

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2017

課題番号：25820199

研究課題名(和文) 鋼構造物における地震時脆性破壊発生機構の解明と汎用性の高い限界状態評価手法の提案

研究課題名(英文) Proposal of versatile evaluation method for occurrence of Brittle fracture during earthquakes in steel structures based on the further understanding of its mechanism

研究代表者

田村 洋 (Tamura, Hiroshi)

東京工業大学・環境・社会理工学院・助教

研究者番号：10636434

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、鋼構造物において発生し得る地震時脆性破壊について新たな破壊発生限界照査手法を提案することが目的であった。そのために、WES2808等で提案されている既存の手法では、深さ1mm程度以下の浅い初期亀裂からの脆性破壊の発生限界の予測に適さないため、そのような破壊挙動にも対応できる照査手法を提案することが重要な検討事項であった。様々なアプローチを検討した結果、新たに修正ワイブル応力を導入することにより、地震時脆性破壊の発生に關与する多くの因子を考慮することが可能となり、浅い初期亀裂からの破壊も予測し得ることを示した。そして、そのアプローチの応用例として鋼製橋脚の耐震設計実装への一案を示した。

研究成果の概要(英文)：This study was done with the aim of proposing a new evaluation method of brittle fracture during earthquakes which may occur in steel structures. Especially, we focused on the treatment of brittle fracture transition from shallow initial cracks because those fracture were not considered in existing design cords or guidelines, for example WES 2808. On the basis of trials of some fracture mechanics approaches, it was shown introducing modified Weibull stress approach is effective to consider some dominant relative factors and to estimate critical condition of brittle fracture transition during earthquakes including those from shallow initial cracks. Based on the finding, an example of simplified evaluation procedure for brittle fracture during earthquakes in beam to column connections of steel bridge piers was also provided.

研究分野：鋼構造

キーワード：地震時脆性破壊 修正ワイブル応力 鋼製橋脚

### 1. 研究開始当初の背景

Northridge 地震 (1994) や兵庫県南部地震 (1995) では、多くの鋼構造物に設計想定外の脆性破壊 (以下、地震時脆性破壊) が発生し、図 1 に示すような致命的損傷をもたらした<sup>1)</sup>。地震時脆性破壊は、急速な亀裂進展によって鋼部材の耐力喪失を招く重大な破壊現象であり、発生機構の明確化が重要な課題となっている。

日本溶接協会は、解析的アプローチを援用し破壊実験を省力化した設計基準 WES2808<sup>2)</sup> を提案している。しかし、以下で述べる浅い初期亀裂からの脆性破壊移行 (鋼材におけるへき開破壊発生) については、基礎研究が立ち遅れており未だ取り扱えていない状況にあった。多様な構造物の安全性照査のため、浅い亀裂からの破壊をも解析的に扱える発生限界評価手法の確立と、その前提として破壊発生機構の明確化が求められていた。

地震時脆性破壊は、地震応答下で溶接部等に発生する、図 2 に示すような微小な初期亀裂を起点として発生する<sup>2)</sup>。損傷事例が最も多かった鉄骨建築物接合部においては比較的深くまで進展した初期亀裂を起点として破壊が発生していることから、深さ 1mm 以上の亀裂を有する接合部の脆性破壊移行条件が精力的に検討されていた。南<sup>3)</sup>は、脆性破壊移行条件が材料固有のワイブル応力 (脆性破壊における体積効果を確率論的に考慮した局所的破壊駆動力の評価パラメータ) で説明されるとの仮定のもと、種々の荷重条件・溶接継手における破壊条件を解析的に検討し、その成果が前述の WES2808 の基盤となっている。

しかしながら、地震時の繰返し塑性変形によりじん性劣化を被った溶接部では、深さ 1mm 未満の初期亀裂からでも脆性破壊に至ることが鋼製道路橋脚の損傷事例から確認され、問題となっている<sup>4)</sup>。研究代表者らの過去の研究では、そのような浅い亀裂を対象として脆性破壊移行時の限界ワイブル応力を評価し、亀裂が浅くなるに従い限界ワイブル応力は低下するという、従来報告されていなかった事実が明らかにされていた<sup>5)</sup>。このように、WES2808 の適用範囲外となる浅い亀裂からの脆性破壊移行条件をその発生機構から別途詳細に検討することが求められていた。

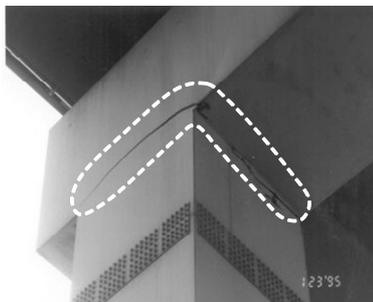


図 1 地震時脆性破壊による鋼製橋脚隅角部の損傷<sup>1)</sup>

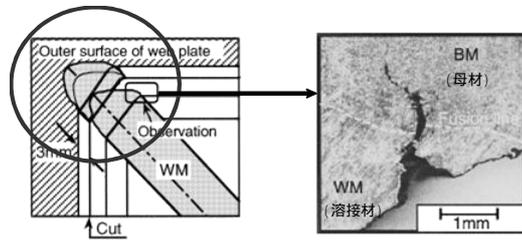


図 2 溶接部における初期亀裂の発生状況 (文献 2) の図に加筆)

- 1) 渡邊英一, 前川義男, 杉浦邦征, 北根安雄: 鋼橋の被害と耐震性, 土木学会誌, Vol. 80, No. 8, 1995.
- 2) 大畑充, 横田昌樹, 広野正彦, 安田修, 豊田政男: 繰返し荷重下での構造用鋼の延性き裂発生クライテリア, 溶接学会論文集, 第 21 巻, 第 4 号, pp. 592-602, 2003.
- 3) 南二三吉: ワイブル応力を用いた破壊評価手法—Part I, 溶接学会誌, 第 75 巻, 第 5 号, pp. 416-446, 2006.
- 4) 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.
- 5) 田村洋, 佐々木栄一, 山田均, 勝地弘: 溶接部の止端形状が地震時脆性破壊の発生限界状態に及ぼす影響, 鋼構造論文集, 第 20 巻, 第 77 号, pp. 1-14, 2013.

### 2. 研究の目的

上述の背景から、本研究では地震時脆性破壊に関してより広範な破壊挙動を予測できる評価手法を確立することを目的に、以下の検討を行うこととした。

- (1) 破壊発生機構の明確化  
浅い初期亀裂先端の負荷状態を評価し、脆性破壊移行の支配パラメータならびに限界負荷状態を明確化する。具体的には、亀裂先端の応力、塑性ひずみ、鋼材の破壊じん性等のパラメータの影響について検討する。
- (2) 脆性破壊移行条件の特定  
浅い亀裂からの脆性破壊を解析的に扱うための移行条件の定式化を行う。そして、その適用範囲についても検討する。
- (3) 破壊発生限界評価手法の提案  
亀裂先端の局所的な負荷状態と耐震設計で用いられるパラメータの対応を検討し、実務レベルで使用できる簡便な発生限界評価手法を提案する。簡便化にあたっては、耐震設計で用いられている断面力をベースの手法とすることを目指す。

### 3. 研究の方法

上述の目的を達成するため、本研究は次の (1)~(4)の方法によって遂行された。

- (1) 切欠き付き小型供試体の低温破壊実験

地震時の浅い初期亀裂先端における負荷状態を再現するため、弾塑性有限要素解析を援用して設計した図3に示す供試体を使用した。初期亀裂が溶接止端部に発生することを想定し、止端形状による拘束を切欠き（切欠き半径：0.5mm または 5.0mm）により再現し、予備荷重により切欠きを起点として浅い疲労亀裂（深さ約 0.3mm～3mm）を導入することで初期亀裂を再現した。供試鋼は SS400、SM490YB、SM570Q の 3 種類とし、溶接熱、地震時の塑性ひずみ履歴、ひずみ速度等による破壊じん性低下の影響を低温環境により再現した。すなわち、じん性が最低レベルまで低下する -196 と、浅い亀裂からの脆性破壊における延性-脆性遷移温度に近い -100 の 2 パターンを設定した。種々の条件の組み合わせにより合計 121 体の供試体の低温破壊実験（図4）を行い、へき開破壊による供試体破断時の限界荷重・変位データを収集した。

(2) 低温破壊実験時の応力・ひずみ解析

破壊実験で把握することのできない供試体内部の初期亀裂先端付近の応力・ひずみ分布を弾塑性有限要素解析によって再現した。解析では図5に示すような 1/4 モデルを用い、荷重冶具と供試体とのすべり挙動も考慮した。材料データとしては各試験温度における供試鋼の引張実験から得られた応力-ひずみ関係データを使用した。

(3) 破壊支配パラメータの特定

各供試体の限界状態における応力・ひずみ分布の解析結果から、限界状態を説明し得る破壊支配パラメータの検討を行った。拘束度等を考慮した独自の CTOD 値を含む複数のパラメータを検討した結果、Bordet らの修正ワイブル応力<sup>6)</sup>が検討したなかで最も説明力の高いパラメータであることがわかった。そこで、初期亀裂深さ、ひずみ速度、塑性ひずみ履歴が異なる場合の破壊の予測可能性等について、修正ワイブル応力を対象として詳細に検討することとした。

(4) 簡便な破壊発生限界評価手法の提案

本研究により、一部の鋼材について修正ワイブル応力に基づく脆性破壊移行限界特性値（限界修正ワイブル応力）が得られ、解析的に破壊限界を評価する手法が示されたが、修正ワイブル応力の算出には、高度かつ煩雑な弾塑性有限要素解析が必要となる。本研究では、修正ワイブル応力評価のために、ソリッド要素からなり初期亀裂先端の平均要素サイズを 0.03mm とした詳細な 3 次元モデル（図7）を使用しているが、個々の鋼部材の耐震設計においてそのような詳細モデルの解析を行うことは現実的ではない。そこで、実際に地震時脆性破壊も発生している鋼

製橋脚隅角部を対象に、橋脚の断面力と想定破壊起点位置の修正ワイブル応力の関係性をデータベース化し、耐震設計で用いられている断面力ベースでありながら浅い初期亀裂からの脆性破壊にも対応できる破壊発生限界評価手法を提案することとした。

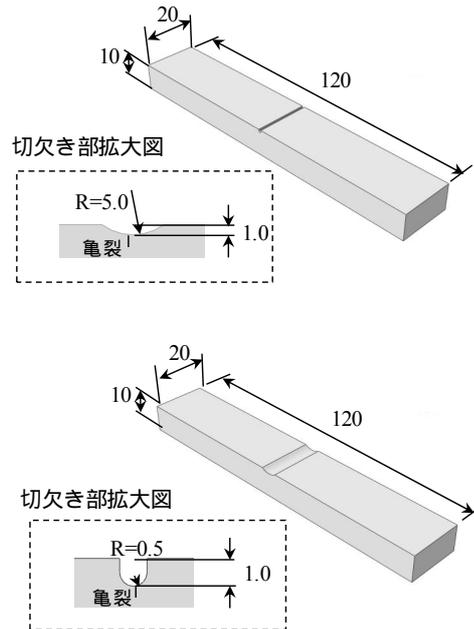


図3 切欠き付き小型供試体の形状と寸法

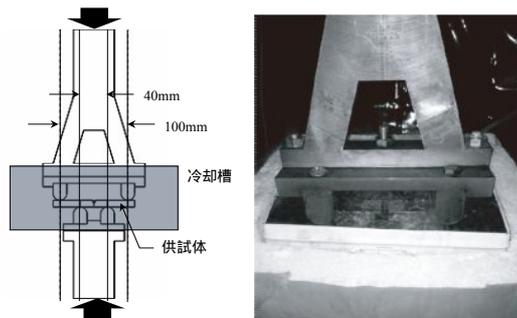


図4 低温破壊実験のセットアップと状況

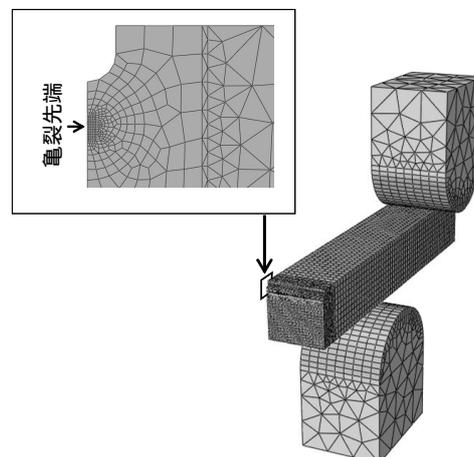


図5 有限要素解析でを使用したモデルの一例

- 6) Bordet, S. R., Karstensen, A. D., Knowles, D. M. and Wiesner, C. S.: A new statistical local criterion for cleavage fracture in steel. Part I: model presentation, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 72, pp. 435-452, 2005.

#### 4. 研究成果

上述の方法により得られた本研究の成果は次の通りである。

- (1) 地震時脆性破壊発生予測への修正ワイブル応力の適用性確認

Bordet らの修正ワイブル応力に若干の修正を加えることで、地震時脆性破壊において想定される浅い初期亀裂からの脆性破壊にも対応した破壊予測が、修正ワイブル応力によって可能であることを示した。

図 6 は、SS400 の供試体における破断時の限界修正ワイブル応力が、約 0.3mm ~ 約 2.5mm の異なる初期亀裂深さの場合において、また -196 と -100 の異なる温度（破壊じん性レベル）において、同等の値であることを示している。限界修正ワイブル応力に至るまでの修正ワイブル応力は載荷点変位の増加に付随して単調に増加する。これらのことより、初期亀裂深さや温度（破壊じん性レベル）が異なる場合においても、修正ワイブル応力を用いることによって、脆性破壊移行限界が鋼材ごとに同定した限界修正ワイブル応力によって予測し得ることが明らかとなった。同様のことを SM490YB と SM570Q に対しても確認することができた。また、地震時脆性破壊で想定される条件下でひずみ速度や塑性ひずみ履歴が異なる場合においても同一の限界修正ワイブル応力が適用できる可能性も示された。

シャルピー吸収エネルギー値や CTOD 値、ワイブル応力といった従来の指標で評価した場合の脆性破壊移行限界値は、初期亀裂深さだけでなく温度、ひずみ速度、塑性ひずみ履歴など多くの因子に依存するものであり非常に多くの材料試験が必要とされたが、これらの因子への依存性が低いと考えられる限界修正ワイブル応力は地震時脆性破壊の統一的な予測手法確立に適した指標であるといえる。限界修正ワイブル応力が初期亀裂深さ、温度、ひずみ速度、塑性ひずみ履歴によらないのは、修正ワイブル応力の評価過程でこれらの諸因子が破壊確率に与える影響を解析的に考慮できる指標であるためと考えられる。

- (2) 3 種の供試鋼に関する限界修正ワイブル応力の特定

121 体の供試体の低温破壊実験と弾塑性有限要素解析結果に基づくキャリブレーションにより、修正ワイブル応力算定

のための材料パラメータと、脆性破壊移行限界評価のための限界修正ワイブル応力を供試鋼ごとに同定した。詳細は文献<sup>7)</sup>に譲るが、累積破壊確率 5% (P(0.05)) に対応する限界修正ワイブル応力については、SS400 で 888MPa, SM490YB で 1216MPa, SM570Q で 850MPa であった。この値は、各鋼種 (JIS 規定) の限界修正ワイブル応力のある程度代表し得るものと考えているが、今後の実証的研究の実施が望まれる。

- (3) 簡便な破壊発生限界評価手法の提案

本研究で提案した箱断面鋼製橋脚隅角部における破壊発生限界評価手法は、現行の設計における照査で使用されており、隅角部周辺の断面力から算出可能なフランジの平均応力<sup>8)</sup>に着目したものである。すなわち、橋脚の骨組モデルの解析に基づき得られる地震時のフランジの平均応力から、本研究で得た図 7 に示す脆性破壊移行に関する累積破壊確率とフランジの平均応力の関係性により、脆性破壊発生限界を解析的に評価することができる。破壊じん性は -100 のレベルを想定している。本研究では、SM490YB を使用した場合の標準的な門型ラーメン橋脚隅角部 (図 8) を対象に、複数の初期亀裂深さ、溶接止端半径の場合について図 7 のような関係を得ることができた。

ハンチを有する逆 L 型橋脚の箱断面隅角部についても同様の検討を行った。その結果、破壊じん性レベル、止端半径、初期亀裂深さが同じ場合でも、門型ラーメン橋脚隅角部とは累積破壊確率とフランジの平均応力の関係性が異なることが明らかとなった。本研究で提案に至った破壊発生限界評価手法を鋼製橋脚隅角部の耐震設計に実装されるために、今後更なる基礎データの蓄積を進めていく予定である。

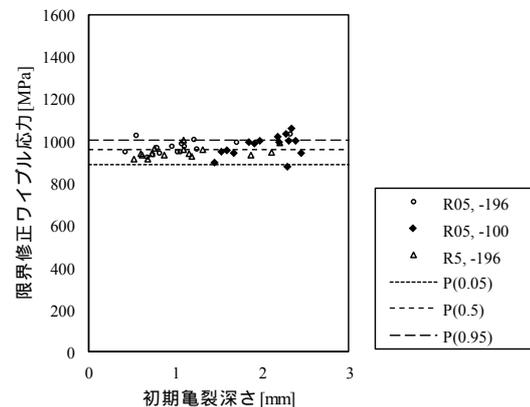


図 6 供試体の限界修正ワイブル応力 (SS400)

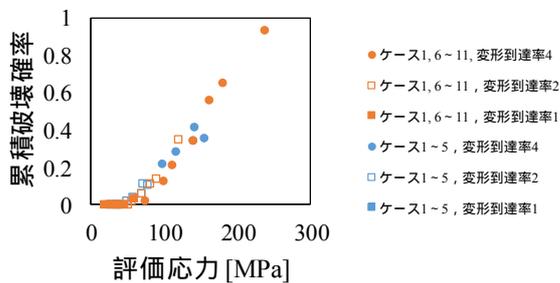


図 7 種々の断面・変形量の門型ラーメン橋脚隅角部におけるフランジの平均応力と累積破壊確率の関係

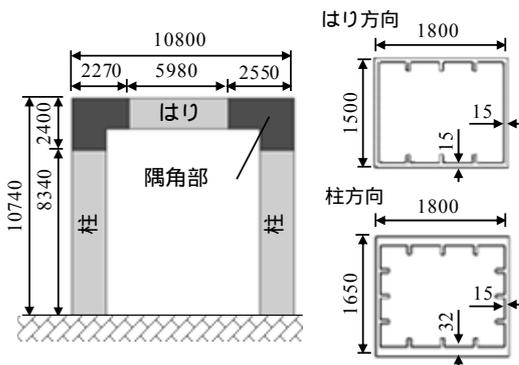


図 8 対象とした鋼製門型ラーメン橋脚の一例 (図 7 におけるケース 1 に対応)

- 7) 田村洋, 佐々木栄一, 富永理史: 修正ワイブル応力に基づく構造用鋼材の破壊じん性評価, 鋼構造年次論文報告集, 第 24 巻, pp. 620~627, 2016.
- 8) 奥村敏恵, 石沢成夫: 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.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

- 1) 田村洋, 佐々木栄一, 富永理史: 修正ワイブル応力に基づく構造用鋼材の破壊じん性評価, 鋼構造年次論文報告集, 第 24 巻, pp. 620~627, 2016, 査読あり.
- 2) 田村洋, 佐々木栄一: 修正ワイブル応力に基づく鋼部材の地震時脆性破壊発生限界の評価, 土木学会論文集 A1, No. 72, Vol. 2, pp. 173-185, 2015, 査読あり.

[学会発表](計 2 件)

- 1) 田村洋, 佐々木栄一, 富永理史: 修正ワイブル応力に基づく構造用鋼材の破壊じん性評価, 鋼構造シンポジウム 2016, S-13, 東京, 2016.
- 2) 田村洋, 佐々木栄一: 地震時の鋼製橋脚箱

断面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, 土木学会年次学術講演会, I-665, 福岡, 2017.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

なし

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村 洋 (Tamura Hiroshi)

東京工業大学・環境・社会理工学院・助教

研究者番号: 10636434

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし