

座屈変形圧縮部材の修復法に関する研究

日本生産工 ○川井 豊 日大生産工 木田 哲量
日大生産工 阿部 忠 日大生産工 水口 和彦

1. はじめに

地震や台風などの突発的過大荷重により鋼部材に座屈変形（残留面外変形）を生じた場合、その変形量や変形位置によっては部材の交換や最悪の場合には更新が必要となる。残留面外変形が構造強度上危険と判断された場合、現場で矯正あるいは補強を行うことにより構造機能が回復できれば、構造物の使用停止期間の短縮や部材交換・更新費用の縮減が可能となる¹⁾。

本研究では、上記観点から現場での補修により機能回復を図るため、実際に行われる可能性が高い代表的な補修法を対象に、修復後のパネルの圧縮載荷試験を行うことにより、各補修法の修復効果を調査したものである。

2. 圧縮パネルの許容面外変形量

面外変形パネルの変形許容量の判定は、以下に示す新設構造物に対する初期不整（部材加工精度）の規定が適用可能と考えられる。また、修復における変形矯正の目標値としても適用するのが良い。本研究においても、許容残留変形量として道示の規定を用いることとした、

道路橋示方書²⁾

$$\delta \leq h/250 \quad h; \text{腹板高さ}$$

$$\delta \leq w/150 \quad w; \text{腹板またはリブの間隔}$$

$$\text{I.D.R.}^{3)} \quad \Delta_x \leq \text{Max} \left\{ \frac{2w}{30t} \left(1 + \frac{w}{5000} \right); 1 \right\}$$

$$\delta_2 \leq \text{Max} \left\{ \left| -\frac{L}{1200} \right|, 2 \right\}$$

$$\leq \text{Max} \left\{ \left| \frac{L}{900} \right|, 2 \right\}$$

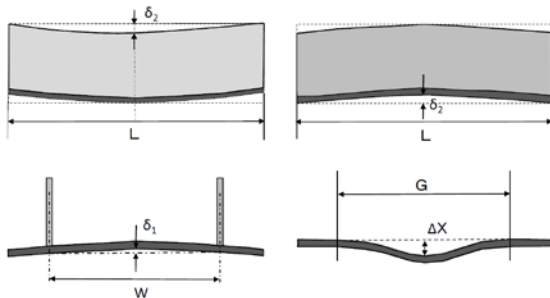


図-1 初期たわみの規定^{2), 3)}

3. 座屈変形圧縮パネルの修復実験

3.1 圧縮パネルの載荷試験

(1) 試験体

試験体は、箱形断面部材の圧縮フランジの補剛リブで囲まれた圧縮パネルを想定し、板厚 $t=8\text{mm}$ 、全幅 780mm 、長さ $1,500\text{mm}$ の熱間圧延鋼板を用いた。なお、材質は入手の都合上、SS400 とした。用いた鋼板の化学成分を表-1 に示す。機械的性質については、後述する。

表-1 供試鋼板の化学成分

鋼種	板厚 (mm)	化学成分(wt.%)				
		C	S	M	P	S
SS400	8	0.16	0.02	0.81	0.09	0.012

(2) 試験方法

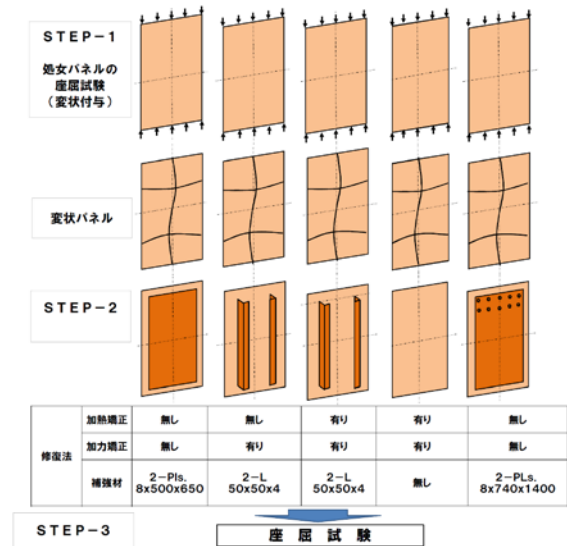


図-2 試験に用いた修復法と試験手順

同一鋼板からガス切断にて5枚のパネルを切り出し、変形部を模擬するため面内圧縮荷重を負荷することにより、すべて座屈により面外変形させた。残留面外変形量としては、板厚の2倍 ($2 \times 8 = 16\text{mm}$) を目標値とし、除荷時のスプリングバックを見込んで面外変形が約 20mm となるまでパネルの座屈後も載荷を続けた。

パネルに所定の残留面外変形を付加後、実際に行われる可能性の高い以下の5つの補修方法を用いて修復を行った。

Rehabilitation methods for buckled compression steel panel member

Yutaka KAWAI, Tetsukazu Kida, Tadashi ABE and Kazuhiko MINAKUCHI

- (a) 変形を矯正せず、補強板を溶接し補強修復。
- (b) 変形を冷間でジャッキにて加力矯正しながら補強リブ材を断続溶接し補強修復。
- (c) ジャッキによる熱間加力矯正および点状局部加熱法の併用にて変形矯正後、補強リブ材を断続溶接し補強修復。
- (d) ジャッキによる熱間加力矯正および点状局部加熱法の併用にて変形矯正(追加補強材なし)。
- (e) 変形パネルの両側から補強板をあて、ボルト穴を穿孔した後、高力ボルトにて変形パネルと補強板を一体化し修復。

このうち、(a)については溶接の入熱が大きいことから、補修時の不安定挙動の発生の有無を調査する目的で、処女パネル座屈荷重の20%の荷重を作用した状態にて補修を行った。他のケースは全て、圧縮試験装置から一旦撤去した後、矯正治具を用いて矯正ならびに補強を行った。

試験体の種類および試験の流れを図-2に示す。

(3) 試験装置および測定

座屈試験に用いた試験装置を図-3に示す。座屈試験では、パネルの支持条件を明確にするため、できるだけ四辺単純支持条件に近くなるように、側辺の回転および縦横方向の面外変位が自由となる様な支持装置を用いた。

座屈試験においては、パネルの表裏の2面に貼付したひずみゲージにより応力分布を、変位計によりパネルの面外変形を計測記録した。載荷前のパネル(以後処女パネルと呼ぶ)の初期変形量と座屈後の残留変形量は、ダイヤルゲージを7個とりつけた測定治具と定盤を用いて測定した。

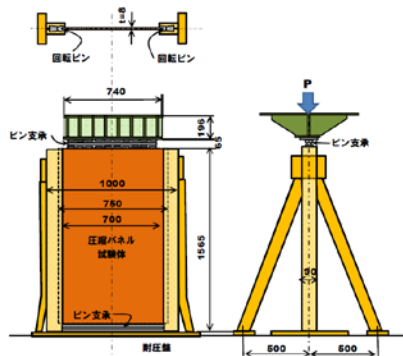


図-3 圧縮試験装置

(4) 試験結果

(a) 供試鋼板の材料試験結果

残留面外変形の矯正には、線状加熱あるいは点状加熱等の加熱処理が行われることが多い。これらの加熱処理は、既に鋼構造物の矯正および加工の一般的製造法の一つとして広く用いられており、加工部の材質変化については特殊な調質鋼を除いては実用上ならんら問題の無いことが報告されている^{4), 5)}。

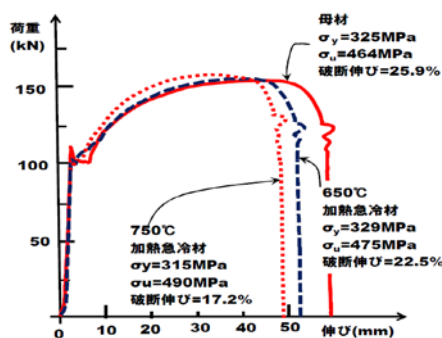


図-4 荷重-伸び曲線

本研究においても、加熱急冷による面外変状矯正(試験ケース3, 5)を行うため、加熱急冷による矯正後の機械的性質の変化について、引張試験片を用いて確認を行った。試験片は、供試鋼板から引張試験片(JIS-1号)9本を採取し、3本は素材そのまま、残り6本を加熱急冷矯正した後引張試験に供した。加熱急冷矯正処理は、(1)試験片平行部中央にプレスにて約20mmの面外変形を与え、(2)加熱温度650℃と750℃の2水準で加熱急冷ならびに加熱矯正を併用して平坦な試験片に加工した。

表-2には引張試験結果を、図-4には引張試験結果と荷重-伸び(チャック間変位)の関係を示す。図から、加熱急冷により伸びはかなり低下するが、降伏点(微減)、引張り強さ(微増)は、ほぼ母材と同等と考えられる。

(b) パネル試験体の圧縮試験

図-2に示す手順に従って実施した圧縮パネル試験体の試験結果を、表-3に一括して示す。

(i) 処女パネルの圧縮試験結果

パネルに残留面外変状を付加するために実施した処女パネルの圧縮試験(Step1)では、すべての試験体のアスペクト比(L/w:長さ/幅比)が2となるため、モードが2半波の座屈を生じ耐荷力の低下を生じた。これらの試験体は、端面をガス溶断のままとし、切断時に生じたそり変形(面外変形)の矯正を行わない処女材としたため、各試験体は表-3に示す如く、様々な最大初期不整を有していた(モードはいずれも1半波長)。その結果、最大耐荷力(座屈荷重)は、初期不整量の最も大きかったNo.4の $P_{max}=633kN$ から、最小であったNo.2の $P_{max}=833kN$ まで、大きなばらつきを示した。

処女パネルの圧縮試験における座屈応力 σ_{cr} は、初期不整がないと仮定して次式で与えられる⁶⁾。

$$\sigma_{cr} = \kappa \cdot \sigma_e \quad (1)$$

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2 \quad (2)$$

t: 板厚, w: パネル幅, L: パネル長さ, E: ヤング係数, ν : ポアソン比, κ は4辺の境界条件から定まる座屈係数である。

本実験では、修復効果を定量的に把握するため、4 辺単純支持の条件を満たすようパネル支持装置を設計・製作したが、側辺(非載荷縁)および隅角部で単純支持の条件を満たすことが困難なこと、側辺支持線の外側部も荷重を分担してしまうことから、当該部においてある程度の固定度が生じた。その結果、実験値は $P_{max}=633kN$ から $833kN$ と式(1)を用いて計算される 4 辺単純支持の座屈荷重 $P_{\alpha}=535kN$ (座屈係数 $\kappa=4$)を、18%から 56%上回った。このため、修復パネルの強度評価においては、座屈係数を処女パネルの試験結果を基に修正した。

最大耐荷力の低いパネルは、いずれも初期不整量が大きいことから耐荷力の低下を招いたと考えられるため⁵⁾、初期不整量の最も小さく耐荷力最大のパネル No.2 の実験値を参考に、本試験に用いたパネル支持装置の支持条件を代表する座屈係数を逆算し、 $\kappa = 6.2$ を得た。

(ii) 修復パネルの圧縮試験結果

写真-1 に、試験体の修復状況を、図-5 に、修復後の試験体形状寸法を示す。圧縮試験結果は、処女パネルの圧縮試験結果とともに、表-3 に総括して示す。表-3 から、いずれの修復パネルも、処女パネルの計算座屈荷重 $P_{\alpha}=535kN$ (4 辺単純支持)を上回っており、静的圧縮強度の観点からのみ見た場合、本研究でとりあげた 5 つの修復法は、実用上問題は無いと考えられる。

表-3 パネル試験体圧縮試験結果の概要

試験体 No.	1	2	3	4	5
最大初期変形量 (mm)	1.8	1.9	2.0	5.0	1.2
最大荷重 (kN)	773	833	711	633	817
最大応力 (MPa)	123	133	114	102	131
座屈モード					
載荷時最大変形 (mm)	12.1	13.4	10.9	11.7	12.6
修復法	補強板溶接 タフリング	冷間加力矯正 + 補強リブ溶接	熱間加力矯正 + 補強リブ溶接	熱間加力矯正 のみ 補強リブなし	補強板 高力ボルト溶接 (タフリング)
修復後最大変形量 (mm)	---	3.5	1.3	1.5	4.3
最大荷重 (kN)	686	1156	1347	790	1531
最大応力 (MPa)	110	185	216	126	245
座屈モード					

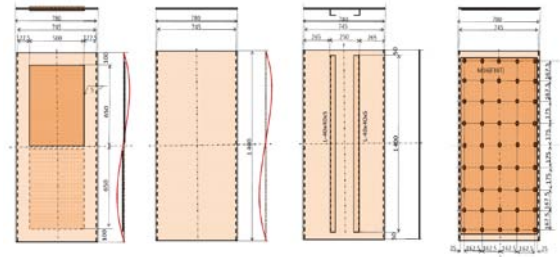


図-5 修復後の試験体形状寸法



写真-1 試験体の修復状況

以下に、各修復パネルの座屈耐力の推定値と実験値との比較から考えられる、各方法における修復設計上の問題点を述べる。

まず、補強板を用いる修復法、(a)試験体 No.1、(d)試験体 No.5 では、母材と補強板の板厚を加えた板厚が有効板厚と考えられる。即ち、試験体 No.1 では、 $t'=2t=16mm$ 、試験体 No.5 では $t'=3t=24mm$ の板厚と考えると、式(1)と試験装置の初期周辺支持条件(座屈係数; 6.2)を用いて座屈応力はそれぞれ $1179MPa$ 、 $1355MPa$ となり、いずれも供試材の降伏応力を越える値となることから、修復パネルがある程度平坦($w/150$ 以下)であれば当該部では弾性座屈は生じないことになる。一方、実験値をみると、No.1 で $110MPa$ 、No.5 で $245MPa$ であり、計算値よりはるかに低い値となっている。これは、本実験では補強板が母板全体を覆っておらず、荷重辺および側辺が $t=8mm$ の母板のまま残っていることから、実際の耐荷力がこの $t=8mm$ の部分の局部変形で決定されたためと考えられる。また、試験体 No.1、No.5 の共通条件として、修復において母板の残留面外変形の矯正を行っておらず、修復後の残留変形が比較的大きいため、荷重の増加に伴い補強板周辺の母板に面外曲げが集中したため、前記要因との相互作用により計算値に比へ実験値が低くなったものと考えられる。

実際の修復では、上記実験結果に鑑み、変状部を含む広い範囲、即ち健全部を充分含む範囲まで補強板をのばし、補強板縁端での局部変形が生じないように補強板の設計時に配慮すべきである。

次に、変状部の矯正を行った後にリブを溶接補強する修復法(b); 試験体 No.2、試験体 No.3 では、補

強板の圧縮強度算定式の適用が可能と考えられる。
リブ補剛された板の座屈問題は、リブの面外剛性を等価に見積もることにより直交異方性板として取り扱うことができる。

Gienckeにより一般的補剛板の座屈係数 κ_s は次式で与えられる⁶⁾。

$$\kappa_s = \frac{1}{1+(s+1)\cdot\delta} \cdot \left[\left(\frac{m}{\bar{\alpha}} + \frac{\bar{\alpha}}{m} \right)^2 + \left(\frac{m}{\bar{\alpha}} \right)^2 \cdot (s+1) \cdot \gamma_s + \frac{\bar{\alpha}}{m^2} \cdot (r+1) \cdot \gamma_r \right] \quad (3)$$

ここに、 s ；補剛リブの本数、 n ；リブで分割されたパネル数 ($n = s + 1$)

γ_s ；縦方向補剛材剛比、 δ ；縦リブ断面積比、 γ_r ；横方向補剛材剛比

m ；座屈波形半波長数、 r ；横方向補剛材数、 L ；補剛材の全長

$\bar{\alpha}$ ；パネルのアスペクト比 (L/w)、

w ；補剛板全幅

$$\gamma_s = \frac{12(1-\nu^2) \cdot I_s}{b \cdot t^3}, \quad \delta = \frac{A_s}{Wt}$$

t ；補剛板主板厚、 A_s ；補剛材の断面積、

I_s ；補剛材の断面二次モーメント

また、座屈係数の最小値は、下式で与えられる。

$$\kappa_{\min} = 2 \cdot \frac{1 + \sqrt{\{1 + (s+1) \cdot \gamma_s\} \cdot \{1 + (r+1) \cdot \gamma_r / \bar{\alpha}\}}}{1 + (s+1) \cdot \delta} \quad (4)$$

試験体 No.2, No.3 の形状寸法を上式に代入し最小座屈係数を求めると、6.63 を得る。

式(1)から、これらの試験体の座屈応力は、142MPa となる。ただし、前述したとおり本実験では、側辺および隅角部に単純支持の条件が満たされておらず、面外方向の回転に拘束が生じており、四辺単純支持時の最小座屈係数の 4.0 が実験値の逆算から 6.2 と値が 1.55 倍となっている。そこで、この側辺の拘束による修正を計算座屈応力に適用すると、221MPa となり、面外初期変形の小さい試験体 No.3 の実験値をほぼ説明できることになる。一方、冷間矯正した No.2 では初期変形が熟間矯正の No.3 より大きかったため、179MPa と上記計算値より約 15%低い値となっている。実際の圧縮パネルの周辺拘束状態は理想的四辺単純支持状態よりもむしろ、本実験の支持条件に近いものと考えられるため、いずれの矯正法を用いた場合にも修復設計時には、安全側の強度推定として四辺単純支持の条件で、補剛板としての座屈応力を計算すればよいと考えられる。

最後に、修復法(e)；試験体 No.4 では、面外変形を $w/150$ 程度に矯正できれば、処女パネルと同様、式(1),(2)を用いて修復後の強度回復を照査すること

ができ、加熱急冷、加力等の矯正による材質変化については何等特別の配慮を必要としないことが分かる。

4. まとめ

(1) 650°Cおよび750°Cの加熱急冷処理を施し、その材質変化を調査し結果、伸びはかなり低下するが、降伏点(微減)、引張り強さ(微増)は、ほぼ母材と同等と考えられる。

(2) 残留面外変形を矯正せず、変状部のみを覆うように補強板をすみ肉溶接にてダブリングして修復した場合、ある程度補強板が軸力を分担するが、補強板縁付近に断面急変による面外曲げが生じ、当該部の局部変形で圧縮耐荷力が支配される。補強効果を高める為には、変状部を含み健全部のある程度広い範囲にわたりダブリングする必要がある。

(3) 冷間または熟間にて変状部を加力矯正した後、リブ材を断続溶接し補強すれば、矯正の程度(量外面変形量)にもよるが、効果的な修復が可能である。この場合には、修復後の圧縮耐荷力は、四辺単純支持の補剛板として算定すれば充分安全である。

(4) 熟間にて加力矯正した場合、最大面外変形量が充分小さく矯正できれば、(例えば、 $w/150$ 以下)健全パネルと同程度の耐力を確保し得る。

(5) 高力ボルトを用い補強板を母板変状部に緊結し、面外変形の矯正と面外剛性の増加を行えば、極めて高い強度上昇が期待できる。但し、この場合も(2)と同様、補強板を健全部にまで展ばしておく必要がある。

【参考文献】

- 1) 局部座屈損傷部を加熱/プレス矯正した鋼製橋脚の力学的挙動：構造工学論文集, Vol. 54A, 2008年
- 2) 道路橋示方書・同解説；17.3.2 部材精度：日本道路協会, 平成14年3月
- 3) Inquiry into the basis of design and method of erection of steel box girder bridges, Interim design and workmanship rules, Part I~III, Dept. of environment, Scottish Development Department, 1973
- 4) 鋼鉄道標製作仕様の解説(その2)；冷間曲げ及び加熱矯正：構造物設計資料, No. 29, pp19-29, 1972-3
- 5) 例えば、鋼板の靱性に及ぼす組立工程における加工の影響(その2), (その3)：木原, 栖原, 他, 日本造船学会論文集, 第133号, 昭和48年
- 6) 座屈設計ガイドライン・改訂第2版[2005年版]；土木学会, 平成17年