

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月19日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760340

研究課題名（和文） 応力多軸性に着目した鋼構造物の地震時脆性破壊制御に関する研究

研究課題名（英文） A study on brittle fracture control of steel structures focusing on stress multi-axiality

研究代表者

佐々木 栄一 （SASAKI EIICHI）

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：40311659

研究成果の概要（和文）：本研究は、鋼構造物の耐震性を確保する上で不可欠となる地震時脆性破壊の防止を実現するため、その発生機構、発生規準を明確化することを目的とし、材料特性、局部塑性拘束、溶接部形状等の影響について、応力多軸性に着目し、実験および解析により詳細に検討したものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, for the purpose of the control of brittle fracture during earthquakes, experimental and analytical investigations were conducted to clarify occurrence mechanism and occurrence criterion focusing on stress multi-axiality. In this study, especially, the effects of material properties, local constraint, and weld bead shapes were discussed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：耐震構造

1. 研究開始当初の背景

1994年のNorthridge地震，翌年の兵庫県南部地震において，鋼構造物に倒壊，座屈，脆性破壊などの甚大な被害が生じた．それを受けて，安定な弾塑性挙動を呈し，所定の變形性能を發揮するまで脆性破壊が生じないことを保証することを目指し，多くの実験的，解析的な検討が実施され，耐震設計法の改革がなされてきた．耐震設計法の改革においては，これまで実施された多くの検討の成果に基づいて，安定な弾塑性挙動を示すために必要な補剛方法など構造的な対策について提

案がなされてきた．しかしながら，所定の變形性能を發揮するまで脆性破壊を発生させないという点については，現在においても明確な対応策が確立されていない状況にある．

鋼構造物における地震時脆性破壊は，大規模塑性變形下で発生し，起点となるき裂の特定が困難であるなど，Northridge地震，兵庫県南部地震以前に想定されていた脆性破壊とは特徴を異にする破壊性状を呈していたことから，その発生機構や発生規準の明確化が火急の課題となった．

現状では，鋼構造物における地震時破壊の

発生規準として、破壊靱性に着目した材料特性面からのアプローチと、局所的な応力多軸性の発現に着目したアプローチがある。前者については多くの実験による検証がなされているが、後者については、材料特性の影響が不明瞭であるなど、その適用性について明確にすべき点が多々残されている。また、これら2つのアプローチの関連性についても検討を進める必要がある。さらに、地震時脆性破壊の起点については、桑村ら⁸⁾が指摘している延性き裂からの脆性破壊移行に関して詳細に検討することが重要となる。

2. 研究の目的

本研究では、鋼構造物の地震時破壊の破壊機構および規準を明確にするため、起点となるき裂の発生規準の整理を行うとともに、地震時破壊に及ぼす塑性拘束に起因した局所的な応力多軸性および鋼材の材料特性、特に破壊靱性の影響を実験および解析により分析する。最終的に、その成果に基づき、鋼構造物の地震時破壊の支配的要因を明確にするとともに、鋼構造物の地震時破壊における破壊規準について検討を行う。

具体的には、本研究では、まず局所的な応力多軸性の影響を評価するため、応力多軸性をベースとした鋼材の破壊発生規準の適用性を実験およびFEM解析により検証し、さらに、鋼材の材料特性の影響評価を目的として、複数の鋼種を対象とした実験を行い、鋼材の破壊性状に関する検討を行う。一方で、兵庫県南部地震で被災した鋼製橋脚等の実大モデルを用いたFEM地震応答解析により、地震時に発生し得る局所的な応力多軸性とそのレベルを把握し、溶接継手試験体を用いた破壊試験を実施し検証する。

3. 研究の方法

本研究では、鋼構造物の地震時脆性破壊の発生機構と発生規準を明確化し、鋼構造物の耐震設計において脆性破壊に対する制御策を提示することを目指し、まず実際に兵庫県南部地震で被災した鋼製橋脚等の実大FEMモデルを用いた地震応答解析を詳細に実施することにより、実構造物における脆性破壊の実際の起点と応力多軸性の面で脆性破壊発生リスクの高い部位の関係を明確にする。そのうえで、まず、応力多軸性と脆性破壊の起点となる延性き裂の発生規準との関係について実験的に検討する。さらに、脆性破壊発生に及ぼす塑性拘束に起因した応力多軸性の影響および材料特性の影響を明らかにする。

の検討においては、溶接部の形状についても検討する。その上で、脆性破壊の発生機

構について検討し、その制御方法に関して実験的に検証することを目指した。本研究では、上記からこのテーマについて検討を行った。

4. 研究成果

3. に示した(1)~(5)のテーマについてそれぞれ成果をまとめる。

(1) 実構造物における局部応力多軸性の把握
兵庫県南部地震で実際に被災した鋼製橋脚(図1)などの実大FEMモデル(図2)を用いた地震応答解析を実施することにより、実構造物において、地震時にどのような塑性ひずみ履歴、応力多軸性が生じているのかを明らかにし、実際の破壊発生起点と応力多軸性の観点からリスクが高いと考えられる部位に関連性があることを明らかにした(図3)。



図1 兵庫県南部地震で発生した脆性破壊

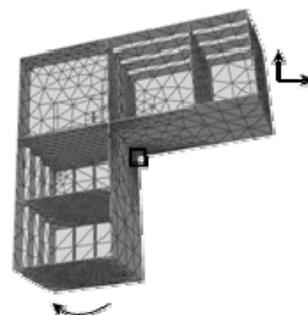


図2 被災橋脚のモデル化

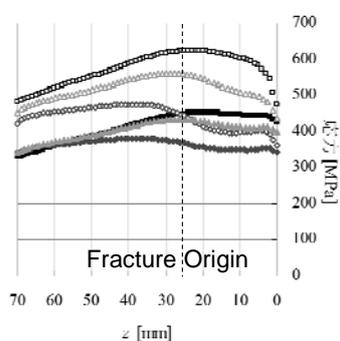


図3 フランジ端部からの距離と応力の関係

(2) 延性き裂の発生規準と塑性拘束の影響

延性き裂を起点とする脆性破壊の分析のため、延性き裂の発生規準について、実験的

に検討をおこなった。延性き裂発生には塑性拘束の程度が影響を及ぼすことが想定されたため、切欠きの大きさを变化させた丸棒引張試験片を用意し、破壊実験を実施した。

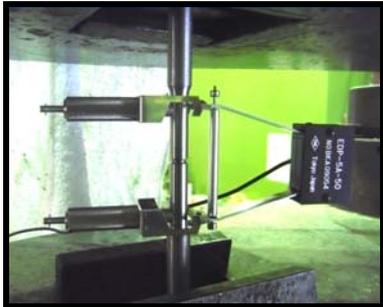


図4 丸棒試験片の引張試験状況

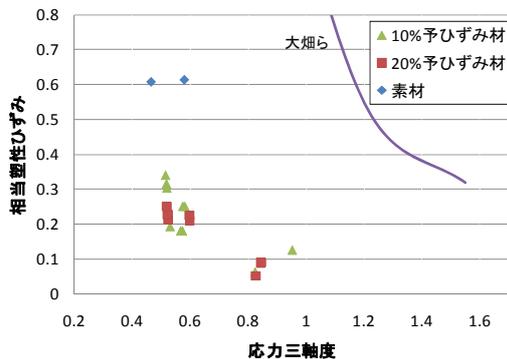


図5 延性き裂発生時の応力三軸度および相当塑性ひずみ

その結果、表面から延性き裂が発生する場合は、応力多軸性の影響のほか、発生ひずみ量の影響が大きいことを確認した。さらに、鋼材の破壊発生規準の適用性および適用可能な条件についても検討し、表面から延性き裂が発生する場合には、発生基準においてひずみ量（相当塑性ひずみ）の影響を考慮すべきであり、その点を踏まえた新たな規準の提案が必要であることを示した。また、予ひずみを10%、20%与えた場合の影響についても検討し、切欠きの存在により、予ひずみ量よりも大きい延性低下が起こりうることを示した。

(3) 鋼材の破壊に及ぼす応力多軸性と繰返しひずみ履歴の影響

等方硬化則、移動硬化則、繰返しひずみ履歴による降伏曲面の拡大を再現した移動硬化則など複数の条件を考慮して、FEM動的応答解析を実施し、地震時の脆性破壊の起点なる部位での応力多軸性の状況には、材料の構成則の影響はあまり大きくないものの、脆性破壊の要因となるひずみ速度には影響があり、温度上昇（図6）など動的効果についてはさらに詳細に検討が必要であることが分かった。

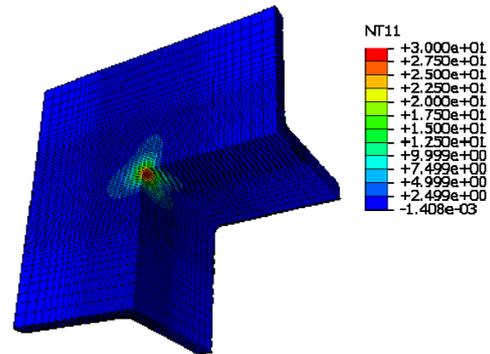


図6 地震時の鋼製橋脚隅角部角部における塑性ひずみ履歴による温度上昇

(4) 地震時脆性破壊の発生機構

CTOD試験の結果を踏まえ、脆性破壊発生には、破壊靱性に依存した応力三軸度 - 局部ひずみレベル関係による破壊規準が規定されるべきであることが実験的に確認された。応力三軸度だけではなく、破壊靱性および局部ひずみも評価すべきことが分かったため、材料面と構造面の両面が考慮された破壊規準となる。この破壊規準は材料の種類に依存し、今後より多くの、特に高強度鋼材のデータを蓄積する必要がある。

(5) 実構造物の溶接継手を模した寸法形状を有する溶接継手試験体の破壊実験

溶接材料の強度マッチングおよび溶接欠陥を模擬した試験体の繰返し破壊実験（図7）を実施し、板組（欠陥の位置）により破壊強度が異なること、および、アンダーマッチング継手の方が早い繰返しの段階でき裂が発生することを確認した（図8）。



図7 実構造物を模擬した隅角部試験体実験の状況

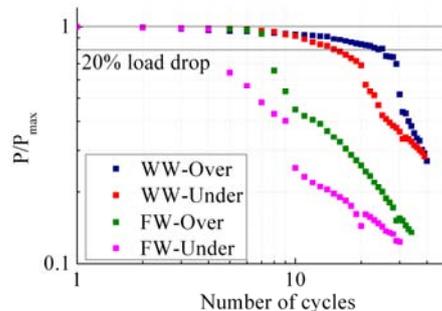


図8 繰返し破壊実験の結果例

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3件)

Saiprasertkit K., Sasaki E. and Miki C.: Experimental study on low cycle fatigue strength of beam-to-column connections in steel bridge bents with different plate assembling and material mismatching, International journal of steel structure, 査読有, 2012 (掲載決定)

田村洋, 佐々木栄一, 山田均, 勝地弘: 動的負荷の影響に着目した鋼製橋脚隅角部における地震時脆性破壊発生要因の検討, 土木学会論文集A1, Vol. 68, No. 2, pp. 226-241, 査読有, 2012

田村洋, 佐々木栄一, 金成東, 山田均, 勝地弘: 地震時に曲げを受ける溶接部の延性き裂発生に与える溶接部形状の影響と止端仕上げによる抑制効果, 鋼構造論文集, 査読有, No.68, pp. 55-68, 2010

[学会発表](計3件)

Saiprasertkit K., Sasaki E. and Miki C.: Experimental study on low cycle fatigue strength of beam-to-column connections in steel bridge bents with different plate assembling and material mismatching, International Institute of Welding, 2012/3/15, Aalto University, Finland

森谷謙一, 佐々木栄一, 山田均, 勝地弘, 田村洋: 鋼材の延性破壊に及ぼすひずみ履歴の影響, 第66回土木学会年次学術講

演会, 2011/9/7, 愛媛大学

田村洋, 佐々木栄一, 山田均, 勝地弘, 金成東: 地震時に曲げを受ける溶接部の延性き裂発生に与える溶接部形状の影響と止端仕上げの効果, 第65回土木学会年次学術講演会, 2010/9/1, 北海道大学.

[図書](計0件)

[産業財産権]
出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等
該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 栄一 (SASAKI EIICHI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 40311659

(2) 研究分担者
該当なし

(3) 連携研究者
該当なし