

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25年 5月31日現在

機関番号：37401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560579

研究課題名（和文） 溶接欠陥から進展した延性亀裂を起点とする脆性破壊発生の予測
— 接合部の品質管理基準研究課題名（英文） Prediction of brittle fracture initiated at toes of ductile cracks
growing from weld defects

研究代表者

東 康二（AZUMA KOJI）

崇城大学・工学部 准教授

研究者番号：80320414

研究成果の概要（和文）：

欠陥形状・寸法と延性亀裂進展量の関係を調べるために、通しダイアフラム形式柱梁接合部をモデル化した試験体に、塑性拘束の弱い表面欠陥となる切欠きを挿入し、欠陥から進展した延性亀裂を起因とする脆性破壊を再現する繰返し載荷実験を行った。同時に FE 解析と併せて検討した結果、欠陥から進展する延性亀裂の進展量と FE 解析から求めた塑性拘束の度合いとの間に一定の関係が確認でき、破壊点の予測もおおよそ妥当な値を示した。

研究成果の概要（英文）：

Welded plate bend models, which were designed to represent a connection of an I-section beam to an RHS column member with through diaphragms, were tested under cyclic loads in order to investigate the correlation of defect size, dimensions and quantity of ductile crack growth. Test results supported prediction; brittle fracture occurred from tips of defects. It was attempted to predict the fracture moment. The predicted moments using J values which were taken into account plastic constraint of crack tips roughly coincide with the test results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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，柱梁接合部，脆性破壊，溶接欠陥，塑性拘束

1. 研究開始当初の背景

我が国では甚大な被害をもたらした兵庫県南部地震を含め、駿河湾地震まで毎年、大規模地震が頻発している。兵庫県南部地震以外では鉄骨建物の脆性破壊という重大な被害は報告されていないが、断層に起因する大地震は大都市圏でも発生する可能性は高く、

これまでにない被害が予想される。兵庫県南部地震以後、溶接欠陥そのものを回避するための数多くの実験研究が行われ、その成果の一部は実用化されているが、すべての鉄骨構造物から溶接を排除することは非経済的であり、現実的ではない。超音波探傷検査による欠陥の許容規準は存在するが、脆性破壊の

発生は欠陥寸法・部位・形状に大きく依存し、検査では許容される微小欠陥から進展した延性亀裂を起点として脆性破壊が発生した事例も報告されている。逆に、大きな欠陥が存在する場合でも、延性亀裂が安定成長し脆性破壊に到らない場合もある。耐震補強が急がれる現在、的確に破壊の危険性を評価する手法の確立が急務である。

鋼構造柱梁接合部で最も破壊の起点となりやすい溶接始末端では、ルート部に欠陥が生じやすく、溶接のディテールと施工方法を改善する必要がある。始末端からの破壊を再現するため、これまでに、柱梁接合部を単純化し、始末端部に人工欠陥（融合不良、機械切欠き、疲労亀裂）を挿入した試験体を用いて繰返しおよび単調載荷実験を行った。この一連の実験で、溶接始末端部に挿入した欠陥から延性亀裂が進展し脆性破壊へ到る過程を的確に再現できた。

実構造物の欠陥から発生する脆性破壊の予測手法については、1980年代から破壊評価線図(FAD)が実用化されてきた。その後、主としてヨーロッパのグループが構造保全評価手法(SINTAP)と呼ばれる研究プロジェクトを推進し、原子力容器等の設計指針(R6)の改良を通してFADを拡張し、1999年に規格BS7910:1999が発表された。そこで我々も、上記の実験および有限要素解析結果を用いて、これらの手法の適用可能性を検討したが、「亀裂先端における塑性拘束が破壊靱性に及ぼす影響」および「延性亀裂の進展のモデル化」の2つの問題点が明らかとなった。

我が国では、兵庫県南部地震の直後からCTOD設計曲線に基づく手法を拡張する研究が進められ、WES-2805:1997として公表された。その後、地震時にみられる動的繰返し大変形を考慮し、更に信頼性工学に基づき塑性拘束の影響を考慮する補正係数を組み入れ、適用範囲の拡大と評価精度の向上が図られたWES-2808:2003が公表された。この規格では延性亀裂の成長後の破壊限界を、材料の遷移温度を修正することによって特定する手法を用いているが、実験室レベルにおける材料試験による正確な材料定数の決定が必要となる。

我々もWES-2808の公表と同時期に、塑性拘束の影響を考慮した改良FADを提案した。欠陥の評価に用いる弾塑性の破壊限界J積分値 J_c は、規格化された材料試験方法に従い得られたものである。この試験片の亀裂先端は強い塑性拘束を受けている。他方、柱梁接合部に存在する溶接欠陥の多くは表面欠陥であり、かつ、延性亀裂が発生する時点では溶接欠陥の周辺部は広い範囲で降伏している。従って、溶接欠陥の亀裂先端部に存在する塑性拘束は遥かに弱い。塑性拘束の弱い亀

裂先端部から脆性破壊が同じ確率で発生するためには、亀裂先端部の高応力領域の体積が、塑性拘束の強いSENB試験片などにおける亀裂先端部の高応力領域の体積と等しくなるまで割増したJ値を作用させる必要がある。換言すれば、塑性拘束の弱い欠陥の J_c (修正 J_c)は、SENB試験片で計測される J_c を上記の体積一定の条件を用いて割増したものとする必要がある。実験および解析結果に、塑性拘束の影響を考慮した改良FADを適用した結果、脆性破壊の発生を精度良く予測できることが分かった。ただし、ここでは延性亀裂の進展は考慮していないため、延性亀裂が大きく進展した試験体では安全過ぎる評価を与えた。

2. 研究の目的

実在接合部に即した状況を再現するために、通しダイアフラム形式接合部をモデル化した試験体を製作した。欠陥形状はルート側の溶込不良を意図的に作成したものと溶接止端部に表面欠陥(機械切欠き)を設けたものである。いずれも欠陥先端の塑性拘束は小さく、延性亀裂が大きく進展する場合を想定している。延性亀裂の進展量を含む欠陥を挿入した有限要素解析の結果から、融合不良の先端への応力集中は小さく、止端部に設けた欠陥に大きな応力集中が見られた。上記の修正 J_c を用いた改良FADを適用した結果、止端部側の欠陥からのみ脆性破壊の危険性が示唆されたが、実験では大きな変形能力を示し、実験を終了した。すなわち、安全側過ぎる評価を与えた。このことから、脆性破壊の発生を正確に予測するには、延性亀裂の進展から脆性破壊に移行するときの破壊靱性を把握する必要があるが、そのためには破壊駆動力と亀裂進展量の関係を明確にする必要がある。本申請の目的は、これまでの研究成果を踏まえて延性亀裂進展挙動を正確に捉え、改良FADを更に拡張して脆性破壊発生の的確な予測を行うことである。

3. 研究の方法

(1)実験的研究

柱梁接合部をモデル化した試験体に、塑性拘束の弱い表面欠陥となる切欠きを挿入し、欠陥から進展した延性亀裂を起因とする脆性破壊を再現する繰返し載荷実験を行った。通しダイアフラム形式柱梁接合部から、梁フランジとダイアフラムとの接合部のみを取り出し試験体を製作した。材質はSN490Bである。欠陥は下フランジの溶接始末端部に、溶接前に開先に金属板を挿入することにより生成した。欠陥形状は溶接始末端部両端の梁フランジ側の貫通欠陥(TC試験体)と表面欠陥(SC試験体)とした。貫通欠陥の場合、亀裂先端の塑性拘束はDENT試験片の値と近

い状態となることを意図した. 図1に試験体, 図2に欠陥形状を示し, 表1に各試験体の欠陥寸法を示す. 荷重は図3に示すように, 試験体頭部を載荷点とする正負交番繰返し荷重とした. なお本実験は試験体の溶接部周辺を母材の遷移温度となる -30°C まで冷却した. 本荷重の変位振幅は片持ち梁が全断面降伏状態となる時の全塑性モーメント M_p に対応する弾性相対回転角 θ_p として, 正負に1回ずつ $\pm 2\theta_p$ を繰り返す, その後 $\pm 3\theta_p$, $\pm 4\theta_p$ と繰り返すものとした. 荷重は試験体が脆性破壊するまで, 若しくは, 延性亀裂がフランジプレートを横断し荷重を保持できなくなるまで行なった.

(2)解析的研究

汎用プログラム ABAQUS を用いて非線形有限要素解析を行い, 欠陥寸法が脆性破壊に及ぼす影響を検討した. 要素は Von Mises の降伏条件に従う8節点低減積分要素, ポアソン比は0.3, 硬化則は等方硬化則とし, 荷重方法は単調載荷とした. 図5に解析モデルを示す. 欠陥先端周辺の要素を円環状に配置し, 最小要素寸法を 0.05 mm とした. このモデルを用いて, 亀裂先端における破壊駆動力のパラメータ J 積分と塑性拘束の度合いを表す応力三軸度を求め, 実験における亀裂進展量との相関を検討した. また, 上記の塑性拘束を考慮する手法(Toughness Scaling Model 手法)を用いて各亀裂先端の破壊靭性を算出し, それらを用いて破壊点を予測した.

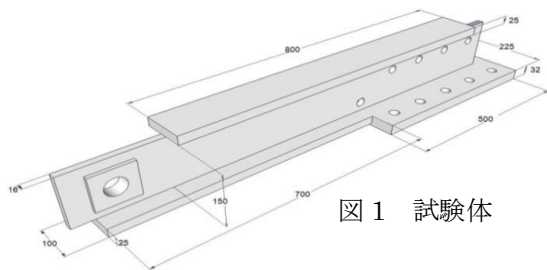


図1 試験体

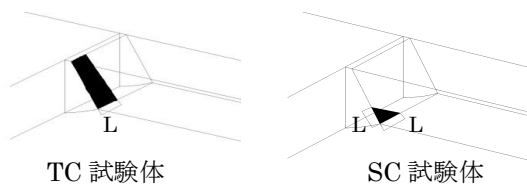


図2 欠陥形状

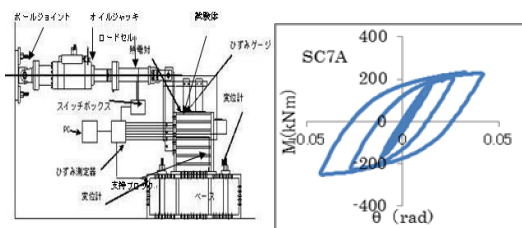


図3 実験装置

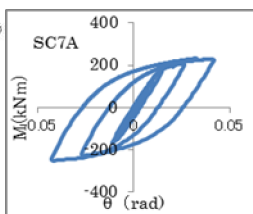


図4 履歴曲線

4. 研究成果

(1)実験結果

実験より求めたモーメント - 回転角関係の履歴曲線を図4に, 実験結果を表1に示す. 累積塑性変形倍率 η およびエネルギー量による変形倍率 η_s は引張側荷重のみから算出した. なお表中の a は延性亀裂進展量, 試験体名の数字は想定欠陥寸法, A・C は試験体製作時に挿入した金属板の種類を表す. 累積塑性変形倍率 η および骨格曲線による変形倍率 η_s は引張側荷重のみから算出した. SC-7A と SC-14A の塑性変形倍率の値を比較すると, 想定した欠陥の寸法が2倍違うのに対し, 値はSC14Aの値の方が大きくなった. SC21A は破壊が早期に発生したが, 延性亀裂の面積は1番大きくなった. 実験より求めたモーメント - 回転角関係の例を図5に示す. いずれの試験体も安定した履歴ループを描いている. TC8A 試験体では, $20p$ の正載荷時に人工欠陥挿入面より脆性破壊が発生し実験を終了した. SC7 では $40p$ の正載荷時に破壊に到った. 破断面の例として TC4A 及び SC-7A 試験体の破断面を写真1, 2に示す. 図6に全試験体の骨格曲線を示す. SC7, 14, 21A においては弾性範囲では同一線上にあるが, SC21A は塑性域に到達後, すぐに破壊に至っている. SC7A は, SC14A より想定欠陥寸法が小さい SC14A の欠陥に対する面積比は $1/4$ だが, SC7A の方が若干, 早く破壊に至った.

表1 実験結果

試験体	L (mm)	a (mm)	M_{max} (kNm)	θ_{max} (rad)	η
TC4A	5.65	2.34	252.8	0.019	8.9
TC8A	10.0	1.0	192.7	0.044	1.2
TC8C	9.8	8.9	222.3	0.044	9.0
SC7A	10.2	13.9	233.6	0.041	8.8
SC7C	5.68	6.2	261.4	0.050	10.8
SC14A	12.6	3.7	243.5	0.042	8.9
SC14C	5.07	6.7	214.7	0.013	3.7
SC21A	18.2	13.0	203.4	0.025	2.9

A : アルミニウム板 C : 銅板

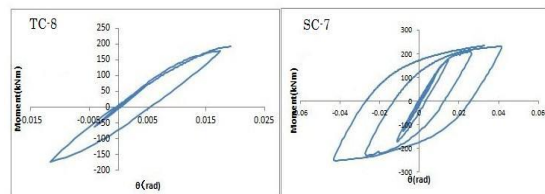


図5 モーメント・回転角関係

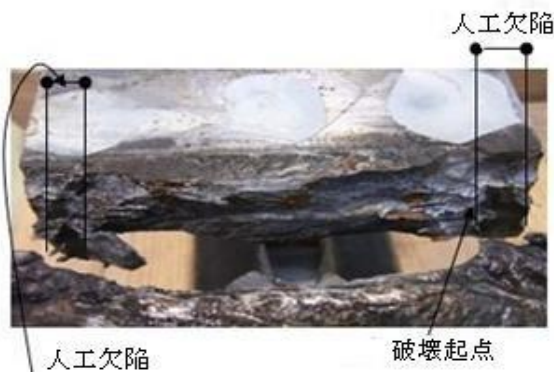


写真1 TC-4 破断

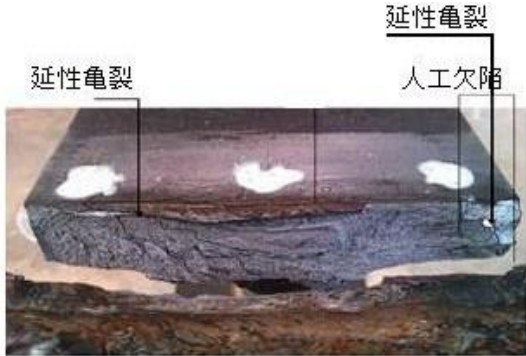


写真2 SC-7A 破断面

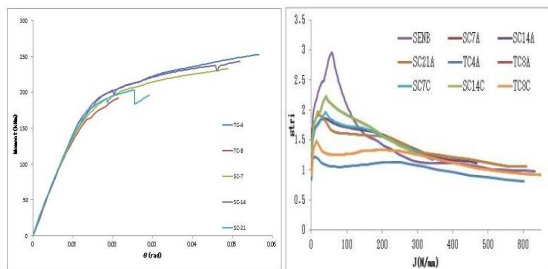


図6 骨格曲線

図7 T_s -J 関係

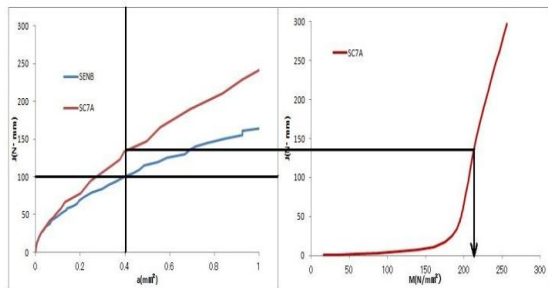


図8a J-a 曲線

図8b J-M 曲線

(2)欠陥寸法が脆性破壊の発生に及ぼす影響

図7に応力三軸度 - J 積分関係の例を示す。ここで、応力三軸度(T_s)は、延性亀裂先端近傍における最大値をとった。応力三軸度が高い場合、脆性破壊が発生した際のJ積分の値は低く、逆に低い場合は脆性破壊が発生した際のJ積分の値は高くなる傾向を示し、脆性破壊発生時の破壊靱性に塑性拘束の度合いが影響を及ぼしていることが確認できる。

SENB 試験の値に比べ全ての試験体において亀裂先端の塑性拘束が低いことが分かる。亀裂寸法が大きくなるにつれて三軸度の値が小さくなる傾向にあるが、大きな差はない。亀裂寸法が大きくなるにつれてJ積分の伸びは大きい。

(3)J-M 関係による破壊点の予測

材料が持つ靱性を SENB 試験から判断し、各試験体モデルと比較するためには塑性拘束の違いを考慮する必要がある。対象とする弾塑性の J_c は破壊靱性試験 (SENB 試験) から求められた値であるが、SENB 試験を用いて導出した J_c に対し、本実験の亀裂形状の違いから塑性拘束の度合いの違いが生ずる。このことから、SENB 試験で求めた J_c と同条件下で各試験体を比較するためには塑性拘束の違いを考慮し、塑性拘束が弱まれば、亀裂先端部での応力集中は緩和され高い応力集中を受ける領域は小さくなるはずである。SENB 試験と同じ確率で破壊に至るためには、亀裂先端の高応力領域の体積が、SENB 試験片の体積と等しくなるまで割り増した修正 J_c を作用させる必要がある。この手法を用いて破壊点の予測を行なった。但し、本研究では高応力領域の体積の代わりに体積を要素厚さで割った面積(a)を使用した。高応力領域は $3\sigma_y$ 以上の領域とした。見かけの J_c と曲げモーメント M を用いた破壊点の予測を図 8a・8b 及び表 2 に示す。なお、破壊靱性試験の結果より $J_c=100\text{N/mm}$ とした。

TC4A と SC7A の破壊点の予測値は実験値を的確に捉えており、その他においても概ね実験値を捉えていると言える。ただし、SC7C と SC14A では、実験において延性亀裂が進展し、大きな塑性変形能力を示したことから、かなり安全側の評価となっている。

また、Toughness Scaling Model により塑性拘束を考慮する手法の有効性を検討した結果、この手法では塑性拘束を的確に考慮されない場合があることも示唆された。即ち、実験では亀裂先端の鋭敏性に応じて破壊靱性 J_c は異なるが、解析上では応力三軸度に差が生じず、等価な応力状態を想定することにより塑性拘束の影響を考慮するこの手法では、鋭敏性を考慮する必要があることが明らかとなった。

(4)まとめ

延性亀裂の安定成長から脆性破壊の発生までの再現実験を行い、解析によって破壊時の状態を検証した。

梁フランジ側に貫通欠陥を設けた試験体では、延性亀裂の進展量が小さく、ダイアフラム側に貫通欠陥を持つ試験体と同様の変形性能・破壊性状を示したため、溶接始端角部に更に塑性拘束が低い表面欠陥を挿入

した。その結果、欠陥から進展する延性亀裂の進展量と FE 解析から求めた塑性拘束の度合いとの間に一定の関係が確認できた。応力三軸度-J 積分関係より、応力三軸度が高い場合、脆性破壊が発生した際の J 積分の値は低く、逆に低い場合は脆性破壊が発生した際の J 積分の値は高くなる傾向を示し、脆性破壊発生時の破壊靱性に塑性拘束の度合いが影響を及ぼしていることが確認できた。また、亀裂寸法が大きくなるにつれ三軸度の値が小さくなる傾向にあるが、大きな差は見られない。ただし、亀裂寸法が大きくなるにつれ J 積分の伸びは大きい。

破壊点の予測では、概ね実験結果を捉えることができた。しかし、予測値にはばらつきが大きいので、今後、更に精度の向上に向けた検討が必要である。

表 2 修正 J_c に対する破壊点の予測値

試験体	修正 J_c	M(解析)	M(実験)
TC4A	187.9	242.6	252.8
TC8A	160.0	205.6	192.7
TC8C	227.2	213.3	222.3
SC7A	134.2	212.7	233.5
SC7C	205.3	222.3	261.4
SC14A	141.9	202.6	243.5
SC14C	203.1	229.5	214.7
SC21A	137.3	196.7	196.0

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 岩下勉, 東康二, 欠陥を有する完全溶込み溶接始末端部から発生する脆性破壊 塑性拘束が及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 77, No. 761, pp.105-112, 2012, 査読有
- ② Iwashita, T. and Azuma, K., Effect of Plastic Constraint on Brittle Fracture in Steel: Evaluation Using Toughness Scaling Model, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 138, No. 6, pp.744-752, 2012, 査読有
DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000507

[学会発表] (計 8 件)

- ① Iwashita, T., Kobayashi, R. and Azuma, K., Assessment of brittle fracture for single edge notched bend specimens with different machined-notch depth, 32nd Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2013, Nantes, France, 11 Jun., 2013
- ② Azuma, K. and Iwashita, T., Further

experimental study on assessment of safety of beam-column connections with weld defects from brittle fracture, Proc. of 14th Int. Symposium on Tubular Structures, Tubular Structures XIII, pp. 351-358, London, UK, 12 Sep., 2012

6. 研究組織

(1)研究代表者

東 康二 (AZUMA KOJI)
崇城大学・工学部・准教授
研究者番号：80320414

(2)研究分担者

岩下 勉 (IWASHITA TSUTOMU)
有明工業高等専門学校・建築学科・准教授
研究者番号：10332090