

審査の結果の要旨

氏名 榎並 啓太郎

地震・衝突等の災害時に、大型鋼構造物は局部座屈等により大塑性歪（特に圧縮歪）を受けることが考えられる（以下、予歪と呼ぶ）。引き続く二次的な外力により、塑性予歪を受けた構造部位より延性、或いはへき開き裂の発生する可能性が指摘されており、更に応力集中源等が存在して最も厳しい場合には、最終へき開破壊の発生する可能性もある。1995年の阪神大震災では、大型鉄骨建築構造物の溶接継手部等の応力集中部が、塑性予歪を受けて延性き裂を発生し、更に地震の揺り戻しでへき開破壊した事例が報告されている。大型鋼構造物の大変形後のへき開破壊を防ぐ上で、大塑性予歪（特に圧縮予歪）を受けた鋼材からの延性及びへき開破壊発生を定量化する強度評価手法の確立が緊急の課題である。

延性破壊発生に要する相当塑性歪は、応力三軸度が大きくなると急激に減少することが知られており、応力三軸度一相当塑性歪関係で延性破壊発生を評価する手法（以下、延性限界曲線と呼ぶ）が近年再び注目されている。一方、へき開破壊は、切欠底における局所最大引張応力が限界値に達すると発生することが明らかとされている（以下、局所へき開応力と呼ぶ）。本論文は、延性限界曲線と局所へき開応力クライテリアを適用し、圧縮予歪を受けた鋼材からの延性及びへき開破壊発生を定量的に評価することを目的としている。具体的には、一様圧縮予歪を与えた鋼材の円周切欠付丸棒引張試験を行い、延性限界曲線に及ぼす予歪の影響を調査し、また、曲げ予加工で圧縮予歪を与えた平板試験片等を用いて、逆曲げ（曲げ戻し）試験を実施し、予歪部からの延性き裂（又はへき開破壊）の発生条件を調査している。

本論文は、全8章で構成されている。第1章「緒言」では、研究の背景及び研究の目的が述べられている。

第2章「鉄鋼材の破壊挙動」では、延性及びへき開破壊に関する基礎知識と破壊強度評価手法について述べた。延性破壊は、一般にボイドの発生と連結を経て起こると考えられており、延性限界曲線でボイド連結型の延性破壊発生を評価する手法が近年注目されていることを説明した。一方、へき開破壊は、一般にマイクロき裂の発生と伝播により起こる、粒内貫通型の高速破壊であると考えられる。へき開破壊は、応力支配型の破壊と考えられることを述べ、局所へき開応力でへき開破壊発生を評価する手法について説明した。また、予歪により延性と破壊靱性が低下することを示す、従来の研究報告についてまとめている。

第3章「実験方法」では、本論文で実施した材料基礎試験、応用破壊実験の方法について説明している。主要な供試材として、API-X65鋼材とJIS-SM490B鋼材を選択した経緯について述べ、各種実験の目的について説明した。主な実験として、基礎試験では丸棒引張試験、円周切欠付丸棒引張試験、シャルピー衝撃試験及び限界CTOD試験があり、応用実験では平板の逆曲げ試験、小型切欠試験片の四点曲げ逆曲げ試験の計6種類がある。

第4章「材料基礎試験結果」では、供試材の応力一歪線図、破壊靱性の延性一脆性遷移曲線等の基礎試験結果を説明している。予歪が大きくなると材料の降伏応力が上昇すること、破壊靱性

の遷移温度が顕著に上昇することを示した。予歪材の切欠丸棒試験片の破面観察結果を示し、予歪が大きくなると延性破壊に先立って局所へき開き裂の発生することを明らかにしている。

第5章「応用破壊実験結果」では、平板逆曲げ試験結果、小型切欠試験片の逆曲げ試験結果等を述べている。平板逆曲げ試験では、曲げ予加工により圧縮予歪表面に微視的な皺の発生することが明らかとなった。そして、曲げ戻しにより予歪部が逆方向の引張変形を受け、皺底部から延性き裂の発生することが明らかとなった。逆曲げにより予歪部から延性き裂が発生したが、予歪が大きくなると延性き裂の発生量も大きくなった。また、予歪による破壊靱性の低下は顕著であるにも関わらず、人工的に応力集中源（切欠）を設け、且つ低温でなければ、予歪部からへき開破壊の発生することは無かった。一方、圧縮予歪により表面に皺が発生するが、皺の発生状況は鋼材組織により変化することを明らかにした。

第6章「数値解析」では、予歪材切欠丸棒試験や平板の逆曲げ試験等に対応する数値解析を行い、予歪部からの延性及びへき開破壊発生を定量的に評価している。予歪材切欠丸棒試験の数値解析の結果、予歪が大きくなると延性限界曲線は低下し、延性の低下することが明らかとなった。そこで、予歪を含めて応力三軸度—相当塑性歪の履歴を考慮すると、予歪材の延性限界曲線は素材のそれとほぼ一致し、本供試材では便宜的に統一的な延性限界曲線を設定できた。

しかし、ポイド成長率の理論式から考えて、圧縮予歪場でポイドは成長しないにも関わらず、なぜ予歪で延性が低下するかが問題となった。そこで、先述の局所へき開き裂を考慮した数値解析を実施し、き裂先端部の応力三軸度—相当塑性歪履歴を求め延性限界曲線と比較した結果、予歪材切欠丸棒の延性破壊発生の実験結果を評価でき、予歪による延性の低下を説明出来た。従って、局所へき開き裂の発生が主な原因で、予歪により延性の低下することを本論文で明らかにした。一方、へき開破壊した予歪材切欠丸棒試験等の数値解析を実施し、へき開発生部の局所最大主応力を求めて局所へき開応力を評価した。その結果、近似的に局所へき開応力は予歪によらず一定となる可能性を示した。

平板逆曲げ試験で予歪部皺底部からの延性き裂発生を評価するため、皺を考慮した局所モデルを適用した数値解析を実施した。その結果、皺底部の応力三軸度—相当塑性歪履歴を延性限界曲線と比較すれば、予歪部からの延性き裂発生の有無をほぼ評価できることを示した。また、へき開破壊した平板切欠材（曲げ予加工後、一部試験片は切欠加工した）の逆曲げ試験の数値解析を実施した。へき開部の応力三軸度—最大主応力履歴を局所へき開応力と比較した結果、へき開発生部の局所最大主応力はほぼ一定となる可能性を示した。

第7章「考察」では、数値解析の結果等を基に、圧縮予歪を受けた鋼材からの延性及びへき開破壊発生挙動を、延性限界曲線と局所へき開応力で評価することの妥当性を検証している。また、数値解析の適用限界、今後の研究課題等を述べている。

第8章「結論」では、本論文で得られた知見を総括し、今後の課題を要約している。圧縮予歪を受けた鋼材からの延性及びへき開破壊発生は、延性限界曲線と局所へき開応力クライテリアを適用して定量的に評価可能であると結論付けている。

以上、本論文は、大型鋼構造物が大規模圧縮予歪を受けた後の延性及びへき開破壊発生挙動を定量的に評価する破壊強度評価手法の一つのあり方を示したもので、鋼構造物の安全性確保に関し、その成果は工学上極めて有用である。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。