

下フランジに腐食減肉を生じた負曲げを受ける I 桁の座屈強度に関する研究

鋼構造研究室 GONZALEZ PORRAS ALFREDO ISAI

1. 研究の背景

国土交通省の道路維持管理年次報告書¹⁾によると、日本の橋梁の39%が建設から50年以上経過しており、この割合は今後10年間で63%に急増すると予測されている。これらの橋のうち、15メートル未満の橋の70%、および15メートル以上の橋の51%が、同期間に50年以上の使用年数に達する見込みである。この老朽化の進行は、橋梁の安全性や機能性に大きな課題をもたらしており、とりわけ腐食や疲労などの累積的な損傷が橋梁の構造耐力に影響を及ぼしている。

このようなインフラの維持管理は不可欠であり、老朽化した橋梁には、安全性と運用性を確保するために、適切な補修・補強・維持管理措置が求められる。橋梁の老朽化が進むと、橋梁部材の交換といった大規模な維持管理作業が必要になる場合もある。

1986年から2006年の間に行われた15メートル以上の橋梁を対象とした橋梁の架け替えに関する調査²⁾によると、橋梁の架け替え理由は以下の順であった：改良工事、機能上の問題、上部構造の損傷、下部構造の損傷、耐荷力不足、耐震対策。特に鋼橋においては、上部構造の損傷が最も一般的な架け替え理由となっており、図1.1は上部構造の損傷による橋梁の架け替え理由の内訳を示している。

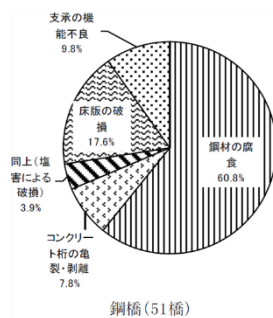


図 1.1 上部構造の損傷による架け替え理由の内訳 (2016年調査)²⁾

この図から、鋼部材の腐食が鋼橋の劣化の主な要因であることが分かる。そのため、腐食への対策が極めて重要である。

一般的な鋼材における腐食とは、錆が局部的に発生する、または進行が極端なレベルに達することで、部材の厚みの減少や断面の損傷を引き起こす現象である³⁾。この板厚の減少は、部材の断面積を縮小させるため、耐荷力を著しく低下させるとともに、残存部材への応力を増加させる。

鋼橋における腐食は、長期的に構造耐力と安全性に深刻な影響を及ぼす問題である。特に I 形鋼の下フランジは、その位置や曝露環境の影響で、腐食の影響を受けやすい部位である。これらの箇所は、デッキの水漏れ、伸縮継手の隙間、ゴミの蓄積などにより、水や塩分、その他の腐食性物質に直接さらされることが多い。このような局所的な腐食は、材料の厚みを減少させるだけでなく、下フランジの座屈耐力を著しく低下させるため、荷重条件下での構造的な破壊リスクを増大させる。

特に、連続桁橋の支点近傍にある下フランジは、負の曲げモーメントによる圧縮力が作用するため、座屈の影響を受けやすい重要な領域である。腐食による板厚の減少と高い圧縮応力の相互作用によって、局所的な破壊が発生し、橋梁の構造的な健全性を損なう可能性がある。

1.1 本研究の目的

腐食による板厚減少が下フランジの座屈強度に及ぼす影響を理解することは、効率的な維持管理を行う上で極めて重要である。座屈強度を最も大きく低下させる要因を特定することで、I 形鋼の下フランジの座屈破壊リスクが高い橋梁に対する維持管理の優先順位を決定することが可能となる。

したがって、本研究の目的は、腐食による板厚減少が下フランジの座屈強度に与える影響を評価し、その影響が特に顕著になる条件を明確にすることである。この研究を通じて、より効果的な維持管理戦略の策定を支援し、日本の老朽化した橋梁インフラの安全性と耐久性の向上に貢献することを目指す。

2. 解析に使用するモデルについて

上述のように、腐食によって下フランジが減肉した I 型鋼は、負のモーメント条件下で座屈しやすいことが示されており、**図 2.1** に示されています。本研究の目的と整合性を持たせるため、この減肉が座屈耐力にどのような影響を及ぼすかを分析するために、有限要素法 (FEM) を用いた弾塑性座屈解析を COMP ソフトウェアで実施しました。これにより、さまざまな腐食条件下での下フランジの座屈耐力を正確に評価することができました。

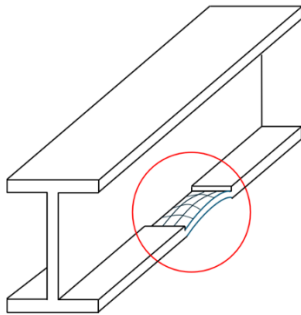


図 2.1 腐食による下フランジの局所座屈

本モデルでは、下フランジを鋼板として概念化し、腐食による減肉を不連続な損傷として取り扱い、健全な部分と影響を受けた部分の間に急激な遷移があるものとしています。材料特性として、ヤング率 (E) は $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 (ν) は 0.3、降伏応力 (σ_y) は 355 N/mm^2 と仮定しました。

腐食による減肉は、パラメータ α および β を用いてモデル化され、それぞれフランジの厚さ方向および長さ方向の影響率を表します。

- パラメータ α は、減肉後に残る初期フランジ厚さの割合を示します。例えば、

$\alpha = 1.0$ は腐食減肉がない健全なフランジを表し、 $\alpha = 0.5$ は厚さが 50% 減少した状態を示します。

- パラメータ β は、腐食による減肉が影響するフランジの長さを、板幅に対する割合で示します。

これらのパラメータの図示およびモデルへの適用は、**図 2.2** に示されています。

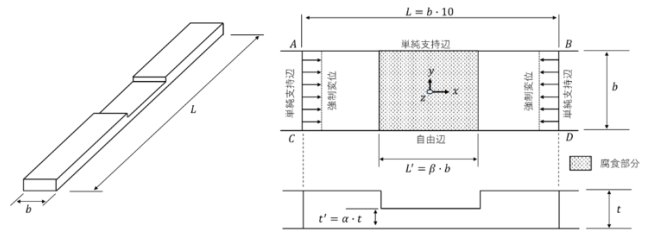


図 2.2 FEM 解析に使用したモデル

2.1 荷重および支持条件

x 軸は鋼板の長さ方向、 y 軸は鋼板の幅方向、 z 軸はこれらの軸に垂直な方向とします。これらの方向の変位はそれぞれ u_x, u_y, u_z とし、回転は θ_x, θ_y で表します。支持条件は以下のように設定しました：

- 辺 AB: $u_y = u_z = \theta_y = 0$
- 辺 AB: $u_x = \bar{U}, u_z = \theta_x = 0$
- 辺 AB: $u_x = -\bar{U}, u_z = \theta_x = 0$

ここで、 \bar{U} は強制変位を表します。

2.2 モデル寸法

使用した寸法は、建設プロジェクトで一般的に使用される I 型鋼に関する研究「鋼道路橋の部分係数設計法に関する研究」⁴⁾ から取得しました。

幅厚比パラメータ R は、表 2.1 に示される I 型鋼の各寸法について計算され、日本鋼構造協会 (JSCPA) の「鋼および複合構造の標準仕様書 一般規定・構造計画・設計」⁵⁾ から抽出された**式 2.1** を用いました。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{yk}}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k}}$$

式 2.1 幅厚比パラメータの計算式⁵⁾

ここで、

R = 幅厚比パラメータ

b = 鋼板の幅

t = 鋼板の厚さ

σ_{yk} = 降伏強度

E = ヤング率

μ = ポアソン比

k = 座屈係数

座屈係数 k は、「鋼構造座屈設計ガイドライン」⁶⁾ から得られる以下の式により求めました。

$$k = 0.425 + \frac{1}{(a/b)^2}$$

式 2.2 座屈係数の計算式⁶⁾

ここで、

a = 鋼板の長さ

b = 固定端間の距離 (鋼板幅)

本解析では、下フランジの厚さや幅に関係なく、長さをフランジ幅の 10 倍 ($L=10 \cdot b$) としました。この比率を設定することで、すべての解析で座屈係数 k を一定に保つことを目的としました。

解析結果に基づき、表全体から、下フランジの幅厚比パラメータ R が 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 に近いケースを選択しました。これらの寸法をモデルに適用し、R の各値に対する腐食進行に伴う座屈耐力の変化を評価しました。表 2.1 には、選択された寸法が示されており、b および t はそれぞれ下フランジの幅と厚さ、R は計算された幅厚比パラメータを示します。

表 2.1 解析に使用した I 型鋼の下フランジ寸法

Case No.	Lower Flange		R
	b	t	
1	185.5	30	0.415
2	205.5	27	0.511
3	437.5	49	0.599
4	388	36	0.724
5	437.5	37	0.794
6	269.5	20	0.905
7	340.5	23	0.995

2.3 残留応力および初期不整の導入

溶接プロセスや鋼板の製造過程で発生する残留応力や幾何学的不整は、材料の強度に大きな影響を与える可能性があります。これらの要因は、構造の特定の領域で局所的な降伏を引き起こしたり、理論的な臨界荷重に達する前に座屈破壊を発生させたりする可能性があります。そのため、本解析ではこれらの影響をモデルに組み込むことで、圧縮荷重下における下フランジの実際の挙動をより正確に反映させることを目的としています。

2.3.1 残留応力

下フランジにおける残留応力分布は、図 2.3 に示すパターンに従うものと仮定しました。このモデルでは、 r_t および r_c は、それぞれ自由端における引張応力と中央部における圧縮応力の大きさを、材料の降伏応力に対して決定する係数を表します。また、x は、残留応力が 0 となるウェブからの距離を示します。

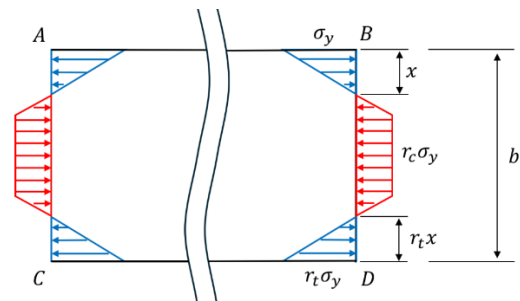


図 2.3 下フランジの残留応力分布

本研究では、以下の値を使用しました：

$$r_c = 0.23^{7)}$$

$$r_t = 0.6^{8)}$$

2.3.2 初期不整

本解析では、鋼板の支持条件に基づき、下フランジに発生する初期たわみが図 2.4 に示すパターンに従うものと仮定しました。ここで、 \bar{W}_0 はたわみの大きさを示します。

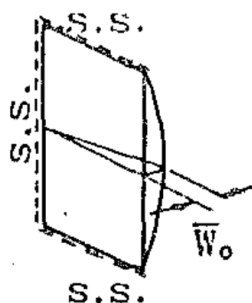


図 2.4 本解析で仮定した初期たわみのモード

本研究では、以下の値を使用しました：

$$\bar{W}_0 = b / 100^{9)}$$

2.4 メッシュサイズの決定

表 2.2 は、メッシュの最適なサイズを決定するために実施した収束解析の結果を示しています。この表において、N は鋼板の幅方向の分割数を表します。

表の結果から、各幅方向の要素数 (N) に対して得られたすべての座屈耐力の値は、収束値および設計基準に基づく理論値との誤差が 5%未満であるという条件を満たしていることが確認できます。N=40 の場合、最も低い誤差を示しましたが、本研究では N=20 を最適な選択としました。これは、計算精度と解析コストのバランスが最も適しているためです。N=20 は、より細かいメッシュと比較して十分な精度を確保しつつ、解析時間を抑えることができます。

表 2.2 座屈耐力の比較および異なる N 値における誤差

R	N	σ'_{cr}	% Error (C_1)	% Error (標準仕方書)
0.7	10	351.393	0.167	1.159
	20	351.136	0.094	1.085
	40	350.991	0.052	1.043
0.8	10	339.588	0.233	3.735
	20	338.913	0.034	3.529
	40	338.815	0.005	3.499
0.9	10	309.109	0.350	2.660
	20	308.244	0.069	2.373
	40	308.073	0.014	2.316
1	10	283.295	0.582	-0.074
	20	282.311	0.233	-0.421
	40	281.918	0.093	-0.560

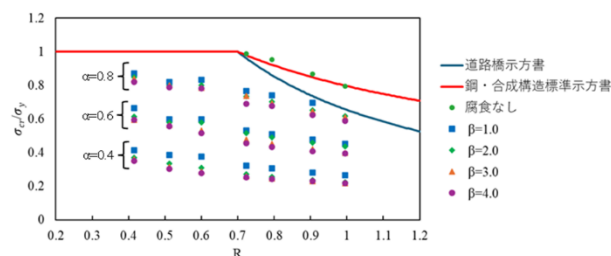
上述のように、鋼板の幅方向の要素数は N=20 に設定しました。したがって、後続の FEM 解析では、辺の長さが $b/20$ の正方形要素を使用しました。ここで、b は解析対象の鋼板の幅を表します。

3. 解析結果

グラフ 3.1 に解析結果を示します。縦軸および横軸の設定は以下の通りです：

- 縦軸 (σ_{cr}/σ_y)：解析によって得られた座屈応力を降伏応力 ($\sigma_y = 355 \text{ N/mm}^2$) で割った無次元値。
- 横軸 (R)：腐食前の幅厚比パラメータ。

また、得られた結果と比較するために、道路橋示方書¹⁰⁾および鋼・合成構造標準仕様書¹¹⁾に基づく幅厚比パラメータの式をグラフに含めました。



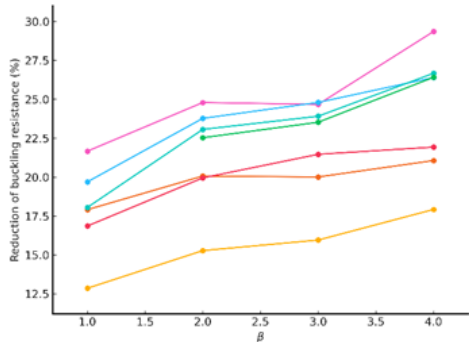
グラフ 3.1 解析結果

座屈耐力の低下に対して、厚さの減少がどの条件でより重大な影響を及ぼすかを明らかにするため、一連のグラフを作成し、この関

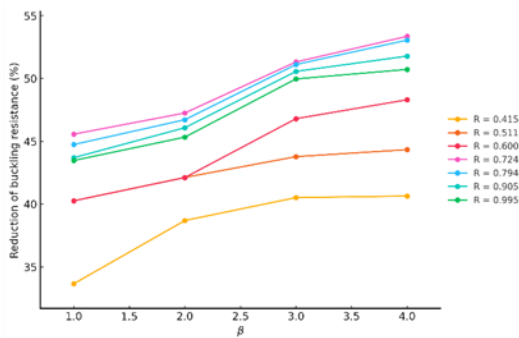
係を定量的に視覚化しました。これらのグラフでは、鋼・合成構造標準仕様書で定められた基準値を参照しながら、下フランジの座屈耐力の減少率を示しています。

グラフ 3.2 は、パラメータ α が減少する（つまり、下フランジの腐食による減肉が進行する）につれて、座屈耐力がどの程度低下するかを示しています。グラフ 3.3 は、パラメータ β が増加する（つまり、腐食が下フランジの長手方向に拡大する）ことによる強度低下率を示しています。

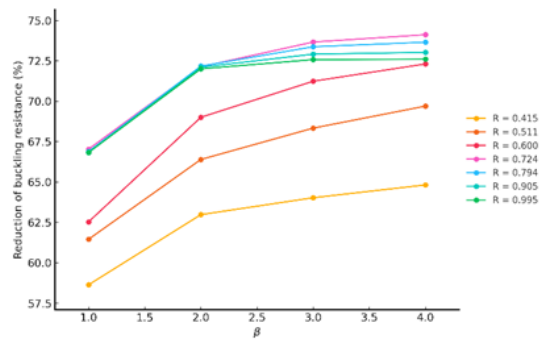
両方のグラフを比較することで、どちらの要因が座屈耐力の劣化により大きな影響を及ぼすのか、およびどの条件下で材料の損失が重大な問題となるのかを評価することができます。



a) $\alpha=0.8$

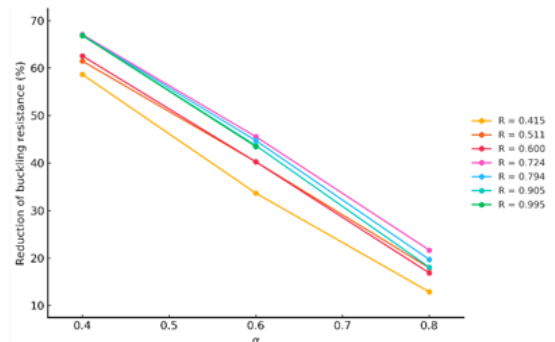


b) $\alpha=0.6$

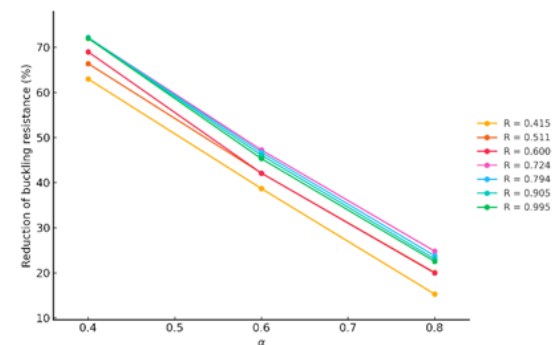


c) $\alpha=0.4$

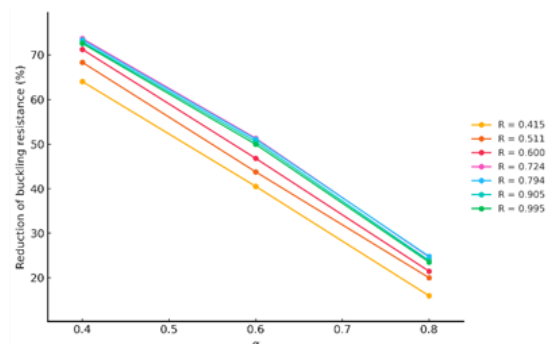
グラフ 3.2 α が座屈耐力低下に及ぼす影響



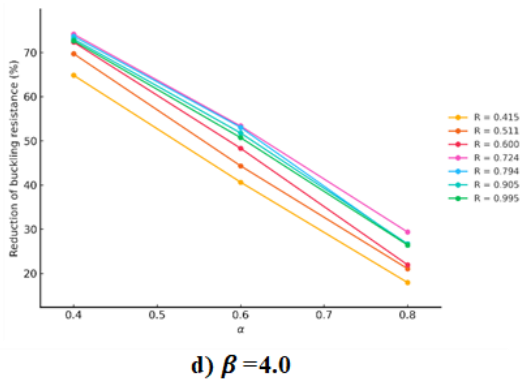
a) $\beta=1.0$



b) $\beta=2.0$



c) $\beta=3.0$



グラフ 3.3 β が座屈耐力低下に及ぼす影響

4. まとめ

- フランジ厚さの減少 (α) は、腐食の長手方向の広がり (β) と比較して、座屈耐力の低下により顕著な影響を及ぼす。したがって、厚さの損失が構造安定性に最も重要な要因である。
- 幅厚比パラメータ R が 0.7 以上の鋼板は、座屈耐力の低下が最も大きいことが確認され、腐食の進行によって細長い鋼板ほど不安定性のリスクが高まることを示している。

インフラの保守計画において、以下のケースを優先的に対処する必要がある：

1. 下フランジの幅全体が腐食されていなくても、鋼板の減肉が著しい場合は優先的に対応する必要がある。
2. 下フランジの幅厚比パラメータが 0.7 以上 ($R \geq 0.7$) の場合は特に注意が必要である。

このように、破壊リスクの高いケースを優先的に対処することで、利用者の安全性を確保できる。さらに、日本の老朽化するインフラにおいて、限られた維持管理予算を効率的に活用することが可能となる。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，国土交通省道路局，pp. 62，2024.08
- 2) 白戸真大，藤田裕士，高橋慶：橋梁の架替に関する調査結果（V），国土技術政策総合研究所資料第 1112 号，2020 年 6 月
- 3) Czarnecki, A. A. (2006). System* reliability models for evaluation of corroded steel girder bridges. University of Michigan.
- 4) 土木研究所：鋼道路橋の部分係数設計法に関する検討，土木研究所資料，第 4141 号，2009
- 5) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書，設計編，土木学会，p79，2022
- 6) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針，日本建築学会，p179，2009
- 7) Fukumoto, Y., and Y. Itoh. 1984. "Basic compressive strength of steel plates from test data." Proc. Struct. Eng. Earthquake Eng. 344 (I-1):129-139.
- 8) 構造工学論文集 Vol. 53A (2007 年 3 月) 前田 亮太，野村 昌孝，野阪 克義，奥村 学，伊藤 満「ハイブリッド桁の斜張力場作用を考慮したせん断耐荷力に関する研究」
- 9) Komatsu, S. and Kitada, T.: Statistical Study on Compression Flange Plates, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 2, pp. 404-417, 1983
- 11) 公益社団法人 日本道路協会「道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材辺」平成 29 年 11 月 p101
- 12) 土木協会「2022 年制定 鋼・合成構造標準示方書 総則編・構造計画編・設計編」