

鋼製橋脚隅角部の疲労耐久性評価に関する一考察

○名古屋高速道路公社 正会員 瀬谷千恵 名古屋高速道路公社 正会員 森下宣明
 芝浦工業大学 正会員 穴見健吾 名古屋大学 正会員 判治剛
 川田工業(株) 正会員 段下義典 (株)駒井ハルテック 正会員 平野穂菜美

1. はじめに

鋼製橋脚隅角部は、一般部に比べ厚板化する傾向にあり、その板厚低減に資する対応として、既往の研究で提案されている、フィレット設置によるせん断遅れの低減効果を考慮した設計法¹⁾や、高強度鋼材の適用が考えられる。一方、板厚低減により変動応力が増加することで疲労耐久性への影響が懸念されるが、応力伝達が複雑な隅角部の照査方法は確立されていない。そこで今回、疲労実験から得られた知見をもとに、試験体を再現した FEM モデルを実橋サイズへ展開し、供用中路線の実測値と組み合わせることで、疲労耐久性への影響評価を試みた。

2. 疲労実験から得られた知見と評価に用いる着目点の選定

先の疲労実験²⁻⁴⁾では、隅角部から 50mm 離れた点を応力参照点として、SBHS500 のフィレット構造は従来鋼と同等以上の疲労耐久性を有していることを確認した。さらに、引張条件下の繰り返しにより疲労き裂を生じさせた結果、従前の構造でみられた 3 溶接線交差部未溶着を起点としたき裂が、フィレット構造とすることで、比較的発見が容易な表面を起点とするき裂に移行することを確認した。今回確認されたき裂 4 箇所のうち 3 箇所は、溶接欠陥や止端形状の急変部を起点としていたため、これらは製作改善により耐久性の向上が期待できるが、No.2 試験体右フィレットに生じたき裂は、母材の応力集中部付近の鋼材角部を起点としているため、構造的な特性から発生したものと考えた。この知見から、応力集中部をフィレット構造の疲労耐久性を評価する着目点と考え、FEM 解析により得られる局所的な応力による評価を試みた。図 1 に応力参照点と着目点の位置関係を示す。

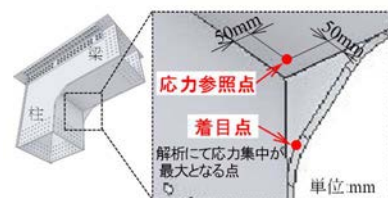


図1 応力参照点と着目点の位置関係

3. 試験体と実橋の応力性状

試験体と実橋では、断面形状の違いにより応力性状が異なる可能性があるため、表 1 に示す 2 ケースの FEM 解析により検証した。Case1 は試験体、Case2 は標準的な鋼製橋脚の断面形状をそれぞれ模擬したもので、Case2 は後述する応力頻度計測の対象橋脚と同じサイズとした。解析の境界条件・荷重条件を図 2 に示す。ソリッド要素を用いて溶接ビードまでモデル化し、メッシュ分割は、要素のアスペクト比が両ケースで同等となるように設定し、最小要素サイズは 5mm とした。Case1 の解析値は、静的荷重試験のひずみゲージ計測値と概ね一致することを確認している²⁾。鉛直力は、図 2 に示す隅角付け根部の梁フランジで公称応力が 1N/mm²となるよう作用させ、公称応力に対する応力集中の分布傾向をケース間で比較した。

表 1 FEM 解析ケース

	梁高×梁幅	板厚		フィレット突出長	溶接脚長	単位: mm 荷重点の距離
		フランジ ^a	ウェブ ^a			
Case1	775×750	25	25	150	7	2,000
Case2	2,604×2,648	35	24	520	9	7,061

次頁表 2 に公称応力に対する応力の比を、次頁図 3 にフィレット部の最小主応力の分布を示す。両ケースの公称応力に対する応力参照点の応力の比は、ほぼ等しい。応力集中が最大となる点は、フィレット突出長に対する位置関係から両ケースとも概ね同様と考えられ、主応力方向はフィレットコバ面に沿う方向で一致している。応力集中の大きさは、Case1 : Case2=3.56 : 4.30 と、試験体よりも実橋が大きくなる傾向にあった。この結果から、応力集中点の応力の比を求めることで、試験体と実橋を比較した評価ができると仮定し、以下の検討を試みた。

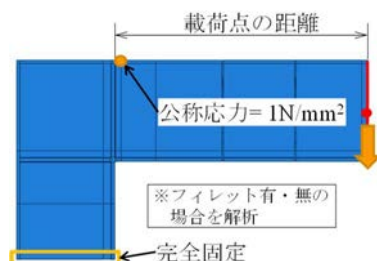


図2 解析モデル概要

4. 疲労耐久性への影響評価

1) 評価の方法 別稿^{3,4)}では、試験体の応力参照点での応力範囲と荷重回数を用いて隅角部に蓄積された疲労ダメージという概念を定義し、定量的な比較を試みた。3 章の結果から、この疲労ダメージの考え方を、応力集中点を隅角部の代表点とし、断面形状の異なる試験体と実橋を比較する場合にも適用可能と考え、実橋で試算した疲労キーワード：SBHS500、疲労耐久性、鋼製橋脚隅角部、フィレット、疲労実験

連絡先：〒453-0804 愛知県名古屋市市中村区黄金 7 丁目 28-1 名古屋高速道路公社 (TEL) 052-756-5969

劣ダメージが試験体のそれを超えなければ疲労耐久性上問題ないと考えた。

2) 評価の基準となる試験体の疲労ダメージ 実験結果が少ない中ではあるが、フィレット構造の疲労強度は No.2 試験体と同等であると仮定し、応力参照点に作用させた応力範囲 ($\Delta\sigma=70\text{N/mm}^2$) と表 2Case1 の応力参照点と応力集中点の応力の比 (3.56/0.83) から計算した局所的な応力と、き裂を確認した载荷回数 159.7 万回から、疲労ダメージを計算した ($(70\times 3.56/0.83)^3\times 159.7$ 万回)。

3) 影響評価に用いる実橋の疲労ダメージ 実橋の疲労ダメージを計算するための応力範囲と载荷回数は、名古屋高速の供用中路線での応力頻度計測結果を基に設定した。実測の対象脚は、設計上活荷重の占める割合が大きい橋脚を選定した。ただし、対象脚にフィレットはないため、3 章のモデルを用いたフィレット有無の解析で補完し、実測対象脚にフィレットがある場合の仮想の脚で評価することとした。

計測位置は試験体と同様に隅角部から 50mm 離れた梁下フランジとし、2021 年 9 月の平日に 48 時間計測をした。計測中の最大発生応力範囲は 32N/mm^2 、等価応力範囲は 3.9N/mm^2 、繰返し数は 41,473 回という結果を得た。これと解析より得られた表 2Case2 フィレット無の応力参照点 (実測点) とフィレット有の応力集中点の比 (4.30/2.99) から実橋の応力集中点の応力範囲を算出した。载荷回数は、応力頻度計測の繰返し数が交通量と相関すると考え、交通量データから、計測期間の交通量がコロナ禍前の年間平均交通量に相当する係数 (1.12) を設定し、これが 100 年続くとして実橋の疲労ダメージを計算した ($(3.9\times 4.30/2.99)^3\times 41,473\text{回}\times 1.12/2\times 365\text{日}\times 100\text{年}$)。

4) 板厚低減による変動応力の増加 隅角を模擬した耐荷力実験⁵⁾にて確認された、フィレット設置によるせん断遅れの低減効果を参考に、仮に奥村式⁶⁾から求まるせん断遅れを 50%低減できると仮定し、いくつかの橋脚を対象に試設計したところ、せん断遅れを 100%考慮して設計した場合に比べ、最も板厚低減したもので断面剛性が 0.87 まで減少したことから、変動応力の増分は最大で 1.15 倍になると考えた ($1/0.87\approx 1.15$)。高強度鋼材の適用は、これまで隅角部に多く用いられてきた SM570 を SBHS500 とした場合を想定した。鋼種を変えても設計外力の死荷重と活荷重の割合は同じであるため、設計に用いる制限値の比が変動応力の増加分になると考え、道路橋示方書⁷⁾に示されている各鋼材の特性値 (SM570 : 450N/mm^2 , SBHS500 : 500N/mm^2) に、SBHS500 の場合に適用される部材係数 0.95 を考慮した比 ($500\times 0.95/450\approx 1.06$) を変動応力の増分と考えた。両者を考慮した場合、変動応力の増分を掛け合わせた 1.22 倍となり、変動応力の増加により蓄積される疲労ダメージはその 3 乗に比例し、1.82 倍となる。これを 3) で計算した実橋の疲労ダメージに掛け合わせる。

5) 評価の結果 試験体の疲労ダメージと板厚低減による変動応力の増加を考慮した実橋の疲労ダメージを、上記の手順で計算し比較したところ、試験体 : 実橋 = $4.23\times 10^{13} : 2.72\times 10^{11}$ となり、試験体 1.0 に対する実橋 100 年供用時の比は 0.0063 (<1.0) という結果が得られた。

6. まとめ

様々な仮定の下での評価であるため、計算方法は今後精査・検討が必要ではあるが、今回、板厚低減の影響で設計上の変動応力が 1.22 倍に増加することを考慮しても、疲労耐久性上問題のない結果が得られた。

参考文献

- 1) 美島ら；鋼製ラーメン橋脚隅角部の弾塑性挙動およびフィレットの効果を考慮した設計法・・・土木学会論文集 A1, Vol.70 No.1, pp.31-50, 2014
- 2) 瀬谷ら；SBHS500 を用いた鋼製橋脚隅角部の疲労耐久性に関する実験的検討，土木学会第 77 回年次学術講演会，I-81，2022.9
- 3) 井口ら；SBHS500 を用いた鋼製橋脚隅角部の疲労耐久性に関する実験的検討(その 2)，土木学会第 78 回年次学術講演会
- 4) 平野ら；SBHS500 を用いた鋼製橋脚隅角部の疲労耐久性に関する実験的検討(その 3)，土木学会第 78 回年次学術講演会
- 5) 大門ら；SBHS500 を用いたフィレットを有する鋼製橋脚隅角部のフランジの・・・，第 25 回耐震シンポジウム講演論文集，pp.163-168，2022.7
- 6) 奥村ら；薄型構造ラーメン隅角部の応力計算について，土木学会論文集，第 153 号，pp.1-18，1968.5
- 7) 公益社団法人 日本道路協会；道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，丸善出版株式会社，2017.11

表 2 公称応力に対する応力の比

		解析値 [N/mm ²]	
		Case1	Case2
公称応力		1.00	
フィレット有	応力参照点	-0.83	-0.84
	応力集中点	-3.56	-4.30
フィレット無		-1.62	-2.99

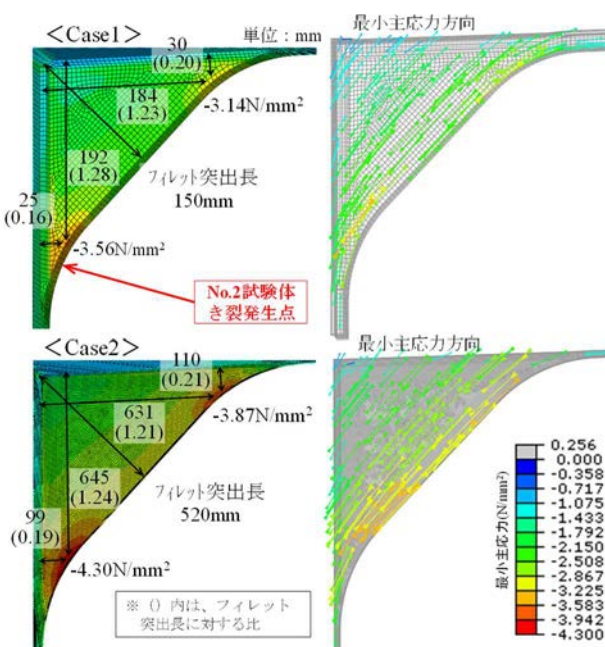


図 3 フィレットの最小主応力分布