

腐食損傷を受けたリベット継手の力学的挙動に関する検討

Study on mechanical behavior of single-riveted joint damaged by corrosion

橋本国太郎*, 山口隆司**, 三ツ木幸子***, 杉浦邦征****

Kunitaro Hashimoto, Takashi Yamaguchi, Yukiko Mitsugi, Kunitomo Sugiura

*博士(工学),京都大学大学院助教,工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

**博士(工学),大阪市立大学大学院教授,工学研究科都市系専攻(〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

***工博,新構造技術株式会社(〒136-0071 東京都江東区亀戸 1-42-20)

****Ph.D,京都大学大学院教授,工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

In this study, in order to clarify the mechanical behavior, and the relationship between corrosion and residual strength of single-riveted joint damaged by corrosion, experimental and analytical studies are carried out. In the experiment, are used the specimens, which cut from the demolished steel bridge members. Two types of the specimens, light and the heavy corroded joints, are prepared and tensile tests are executed. In FE analysis, corroded condition of rivet head is varied and parametric analysis is carried out. From the result, it is found that there is the influence to strength when a rivet head is corroded heavy, in case of the single riveted joint.

Key Words: riveted joints, corrosion, residual strength

キーワード: リベット接合継手, 腐食, 残存強度

1. はじめに

現在, 土木構造物の維持管理に関する多くの問題がとりあげられており, 鋼橋に関しては, 腐食劣化の問題¹⁾や疲労き裂による損傷²⁾の問題が大きくクローズアップされている. 疲労き裂に関しては, 鋼橋の多くの部位で見つかっており, その発生メカニズムから補修対策までを検討した様々な研究が多くなされている³⁾. また, 腐食に関しても, 腐食損傷量と部材の残存強度との関係を検討した研究が多くなされている⁴⁾.

腐食問題が取り上げられるような古い橋梁では, リベット接合が使用されているものが多く, さらに, そのリ

ベットによって組み立てられた組立部材を使用しているものが多い. そのような組立部材の場合, リベットの腐食が桁の耐荷力に与える影響は少なからずあると言える. また, 図-1 に示すように, リベット継手には, 大きく分けて一面せん断継手と二面せん断継手がある. 二面せん断継手の場合, リベットヘッドがすべて無くなるような重度の腐食損傷を受けても継手強度にほとんど影響しないと木村ら⁵⁾の実験的研究によって結論付けられている. しかし, 実験の制約から圧縮载荷のみであること, さらに, リベット継手の引張・圧縮強度比に差はないという結論が出されているが, この強度比は, 健全な状態のみでの検討であり, 腐食損傷を受けた場合にお

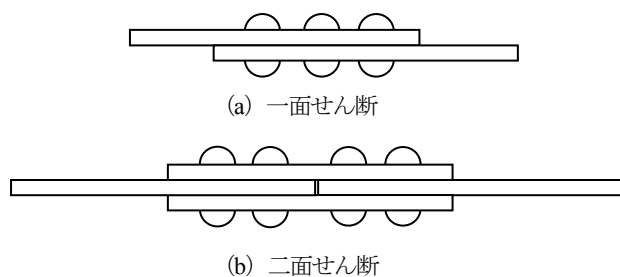


図-1 リベット継手の例



図-2 撤去された鋼ランガー橋（撤去前）

ける、載荷方向の影響に関する議論はなされていない。一方、一面せん断継手の場合、軸心のずれによる付加的な曲げモーメントが作用し、重度な腐食損傷を受けた継手の力学的挙動を検討した事例は今のところほとんどない。

そこで、本研究では、腐食損傷を受けたリベット継手の残存強度およびその力学的挙動を実験的および解析的に検討することを目的とし、損傷度、損傷パターン、載荷方向、継手面数の違い（一面せん断継手および二面せん断継手）および継手の崩壊モード⁶⁾が異なる場合（具体的には板厚を変化させる）について検討する。

なお、本研究の実験で使用したリベット継手供試体は、リベットを有する新たな継手供試体を製作することが困難であったため、実際の橋梁から切り出したものを使用した。実際の橋梁は図-2 に示す福島県山間部で 55 年間供用され、2008 年に撤去された鋼ランガー橋である。撤去理由は、道路幅拡幅のための更新であり、目立った腐食損傷や疲労損傷はほとんどない健全な橋梁であった。

2. 載荷実験による腐食損傷の影響に関する検討

2.1 実験供試体

図-3 に本研究で用いた実験供試体の写真を示す。実験供試体は下横構部材から切り出した、1 本のリベットと 2 枚の板から構成される最も単純な構造のリベット継手

である。表-1 に実験供試体の種類を示す。表-1 に示すように、腐食損傷度の影響を検討するため、①軽度に腐食した実験供試体（切り出したそのままの状態）≡健全な状態、②リベットヘッドに人工的に損傷を与え、重度の腐食損傷を模擬した実験供試体で、腐食損傷度を 2 パターン（リベットヘッド（高さ h ）をグラインダーで半分削ったもの（0.5 h ），および 1/8 となるまで削ったもの（0.125 h ））とした合計 3 体の実験供試体を用意した。

2.2 載荷方法および計測項目

載荷は 1,000kN 万能試験機を使用して、単調に引張力を与え行った。なお、図-4 に示すように実験供試体の両端に板を一枚ずつかむことで、載荷中心が接合面の位置となるようにした。

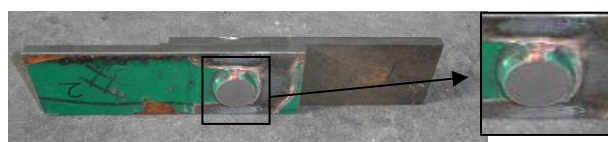
計測項目は、①荷重、②継手全体の変位、③供試体中央部での板と板との相対変位および④部材軸方向のひずみで、供試体中央のこば面およびリベットによって支圧を受ける位置で測定した。相対変位の測定位置、ひずみゲージの貼付位置、および供試体の構造寸法を図-4 に示している。

2.3 材料試験

実験に使用したリベットおよび板の機械的特性を調べるため、材料試験を行った。リベットの材料試験では、図-5 に示すようにリベットから切り出したのち、両端部をねじ加工し、中央部を有効ねじ径より細くした試験片



(a) 切り出したままの供試体



(b) リベットヘッドに腐食損傷を与えた供試体（頭部 1/2 カット）

図-3 実験供試体

表-1 実験供試体の内訳

実験ケース名	頭部の腐食損傷度 α	
	高さ方向	幅方向
B-1-0ex	1	1
B-1-1 0.5 1ex	0.5	1
B-1-1 0.125 1ex	0.125	1

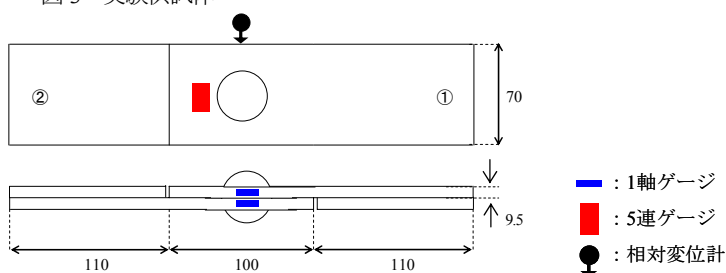


図-4 ひずみおよび変位測定位置（寸法単位：mm）

表-2 材料試験結果のまとめ

	試験体 No.	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)	破断時伸び (%)
板	1	208	0.28	334	477	33.2
	2	200	0.29	335	472	34.9
	3	205	0.29	332	473	30.7
	平均値	204.3	0.29	333.7	474.0	32.9
リベット	1	215	0.27	348	480	52.8
	2	203	0.28	320	477	51.6
	3	210	0.31	385	497	53.6
	平均値	209.3	0.29	351.0	484.7	52.7

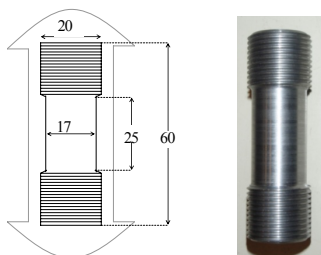


図-5 リベットの材料試験片（寸法単位：mm）



図-6 リベット継手の腐食状態

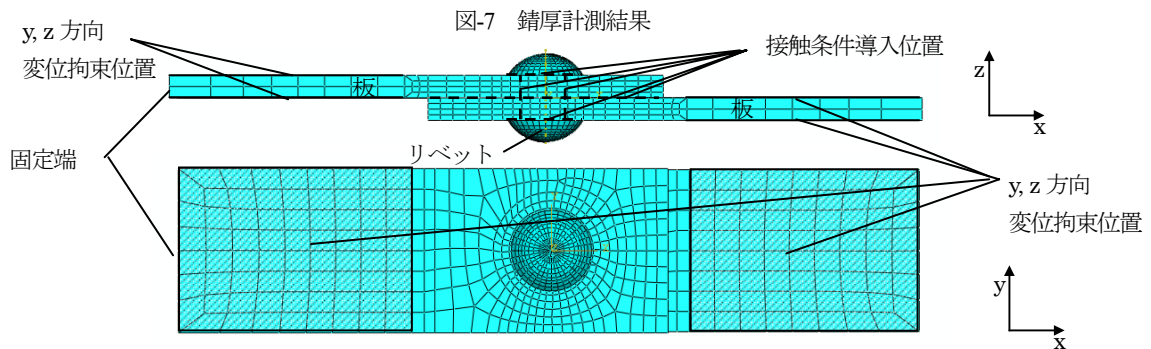
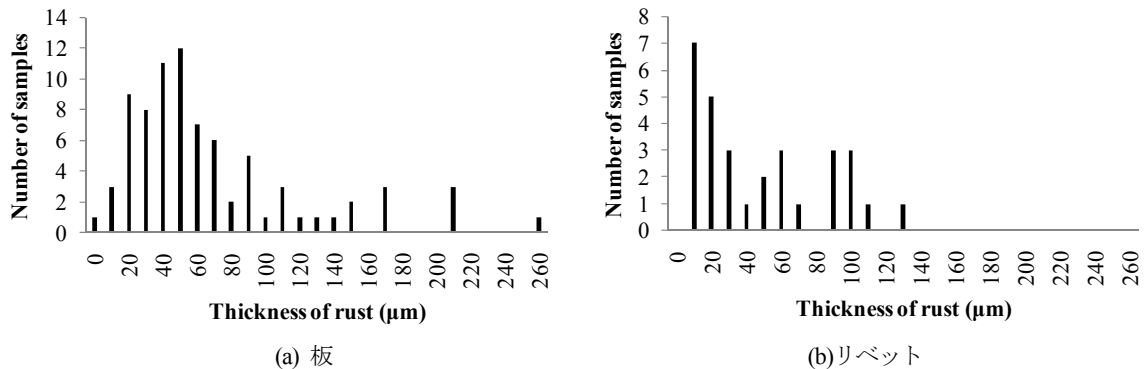


図-8 FEM 解析モデル (リベット健全モデル (B-1-0 モデル))

を使用した。板は5号試験片の形状に切り出した。材料試験結果のまとめを表-2に示す。

表-2 から、リベットはSV400材（製作当時SV41材）⁷⁾、板材はSS400材（製作当時SS41材）の規格を満足していることがわかる。

2.4 腐食状態の計測

載荷実験に先立って、継手の腐食状況を調査した。調査方法としては、塗装されていない板の接合面およびリベットの支圧面の観察と錆厚の測定である。

図-6に板の接合面およびリベットの支圧面の写真、また継手断面で切断した写真を示す。図-6より、塗装が施されていない接合面では錆が生じていることがわかる。また、いくつかの継手でその断面をカットしたが、リベットと板とが密に詰まっているものや、若干の隙間がありリベットが変形しているものがあつた。図-6(c)には隙間のあるものを一例として示している。この隙間やリベットの变形がどの時点（製作時、供用時もしくは撤去時）

で生じたかは不明であるが、リベットについている錆の状態から、撤去時であるとは考えにくく、リベットを打ち込む製作の際に、孔同士がずれており、そのまま打ち込んだため隙間が生じた可能性が考えられる。

図-7にリベットおよび板の錆厚の測定結果を示す。測定には電磁膜厚計（LE-200J：ケツト科学研究所製）を用い、測定位置に関しては、ランダムに選択し測定を行った。図-7より、板の接合面内の錆厚は10～100μm、リベットの支圧面の錆厚は、10～70μmに分布していることがわかる。また、錆厚の平均値は板材では70μm程度、リベットでは50μm程度であり、極端に大きな腐食をしている箇所は見られず、良好な状態であつた。この結果から、人工的に腐食損傷を与えない供試体は、健全な継手として扱った。

3. FEM 解析による腐食損傷の影響に関する検討

3.1 解析モデル

図-8にFEM解析モデルの全体図を示す。FEM解析は汎用有限要素解析コードABAQUS⁸⁾を用いて行った。モデル化にはソリッド要素(C3D8R要素もしくはC3D6R要素)を用いた。

境界条件としては、継手片端を固定とし、また、実験でつかみ具によってつかまれている範囲の引張方向以外の変位(図中のyおよびz方向)を拘束した。

解析で用いた応力-ひずみ曲線は、図-9に示すように実験結果の降伏点および引張強度をもとにトリリニア型を用いた。

モデルは板とリベットを別々にモデル化し、部材同士が接触する部分(板-板間、リベット-板間)は、ABAQUSで使用される、表面ベースの接触によってモデル化している⁸⁾。表面ベースの接触では、初めに、異なる部材において解析中接触すると予想される接触面同士(要素の面)に対し、一方にマスター面、もう一方にスレーブ面を設定する。接触対同士では節点の位置を一致させる必要はなく、指定したマスター面内に対して、スレーブ面内の節点が食い込みんだ量や離間した量などを算出し、それぞれが許容値に収まるように収束計算を行っている。この接触対に対し、接触鉛直方向の接触条件(接触後の分離条件や離散化手法など)および接線

方向の接触条件(摩擦係数や離散化手法など)を導入する。本モデルの接触鉛直方向および接線方向の離散化手法には、ペナルティ法を使用した。また、鋼材のすべり係数は、接合面の状態に大きく影響し、0.2~0.8程度と幅広く分布することが知られており、本解析モデルで設定する摩擦係数は、以下の3.3節で検討することとした。

3.2 解析ケース

解析ケースを表-3に示す。本解析で定めた腐食損傷状

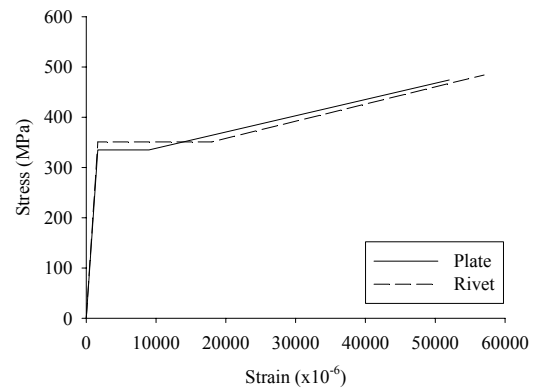


図-9 解析に用いた応力-ひずみ関係

表-3 解析ケースおよび解析結果のまとめ

継手タイプ	腐食損傷面	解析ケース名	頭部の腐食損傷度 α		腐食損傷パターン	載荷パターン	板		リベット		設計降伏強度 (kN)	引張降伏強度 (kN)	引張最大強度 (kN)	圧縮降伏強度 (kN)	圧縮最大強度 (kN)
			高さ方向	幅方向			板厚	板幅	径	長さ					
一面薄板モデル	無	B-1-0	1	1	—	圧縮、引張	9.5	70	24.5	19	117.0	80.2	139.3	81.5	151.8
	片側損傷	B-1-1 0.5 1-1	0.5	1	①	引張						83.3	137.1	—	—
		B-1-1 0.25 1-1	0.25	1		引張						77.7	136.9	—	—
		B-1-1 0.125 1-1	0.125	1		引張						74.7	116.0	—	—
		B-1-1 0.5 0.5-2	0.5	0.5		引張						77.6	139.6	—	—
		B-1-1 0.25 0.25-2	0.25	0.25	②	引張						76.5	136.9	—	—
		B-1-1 0.125 0.125-2	0.125	0.125		引張						75.3	129.1	—	—
		B-1-1 0.5 0.5-3	0.5	0.5		引張						75.6	93.6	—	—
		B-1-1 0.25 0.25-3	0.25	0.25		引張						75.7	129.6	—	—
	両側損傷	B-1-1 0.125 0.125-3	0.125	0.125	③	引張						78.5	129.4	—	—
		B-1-1 0 0-4	0	0		圧縮、引張						49.2	74.0	70.3	133.4
		B-1-2 0.5 0.5-3	0.5	0.5		引張						73.4	88.8	—	—
		B-1-2 0.25 0.25-3	0.25	0.25		引張						71.2	102.2	—	—
		B-1-2 0.125 0.125-3	0.125	0.125	④	引張						70.3	108.2	—	—
		B-1-2 0 0-4	0	0		圧縮、引張						39.6	55.1	51.3	94.2
		S-1-0	1	1		圧縮、引張						105.1	144.7	113.6	158.2
		S-1-1 0.25 0.25-3	0.25	0.25		引張						103.4	135.8	—	—
一面厚板モデル	片側損傷	S-1-1 0 0-4	0	0	④	圧縮、引張	19	70	24.5	38	132.4	99.0	136.7	103.8	143.1
	両側損傷	S-1-2 0.25 0.25-3	0.25	0.25	③	引張						103.2	137.9	—	—
		S-1-2 0 0-4	0	0	④	圧縮、引張						99.9	132.8	109.1	142.7
	無	B-2-0	1	1	—	圧縮、引張						234.1	290.1	225.9	291.2
二面薄板モデル	片側損傷	B-2-1 0.25 0.25-3	0.25	0.25	③	引張	18	70	24.5	36	221.6	232.3	286.6	—	—
	両側損傷	B-2-1 0 0-4	0	0	④	圧縮、引張						215.7	272.0	211.9	272.8
		B-2-2 0.25 0.25-3	0.25	0.25	③	引張						229.2	283.3	—	—
		B-2-2 0 0-4	0	0	④	圧縮、引張						199.6	255.4	198.8	258.4
二面厚板モデル	無	S-2-0	1	1	—	圧縮、引張	36	70	24.5	72	248.2	236.2	297.0	230.8	300.8
	片側損傷	S-2-1 0.25 0.25-3	0.25	0.25	③	引張						229.7	291.8	—	—
		S-2-1 0 0-4	0	0	④	圧縮、引張						222.9	291.7	231.8	293.8
		S-2-2 0.25 0.25-3	0.25	0.25	③	引張						227.2	288.6	—	—
	両側損傷	S-2-2 0 0-4	0	0	④	圧縮、引張						225.5	288.0	234.4	291.3
		S-2-2 0 0-4	0	0	④	圧縮、引張						—	—	—	—

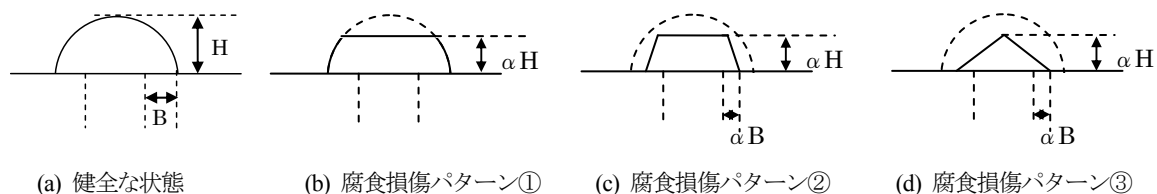
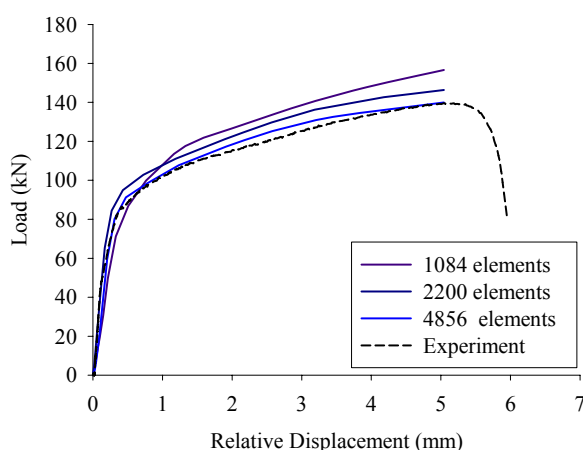
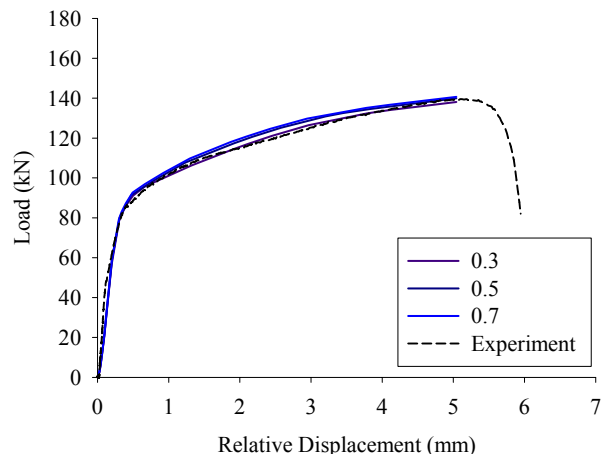


図-10 リベットヘッドの腐食損傷状態の模式図



(a) 要素数の影響



(b) 摩擦係数の影響

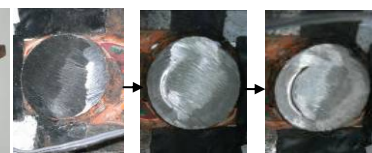
図-11 荷重-相対変位関係 (解析モデルの検証)



(a) B-1-0ex 供試体 (終局状態)



(b) B-1-1_0.125_1ex 供試体



(ii) き裂発生状況

図-12 実験供試体の終局状態の一例

態の模式図を図-10 に示す. 表-3 および図-10 に示すように, 腐食損傷パターンや腐食損傷度の影響を調べるために, リベットヘッドが腐食することを想定し, リベットヘッドの高さ方向のみ (腐食損傷パターン①), および高さ方向と幅方向を変化させたもの 2 種類 (腐食損傷パターン②, ③), さらに, リベットヘッドが全損したパターンを腐食損傷パターン④とし, 合計で 4 種類の腐食損傷状態を対象としたパラメトリック解析を実施した. また, 頭部の片側のみと両側が腐食した場合も想定して, 両側腐食損傷の場合も解析を行った. さらに, リベット継手の被接合材の板厚の違い, 載荷方向が引張の場合と圧縮の場合, また, 二面せん断継手に対しても, 腐食損傷を考慮した解析を行った. 載荷方向に関しては, 特に影響が大きいと考えられる, リベットヘッドが全損した場合のケースおよび比較のため健全なケースにおいて圧縮載荷も行った. なお, 表中に示す設計強度は, 文献 6) を参照し決定した. 以下に本論文で考慮したパラメータを列举し, まとめる.

- ①腐食損傷パターン (最大 4 パラメータ)
- ②腐食損傷度 (最大 5 パラメータ)
- ③腐食損傷面 (リベットヘッドの片側腐食損傷もしくは両側腐食損傷)
- ④リベット継手の被接合材の板厚 (厚い場合と薄い場合)
- ⑤接合面数 (一面継手もしくは二面継手)
- ⑥載荷方向 (圧縮もしくは引張)

表-3 中の解析ケース名は, 最初のアアルファベットが薄

板モデル (B) もしくは, 厚板モデル (S) を表し, 次のハイフンの後の数字が継手面の数を表し, その次の数字が腐食損傷面の数 (片側では 1, 両側では 2) を表す. さらに, 次の数字は腐食損傷度の高さ方向の係数であり, その次の数字が幅方向の係数である. 最後の数字が腐食損傷パターンを示す.

3.3 解析モデルの検証

解析モデルの検証を行うために, 実験結果との比較を行い, その解析モデルの妥当性を判断した.

図-11 に健全な (人工的な損傷を与えていない) 実験供試体および FEM 解析によって得られた荷重-変位曲線を示す. 図-11 では, 摩擦係数や要素数の違いによる解析結果を示している. 図-11 より, 極端に要素数を少なくすると, 実験結果と大きく異なる結果となっていることがわかる. また, 摩擦係数による違いはほとんど見られないこともわかる.

これらの結果から, 解析モデルは要素数 4856 としたものが妥当であると言える. また, 摩擦係数に関しては, ほとんど差異がないことから, 本解析では, 実験で接合面内が錆びていたことを考慮して 0.5 とした. 以降のパラメトリック解析は, このモデルを基本解析モデルとして解析を行った.

4. 結果および考察

4.1 終局状態

実験で得られた終局状態および解析で得られた応力コンター変形図（変形倍率：1 倍）を図-12 および図-13 に示す。応力コンター変形図は、終局時の状態を示しており、応力はミーゼスの相当応力である。なお、本解析での終局状態はリベットのせん断ひずみが 36.7%に達したときと定義している。（健全リベット継手実験の荷重-変位曲線において、最大強度時の変位に達した時のリベットのせん断ひずみ値）

図-12 より、B-1-0ex 供試体では、板の面外曲げ変形が生じており、最終的にはリベットのせん断破壊で終局状態となっていることがわかる。これは、B-1-1_05_1ex 供試体でも同様であった。また、図-13(a)の解析結果より、実験と解析の変形状態を比較すると、ほぼ同様の変形状態となっていることがわかる。ただし、本解析において

は、破断は考慮していない。一方、B-1-1_0125_1ex 供試体では、腐食損傷を与えたリベットヘッドの腐食損傷面でき裂（図-12(b)(ii)）が生じ、ヘッド部がせん断破壊し、そこからリベットが抜け、終局状態に至った。また、板の曲げ変形は、腐食損傷を与えていない側の変形が大きく出る結果となっている。解析では、き裂の発生および進展は考慮していないが、図-13(b)の解析における変形図を見ると、リベットの腐食損傷面が大きく変形していることがわかる。また、両側の板の曲げ変形の大きさの違いも実験と同様の傾向が見られ、健全側の板が大きく変形していることがわかる。

リベットヘッドが全損した場合の変形図を図-13(c)および(d)に示しているが、両ケースともリベットが抜けるような変形をしている。図より、薄板モデルでは、その

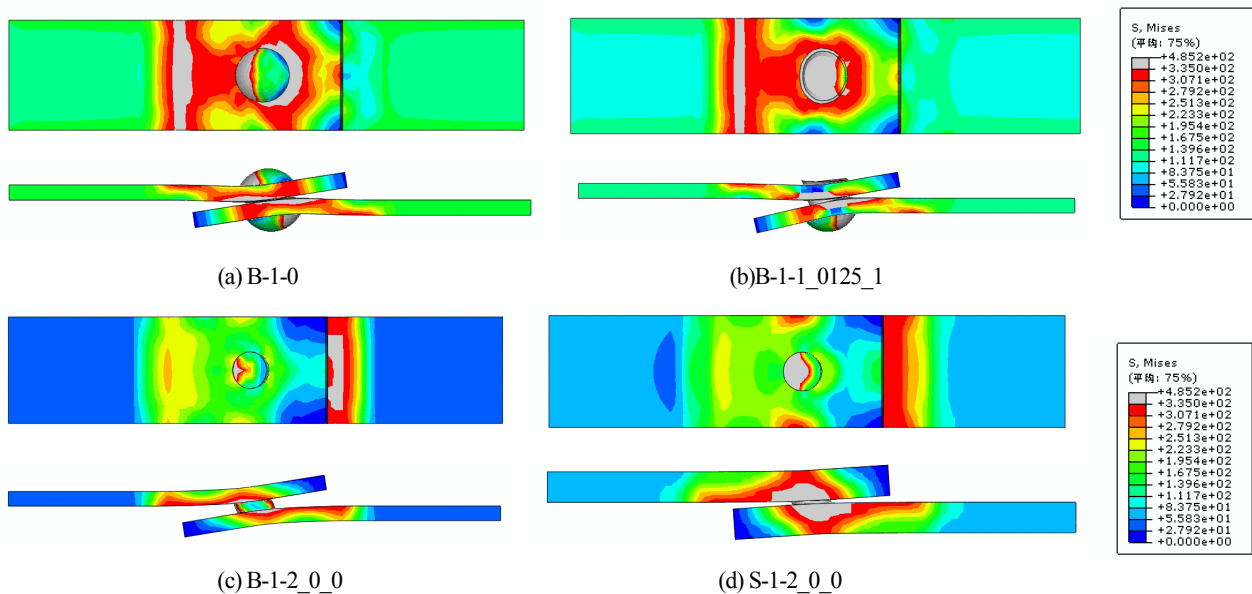


図-13 相当応力コンター変形図の一例（変形倍率 1 倍）

表-4 実験結果のまとめ

継手タイプ	損傷箇所	実験ケース名	頭部の腐食損傷度 α		損傷パターン	载荷パターン	板		リベット	設計降伏強度	引張降伏強度	引張最大強度
			高さ方向	幅方向			板厚	板幅				
一面薄板モデル	無	B-1-0ex	1	1	①	引張	9.5	70	24.5	117.0	92.7	139.6
	片側損傷	B-1-1_0.5_1ex	0.5	1		引張					79.8	140.0
		B-1-1_0.125_1ex	0.125	1		引張					78.4	101.1

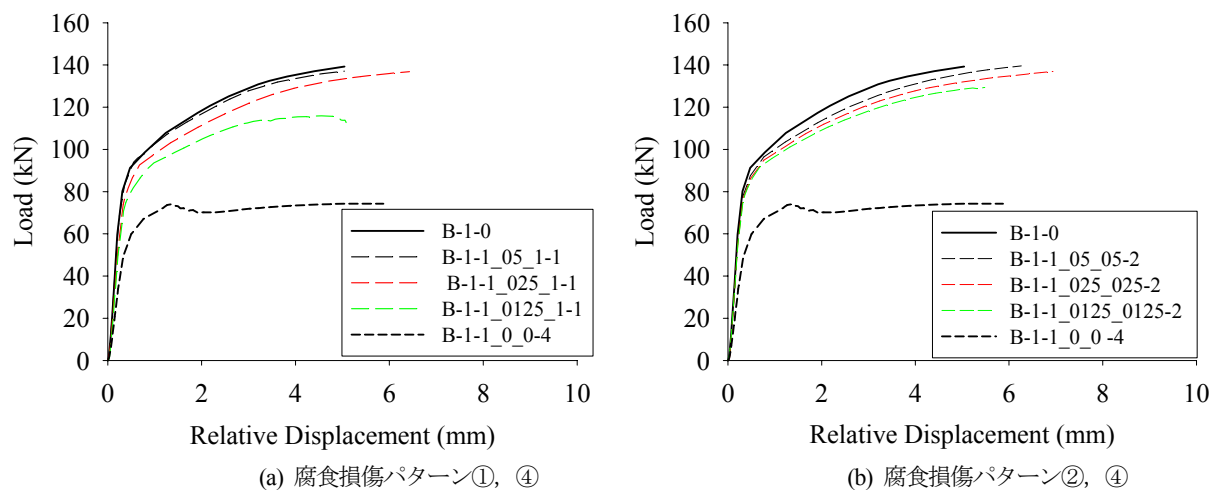


図-14 荷重-相対変位関係（一面・薄板モデル）

リベットの抜け量が顕著であることもわかる。

4.2 荷重-変位関係

パラメトリック解析で得られた荷重-相対変位関係を図-14～図-17に示す。ここで、相対変位は、プレート間の部材軸方向の相対変位である。ただし、実験結果に関しては、測定器の不具合から腐食損傷を与えた供試体では変位を測定できなかったため、荷重-相対変位関係は載せていない。解析結果および実験結果のまとめを、表-3および表-4に示している。表中の解析における降伏強度は、板もしくはリベットのいずれかの要素の積分点でのひずみが降伏ひずみ（板の場合は载荷軸方向ひずみ、リベットの場合はせん断ひずみもしくは载荷軸方向ひずみ）に達したときと定義した。これは、実験における降伏強度の判定として板側面もしくは支圧部に貼付したひずみが降伏ひずみに達した時と定義しており、解析でもそれに合わせたためである。最大強度は、リベットのせん断ひずみが36.7%に達した時（健全リベット継手実験の荷重-変位曲線において、最大強度時の変位に達した時のリベットのひずみ値）もしくはそれ以前にピークが

出ている場合はその値とした。

(1) 腐食損傷パターンおよび腐食損傷度の影響

表-3および表-4より、実験と解析とを比較すると、腐食損傷度と残存強度（腐食損傷を受けた継手の降伏強度もしくは最大強度）の低下に対する傾向は一致しているが、B-1-1_0125_1モデルに関しては、残存強度そのものは、あまり一致していない結果となっている。これは、実験において、腐食損傷を与えた側のリベットヘッドが変形していくと、塑性変形後、延性的なき裂が発生し、リベットが抜け出る挙動をしたが（図-12(b)(ii)参照）、解析では、このようななき裂の発生および進展をモデル化できておらず、このような差が生じたと考えられる。

表-3および図-14(a)～(c)より、腐食損傷パターンによって腐食損傷度と強度低下割合に違いがあることがわかる。腐食損傷パターン①および②では、腐食損傷度が大きいと強度低下割合も大きくなるという傾向が見受けられるが、腐食損傷パターン③では、腐食損傷度が一番小さいB-1-1_05_05-3モデルは、その他の腐食損傷度の大きいモデルに比べて残存強度が小さいことがわかる。このように腐食損傷形状によっては、腐食損傷量が

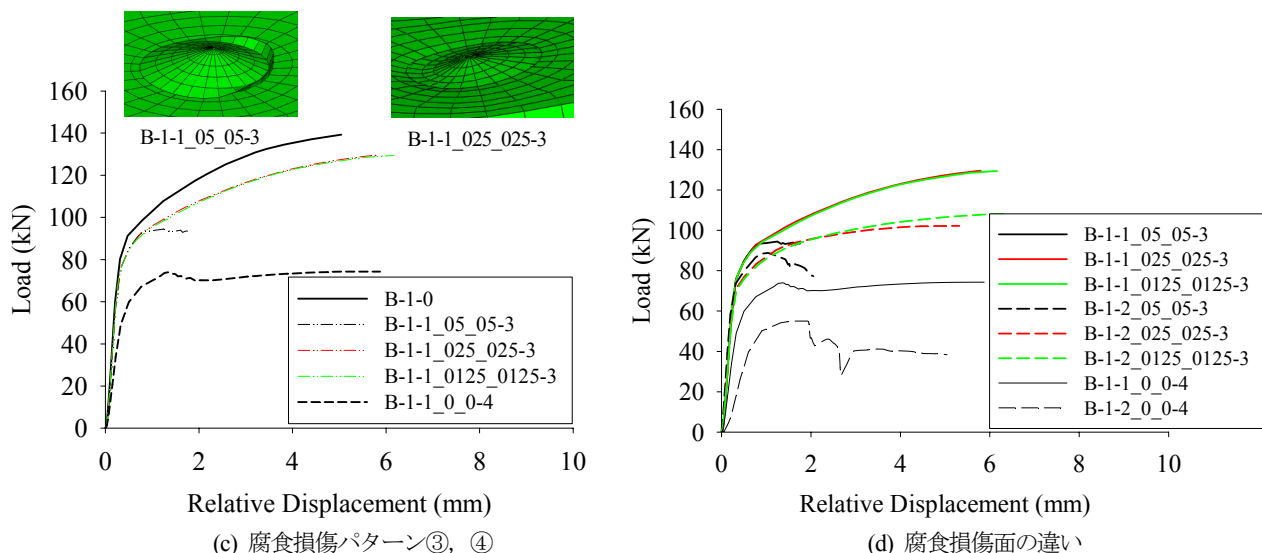


図-14 荷重-相対変位関係（一面・薄板モデル）

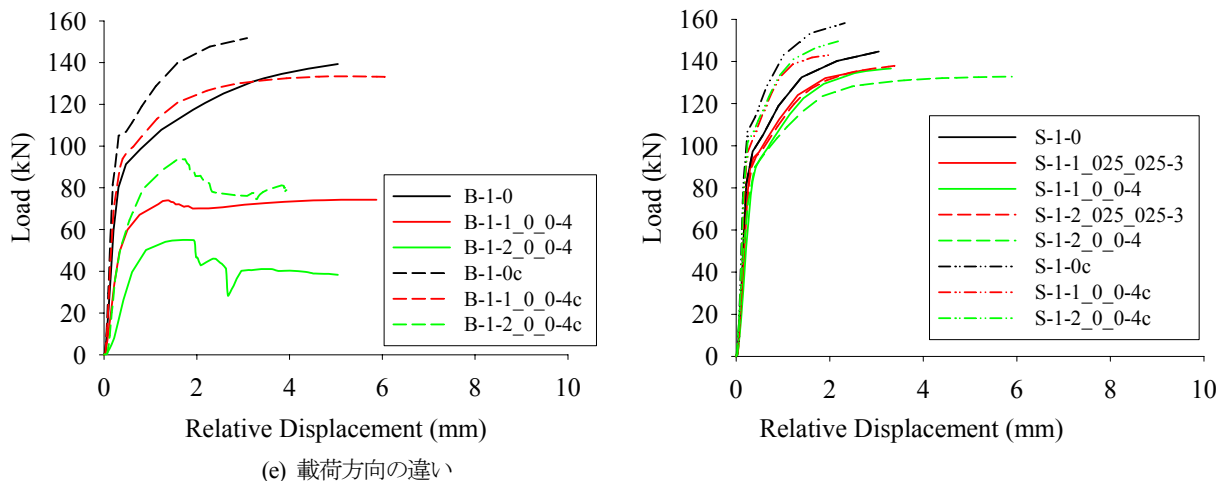


図-14 荷重-相対変位関係（一面・薄板モデル）

図-15 荷重-相対変位関係（一面・厚板モデル）

大きくなれば、残存強度が小さくなるという傾向に当てはまらない場合もでてくることがわかる。これは、B-1-1_05_05-3 と B-1-1_025_025-3（もしくはB-1-1_0125_0125-3）の崩壊モードに違いがあることが原因である。図-14(c)中に示すように、B-1-1_05_05-3では、リベットヘッドの端部が若干長めに残っていることもあり、板の曲げ変形の影響を受け、その端部が大きくめくれ上がり、リベットが抜け出るような挙動をしているのに対し、B-1-1_025_025-3（もしくはB-1-1_0125_0125-3）では、リベットヘッドの端部が板と一体となって曲がり、リベットが抜け出るような挙動はしていない。このリベットの抜け出る挙動が強度に影響したと考えられる。

(2) 腐食損傷面の影響

表-3 および図-14(d)より、腐食損傷面が片側と両側の場合、両側に腐食損傷を与えたケースの方が、強度低下の割合が大きいことがわかる。

(3) 継手の板厚の影響

表-3 および図-15には、一面せん断継手の厚板モデルの結果を示している。厚板モデルでは、リベットヘッドが大きく腐食損傷した場合（例えば、S-1-2_0_0）でも、強度低下の割合は小さい結果となった。また、荷重-変位曲線から、薄板モデルの頭部が大きく腐食損傷したモデル（例えば、B-1-2_0_0）に比べ、荷重の急激な減少が見られないことがわかる。これは、図-13 に示すように、

変形状態が、リベットのせん断変形が支配的となり、リベットの抜ける出る挙動が小さかったためと考えられる。一方、薄板モデルの頭部が大きく腐食損傷したモデルでは、板の面外方向の曲げ変形が大きくなることで、最終的に、リベットが抜け出るような状態となる。このことから、荷重-変位曲線において、急激な荷重低下が起こったと考えられる。

(4) 接合面数の影響

表-3、図-16 および図-17には、二面せん断継手の結果を示している。二面せん断継手の場合、薄板モデルおよび厚板モデルともに、強度低下の割合が小さいことがわかる。ただし、薄板モデルの場合、両側のリベットヘッドが全損すると、1割程度強度が低下していることがわかる。これは、前述したように、薄板モデルの場合、板の曲げ変形が、リベットのせん断変形に比べ大きいいため、変形が進行していくと、リベット端部が抜けていくような挙動を呈し（図-16中に示す）、継手の強度が低下したと考えられる。一方、厚板モデルでは、リベットのせん断変形が卓越し、リベット自体のせん断強度のみで継手強度が決まるので、リベットヘッドが腐食損傷を受けても、継手強度に対してほとんど影響がないと考えられる。なお、今回の薄板モデルの継手は、中板厚18mmと比較的厚めの板で解析を行っているため、板厚が小さくなるほど、強度低下の割合が大きくなる可能性もあるため注

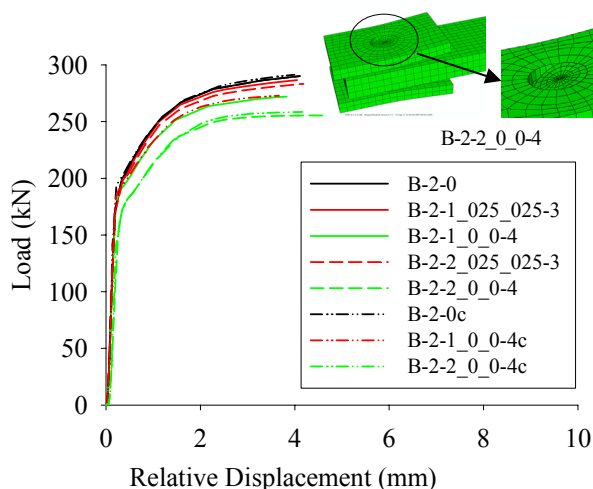


図-16 荷重-相対変位関係（二面・薄板モデル）

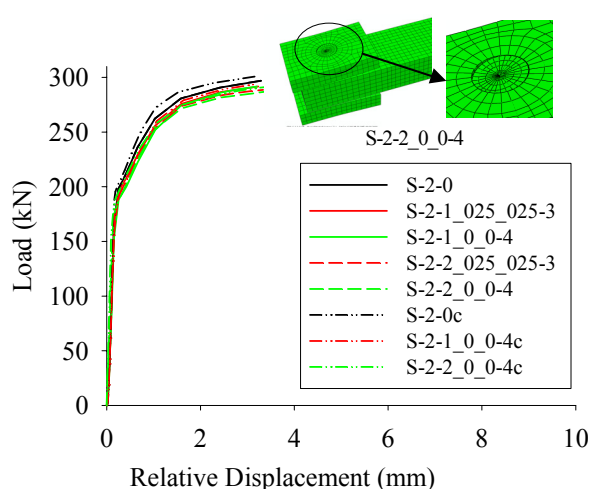


図-17 荷重-相対変位関係（二面・厚板モデル）

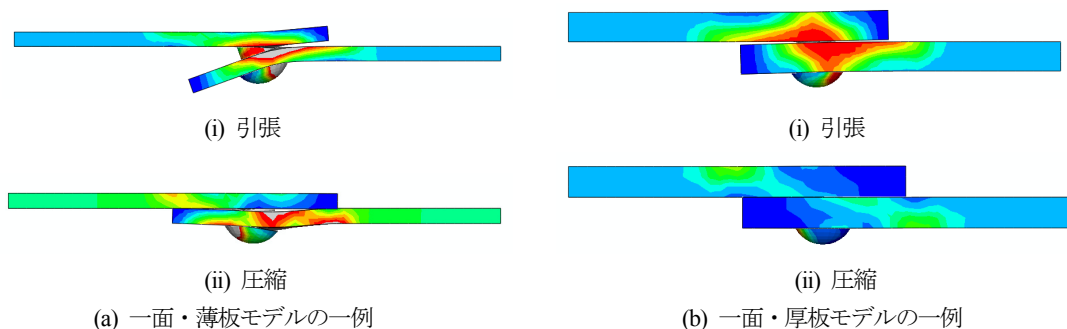
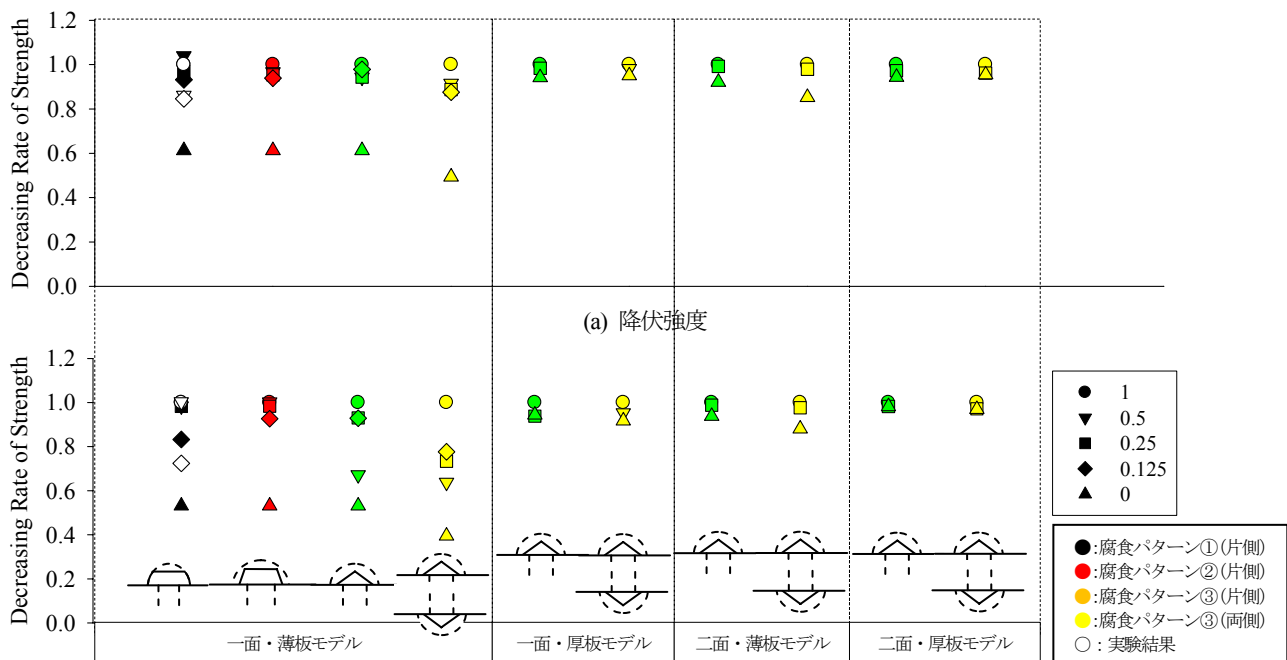


図-18 載荷方向による崩壊モードの違い（変形倍率1倍、相当応力コンター）



(b) 引張強度
図-19 強度低下率

意が必要である。

(5) 载荷方向の影響

表-3, 図-14(e), 図-15, 図-16 および図-17 に载荷方向が圧縮の場合 (解析ケース名の最後に c をつけたケース) の結果を示している。結果より, ほとんどのケースで, 圧縮強度の方が, 引張強度より大きいことがわかる。また, 腐食損傷を入れた場合においても, この傾向は変わらないことがわかる。

しかし, 圧縮と引張との強度比でみると, 一面せん断の支圧先行継手に関しては, 腐食損傷無しの場合と有りの場合で大きな違いがあり, 腐食損傷を受けた場合, 引張が作用すると, 圧縮に比べ大きく強度低下していることがわかる。図-18 には, 相当応力コンター変形図の一例を示しているが, 図より, 引張を受けた場合, 腐食損傷を受けていない側の板が曲げ変形しているのに対し, 圧縮を受けた場合, 板が座屈変形していることがわかる。この崩壊モードの違いが, 強度の違いとなって表れていると考えられる。しかし, 他の継手タイプでは, 極度な腐食損傷があっても, 強度比の違いはほとんどないことがわかる。これは, 図-18 から見てもわかるように, 継手の崩壊がリベットのせん断が大きく影響しており, 引張による板の曲げ変形や, 圧縮による板の座屈変形がないためと考えられる。ただし, 圧縮を受けた板が座屈する場合, 板の座屈長 (本モデルではリベット孔から部材端までの距離) に大きく影響するため, 座屈長が大きくなると, 座屈強度が小さくなり, 継手強度への影響が大きくなる可能性があることに注意が必要である。

4.3 各継手の強度低下率

図-19 には, 実験および解析で得られた各継手の腐食損傷パターンにおける強度低下率を示す。強度低下率は, 健全な継手の強度を基準値として, 各継手の残存強度を割った値であり, 降伏強度および引張強度に対するそれぞれの強度低下率を示している。

図-19 より, 薄板モデルの一面せん断継手では, リベットヘッドが全損するような状態であると, 残存強度が大幅に低下することがわかる。その他の継手タイプについても, 全損した場合, 3~15%程度の強度低下が見られる。また, 一面の薄板継手では, 全損以外にも, 腐食損傷の形状によっては, リベットヘッドが半分程度腐食しても強度低下する恐れがあるため注意が必要である。

5. まとめ

本研究では, リベットヘッドが腐食した場合を想定したリベット継手の力学的挙動および腐食損傷程度と継手強度との関係を, リベット 1 本のみの単純な継手モデルを用いた実験および FEM 解析によるパラメトリック解析により検討を行った。本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

- 1) 一面せん断継手では, 特に, 支圧降伏が先行する継手において, リベットヘッドが無いような極度な腐食損傷がある場合は, 残存強度が 50%程度となる可能性がある。
- 2) リベットヘッドが半分程度残っている場合でも, 腐

食損傷形状（腐食損傷パターン③）によっては残存強度が80%以下となる場合もあるので注意が必要である。

3) 厚板モデルでは、リベットヘッドが無くなるような極度な腐食状態でも、残存強度にほとんど影響しないことがわかった。

4) 二面せん断継手の場合、薄板モデルでは、リベットヘッドが無くなるような極度な腐食を受けた場合、最大強度で15%程度、降伏強度で12%程度低下する可能性があることがわかった。

5) リベットヘッドの両側が腐食損傷を受けた場合は、片側のみ腐食損傷を受けた場合に比べ、残存強度は低下する。

6) 引張力を受ける場合に比べ、圧縮力を受ける場合の方が、継手強度は大きくなる。また、一面せん断の薄板モデルの継手に関してのみ、腐食損傷を受けると、引張と圧縮の強度比は大きく異なり、引張を受けた場合、強度低下が著しいことがわかった。

本検討では、リベット一本のみの単純な継手モデルによる検討を行ったが、実際のリベットを使用した組立部材や継手部は、数本のリベットによって構成されている。今後は、そのような複数本のリベットを用いた組立部材や継手部において、リベットに重度な腐食が生じた場合の耐荷力の検討を行う必要がある。また、重度の腐食損傷を受けたリベットにおいてリベットが抜け出す挙動が見られたが、このときリベット軸部と板の孔との摩擦係数が強度に大きく影響すると考えられるため、今後、摩擦係数を変化させた解析も行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究の実験を行うにあたって、京都大学大学院技術職員の有馬博人氏、京都大学大学院生の奥野寿哉君およ

び大阪市立大学学生の堀嗣輔君に多大な協力を得た。ここに記して、感謝の意を表します。また、本研究は、科学研究補助金、基盤研究(B)(課題番号: 21360218)の補助により行われたことを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 名取 暢, 西川和廣, 村越 潤, 大野 崇: 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文集, No.698, I-54, pp.299-311, 2001.1.
- 2) 日本道路協会: 鋼橋の疲労, 1997.5.
- 3) 例えば, 森河 久, 下里哲弘, 三木千壽, 市川篤司: 箱断面柱を有する鋼製橋脚に発生した疲労損傷の調査と応急対策, 土木学会論文集, No.703, I-59, pp.177-183, 2002.4.
- 4) 例えば, 杉浦邦征, 田村功, 渡邊英一, 伊藤義人, 藤井堅, 野上邦栄, 永田和寿: 腐食鋼板の圧縮強度の簡易評価法に関する検討, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.1, pp.43-55, 2007.1.
- 5) 木村元哉, 中山太士, 松井繁之: 腐食桁におけるリベットの継手強度と高力ボルト置換に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.880-888, 2009.3.
- 6) 橋本国太郎, 山口隆司, 北田俊行: 高力ボルト摩擦接合とした既設リベット継手の部分取替えに関する解析的検討, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.555-562, 2008.3.
- 7) 日本工業標準調査会: JIS G 3104 リベット用丸鋼, 1953 [2004年改正版] .
- 8) Dassult Systems Simulia : ABAQUS 6.7 User's Manual, 2008.

(2009年9月24日受付)