

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760518

研究課題名（和文） 建築鉄骨構造におけるき裂発生後の残存性能評価に関する研究

研究課題名（英文） Evaluation study on remaining performance of structural steel after crack initiation

研究代表者

伊山 潤 (IYAMA JUN)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：30282495

研究成果の概要（和文）：本研究は、鉄骨骨組が地震により塑性変形やき裂を生じた後の残存性能を定量的に評価することを目的とするものである。試験片としては、実構造物の不整形さを表現した切り欠き付き丸棒を作成した。これに異なるレベルの引張ひずみを与えた後、X線CTにより内部空隙および表面き裂を立体的に計測した。この結果は、き裂進展解析とおよそ合致しており、解析により残存耐力や残存断面積を評価できる可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research is to establish a reasonable method to evaluate remaining performance of structural steel in steel buildings after yielding or crack initiation due to earthquakes. In this study, tensile load was applied to round steel bar specimens and then the specimens were investigated by X-ray CT to measure void volume or crack length inside the specimens. The observation results approximately agreed with the finite element analysis showing the possibility to evaluate remaining performance with these analysis and observation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：鋼構造、き裂進展、非破壊検査、残存性能、有限要素解析

## 1. 研究開始当初の背景

近年の環境問題への関心の高まりに伴い、建築構造物に対しても、長寿命化、残存寿命の評価、修復再利用などの要求が高まっており、破断、倒壊などの最終終局状態に至るまでの残存構造性能を提示できる技術の確立が望まれてきている。この要求に応えようと、例えば、E-defenseを用いて地震時に倒壊する様子を再現する実験が行われたりしているが、部材の破壊についてはいまのところ構造物の破壊までを十分に追跡し、破壊モードおよび破壊までの変形性能を推定する実用的な評価法は確立されて

いない。

鋼材が地震によって多数回の繰り返し塑性変形受けると、鋼材内部あるいは表面から、微細なき裂が徐々に進展して最終的に全断面を貫通して破断に至る。この現象については、延性破断、脆性破断、あるいは低サイクル疲労に関する既往研究として数多くのものがある。例えば、この破壊メカニズムに基づくモデルはいくつか提案されており有限要素解析によるき裂発生の予測が試みられている<sup>1)</sup>。また、塑性変形後の鋼材を切断して顕微鏡観察することで材料内のき裂や空隙を確認した研究もある<sup>2)</sup>。

しかし、鋼材内部の空隙については切断後の観察以外の計測法が存在しなかったため、内部空隙を実測・観察した既往研究は極めて限られており、理論と実現象の対応関係が十分検証されていたとは言えない状況にある。

現在では非破壊検査手法が数多く実用化されている。本研究で活用する X 線 CT もその一つである。この技術は医療用の検査技術として発達してきたが、近年アルミなどのき裂観察に用いられるようになった<sup>3)4)</sup>。X 線は鋼材を透過しにくいいため、鋼材への適用事例<sup>5)</sup>はまだ少ないものの、同様にき裂の立体的・定量的観察手法としての確立が期待できる。

## 2. 研究の目的

前章で述べたように、ボイドの発生からき裂進展、延性破壊あるいは脆性破壊に至るまでの過程については数多くの既往研究があり、提案されている理論も数多い。しかしこれららの理論は極めて整形な試験体による実験事実から導かれているものが多く、これらを実構造物に適用するのが困難である。適用性を向上させるためには、実際の構造物中に生じている実際の現象を計測・観察し、理論との整合性を確かなものとしておく必要がある。

このような観点から、本研究では X 線 CT を利用し、これまで観察が困難だった鋼材内部の空隙や表面からのき裂を立体的・網羅的に観察し、この結果を鋼材の破断までの残存性能評価に活用することを目的とする。本研究で用いる試験片は丸棒という整形なものであり、また現時点で X 線 CT で計測できる鋼材は小型なものに限られているが、計測技術の進展により、より大型の構造要素あるいは構造部材の計測が可能となった際には本研究の成果がさらに有効に活用されるものと期待される。

## 3. 研究の方法

研究方法の概要を図 1 に示す。それぞれの研究段階について以下に説明する。

### (1) ノッチ付き丸棒の引張载荷

まず、ノッチ付き丸棒試験片を作成し、これに引張载荷を行って、表面あるいは内部にき裂または空隙が生じる程度までの変形を生じさせた。実験に用いた試験片の形状を図 2 に示す。試験片中央部には切り欠き半径が 4 種類に異なる切り欠きが設けられて

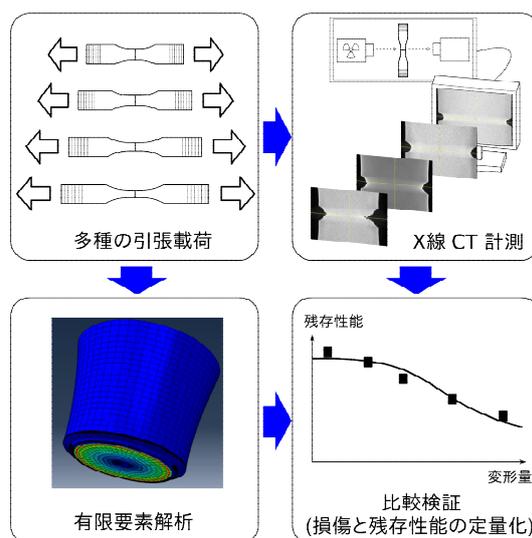


図 1 研究方法概要

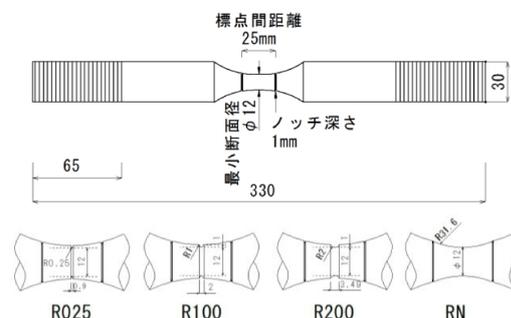


図 2 用いた試験片の形状

いる。試験片名称は切り欠き半径に基づき、R025, R100, R200, RN と呼称する。もっとも小さな切り欠きの R025 試験片の切り欠き半径は 0.25mm であるがこれはおよそ溶接後に生じるノッチの最小サイズにおよそあわせてある。得られた 4 種類の試験片の破断までの荷重変位関係と、载荷中止点を図 3 に示す。

切り欠き半径が小さいものでは、表面からのき裂が早期に観察されたので、载荷中止点も早期に設定した。一方、切り欠き半径が大きいものあるいは切り欠きが無いものについては、破断直前で载荷を中止したものを多くし、この付近での内部空隙あるいは表面き裂の観察に重点を置いた。

### (2) X 線 CT 計測

引張载荷を行い、き裂を発生させた試験片を X 線 CT で計測し、各試験片の立体情報を得た。図 4 に X 線 CT 画像の一例を示す。本図では縦横それぞれ 1 断面のみを示しているが、各試験片には軸方向断層写真が 270 枚得られており、これを合成することで任意の切断面写真を得ることができる。こうし

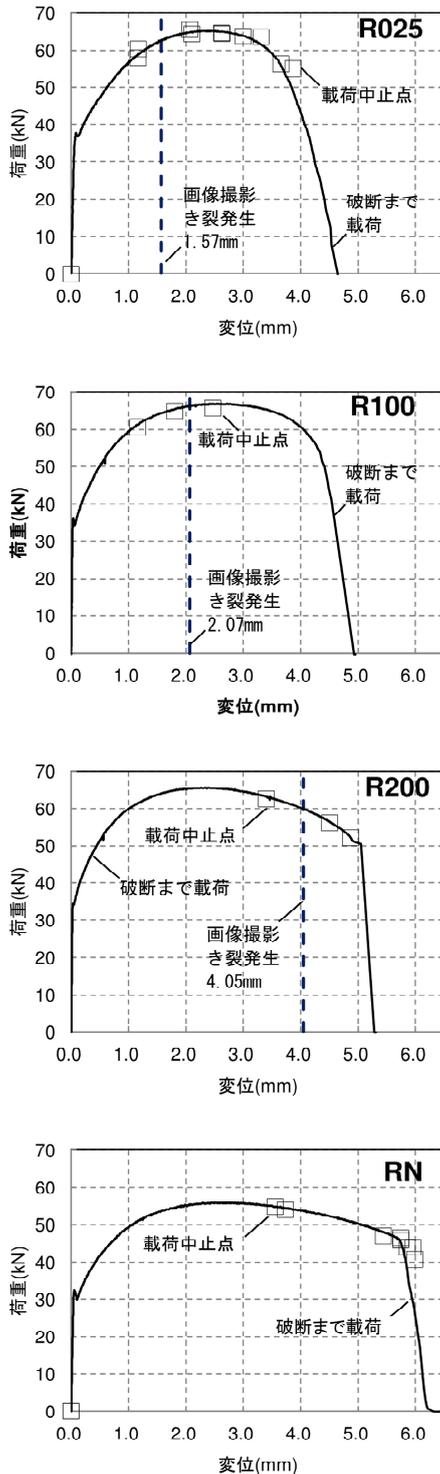


図 3 引張載荷結果

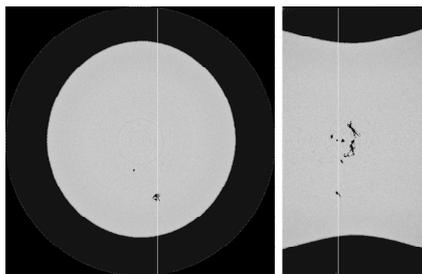


図 4 X線 CT による計測例  
て得られた計測データと次節で伸べる有限

要素解析との比較を行った。

### (3) 有限要素解析

本研究はき裂や空隙の発生および進展を対象としているため、解析方法についてもこれを模擬できるものを用いる必要がある。これらについて、先端的な研究としてはいくつかの試みがあるが、汎用性という面で容易に応用できるものは多くない。本研究では、市販の汎用有限要素解析ソフトウェア ABAQUS を用い、これに装備されている GTN モデル<sup>9)</sup>を用いることとした。これはおよそ等質連続体における解析手法であり、空隙やき裂を精緻にモデル化するものではないが、ポイド体積率という指標により損傷を評価し空隙やき裂の発生や進展を評価しようとするモデルであり、比較的应用が容易である点からこれを用いることとした。

なお、このモデルには多数のパラメタを設定する必要があるが、これについてはいくつかのキャリブレーションスタディにより、荷重変形関係とおよそ解析結果と合致するように定めた。定めた数値の範囲は既往研究による提案の範囲内であり、およそ妥当であると判断した。

### (4) X線 CT 計測と有限要素解析結果の比較

図 5 に、X線 CT 計測結果と有限要素解析結果の比較を示す。横軸は(1)で試験片に与えられた引張変形量、縦軸は有限要素解析 (FEM) および X線 CT で計測された残存断面積である。残存断面積とは、き裂や内部空隙を除いた断面積を示しており、残存性能の指標になりうるものである。いずれの図においても、有限要素解析結果を示す曲線と、X線 CT 計測結果を示すプロットはおおよそ同様の傾向を示している。特にき裂の進展に関しては、き裂進展が徐々に進行する R025 試験片において計測および解析が良好に一致していることがわかる。また、R100 では、表面画像撮影および X線 CT で、変位 2mm 程度の時点で表面からのき裂を観察しているが、小さなものであり、残存断面積もあまり大きな変化が無い。この傾向はおおよそ有限要素解析結果と合致している。

一方、切り欠きが無い RN 試験片では、表面からではなく内部空隙の発生が先行するため、この検出には X線 CT 計測は有益である。特にこれらのケースでは内部からのき

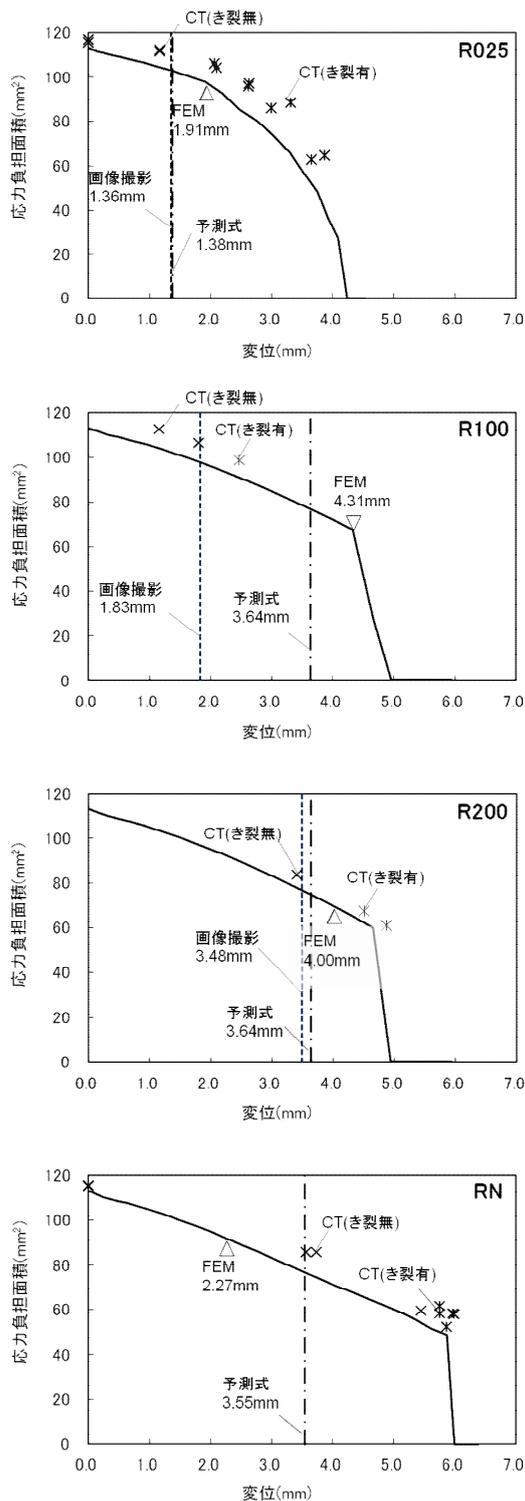


図5 有限要素解析(FEM)とX線CT計測の比較

裂進展進行が早く、空隙が生じるとほぼ同時に破断するため、内部空隙の検出が残存性能評価に極めて重要である。

#### 4. 研究成果

本研究では、切欠き形状の異なる4種類の

試験片に単調引張荷重を加えた後、X線CTを利用してき裂・空隙を観察し、連続画像撮影及び有限要素解析の結果と比較・検証した。

表面の連続画像撮影によりき裂の発生を確認することは可能であるが、き裂深さが判定できずリューダースラインとき裂を誤認する可能性があるなどの問題点がある。X線CTはこれらの問題点を解決し、定量的な評価ができることを示した。

X線CT画像の面積計測から、切り欠きが鋭い場合(R025)では切欠き底からき裂が生じそのまま水平に進展していくこと、切り欠きが無い場合(RN)では断面積が最小となる断面の内部に空隙・き裂が発生することが観察された。著者らによる既往研究<sup>7)</sup>では、繰り返し試験においてはRNであっても表面からき裂が生じたことと対照的な結果であり、载荷パターンによりき裂発生箇所が異なる現象を定量的に把握できた。

有限要素解析ではGTNモデルを利用し荷重-変位曲線を出力した後、応力負担面積-変位関係を計算した。切り欠きが最も鋭い場合については、この計算により変形の進展に従ってき裂が進展する傾向を捉えることができ、またこの結果はおよそX線CT計測の結果あるいは表面観察の結果と合致した。したがって、き裂が鋭く応力集中が著しい場合においては本解析手法がおよそき裂進展を模擬できるものと考えられる。多くの実構造物の場合、損傷が生じる箇所は応力集中も著しい場合が多いため、本手法はこのような実構造物に適用できる可能性がある。

一方、切り欠きが鈍い試験片、あるいは切り欠きが無い試験片については、この解析結果でき裂や空隙が一箇所に生じると即座に全断面に伝播して破断するという結果が得られた。X線CT計測においても、破断直前まで内部の空隙等が観察されていないものが多く、実験的にこの現象を捉えることができたものと考えられる。

ただし、X線CT画像では内部の立体構造を把握できることと比較して考えると、本研究では得られたデータのごく一部を活用したに過ぎない。例えば、X線CT計測結果では鋸状にき裂が進展する様子や、鋼材内部にランダムに空隙が現われる様子が観察されている。しかし、均質な連続体を前提とした現状の有限要素解析ではこれらの現象を追跡することは不可能であるため、これら

の計測された立体構造を活用することができていない。得られた立体構造データをより活用した残存性能評価法の確立が期待される。

#### 参考文献

- 1) 小畑誠, 水谷明嗣, 後藤芳顕: 鋼構造の延性破壊の有限要素法解析への導入に関する基礎的検討, 土木学会論文集, No. 626, pp. 185-195, 1999
- 2) 桑村仁, 秋山宏: 延性き裂発生ひずみに及ぼす冷間塑性加工の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 454 号, 1993-12
- 3) 吉川 暢宏, 半谷 禎彦, 桑水 流理, 宇都宮 登雄, 北原 総一郎: X線CTを用いたアルミニウム合金ダイカストの信頼性評価, M&M 材料力学カンファレンス 2007, 594, 2007-10-24
- 4) 葛上 昌司, 桑水流理, 宇都宮 登雄, 村田 陽三, 半谷 禎彦, 北原 総一郎, 吉川 暢宏: X線CTによるアルミダイカスト内部のひずみ場の計測, M&M 材料力学カンファレンス 2008, "GS0107-1", 2008-09-16
- 5) 柴野純一, 三浦節男, 小林道明, 桐山幸治, 梶原堅太郎, 菖蒲敬久, 鈴木賢治, 新居恭征: 放射光白色 X 線を用いた CT による丸棒鋼内部き裂の観察とその先端近傍のひずみマッピング, 日本材料学会 材料 58(7), 596-602, 2009
- 6) Viggo Tvergaard: Material failure by Void Growth to Coalescence, Advances in Applied Mechanics, Vol. 27, pp. 83-151, 1990.
- 7) 伊山潤, 荒木景太, 有田政樹: 繰り返し塑性ひずみを受ける鋼材のき裂深さに関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), No. 22503, 2010. 9

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

船橋信吾, 伊山潤: 鋼材のき裂発生と破断に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 2012. 9. 12~14, 名古屋大学 (名古屋市)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

伊山潤 ( IYAMA JUN )

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号: 30282495

(2) 研究分担者  
( )

研究者番号:

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号: