

腐食減厚したプレートガーダーのウェブのせん断耐荷力特性に関する研究

設計工学講座 山田 昌樹

1. はじめに

近年、高度経済成長期以降に架設された多くの鋼橋が供用 30~40 年経過し、老朽化が問題となってきた。老朽化に伴い腐食損傷を受けた鋼橋は、応力度照査が実施され、補修・補強または架替えの検討が行われる。鋼橋において腐食は桁端部に生じやすく¹⁾、また、せん断が卓越する部位であることから、プレートガーダーのウェブ部材の腐食とせん断耐荷力の関係を明確にする必要がある。これまでにプレートガーダーのウェブ部材の腐食とせん断耐荷力についてはいくつかの研究が行われている。例えば、ウェブ下部を切削することで腐食を模擬した模型桁を製作し、載荷実験と弾塑性有限変位解析を行い、腐食減厚がウェブのせん断耐荷力に与える影響について検討が行われている²⁾。また、ウェブ全面が腐食減厚した鋼板モデルを対象に載荷実験とパラメトリック解析によるウェブのせん断耐荷力評価法³⁾の検討などが行われている。しかし、これらの腐食を模擬した実験や解析では、実橋における腐食減厚の状態や構造部位別に異なる実腐食分布を有するプレートガーダーのせん断耐荷力を十分評価しているとは言い難い。また、一様に全面腐食減厚したウェブの実験及びせん断強度パラメトリック解析では、特定の腐食形状を有した試験体の実験結果でせん断強度評価法を検討しているため、実橋梁の実腐食形状がせん断耐荷力におよぼす影響を検討する必要があると考えられる。沖縄県北部地域において著しい腐食損傷を受けたプレートガーダー橋が、自然崩落⁴⁾した。撤去後、腐食桁を対象に超音波厚さ計による板厚測定を行った結果、構造部位ごとに異なった腐食特性が顕著に見られた。本研究では、実環境下で腐食分布形状が明確に得られているプレートガーダーを対象に、ウェブの腐食分布形状がせん断耐荷力特性に及ぼす影響について検討することを目的とし、実橋より取り出した実寸大の腐食ウェブを用いて実験供試体を製作し、せん断耐荷力実験を行った。また、レーザー変位計を用いてウェブの実腐食分布形状を計測し、計測結果を用いて詳細な有限要素解析モデルを作成し、弾塑性有限要素法による耐荷力解析を行い、実験結果と比較検討し、ウェブの実腐食分布形状がプレートガーダーのせん断耐荷力特性に及ぼす影響について検討した。

2. せん断耐荷力実験

2.1 実橋梁におけるプレートガーダーのウェブの腐食分布特性

図 1 に本研究の研究対象橋梁の桁内部の腐食状況

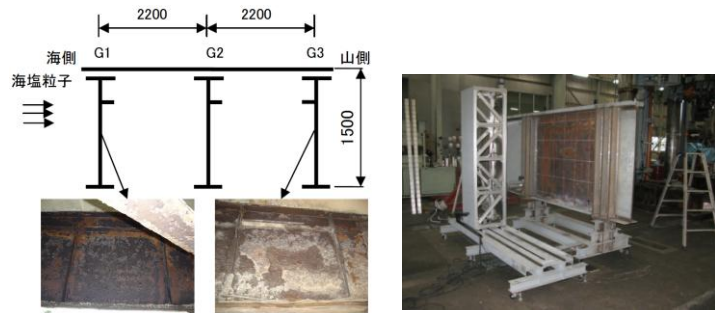


図 1 断面図および腐食状況



写真 1 試験体および計測状況

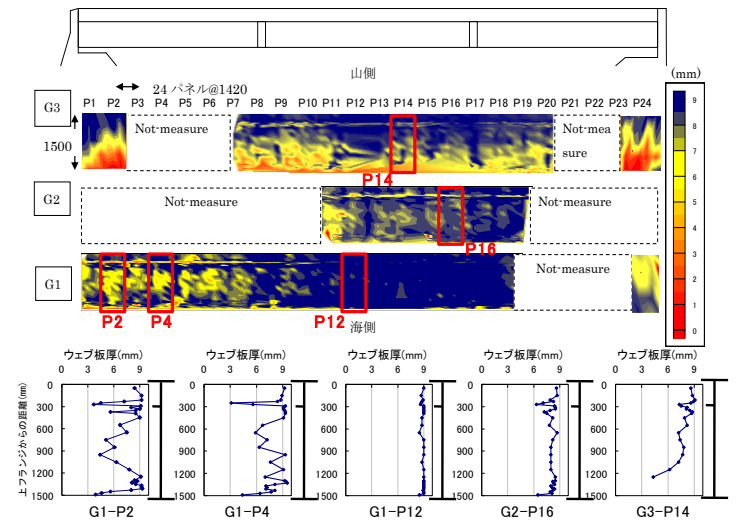


図 2 腐食減厚分布

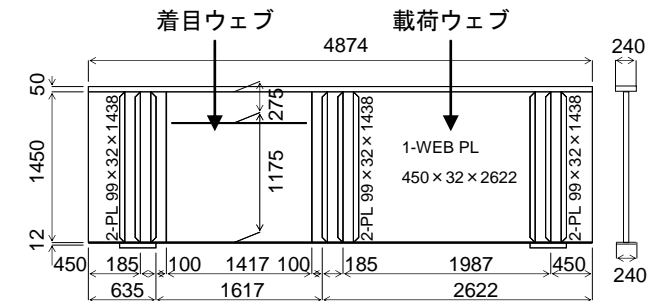


図 3 試験体

を示す。図より、G3 桁海側面のウェブの腐食は G1 桁山側面の腐食より著しく進行している様子が伺える。せん断耐荷力実験および耐荷力解析を行う前に、ウェブの腐食分布形状を把握するため、超音波厚さ計を用いてウェブの板厚計測を行った⁴⁾。図 2 に計測結果を等高線で表示したウェブの腐食減厚分布を示す。図 2 より、以下に腐食減厚分布の特徴を示す。

- ①海側の G1 桁の特徴：桁端部と支間中央部の内側のウェブを比較すると、支間中央部のウェブは腐食減厚が少ないが、桁端部では水平補剛材近傍、ウェブ中央や下フランジ近傍の腐食減厚が激しい。
- ②中桁 G2 桁の特徴：ウェブは両面から腐食しており、

水平補剛材上部付近の腐食減厚が生じている。

③山側の G3 桁の特徴：桁内部のウェブは中央部から下フランジにかけて腐食減厚が激しい。

本研究では、特徴的な腐食分布形状を持つウェブ 5 パネルより試験体を製作した。各試験体の特徴を以下に示す。

試験体①：ウェブの腐食減厚が少ない G1-P12 パネル (健全相当タイプ)。

試験体②：ウェブは両面から腐食し、水平補剛材上部近傍や水平補剛材下部において腐食減厚が生じている G2-P16 パネル (両面腐食タイプ)。

試験体③：ウェブは水平補剛材下部や下フランジ近傍において腐食減厚が生じている G3-P14 パネル (ウェブ下部腐食タイプ)。

試験体④：ウェブは水平補剛材上面近傍やウェブ中央において腐食減厚が生じている G1-P4 パネル (HS 及びウェブ中央部腐食タイプ)。

試験体⑤：ウェブは水平補剛材上面近傍やウェブ中央、下フランジ近傍に腐食減厚が生じている G1-P2 パネル (HS 及びウェブ中央部腐食 (卓越) タイプ)。

2.2 実験概要

試験体は、図 3 に示すように着目ウェブと載荷のウェブからなる単純支持の I 型試験桁である。上フランジ厚さは RC 床板厚さの合成を考慮し 50mm、下フランジ厚さは設計板厚 12mm の健全な鋼板とした。

載荷方法は、6000kN 油圧式万能試験機を使用して、試験体の中央に鉛直方向の荷重を与えた。また、境界条件は試験体両端を単純支持し、支点上はピン支持およびピンローラー支持とした。図 4 に変位計及びひずみゲージの設置位置を示す。変位計は、ウェブの面外変位については腐食ウェブ面に 25 点、鉛直変位については下フランジ下面に 11 点設置した。ウェブ面外変位の計測間隔は、ウェブ中央から縦・横 300mm 間隔とした。ひずみゲージは、腐食ウェブ面について変位計設置箇所同様に 25 点と水平補剛材から 40mm 上方に 5 点の計 30 点 3 軸ゲージを貼付した。

また、せん断耐力実験を実施するにあたり各試験体の腐食特性を調べるため、レーザー変位計を用いて、ウェブ板厚の詳細な計測を行った。写真 1 に計測状況および試験体を示す。計測は、縦横 10mm 間隔とした。計測結果よりウェブの平均板厚は、試験体①が 8.88mm、試験体②が 8.13mm、試験体③が 7.63mm、試験体④が 7.93mm、試験体⑤が 7.49mm であった。

2.3 実験結果

(1) 荷重と鉛直変位及びウェブ中央面外変位関係

図 5 に各試験体の荷重と鉛直変位の関係を示す。図から明らかなように健全相当タイプの試験体①、両面腐食タイプの試験体②、ウェブ下部腐食タイプの試験体③は平均板厚の減少に伴い最大荷重が低下

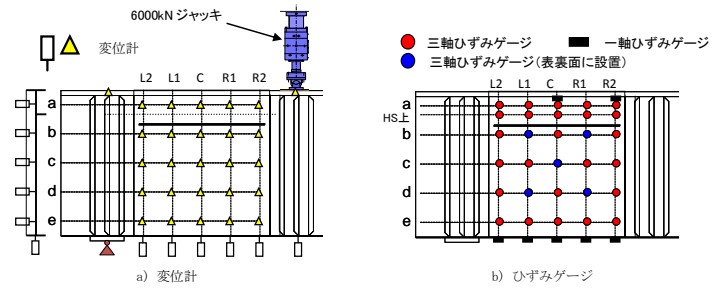


図 4 変位計およびひずみゲージ設置位置

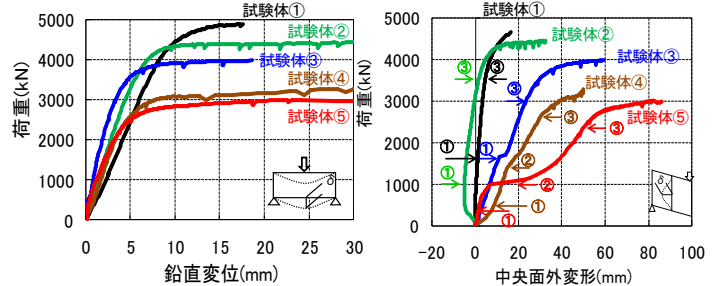


図 5 荷重と鉛直変位関係

図 6 荷重とウェブ中央面外変位関係

表 1 各荷重段階における変化点

荷重段階(kN)	試験体①	試験体②	試験体③	試験体④	試験体⑤	定義
①初期段階	1500	1000	—	500	500	中央面外変位が安定または増加する荷重時
②局部変化点	—	—	1700	1500	1000	面外変位に局部変形が生じる荷重時
③剛性変化点	3500	3500	3000	2500	2400	最大荷重近傍で変形が急増する荷重時
最大荷重	4901	4409	3992	3272	3008	最大荷重時

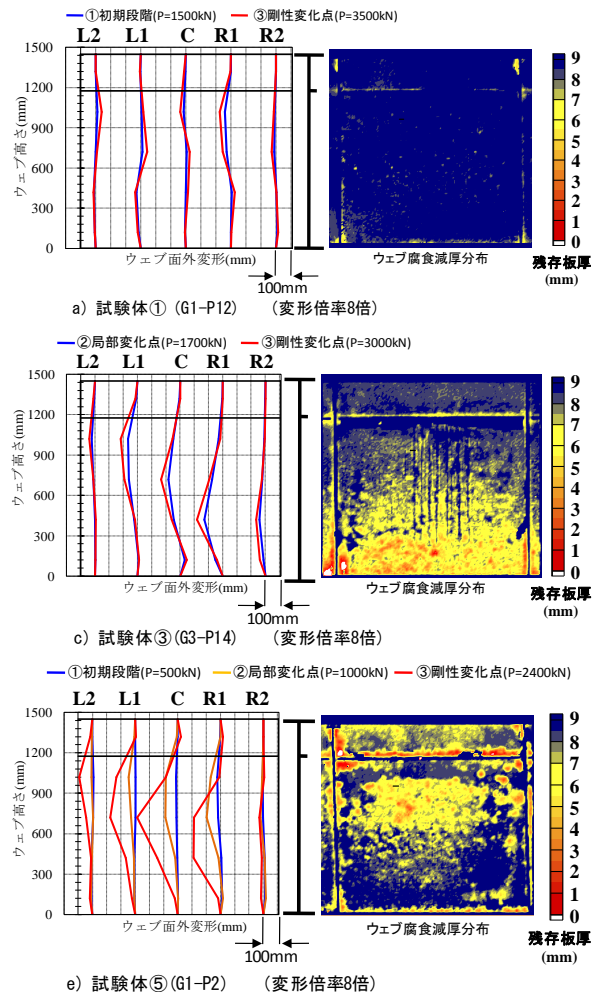


図 7 ウェブ面外変形および腐食減厚分布の一例

した。また、HS 及びウェブ中央腐食タイプの試験体④と HS 及びウェブ中央腐食(卓越)タイプの試験体⑤は、平均板厚が試験体③と同程度、もしくはそれ以上であるにもかかわらず、最大荷重は著しく低下している。

図 6 に各試験体の荷重とウェブ中央面外変位の関係を示す。また、表 1 に荷重とウェブ中央面外変位の関係より、変化が見られた荷重時の段階とその定義を示す。図から明らかなようにウェブ下部腐食タイプの試験体③や HS 及びウェブ中央腐食タイプの試験体④、HS 及びウェブ中央腐食(卓越)タイプの試験体⑤は、健全相当タイプの試験体①に比べ、低い荷重でウェブ中央面外変位は増大している。

(2) 腐食ウェブの面外変形特性

図 7 に各試験体の腐食ウェブの面外変形およびレーザー変位計で計測したウェブの腐食減厚分布の一例を示す。図から明らかなように各試験体は剛性変化点において、せん断座屈が生じている。また、ウェブ面外変形量は、試験体③はウェブ下部、試験体⑤はウェブ中央部にて大きくなりそれぞれ腐食減厚が激しい部位で大きなウェブ面外変形が生じている。

(3) 腐食ウェブの最大主ひずみ特性

図 8 に各試験体のウェブの最大主ひずみの分布の一例を示す。図から明らかなように、各試験体において最大主ひずみは斜め方向にひずみが生じており、斜め張力場が形成している。また、ひずみは、試験体③はウェブ下部、試験体⑤は水平補剛材近傍及びウェブ中央部にて大きくなり、それぞれ腐食減厚が激しい部位で最大主ひずみは大きい。

3. せん断耐荷力解析

3.1 解析手法

耐荷力解析を行うにあたり、図 7 に示したレーザー変位計によるウェブの板厚計測結果及びウェブの初期たわみ値を用いて試験体 5 体の実腐食減厚解析モデルを作成した。なお、着目ウェブ部の水平補剛材及び鉛直補剛材はキャリパーゲージより計測した実測値を用いた。図 9 に解析モデルと境界条件を示す。上フランジ厚さは 50mm、下フランジ厚さは 12mm と実験体と同様とした。境界条件は、実験と同様に両端部はピン及びローラーの単純支持とし、中央部に鉛直方向の強制変位を漸増载荷とした。材料定数は、着目ウェブには、腐食ウェブ(SMA490A)の引張試験結果から降伏応 $\sigma_y=454 \text{ N/mm}^2$ とした。また、 $E=2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.3$ を用いた。応力-ひずみ関係は完全弾塑性体と仮定し、降伏条件は von-Mises の降伏条件式に従うものとした。図 10 に解析モデルに入力した腐食分布及び初期たわみの一例を示す。

3.2 解析結果及び実験結果との比較

(1) 荷重と鉛直変位およびウェブ中央面外変位関係

図 11 に各試験体モデルの荷重と鉛直変位およびウ

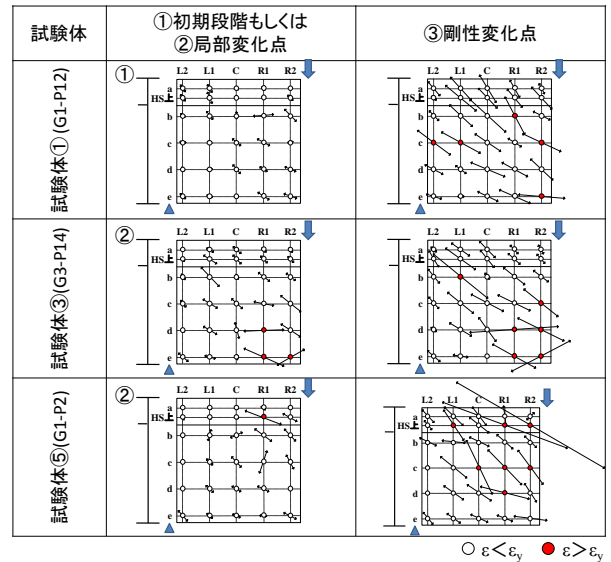


図 8 最大主ひずみ分布の一例

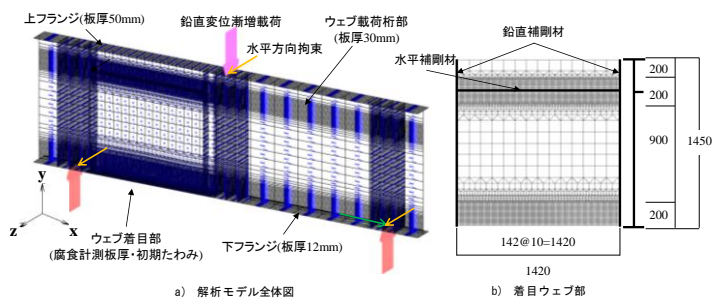


図 9 解析モデル及び境界条件

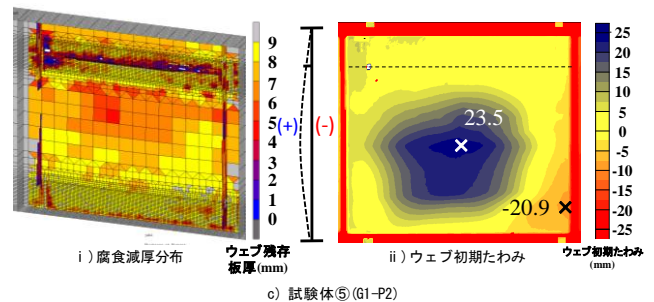


図 10 腐食減厚分布及びウェブ初期たわみの一例

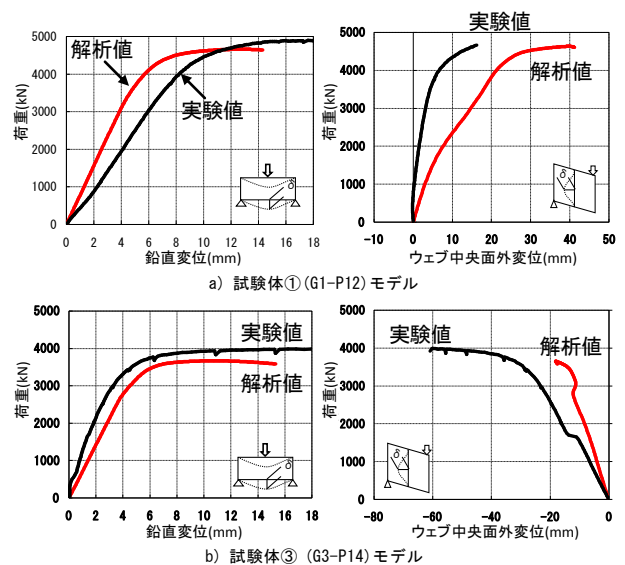


図 11 荷重及び鉛直変位及びウェブ中央面外変位関係の一例(その 1)

ウェブ中央面外変位関係の実験結果と解析結果の比較を示す。図から明らかなように、実験と同様にウェブが健全相当タイプの試験体①モデル、ウェブ下部腐食タイプの試験体③モデルはウェブの平均板厚の減少に応じて最大荷重が低下し、HS及びウェブ中央腐食タイプの試験体⑤モデルは、最大荷重が著しく低下した。また、解析結果は最大荷重について実験結果を概ね評価している。荷重と中央面外変位の関係については、概ね実験と同様の傾向を示している。

(2) 腐食ウェブの面外変形特性

図12に各試験体モデルのウェブの面外変形分布の一例を示す。図中、面外変形分布は荷重1000kN近傍、2000kN近傍、実験での剛性変化点近傍について示している。図から明らかなように、各試験体モデルにおいて剛性変化点近傍に、せん断座屈が生じている。また、試験体⑤のウェブ面外変形量は、腐食減厚が激しいウェブ中央部にて大きくなる。

(3) 腐食ウェブの塑性分布特性

図13に von-Mises の相当応力で表示した各試験体モデルの塑性分布の一例を示す。図中、塑性分布は図12と同様の荷重段階について示した。図から明らかなように、試験体①モデルは、荷重2000kN近傍においてウェブ全体に斜め張力場が形成されている。また、試験体⑤モデルは、荷重1000kN近傍において水平補剛材近傍のウェブに応力集中が生じ、降伏に達している。荷重2000kNにおいて水平補剛材近傍において斜め張力場に不連続な領域が発生した。

4. まとめ

実環境下で腐食分布形状が明確に得られているプレートガーダーのせん断耐荷力実験および耐荷力解析から得られた主な結論をまとめると以下の通りである。

- (1)ウェブの腐食分布形状より、最大荷重は健全相当タイプの試験体①、両面腐食タイプの試験体②、ウェブ下部腐食タイプの試験体③は平均板厚の減少に伴い最大荷重が低下し、HS及びウェブ中央腐食タイプの試験体⑤は、平均板厚が試験体③と同程度、であるにもかかわらず、最大荷重は著しく低下した。
- (2)ウェブ面外変形は腐食減厚の激しい部位において大きくなる。
- (3)実験結果より、全ての試験体において最大主ひずみは斜め方向に生じており、ウェブには斜め張力場が形成されている。
- (4)試験体⑤は、腐食減厚が激しい水平補剛材上部にて最大主ひずみや相当応力が増大し、最大荷重は、ウェブの平均板厚の減少に比例せずに極端に低下した。
- (5)本研究で用いた解析手法は、荷重-変位関係および変形モードについて、実験結果を精度良く評価している。

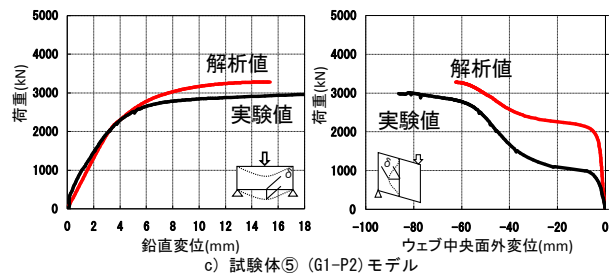


図11 荷重及び鉛直変位及びウェブ中央面外変位関係の一例(その2)

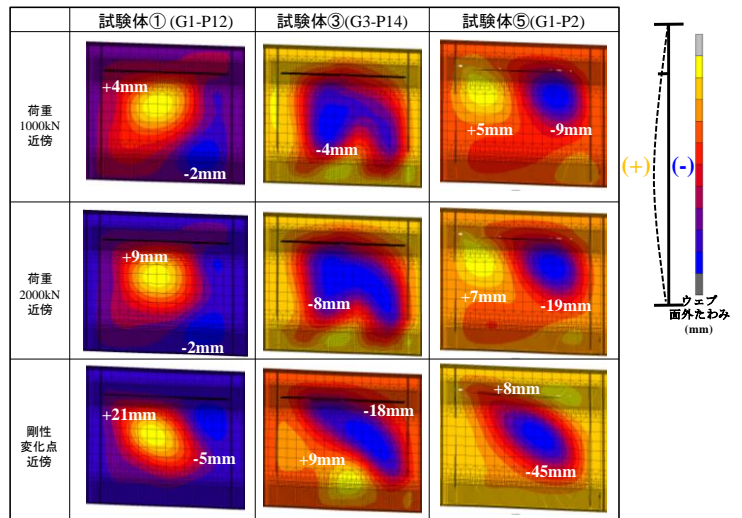


図12 ウェブ面外変形分布の一例

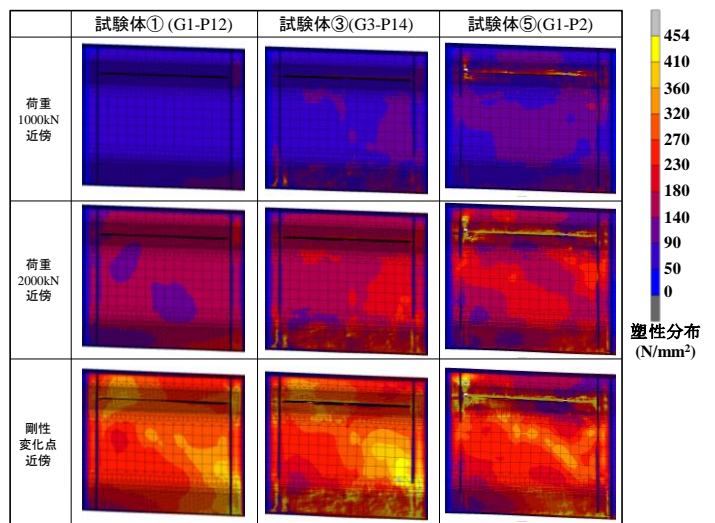


図13 ウェブ塑性分布の一例

【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.668 /I-54,pp.299-311,2001.1.
- 2)ポータンフン、佐々木栄一、市川篤司、三木千壽：腐食を模擬した模型桁のせん断耐力に関する実験および解析、構造工学論文集 Vol.48A,pp1099-1105,2002.3.
- 3)海田辰将、藤井堅、原考志、中村秀治：腐食鋼板のせん断耐力とその評価法、構造工学論文集 Vol.50A,pp.121-130,2004.3.
- 4)下里哲弘、村越潤、玉城喜章、高橋実：腐食により崩落に至った鋼橋の変状モニタリングの概要と崩落過程、橋梁と基礎、Vol.43, pp.55-60, 2009-11.