

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04660

研究課題名（和文）ひずみ速度制御型の高効率な修正ワイブル応力同定試験の開発と溶接部への適用

研究課題名（英文）Development of Strain Rate Controlled Highly Efficient Modified Weibull Stress Identification Test and Application to Weld Joints

研究代表者

田村 洋（Tamura, Hiroshi）

横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・准教授

研究者番号：10636434

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：溶接部の浅い初期亀裂からの脆性破壊への耐性分布を修正ワイブル応力によって詳細に評価するために効率的な材料試験方法の開発を進めた。具体的にはまず、シャルピー衝撃試験を対象に非線形動的解析法を開発した。この解析的と修正ワイブル応力の適用により低温域において試験結果の再現が可能であり、修正ワイブル応力アプローチのひずみ速度制御型試験への適用性を支持する結果を得た。つぎに、高効率な修正ワイブル応力算定時の材料パラメータ同定法として、形状等をパラメータとした様々な供試体を対象とした衝撃実験結果から材料パラメータを同定する手法の構築を試みた。その結果、妥当な精度で再同定できる供試体形状を解析的に発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鋼部材における地震時脆性破壊の多くは溶接部を起点として発生することが知られている。溶接部は熱履歴の影響で破壊じん性をはじめとした材料特性が均一となっておらず複雑に分布している。このような溶接部を起点とする地震時脆性破壊の発生を修正ワイブル応力によって予測するためには、修正ワイブル応力を計算するための各材料パラメータを溶接部の部位ごとに高密度に同定する必要がある。ひずみ速度制御型試験によりこのプロセスを効率化することができれば、溶接部を起点とする地震時脆性破壊の発生予測の実現につながるため、本研究で供試体形状を絞り込むことができたことは重要な成果であるといえる。

研究成果の概要（英文）：An efficient material testing method was developed to evaluate the spatial distribution of resistance to brittle fracture from shallow initial cracks in welds by means of modified Weibull stress. Specifically, a nonlinear dynamic analysis method was first developed for Charpy impact tests. This analytical method and the application of the modified Weibull stress allowed reproduction of test results at low temperatures, and verified the applicability of the modified Weibull stress approach to strain-rate-controlled tests. Next, as a highly efficient method for identifying material parameters for the calculation of modified Weibull stress, it was attempted to develop a method for identifying material parameters from the results of impact tests on various specimens with different geometries and other parameters. As a result, specimen geometries that can re-identify material parameters for the modified Weibull stress calculation with reasonable accuracy were found analytically.

研究分野：構造工学および地震工学関連

キーワード：地震時脆性破壊 修正ワイブル応力 累積破壊確率 シャルピー衝撃試験

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、接合部等に致命的損傷をもたらした[1]。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であるが、破壊起点位置の局部的かつ複合的な発生因子 (図 1) に支配されるため、発生条件の解明が遅れている。日本溶接学会の設計指針 WES2808 では解析的アプローチを採用した破壊評価手法が提案されているが、建築鉄骨が主対象であり、鋼製橋脚をはじめとする土木構造物では適用されていない。応募者らは、鋼製橋脚で発生している深さ約 1mm 以下の浅い初期亀裂からの脆性破壊にも適用可能な、修正ワイブル応力に基づく破壊限界評価手法を構築した[2],[3]。修正ワイブル応力は、図 2 の諸因子の影響を応力値に換算して考慮することができるため、破壊限界値たる限界修正ワイブル応力は材料ごとに一定値であり、土木構造物で想定される複合的かつ多様な条件を考慮するのに適している。しかし、確率的な破壊指標であるため、その評価には多くの破壊実験が必要であり、いまの溶接部の修正ワイブル応力評価は破壊じん性が想定最低レベルまで低下した鋼母材に置き換えた評価に留まっている。

地震時脆性破壊の初期亀裂は溶接部をはじめとする形状不連続部に多く発生するため、初期亀裂が浅い場合には、その先端が溶接部を抜け出る前に (図 2) 溶接部の特性に支配されながら脆性破壊に移行する[1]。それでは、浅い初期亀裂からの脆性破壊に対する溶接部の耐性 (広義の破壊じん性ともいえるが、広く知られている深い初期亀裂について定義される破壊じん性と区別するためこのように呼ぶ) の実態はどのようなものであろうか。母材と溶接金属の異種材料が熱影響を伴いながら連続的に変化する溶接部の材料特性分布は複雑であり、浅い初期亀裂からの脆性破壊に対する耐性の分布も同様ではないと考えられる。各部の耐性は母材と同様に限界修正ワイブル応力によって評価できると考えられるが、現在の修正ワイブル応力評価では上述の通り、破壊じん性を一様に著しく低下させた母材によって溶接部を置き換えている。したがって、実溶接部における限界修正ワイブル応力分布を解明することで地震時脆性破壊限界が究明され、浅い初期亀裂の脆性破壊移行限界をより合理的に評価できる可能性がある。ただし、材料特性が連続的に変化する部位での修正ワイブル応力同定には数多くの破壊実験が必要なため、試験法の効率化が必須となる。

2. 研究の目的

本研究では、溶接部の浅い初期亀裂からの脆性破壊への耐性分布を修正ワイブル応力によって詳細に評価するために効率的な材料試験方法を開発し、その実態を明らかにすることを目的とする。開発にあたっては、従来の試験方法では鋼材の破壊条件を様々な破壊じん性レベルで評

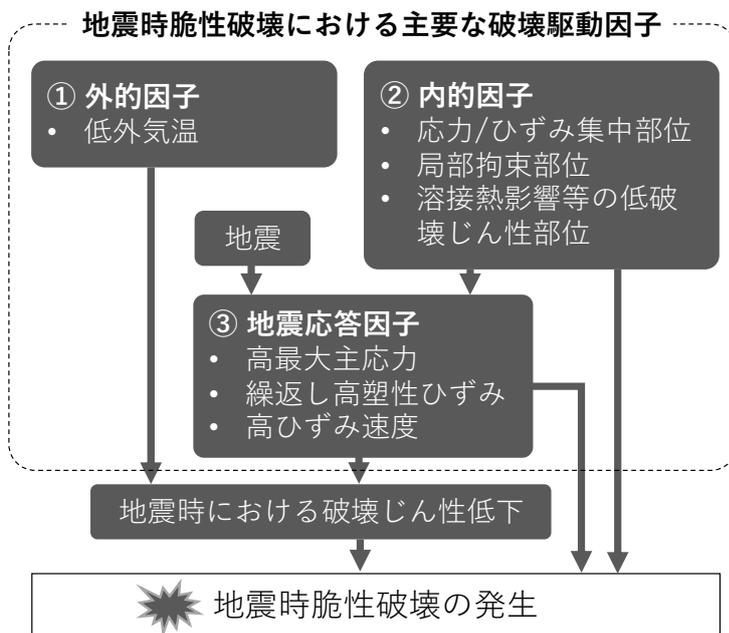


図 1 地震時脆性破壊における主要な破壊駆動因子

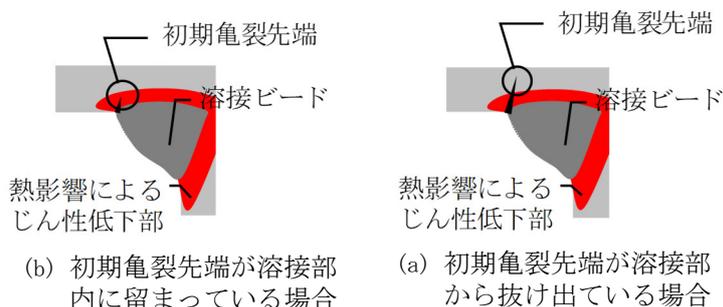


図 2 浅い初期亀裂の先端位置と溶接部構造

価するために温度制御を採っていたのに対し、新たにひずみ速度制御によってこれを実現することを検討する。鋼材の破壊じん性に及ぼす温度効果とひずみ速度効果の可換性については従来から知られていたが[4]、再現される破壊じん性がひずみ速度分布に応じて様とはならないためひずみ速度制御の試験は用いられてこなかった。しかし、修正ワイブル応力を用いれば既知のひずみ速度分布が破壊じん性に及ぼす影響が考慮され、不等分布でも破壊条件を検討できることが理論的に示されている。ひずみ速度制御は、温度制御（ $-100\sim-196^{\circ}\text{C}$ ）と異なり大掛かりな保温装置は不要で、試験片形状や载荷速度によって高い確度で制御でき、载荷時間も大幅に短縮できるなどメリットが多い。また、高ひずみ速度における破壊じん性の評価値であるシャルピー吸収エネルギーと限界修正ワイブル応力の関係も明らかにできると考えている。

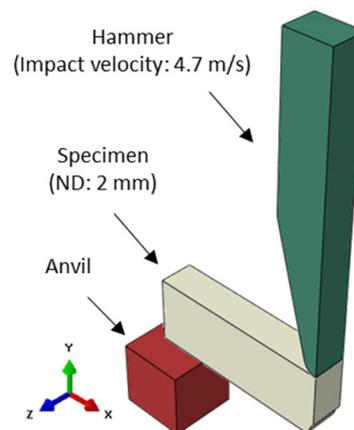


図3 解析モデルの概形

3. 研究の方法

(1) 非線形動的解析法の開発

数値解析による試験時の動的応力・ひずみの推定手法を検討した。具体的には、3種類の供試鋼（鋼種はそれぞれSS400, SM570Q, SM490YB）のシャルピー衝撃試験を対象に、有限要素モデルの陽解法により試験の再現を試みた。解析には汎用解析プログラムAbaqus2019を用い、材料非線形性、境界非線形性、幾何学的非線形性を考慮した複合非線形解析を実施した。図3に解析モデル（1/4モデル）の概形を示す。各供試鋼の試験時における塑性特性の温度・ひずみ速度依存性は、日本溶接協会のWES2808に示されている降伏応力と引張強さに関する換算式と内挿・外挿（引張強さ以降）補間によって考慮することとした。

(2) 修正ワイブル応力アプローチの衝撃問題への適用性確認

本研究で導入したシャルピー衝撃試験により供試鋼の衝撃試験を各温度帯で実施し、温度ごとの吸収エネルギー量を評価した。そして上述の解析方法で各試験温度の再現解析を実施し、その出力値と供試鋼について既知の修正ワイブル応力パラメータ[2, 3]を用いて、脆性破壊の発生時点を予測し、その時点における塑性散逸エネルギー量を吸収エネルギーとして試験結果と比較することとした。そして、その整合性から修正ワイブル応力アプローチの衝撃問題への適用性を確認することとした。

(3) ひずみ速度制御による修正ワイブル応力パラメータ同定用の供試体の開発

衝撃問題への適用性が確認された修正ワイブル応力アプローチを用いて、修正ワイブル応力パラメータをひずみ速度制御型の衝撃载荷試験によって取得するための供試体の開発を行うこととした。具体的には、供試体の破断時の破壊起点に発生する拘束度に差異が生じるよう切欠き形状を様々に変えた供試体セットを考案し、各供試体に関して修正ワイブル応力から想定される脆性破壊が発生すると予想される時点の吸収エネルギーを解析的に評価することで、修正ワイブル応力パラメータが未知の供試鋼に関してその供試体セットを用いて様々な拘束度で吸収エネルギーを実験的に測定し、その測定結果から修正ワイブル応力パラメータを同定することを考えた。

4. 研究成果

論文投稿を予定しているため研究成果を追記した研究成果報告を後日再提出することを希望します

参考文献

- [1] 岡下勝彦ら：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.
- [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，第 71 巻，第 2 号，pp. 173-185，2015.
- [3] H. Tamura et al.：Modified-Weibull-stress-based evaluation of brittle fracture occurrence during earthquakes in steel members，Engineering Fracture Mechanics，Vol. 202，No. 15，pp. 375-393，2018.
- [4] 田川哲哉ら：動的破壊靱性解析へのローカルアプローチの適用とその問題点，日本造船学会論文集，第 185 号，pp. 309-317，1999.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Jamil Aqsa, Hiroshi Tamura
2. 発表標題 MODIFIED WEIBULL STRESS (MWS) based analytical study to investigate the effect of specimen's geometry on Charpy impact energy
3. 学会等名 3rd IABSE Young Engineers Colloquium in East Asia (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 A. Jamil, H. Tamura, H. Katsuchi, C. He
2. 発表標題 Analytical Evaluation of DBTT in Charpy Impact Test for Structural Steels
3. 学会等名 International Association for Bridge Maintenance and Safety 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------