

塑性拘束による応力上昇に着目した 鋼製橋脚の地震時脆性破壊発生に関する解析的検討

横浜国立大学大学院 学生員 ○田村 洋
横浜国立大学大学院 正会員 佐々木 栄一
横浜国立大学大学院 フェロー会員 山田 均
横浜国立大学大学院 正会員 勝地 弘

1. 背景と目的

兵庫県南部地震では、複数の鋼構造物の塑性変形箇所にて脆性き裂が生じた(写真-1)。地震時脆性破壊と呼ばれるこのような形式の破壊に関して、既往の研究では、まずひずみ集中部に微小なき裂が先行発生し(以下、先行き裂と呼ぶ)、その進展の過程で脆性き裂に移行し不安定成長に至るというシナリオが想定されている。先行き裂の脆性き裂への移行を、先行き裂先端からの脆性破壊の発生と捉えた場合、これは破壊力学で仮定される潜在き裂先端を起点とする脆性破壊の発生とよく似ている。破壊力学では、脆性破壊の発生は、き裂先端に発生する応力と材料の破壊靱性によって支配されると考えられている。しかしながら、これまでの地震時脆性破壊に関する研究においては、材料の破壊靱性に関しては地震時に導入される塑性ひずみ履歴による材料脆化に着目した検討などがなされているものの、先行き裂先端に発生する応力に着目したものは十分行われていない。先行き裂発生領域は構造物の塑性変形箇所に位置しており、発生時には塑性拘束の影響で高い応力が生じていたと予想される。そこで本研究では、実際に地震時脆性破壊が発生した鋼製橋脚を対象に、塑性拘束を再現し得るソリッド要素を用いたFEM弾塑性解析で先行き裂発生領域の応力状態を検討し、先行き裂が脆性き裂に移行に応力状態が関与している可能性を検討した。



写真-1 鋼製橋脚に発生した脆性き裂

2. 対象橋脚と塑性拘束を再現するための解析モデル

対象橋脚は写真-1に示した箱形断面鋼製門型橋脚とした。震災後に行われた損傷部の破面観察により、先行き裂になったと考えられる0.7mm程度の深さの延性き裂が隅角部の溶接止端部にあったことが明らかになっている⁽¹⁾。その止端部の止端半径は、文献1の掲載写真から判断する限り1mm程度である。

解析では汎用解析プログラム Abaqus Version 6.7 を用いた。ブーミング手法を適用し、橋脚全体から先行き裂の発生した溶接止端部まで段階的にモデル化部分を絞っていくことで、地震波形を与えた際の橋脚全体の挙動、隅角部の板組みの影響、接合部形状の影響を溶接止端部の解析に継承した(図-1)。地震波形は兵庫県南部地震時にJR鷹取駅で観測されたものを基に、文献[1]の手法に従い実現象に近づけるため振幅を1.6倍に補正したもの(最大加速度1000gal)を用いた。溶接止端部の解析に当たっては、先行き裂発生点が溶接止端部に位置し、その応力分布が止端形状に大きく依存すると予想されたため、5パターンの止端半径(0.5mm, 1.0mm, 2.0mm, 5.0mm, 20mm)のモデルを用意し詳細に検討した。材料の真応力-真ひずみ関係は図-2に示すものを用いた。

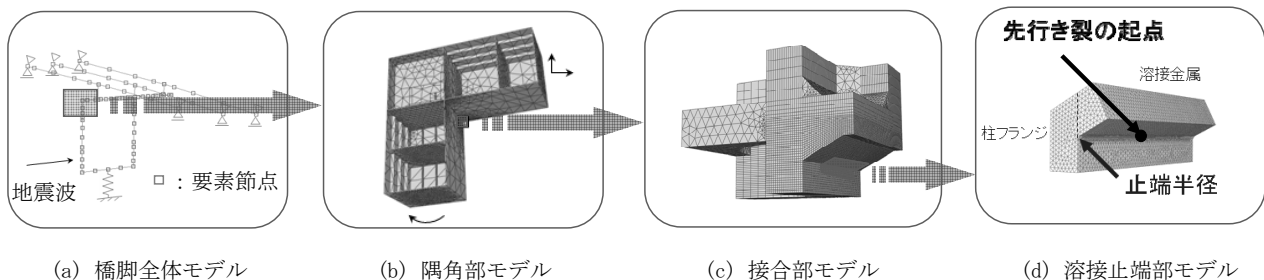


図-1 対象橋脚の解析モデル

キーワード 地震時脆性破壊, 鋼製橋脚, 塑性拘束, 溶接止端半径

連絡先 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7 横浜国立大学大学院工学府構造研究室 Tel 045-339-4041

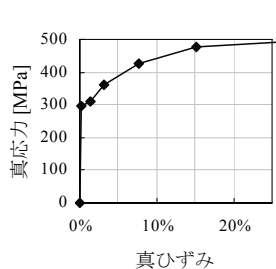


図-2 解析に使用した
真応力-真ひずみ関係

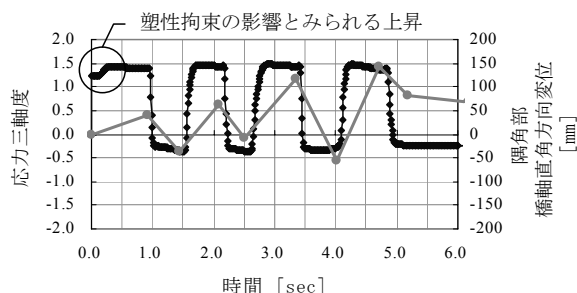


図-3 隅角部と応力三軸度の変化

表-1 先行き裂先端該当地点における
応力三軸度の上昇

止端半径 [mm]	降伏前	最大変位 発現時	変化量
0.5	1.55	1.80	0.24
1.0	1.44	1.58	0.14
2.0	1.36	1.44	0.08
5.0	1.24	1.31	0.08
20	1.11	1.18	0.07

3. 先行き裂発生点における拘束度変化の特徴

地震時における隅角部の橋軸直角方向の変位履歴（図-1 に示す橋脚全体モデルの解析結果に基づく）と先行き裂発生点における応力三軸度履歴（同図に示す隅角部モデルの解析結果に基づく）を図-3 に示す。応力三軸度は局所的な拘束の高さを表すパラメータで、最大主応力を Von Mises 相当応力（以下、単にミーゼス応力と呼ぶ）で除したものとする。図-3 において、1 回目の隅角部の変形のサイクルでは応力三軸度の大きな上昇が認められるが、その上昇が同箇所の塑性化と同時に生じているため、塑性拘束の発現を表しているものと考えられる。また、各サイクルで応力三軸度は隅角部の変形量にほぼ依存せず、同様の傾向で変化していることが分かる。そこで、以降 1 回目のサイクルにおける最大変位発生時に着目し、拘束度とその影響についての議論を進める。

4. 先行き裂進展方向の拘束度・応力分布と止端半径の影響

図-4 に、1 回目のサイクルの最大変位発生時における先行き裂発生点のき裂進展方向の応力三軸度分布を止端半径ごとに示す。同図より先行き裂の先端位置に該当する深さ 0.7mm 地点では止端半径によって応力三軸度の値が大きく異なり、半径が小さい方がその値が高いことが分かった。表-1 は、同地点での降伏前と最大変位発生時の応力三軸度分布の変化を示すが、半径が小さい方が降伏前の値が大きく、またその上昇も大きいことが分かる。これより、半径が小さい方が想定される先行き裂先端における初期の拘束は高く、かつ塑性拘束の発現による拘束の増分も大きかったと考えられる。図-4 と同様に、図-5 に最大変位発生時における最大主応力分布を示す。最大主応力はミーゼス応力と応力三軸度の積として表現できるが、応力三軸度分布の影響を受け最大主応力分布にも違いが認められる。すなわち、半径が小さい方が表面からき裂先端方向に向かって値が大きく上昇しており、先行き裂が進展するにつれ先端における脆性破壊が発生しやすい状況にあると分かる。逆に、半径が大きい場合、先行き裂が発生しても脆性き裂への移行が起こらない可能性もあると推測できる。

5. 結論

- 1) 地震時の応力三軸度の変化において、塑性拘束の発現を表すと見られる値の上昇を確認した。
- 2) 隅角部の変形に伴って応力三軸度も変化するが、各サイクルにおけるその変化量は隅角部の変形量にほとんど依存しなかった。
- 3) 止端半径が小さい場合先行き裂先端における拘束が高く、塑性拘束が発現後その傾向がより顕著となった。
- 4) 3) の結果、止端半径が小さい場合ほど、先行き裂先端における最大主応力の値が高く、脆性破壊が発生しやすい状況にあることが明らかになった。
- 5) 止端半径が大きい場合、先行き裂が発生しても脆性き裂への移行が起こらない可能性がある。

参考文献

- 1) 岡下勝彦, 大南亮一, 道場康二, 山本晃久, 富松実, 丹治康行, 三木千壽: 兵庫県南部地震による神戸港湾幹線道路 P75 橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討; 土木学会論文集 No. 591/I-43, pp. 243-261/1998 年 4 月

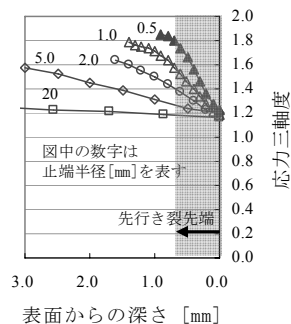


図-4 き裂進展方向の
応力三軸度分布

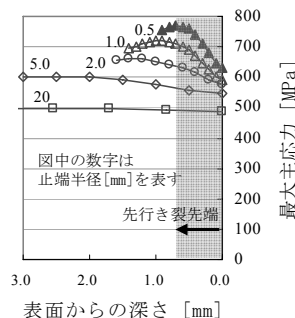


図-5 き裂進展方向の
最大主応力分布