

地震時の箱断面鋼製橋脚隅角部における脆性破壊移行確率に関するパラメトリックスタディ

東京工業大学 正会員 ○田村 洋
東京工業大学 正会員 佐々木 栄一

1. 背景と目的

兵庫県南部地震では、鋼製橋脚において基部や隅角部等に脆性破壊を誘発し得る亀裂損傷が多数発生しており、隅角部では実際に脆性破壊の発生事例も報告されている。本研究では、脆性破壊への移行段階に対しても地震時脆性破壊に対する安全性照査法を確立する必要があるとの考えに立ち、門型鋼製ラーメン橋脚の箱断面隅角部を対象に所定の初期亀裂に対する脆性破壊への移行確率の評価を行い、どのような断面諸元の隅角部において脆性破壊への移行が起りやすいのかについて論じる。

2. 修正ワイブル応力と累積破壊確率

本研究では、初期亀裂をアスペクト比 1/6、深さ 1.0mm の半楕円形と仮定し、その位置は、実際の被災状況からはり下フランジと柱内フランジの溶接線端部における溶接止端部（止端半径 0.5mm）とした。今後、異なる亀裂や溶接部の形状の場合についても検討する予定があることから、浅い初期亀裂からの脆性破壊においてこれらの影響を考慮できる修正ワイブル応力 $\sigma_w^{*1)}$ を導入した。そして σ_w^* に基づき脆性破壊発生に関する累積破壊確率 P_f を評価し、所定の隅角変位に達した際の P_f を断面諸元の異なる隅角部間で比較することで、どのような断面諸元の隅角部において脆性破壊への移行が起りやすいのかを検討した。溶接履歴、塑性ひずみ履歴、ひずみ速度が鋼材に与える影響は、低温環境（-100℃と-196℃の2パターンを検討）によって代替的に再現することにした。したがって、 σ_w^* の算定にあたっては-100℃と-196℃におけるSM490YBの材料パラメータを使用している。

3. 対象隅角部と地震時負荷の再現手法

ケース1とする橋脚を図1に示す。本研究ではこの橋脚に、フランジ、ウェブの板幅、板厚が異なる10ケースを加えた合計11ケースを対象に、隅角部の断面諸元の違いの影響を検討した（表1）。各隅角部の地震時変形とその下において発生し σ_w^* の算定に必要な諸量については有限要素解析により求めた。

まず、はり要素で各橋脚全体を再現した全体モデルによって、隅角部のプッシュオーバー解析で与える振動モード形を得た（図2）。その際、そのモード形に従う変形の進行で隅角部に生じる断面力から現行の設計法²⁾で許容される最大の変形量 Δ_d を評価した。この Δ_d に基づき隅角部の変形量 Δ を標準化した値（限界変形倍率と呼び、記号 Δ/Δ_d で表す）を用いることによって断面諸元の異なる隅角部に互いに等価な変形量を導入するためである。つぎに、各隅角部の形状をシェル要素とソリッド要素により詳細に再現した隅角部モデル（図3）に上記の振動モードに従う変形を $\Delta/\Delta_d=4$ 程度まで与えた（プッシュオーバー・ズーミング解析）。溶接部形状は、はりフランジのこぼ面が露出するタイプの板組を想定している。この程度の変形までは隅角部全体としては弾性挙動を示すが、初期亀裂を仮定する位置では局所的に塑性変形が進行するため、解析はSM490Yの応力-ひずみ関係を用いた弾塑性解析とした。

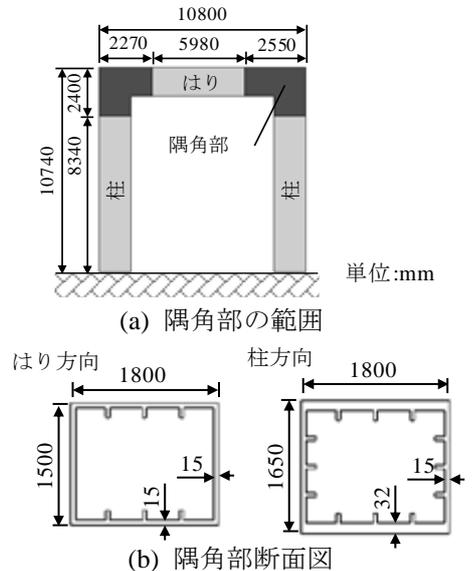


図1 対象橋脚とその隅角部 (ケース1)

表1 対象とした隅角部の断面諸元 (*はケース1と同じ寸法であることを示す)

ケース	目標値	はり側					柱側				
		フランジ		ウェブ		S =	フランジ		ウェブ		S =
		幅 b_f [mm]	厚さ t_f [mm]	幅 b_w [mm]	厚さ t_w [mm]	($b_w t_w$) /($b_f t_f$)	幅 b_f [mm]	厚さ t_f [mm]	幅 b_w [mm]	厚さ t_w [mm]	($b_w t_w$) /($b_f t_f$)
1	-	1800	15	1500	15	0.833	1800	32	1650	15	0.430
2	1.25 b_{fl}	2250	*	*	*	0.667	2250	*	*	*	0.344
3	1.5 b_{fl}	2700	*	*	*	0.556	2700	*	*	*	0.286
4	1.25 b_{wl}	*	*	1875	*	1.042	*	*	2063	*	0.537
5	1.5 b_{wl}	*	*	2250	*	1.250	*	*	2475	*	0.645
6	1.25 t_{fl}	*	19	*	*	0.658	*	40	*	*	0.344
7	1.5 t_{fl}	*	22	*	*	0.568	*	50	*	*	0.275
8	2.0 t_{fl}	*	32	*	*	0.391	*	65	*	*	0.212
9	1.25 t_{wl}	*	*	*	19	1.056	*	*	*	19	0.544
10	1.5 t_{wl}	*	*	*	22	1.222	*	*	*	22	0.630
11	2.0 t_{wl}	*	*	*	32	1.778	*	*	*	32	0.917

そして、ソリッド要素からなり溶接止端形状と初期亀裂を再現した止端部モデル(図4)のズームング解析によって、 σ_w^* の算定に必要な止端部の変形に伴う最大主応力、相当塑性ひずみ、要素体積の履歴を有限要素ごとに得た。応力-ひずみ関係には -100°C と -196°C における同鋼種の実測データを用いた。

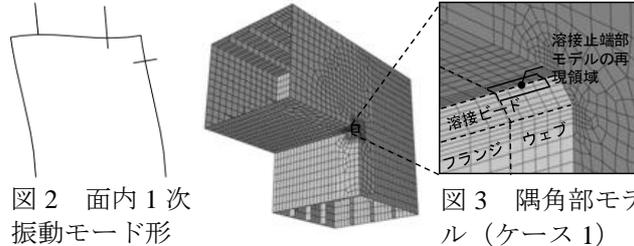


図4 溶接止端モデル(全ケース共通)

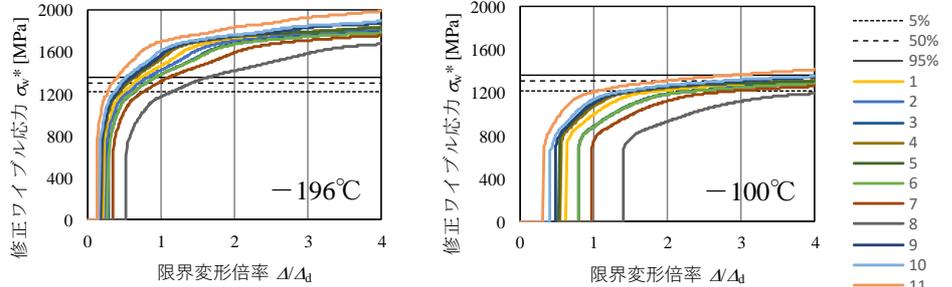


図5 隅角部の変形に伴う修正ワイルド応力履歴

4. じん性レベルと累積破壊確率

図5に -196°C と -100°C の材料パラメータから評価した σ_w^* の履歴を示す。横軸は Δ/Δ_d であり、隅角部変形の増大に付随して σ_w^* が増加する様子を隅角部ごとに示している。図中には $P_f = 5\%$, 50% , 90% に対応する応力値も表している。同図は、 -196°C における破壊じん性レベルの場合、初期亀裂が

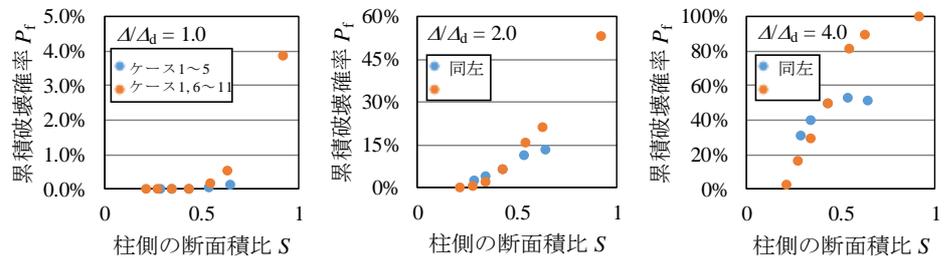


図6 累積破壊確率と隅角部柱側のウェブとフランジの断面積比の関係

発生すれば Δ_d 以下の変形でも多くの隅角部に脆性破壊が発生し得ることを示している。一方、 -100°C のじん性レベルの場合には Δ_d 以下の変形では脆性破壊に至る可能性が極めて小さいことを示唆している。両図に示される結果は、 -196°C レベルまでじん性を低下させてはならず、 -100°C レベルまでの低下に抑えることができれば脆性破壊への移行を回避することも可能であることを示している。

5. 隅角部の断面諸元と累積破壊確率

図6に、 -100°C の材料パラメータから評価した P_f と隅角部柱側のウェブとフランジの断面積比 S の関係を Δ/Δ_d ごとに示す。同図は P_f が S の増加に伴い増加する傾向を示している。また、同じ S の変化においても板幅より板厚の影響の方が大きく、ウェブの板厚がフランジと同等以上の隅角部では脆性破壊発生の可能性が高いことを示している。さらに、第1筆者らが同じ地点の相当塑性ひずみを同様に評価した結果(図7)と比較すると、 Δ/Δ_d が増大すると P_f と S の関係は相当塑性ひずみと S の関係に近づいていることがわかる。このことは変形量が $\Delta/\Delta_d = 4$ 程度に達すると P_f がひずみにより強く支配されることを示唆している。本研究では各隅角部に同量のじん性低下を仮定したが、じん性低下はひずみ速度や塑性ひずみ履歴に依存することから、それも考慮すると実際の P_f のひずみ依存性はさらに高いとも予想される。

6. まとめ

浅い初期亀裂が溶接止端部に発生した箱断面鋼製橋脚隅角部について、地震時脆性破壊に関する累積破壊確率を評価した。その結果、累積破壊確率がウェブとフランジの断面積比に依存し、特にウェブとフランジの板厚比に強く依存することが示された。ウェブの板厚がフランジの板厚に対して大きな隅角部においては高い累積破壊確率が示されたが、破壊じん性の低下を抑えることで脆性破壊への移行を回避することができると考えられる。

参考文献

- 1) Bordet et al.: A new statistical local criterion for cleavage fracture in steel. Part I: model presentation, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 72, pp. 435-452, 2005.
- 2) 奥村ら: 薄肉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.
- 3) 田村ら: 地震時における鋼製橋脚隅角部の負荷集中に関する感度解析, 鋼構造年次論文報告集, 第21巻, pp. 777-784, 2013.

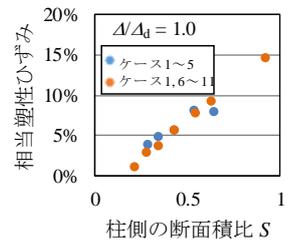


図7 ひずみと隅角部柱側Sの関係³⁾