

平成21年 4月26日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760316

研究課題名（和文）体積欠損過程で鋼部材にもたらされる力学的な影響に関する研究

研究課題名（英文）A study on the mechanical effect brought to steel members under the corrosion process

研究代表者

三好 崇夫 (MIYOSHI TAKAO)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40379136

研究成果の概要：鋼板を溶接して製作した橋梁などの社会基盤構造物は、その製作過程で残留応力と呼ばれる力が内在する。一般に残留応力は構造物の強度を低下させることが知られている。また、鋼は腐食によって溶けて体積が減少するため、残留応力が変化し、さらには構造物の強度も変化すると考えられる。そこで、本研究では、鋼を溶接して製作した構造物に腐食が生ずると残留応力がどのように変化するか、またそれによって構造物の強度がどのように変化するかを実験とコンピュータシミュレーションによって明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	0	2,400,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	150,000	3,050,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：非線形有限要素解析法，鋼部材，腐食，体積欠損，残留応力の再分配，初期不整，残存強度

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、適切な維持管理が施されてこなかった鋼橋での腐食損傷の発生が問題視されている。腐食損傷は、鋼部材の体積欠損による剛性低下はもとより、鋼橋全体の強度を低下させるため、近年、腐食損傷を有する鋼部材の残存強度に関する研究が精力的に行われている。しかし、腐食損傷に伴う体積欠損過程で鋼部材にもたらされる、初期応力、残留応力の変化や付加的な変形の発生、それらが残存強度に及ぼす影響について調査した研究は少ない。

(2) 腐食損傷を有する鋼橋の残存強度の予測は、腐食損傷を有する鋼部材レベルでの残存強度を精度良く予測できる、有限要素解析法などの解析的手法に基づく必要がある。これまでにも有限要素解析法によって、腐食損傷を有する鋼部材の残存強度を予測した研究が報告されているが、実験から得た残存強度を精度良く予測した研究は少ない。

(3) 鋼部材の腐食に伴う体積欠損の進行過程では、欠損部分に作用していた残留応力や死荷重応力などの初期応力は、解放されるとともに残存部に再分配され、残存部での新たな

な塑性化や、それによる非可逆的な変形の発生が考えられる。残存強度を有限要素解析で精度良く予測した研究が少ない理由の一つとして、体積欠損過程で鋼部材にもたらされるそれらの力学的影響が考慮されていないことが考えられる。

2. 研究の目的

(1) 鋼部材の腐食に伴う体積欠損の進行過程を模擬した実験によって、その過程で鋼部材にもたらされる残留応力の変化や、それに伴って発生する変形などの力学的な影響を明確にする。

(2) 腐食損傷を有する鋼部材に見立てた供試体の残存強度を圧縮試験によって把握し、体積欠損による圧縮挙動や残存強度の変化を明確にする。

(3) 上記(1)の実験結果に基づいて、体積欠損過程で鋼部材にもたらされる力学的な影響が再現できる有限要素解析手法の妥当性を検証する。

(4) 上記(2)の実験結果に基づいて、本研究で考案した有限要素解析手法による残存強度予測の妥当性について検証する。

3. 研究の方法

(1) 実験方法

① 供試体

供試体は、図-1に示すような、溶接製作の鋼H形断面部材を用い、その両端には圧縮载荷のため、载荷板を設けた。供試体の寸法

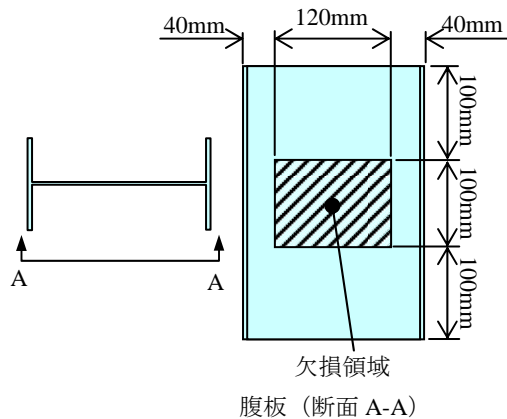


図-1 供試体の形状と体積欠損導入領域

表-1 供試体の寸法諸元

高さ h (mm)	200
幅 B (mm)	100
腹板厚 t_w (mm)	3.2
フランジ厚 t_f (mm)	4.5
フランジ純間隔 h_w (mm)	191
フランジの突出幅 b_f (mm)	48.4
断面柱の長さ L (mm)	300
腹板の降伏応力 σ_w (N/mm ²)	314
フランジの降伏応力 σ_f (N/mm ²)	306

諸元は、表-1に記す通りである。

② 実験ケース

本研究では、鋼部材に腐食に伴う体積欠損が生じた場合の残留応力の再分配挙動や、それに伴う変形挙動、体積欠損後の残存強度を把握するため、表-2に示すような4つの実験ケースを設定した。このうち、体積欠損前の健全な鋼部材を模擬した Type-ARN と、腐食後の鋼部材を模擬した Type-AR0 の残留応力や面外変位をそれぞれ比較することにより、体積欠損過程でもたらされる力学的な影響を把握した。また、体積欠損前の健全な鋼部材を模擬した Type-AN と腐食後の鋼部材を模擬した Type-A0 の終局強度を比較することにより、体積欠損が残留強度や圧縮挙動に及ぼす影響を把握した。

③ 体積欠損の導入方法

実験ケース Type-AR0 と Type-A0 の体積欠損は、図-1に示すように、腹板中央部の片面から機械切削によって、板厚が初期板厚の50%に減少するまで導入した。切削時の板厚管理は、超音波厚さ計を用いて、体積欠損導入領域内において20mm間隔で計測した。

④ 圧縮試験

実験ケース Type-AN と Type-A0 の圧縮試験では、大学所有のアムスラー型万能試験機を使用して、中心圧縮の平押しにより圧縮载荷した。载荷に際しては、極力平押し载荷とな

表-2 実験ケース

実験ケース名	体積欠損	試験項目
Type-AN	なし	耐荷力試験
Type-A0	あり	耐荷力試験
Type-ARN	なし	残留応力 面外変形
Type-AR0	あり	残留応力 面外変形

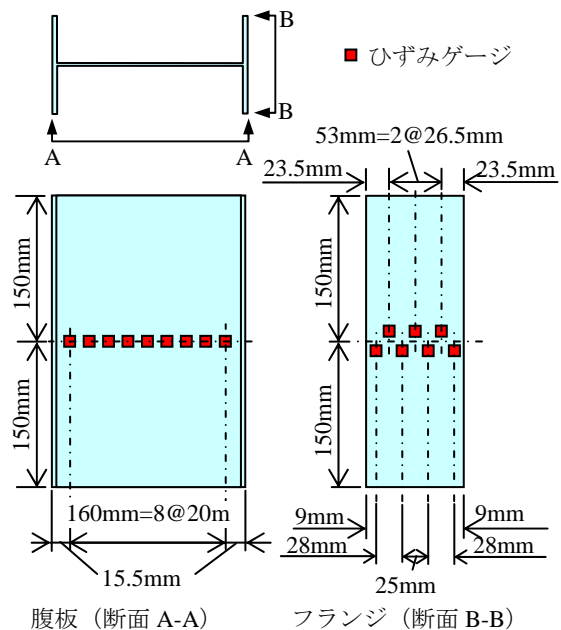


図-2 Type-AR0 の残留応力計測箇所

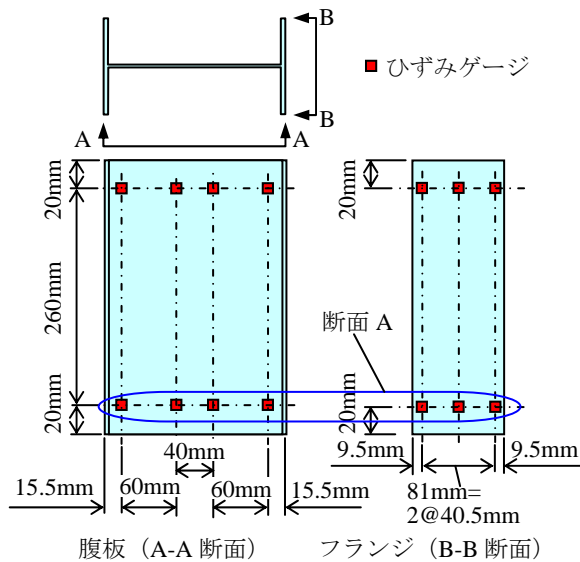


図-3 Type-AR0 の残留応力計測箇所

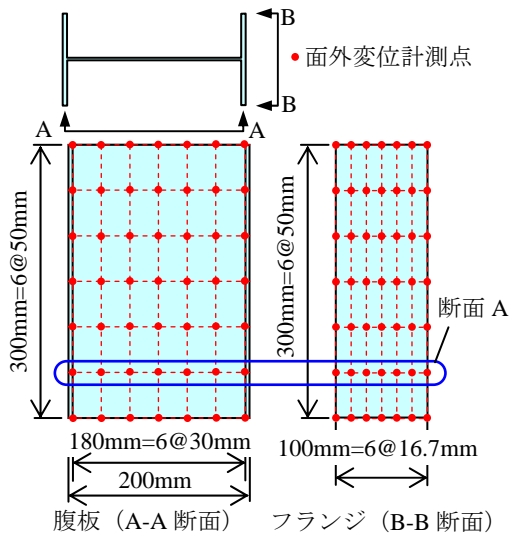


図-4 面外変位の計測箇所

るように、供試体の4隅に貼付したひずみゲージの軸方向ひずみの差が5%以内に入るよう調整した。

⑤ 計測項目と計測方法

体積欠損過程でもたらされる残留応力の変化は、Type-ARNでは、図-2に示す箇所にひずみゲージを貼付して、切断法によって計測し、Type-AR0では、図-3に示す箇所に、体積欠損導入前にひずみゲージを貼付してゼロ調整し、体積欠損導入後に切断法によって計測した。体積欠損過程でもたらされる変形として腹板とフランジの面外変位に着目し、全ての実験ケースでは、図-4に示す点で変位計を用いて初期面外変位を計測し、さらに、Type-AR0、Type-A0では体積欠損導入後の面外変位も計測した。

圧縮試験における圧縮力は試験機内蔵のロードセル、変形は変位計を用いて、図-5に示した点で面外変位と軸方向変位を計測した。

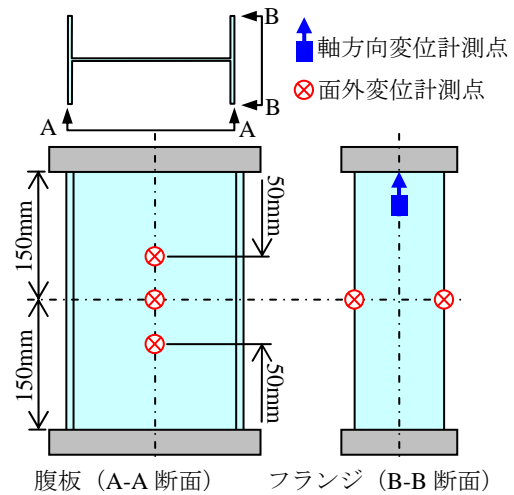


図-5 圧縮载荷試験時の変位の計測点

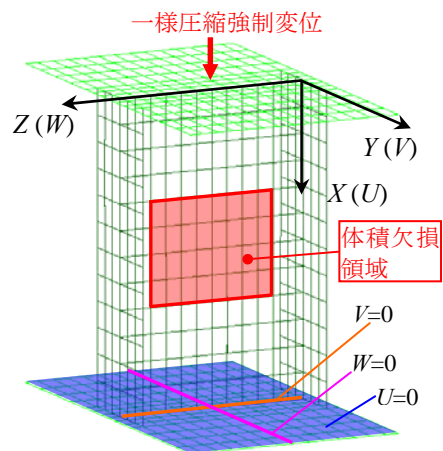


図-6 有限要素解析モデル

(2) 有限要素解析

① 開発した解析手法の概要

本研究では、体積欠損過程で鋼部材にもたらされる力学的挙動を追跡するため、8節点アイソパラメトリックシェル要素に対して、腐食に伴う体積欠損を要素の板厚減少で表現し、欠損部に内在していた初期応力や残留応力を解放力として負荷する解析手法を開発した。

② 有限要素解析モデル

開発した解析手法の妥当性を実験結果に基づいて検証するための解析モデルは、図-6に示すように、載荷板を含めた供試体全体をモデル化した。また、解析モデルには、初期不整として、実験ケースType-ARNで計測した初期面外変位と残留応力を導入した。さらに、応力-ひずみ関係は、別途実施した、試験体の材料試験結果に基づいて多直線近似した。

③ 体積欠損の導入方法と载荷方法

解析における体積欠損の導入は、極力実験との整合性を図るため、図-6に示す腹板の体積欠損領域に対して片面から初期板厚の

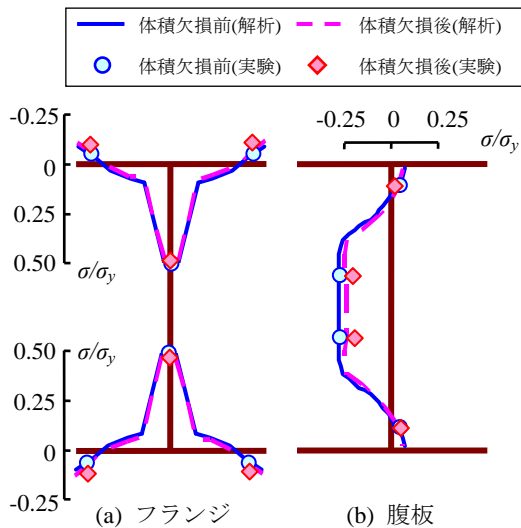


図-7 残留応力の再分配挙動

半分になるまで一様にシェル要素の板厚を減少させる過程を設けて考慮した. さらに, 圧縮試験を追跡する解析では, 図-6 に示すように, 上側の載荷板に軸方向に一様な圧縮強制変位を導入した.

4. 研究成果

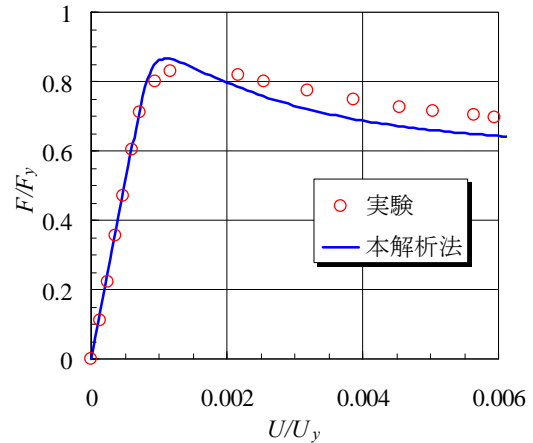
(1) 残留応力の再分配挙動

① 実験結果

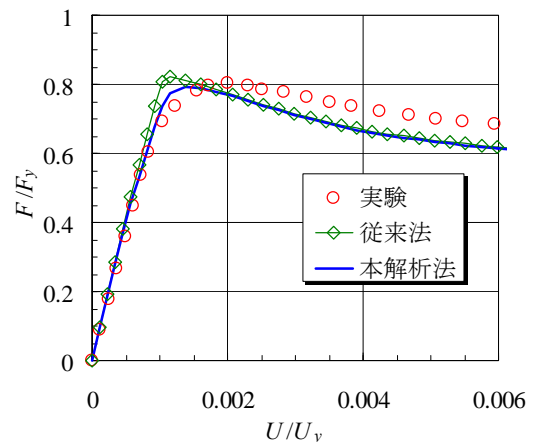
図-3 に示す計測箇所のうち, 断面 A における体積欠損前後の軸方向残留応力の計測結果をフランジについて図-7(a)に, 腹板について図-7(b)にマークで示す. なお, 体積欠損前は実験ケース Type-ARN, 体積欠損後は実験ケース Type-AR0 による計測結果である. また, 同図中, σ_y は降伏応力を表す. 図-7(a)より, フランジでは体積欠損によって全体的に圧縮側に残留応力が変化するのに対して, 図-7(b)より, 腹板では全体的に引張側に推移することがわかる. 既往の研究では, 体積欠損過程の残留応力の再分配挙動が実験的に計測されたものは少なく, 貴重なデータが得られたと考える.

② 解析結果

開発した解析法を用いて得られた体積欠損前後の残留応力の分布状況を実験結果と比較してそれぞれ実線と鎖線とで図-7 に示す. 図-7 より, 開発した解析法によって, フランジ, 腹板とも残留応力の再分配挙動を再現できることがわかる. 現在, 腐食損傷を有する鋼構造物の残存強度予測に用いられている有限要素解析法の殆どは, このような体積欠損過程でもたらされる力学的挙動が再現できないため, 本研究で開発した解析手法は, 腐食損傷を有する鋼構造物の残存強度予測の高度化を推進するための有効な手法であると考えられる.



(a) 体積欠損前



(b) 体積欠損後

図-8 圧縮力と軸方向変位の関係

(2) 圧縮挙動と残存強度

① 実験結果

体積欠損前を模擬した Type-AN と, 体積欠損後を模擬した Type-A0 に対する圧縮試験から得られた圧縮力と軸方向変位の関係をそれぞれ図-8(a), (b)にマークで示す. 同図中, 縦軸は圧縮力 F を体積欠損前の断面に関する降伏軸力 F_y で無次元化し, 横軸は軸方向変位 U を体積欠損前の試験体の降伏変位 U_y で無次元化して表示している. これより, 体積欠損によって, 剛性の低下はもとより, 残存強度 (F/F_y の最大値) も低下することがわかる. 既往の研究では, 体積欠損過程での力学的な影響とともに, その後の載荷時挙動や残存強度を調べた実験は少ないため, これらの実験結果は貴重であると考えられる.

② 解析結果

実験ケース Type-AN と Type-A0 に対する開発した解析手法による解析結果 (本解析結果) をそれぞれ図-8(a), (b)に実験結果と比較して示す. なお, 図-8(b)には, 体積欠損過程での残留応力の再分配や変形挙動を無視する従来の有限要素解析法 (従来法) によ

る解析結果も併せて示す。

図-8(a)より、体積欠損前の解析結果を実験結果と比較すると、終局点近傍からの挙動に差異がみられるものの、緩やかに剛性が低下して終局点に到達するという挙動は定性的には実験結果と一致している。

次に、図-8(b)より、本解析結果は、定性的には、緩やかに剛性が低下して終局点に到達するという実験結果と一致している。また、従来法による解析結果は、剛性を高く評価するとともに、殆ど剛性低下を伴わずに終局点に到達しており、本解析法や実験で得られた挙動とは異なっている。さらに、本解析法と従来法による残存強度を実験結果と比べると、本解析法の方が実験結果との差は小さかった。

したがって、開発した解析法によれば、体積欠損後の圧縮挙動や残存強度を妥当に予測できるのに対して、従来法によれば、その圧縮挙動や残存強度が必ずしも適切に評価できないことが示された。なお、体積欠損導入前後の圧縮挙動に関して、本解析法による解析結果と実験結果に差異が生じた原因として、試験体の応力-ひずみ関係にばらつきがあったため、解析に導入した構成式が試験体の応力-ひずみ関係を必ずしも厳密に表現できるものでなかったことが考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 玉川新悟, 三好崇夫, 奈良 敬, 鋼板腐食に伴う応力再配分を考慮したシェル要素による解析法の開発と実用問題への適用, 応用力学論文集, 11 巻, pp. 979-989, 2008, 査読有
- ② 玉川新悟, 三好崇夫, 奈良 敬, シェル要素を用いた鋼板腐食に伴う体積欠損過程の有限要素解析法について, 応用力学論文集, 10 巻, pp.955-962, 2007, 査読有

[学会発表] (計3件)

- ① Shingo Tamagawa, Takao Miyoshi and Satoshi Nara, A Finite Element Analysis for Steel Plated Structures in the Process of Corrosion, The 7th. German-Japanese Bridge Symposium, Osaka, 2007, July 30 August 1, Osaka City University, Osaka, Japan
- ② 玉川新悟, 三好崇夫, 奈良 敬, 8 節点シェル要素を用いた腐食に伴う体積欠損過程の有限要素解析法について, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 2007 年 9

- 月 12 日, 広島大学東広島キャンパス
- ③ 立石優一, 玉川新悟, 三好崇夫, 奈良 敬, 体積欠損過程で生ずる鋼H形断面柱の応力再分配と変形, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008 年 9 月 12 日, 東北大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三好 崇夫(MIYOSHI TAKAO)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 40379136

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者