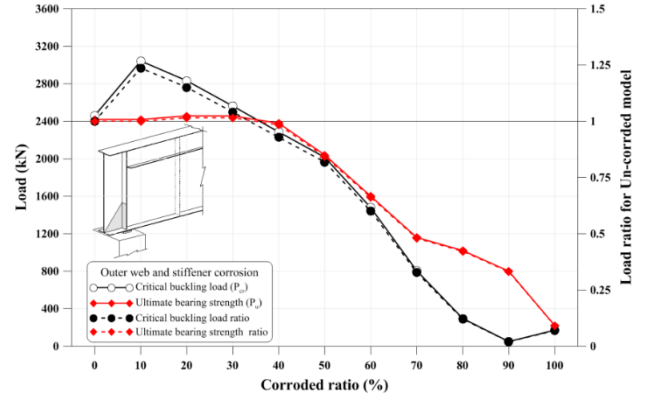
(c) Stiffener corrosion (Case4)



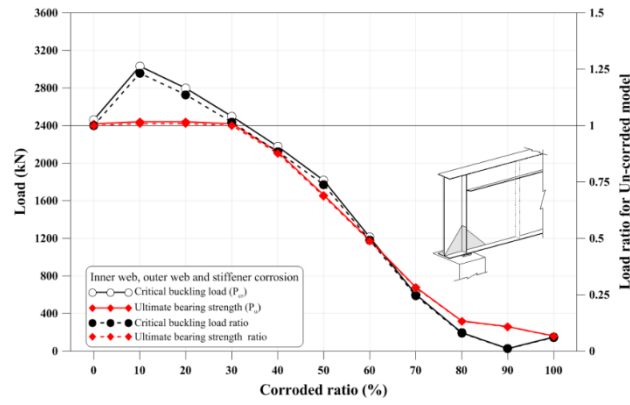
(d) Inner web and outer web corrosion (Case5)



(e) Inner web and stiffener corrosion (Case6)



(f) Outer web and stiffener corrosion (Case7)



(g) Inner web, outer web and stiffener corrosion (Case8)

Fig. 16 Critical buckling load and ultimate strength of plate girder depending on corrosion ratio.

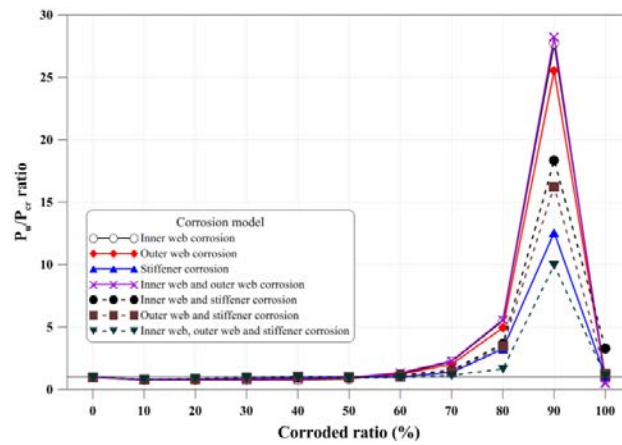


Fig. 17 Ultimate strength/critical buckling load ratio depending on corrosion ratio

3.3.3 腐食損傷を有する鋼 I 桁橋の支承の残存支持力評価

鋼 I 桁橋の有効ウェブ幅を Fig.18 に示す．短柱とみなされる支承直上の垂直補剛材の設計を行う．臨界座屈荷重は式(1)の短柱に関するオイラーの公式を用いて導出し，その終局強さは AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) の設計指針より式(2)を用いて算出した．式中の I は断面二次モーメント， E はヤング率， l_e は有効座屈長， r は回転半径， λ は細長比を表す．解析により求められた終局強さを用いて，局所的な腐食を有する鋼 I 桁橋の支承の残存支持力を評価するために，有効ウェブ幅と AASHTO の設計基準によって計算された値に基づく短柱のモデルを用いた解析を行い，鋼 I 桁の終局強さと臨界座屈荷重を比較した．

鋼 I 桁橋の短柱の解析モデルは，有効ウェブ幅を用いて作成し，臨界座屈荷重と終局強さは非線形有限要素解析により評価した．有効ウェブ幅を有する短柱の終局強さは腐食率を考慮している式

(2b)を用いて計算した．AASHTO の結果と局所的な腐食損傷を有する鋼 I 桁橋の解析結果を比較した結果を Fig. 20 に示す．

解析によって得られた臨界座屈荷重は 1749.0 kN，終局強さは 2,459.1 kN となった．その破壊モードは圧縮応力によって規定される．有効ウェブ幅を有する鋼 I 桁橋において腐食損傷のない場合の終局強さは式(2b)より 4,646.2kN と計算され，腐食率の増加に伴いその終局強さは徐々に減少する．短柱モデルにおける終局強さの解析結果は，鋼 I 桁橋の解析結果に酷似している．AASHTO により計算された終局強さは，40%の腐食率を有する鋼 I 桁橋の有限要素解析の結果に比してはるかに大きな値をとっており，終局強さの変化は補剛材の腐食率が 40%以上の場合に類似している．

この鋼 I 桁橋のモデルにおいて，支承部の反力は自重と設計荷重に基づき計算される．解析結果より，自重による反力は 345 kN，設計荷重による反力はトラックの荷重である 363 kN に対して 285 kN であると評価される．Fig.-21 に示すように，鋼

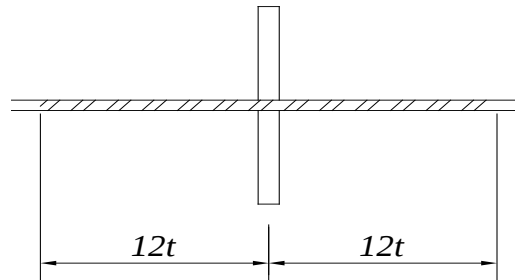


Fig. 18 Effective web width of plate girder for bearing resistance of web and stiffener

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_e^2} \quad (1)$$

$$P_n = \frac{0.88 F_y A_s}{\lambda} : \lambda \geq 2.25 \frac{\pi^2 EI}{l_e^2} \quad (2a)$$

$$P_n = 0.66 \lambda F_y A_s : \lambda \leq 2.25 \quad (2b)$$

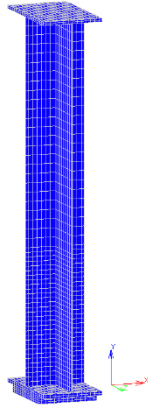


Fig. 19 FE analysis model with effective web width

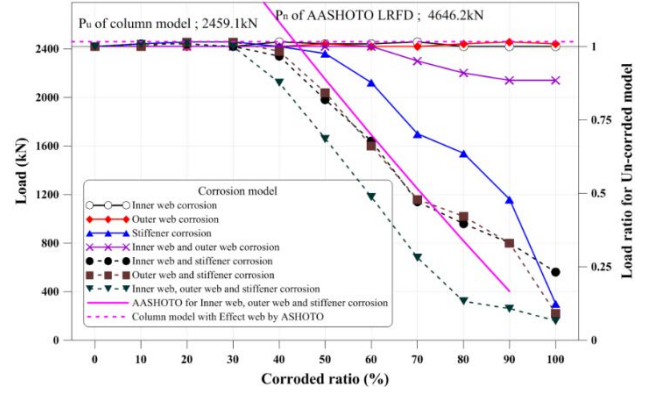
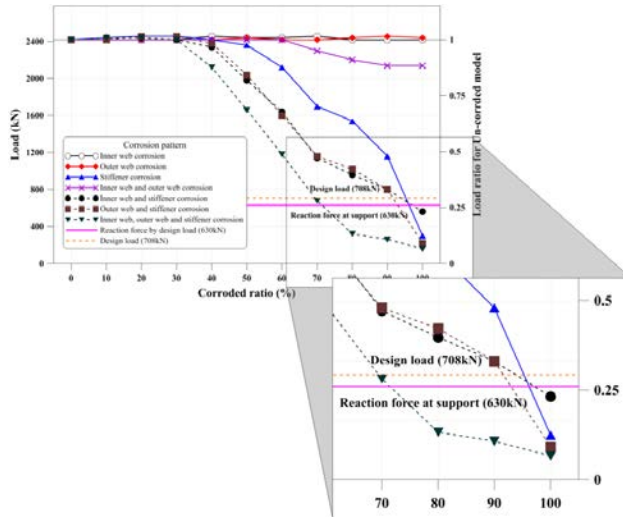
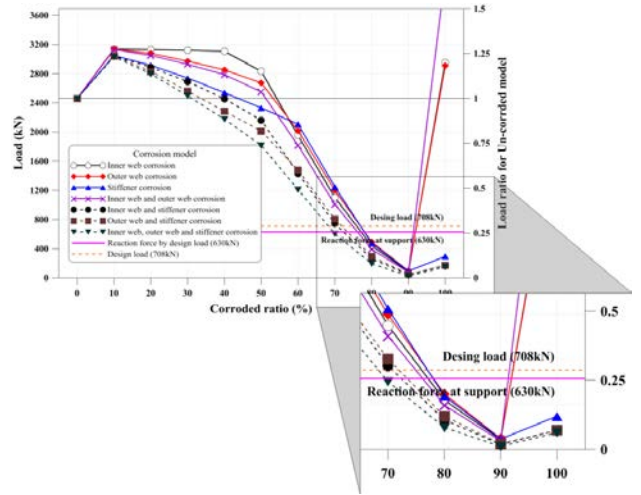


Fig. 20 Bearing capacity comparison of plate girder depending on corrosion ratio



(a) Critical buckling loads comparison with reaction force



(b) Ultimate strengths comparison with reaction force

Fig. 21 Bearing capacity comparison of plate girder with reaction force

I 桁橋の反力と比較した場合、設計反力は腐食率が 70% の場合の臨界座屈荷重と終局強さと同等かそれ以上の値をとる。鋼 I 桁橋のウェブと補剛材に腐食を有する場合の局所的な座屈は、70% 以上の腐食率を有する場合に発生することが確認できる。しかし、終局強さはケース 8 の腐食率が 100% の場合を除いて反力を超えないことも同時に確認できる。それゆえ、支承部に腐食損傷を有する鋼 I 桁橋の支承の残存支持力は主に垂直補剛材の腐食の影響を受け、ウェブの腐食の影響によらないと考えられる。よって、支承部に腐食損傷を有する

鋼 I 桁橋の補修を行う場合は、垂直補剛材の腐食率を調査することが重要であると考えられる。

4.まとめ

本研究では、局所的な腐食損傷や、部分的な鋼 I 桁橋に関するモデルにおける支承の残存支持力について検討した。本検討では鋼 I 桁橋全体を考慮していないために、支承の残存支持力や破壊形態に関する評価は十分でないと考えられる。

今後は、より正確かつ合理的な結果を得るために橋梁全体や局部腐食を有する鋼 I 桁橋の挙動を考慮した検討を行う必要がある。