

研究

梁端部の溶接欠陥が梁の塑性変形能力に与える影響

その4 脆性破壊性能評価方法の検討

吉村 鉄也*

本研究は、L形固形エンドタブ特有の溶接欠陥と梁の塑性変形能力との関係を、繰返し曲げを受ける実大柱梁接合部を対象として系統的に調べ、溶接欠陥の許容限界評価について検討することを目的としている。前報¹⁾では、欠陥長さ、部材間強度比を主な変数とした実大実験について報告している。その実験結果に対しての脆性破壊評価を行う前段階として本報では、別途製作した試験体について WES2808¹⁾評価法に基づいた脆性破壊評価を行い、実大柱梁溶接接合部への適用の可能性を検討した。

キーワード：L形固形エンドタブ、溶接欠陥、脆性破壊、塑性変形能力、WES2808

まえがき

欠陥を有する鉄骨骨組の脆性破壊に関する安全性の評価については、日本溶接協会規格 WES2808：「動的繰返し大変形を受ける溶接鋼構造物の脆性破壊性能評価方法」²⁾（以下、WES2808）が発行されている。この規格は WES2805³⁾にある C T O D 設計曲線の適用範囲を、大変形・動的繰返し負荷および歪集中の構造的な不連続部まで拡大したものである。これは、豊富な要素実験に基づく成果で、数多くの検証が行われている。しかし、実大実験に対する適用の可否については検討事例が少なく、以下の項目について情報が不足していることも否めない。1つめは「歪集中係数」の設定について、固形エンドタブを対象とした解析例は板厚貫通亀裂に対する1例のみであり、部材断面が変化した場合および表面亀裂に関する情報。2つめは「塑性拘束補正係数」の設定について、本研究で対象とする異幅継手の両端に表面亀裂が存在する場合に関する情報。3つめは「等価貫通亀裂寸法」の設定について、フランジ幅の表面亀裂を応力拡大係数が等価な板厚貫通亀裂に置き換えるための情報。4つめは「C T O D 設計曲線」が適用可能であるか否かの情報

である。従って本報では、WES2808 の適用性について、実大実験と、それをモデル化した有限要素解析から WES2808 評価法を踏まえて、前述の項目に対する一考を加え、梁の破断時期を予測し、塑性変形能力の推定を行う。

1. 実験計画

(1) 試験体および実験変数

試験体形状および寸法を図-1に示す。試験体は、通しダイアフラム補剛形式で角形鋼管柱とH形断面

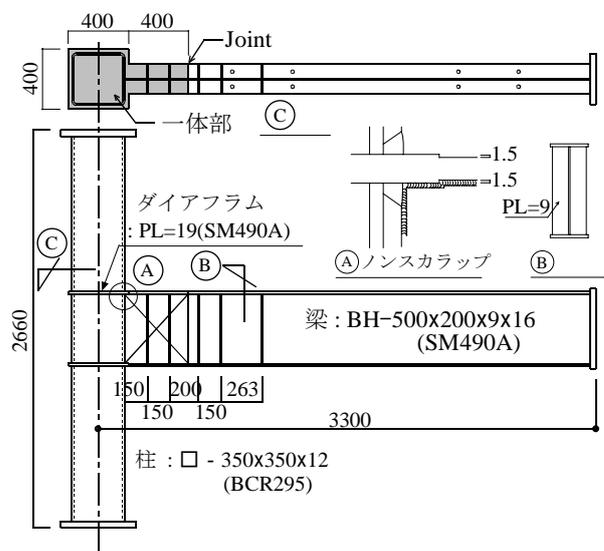


図-1 試験体形状

*鉄構事業部 技術開発課

面梁から成るT字形部分骨組である。本実験では、欠陥形状以外の因子を排除するために、図-1の網掛け部に示すダイアフラムと梁フランジを溶接無しで同一鋼板から切り出す形状とした。梁端には補剛スチフナーを配置して、梁フランジおよびウェブの局部座屈を防いだ。また、図中A部はノンスカラップとしている。試験体一覧を表-1に示す。実験変数はダイアフラム側入隅部における欠陥長さ（無欠陥含め5種類）であり、詳細を図-2に示す。なお、本試験体では、L形固形エンドタブを用いた溶接部の形状を再現するため、梁フランジ端面に3mmの余盛り部を付けており、欠陥長さはこの余盛り部を含めた長さで定義している。欠陥の加工は放電加工にて行っており、スリット幅は0.4mmで、先端はアール形状（ $r=0.2\text{mm}$ ）である。なお、ダイアフラムと梁フランジの板厚段差部にはすべて $r=2\text{mm}$ のアールをつけ、欠陥部以外の歪集中を避けた形状とした。欠陥は上下フランジの両端部、計4カ所に設けている。

表-1 試験体一覧

試験体名	欠陥高さ	欠陥長さ
DBT-S23	5mm	23mm
DBT-S18		18mm
DBT-S13		13mm
DBT-S8		8mm
DBT-N0	欠陥なし	

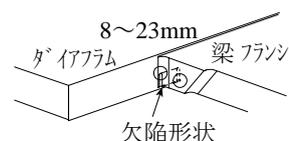


図-2 欠陥形状詳細

(2) 使用鋼材の機械的性質

使用材料の機械的性質を表-2、表-3に示し、梁端部に用いた材料のシャルピー試験結果を図-3に示す。引張試験はJIS Z 2201 5号試験片を、シャルピー試験はJIS Z 2202 4号試験片を使用し、CTOD試験片の形状を図-4に示す。CTOD試験片の初期亀裂長さ(a_0)については、実大試験体の欠陥の加工方法と同じく放電加工にて行い、疲労予亀裂は施していない。

表-2 素材試験結果

採取部位	材質	σ_y (N/mm^2)	σ_u (N/mm^2)	YR (%)	ϵ_u (%)	vE0 (J)	B0 (%)
ダイアフラム 梁フランジ	SM490A	396	584	68	16.9	41	87
柱	BCR295	401	474	85	-	-	-

σ_y : 降伏点 σ_u : 引張強さ YR: 降伏比 ϵ_u : 一様伸び
vE0: 0°Cのシャルピー吸収エネルギー B0: 0°Cの脆性破面率

表-3 CTOD試験結果

最大荷重 P(kN)	クリップゲージ 開口変位 Vp (mm)	K値*1 ($\text{N}/\text{mm}^{3/2}$)	限界CTOD*1 $\delta c(\text{mm})$	
27.8	1.71	2780	0.929	*2 0.925 (10°C)
26.8	1.85	2670	1.001	
27.9	1.55	2790	0.846	
28.2	1.35	2830	0.741	*2 0.658 (-30°C)
26.7	0.98	2670	0.545	
27.2	1.25	2730	0.688	

*1: WES1108より算定 *2: ()内は試験温度

(3) 荷重方法

荷重履歴は正負漸増交番繰返し荷重とし、変位振幅は線材計算値による梁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 を基準に20p, 40p, 60pの各サイクルを2回ずつ行う。なお、すべての実験は約10°Cの温度条件下で行うものとし、必要に応じて、ドライアイスを用いて冷却した。

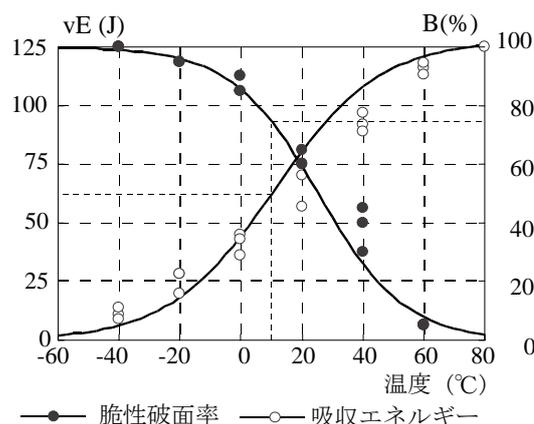


図-3 シャルピー遷移曲線

2. 実験結果

実験結果を表-4に示し、図-5に梁端モーメント M_m —梁端相対回転角 θ_m 関係を示す。いずれの試験体も初期サイクル20p(+1)において欠陥高さ方

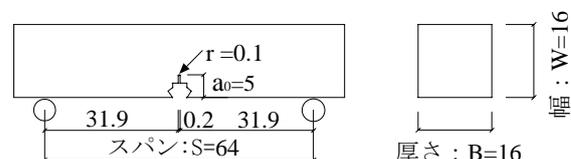


図-4 CTOD試験片

向先端に延性亀裂を確認し、その後のサイクルにて比較的短い進展で破壊が停止する「ポップイン」を生じて端面の亀裂が板厚方向に貫通した。1回～数回のポップインにより梁フランジ幅方向に破壊が進展するが、その後も荷重の上昇が見られる場合は、さらに最大荷重到達まで载荷を続けた。破断面を図-6に示す。起点は欠陥高さ方向先端近傍、端面から2.0mm～3.5mmの位置である。尚、図-5、図-6の丸数字がポップイン発生時である。

3. 有限要素解析

(1) 解析モデル

弾塑性有限要素解析を行う。解析モデルは図-7に示すように、対称性を考慮して、1/4部分について行う。柱梁接合部近傍ではソリッド要素を用

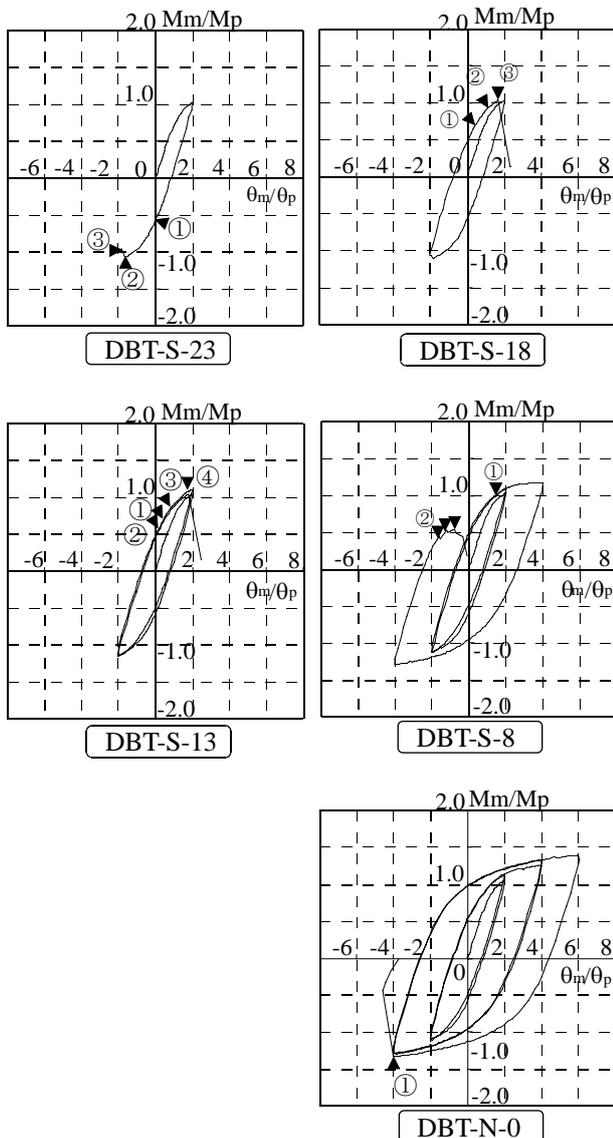


図-5 荷重—変形関係

い、最小寸法は欠陥先端で 0.035 x 0.07 x 1.0mm である。その他の部分では梁要素を用いた。CTOD試験片についても、図-8に示す形状寸法で、1/4部分を対象とした要素モデルを作成した。要

表-4 実験結果

試験体名	破壊時期	$\Sigma\theta_{pl}$ (rad)	η	$\theta_s^+ \times 10^{-2}$ (rad)	$\theta_s^- \times 10^{-2}$ (rad)	η_s
DBT-S23	20p(-1)	0.020	2.0	0.83	-1.47	1.49
DBT-S18	20p(+2)	0.035	3.5	0.85	-1.50	1.52
DBT-S13	40p(+1)	0.064	6.5	1.17	-1.64	1.66
DBT-S8	40p(+2)	0.139	14.1	3.10	-4.30	4.35
DBT-N0	60p(-1)	0.377	38.2	6.81	-6.05	7.39

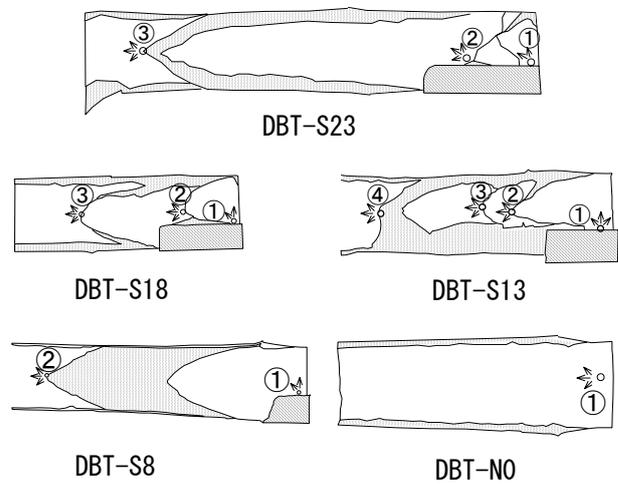


図-6 破面スケッチ

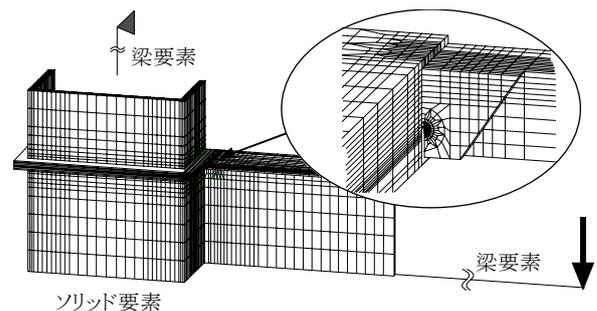


図-7 実大解析モデル

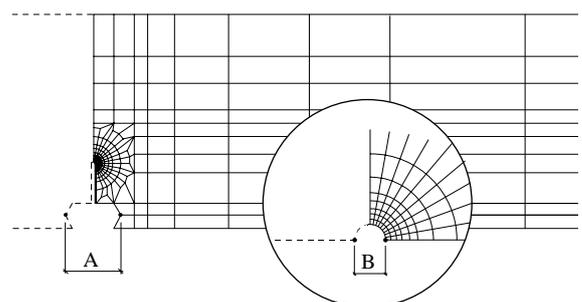


図-8 CTOD解析モデル

素はすべてソリッド要素とし、最小寸法は図中に示すノッチ先端位置で、0.017x0.05x1.0mmである。解析方法は、汎用非線形構造解析プログラムABAQUS ver.6.4を用いた。応力-歪関係は素材試験結果（試験温度：約10℃）を入力した。

(2) 荷重-変形関係

解析によって得られた結果を実験結果と比較する。図-9にDBT-N0の解析モデルと実大試験体のモーメント-梁端回転角関係を示す。実験値の方が同一変形時における荷重が若干高いが、両者はほぼ対応している。他の解析モデルも同様の結果が得られた。図-10に、CTOD試験の荷重-クリップゲージ開口変位関係を示す。初期性状から安定延性亀裂成長の初期段階では、良い対応を示しているが、延性亀裂成長が進み、最大荷重到達までの区間で、解析結果の荷重が高くなっている。したがって、解析値の破断限界推定方法は、実験結果での最大荷重点を通り、弾性勾配で延長した線分との交点であるとし、この時点でのCTODを限界CTODとした。限界CTODの解析値(δ_{FEA})と実験結果から得られたWES1108による計算値(δ_c)との比較を図-11に示す。 δ_{FEA} は δ_c より小さめの値を与えているが、両者の相関は高く

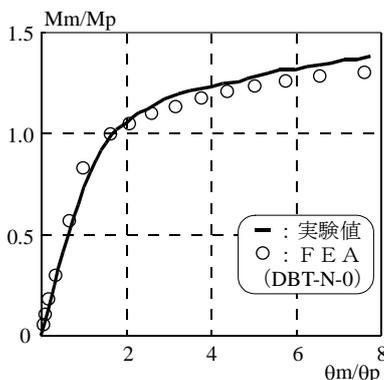


図-9 実験値と解析値の比較（実大モデル）

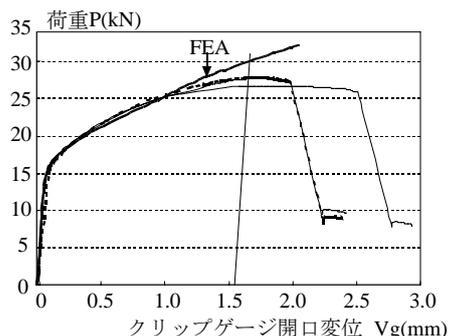


図-10 荷重-変形（CTODモデル）

1.09 程度であった。

(3) 繰返し荷重-歪履歴の算定方法

図-12に繰返し歪の算定方法を示す。数値解析により求めた荷重-梁端回転角を用いて、先ず正側の荷重-回転角曲線を負側に反転する（図中①）。次にサイクルピーク点にて弾性勾配で除荷し、負側の曲線を残留変形分移動させる（図中②、③）。さらに負側のサイクルピーク点にて弾性勾配で除荷し、正側の荷重-回転角曲線を残留変形分移動させる（図中④、⑤）。各サイクルにおいて同様の方法にて作図し、繰返し履歴を作成する（図中⑥、⑦、⑧）。この繰返し荷重-梁端回転角関係図を利用し、数値解析により求めた荷重-歪曲線に対して、各サイクルの同じ荷重に対応する歪値で弾性勾配除荷を行い、繰返し荷重-歪履歴を作成した。実験

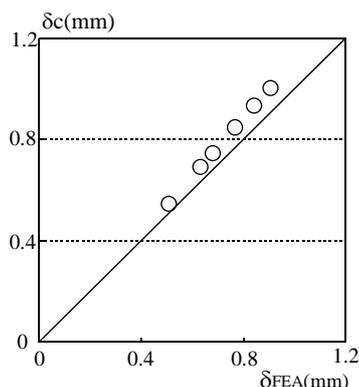


図-11 実験値と解析値の比較（CTODモデル）

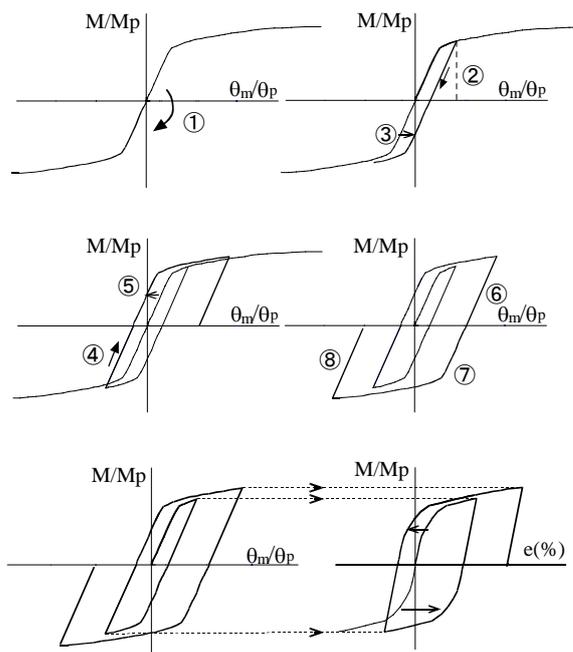


図-12 繰返し歪の算定方法

値と算定値の比較を図-13 に示す。比較対象は DBT-N0 に対するもので、歪については梁フランジ外面の 2 点の平均値とした。本方法ではバウシinger 効果の影響は再現できないが、各サイクルピーク時での値はほぼ対応していると言える。

4. 脆性破壊評価

(1) 繰返し予歪の算定

図-14 に局所領域の定義を示す。WES2808 と同様に、想定する欠陥高さを含む範囲（この場合 5x5mm）の面積平均歪を評価歪として用いている。しかし WES2808 との違いは梁幅方向の位置が、端面から 5mm 内側の断面で算定するのに対して本評価では端面の局所歪とした。これは実験結果での破壊の起点が 2mm 程度であったからである。図-15 に端面と 5mm の位置の局所歪を示す。ここでの局所歪は、3 章 (3) の繰返し荷重-歪履歴の算定方法が局所歪にも応用できるとした。

WES2808 では、梁端が脆性破壊する過程として、梁端が繰返し荷重を受けて、n 回目の荷重サイクルで破壊する場合を考えた時、(n - 1) 回までのサイクルで蓄えられる歪量を繰返し予歪と定義し、材質変化を生む歪とする。n 回目の歪量を破壊歪と定義し、破壊の駆動力となる歪とする。

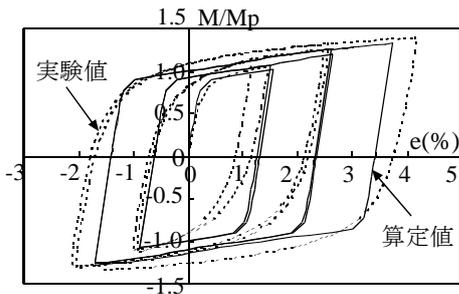


図-13 繰返し履歴の比較

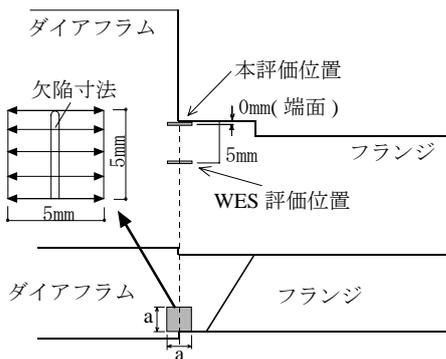


図-14 局所領域の定義

繰返し予歪は図-16 に示すように前荷重サイクルの最大荷重を上回る荷重範囲だけを有効な荷重範囲とし、引張荷重側と圧縮荷重側のそれぞれについて、有効歪 ϵ_{eff} (絶対値) を加算し、その大きい方を繰返し予歪 ϵ_{pre} とする。本論でもこの方法を踏まえた。

図-15 の荷重-歪関係に対して、図-16 に定義する繰返し予歪量を求める。結果を図-17 に示す。図中の記号は、各変位サイクルのピーク時に対応する予歪を表している。

(2) 繰返し負荷による強度変化

梁端が繰返しによる歪を蓄積して、材料の機械的強度 (降伏応力・引張強さ) が上昇する。この

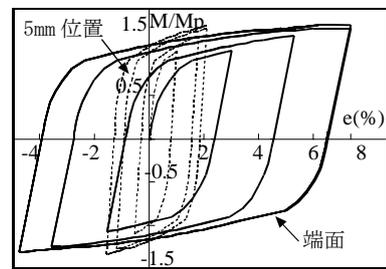


図-15 局所歪

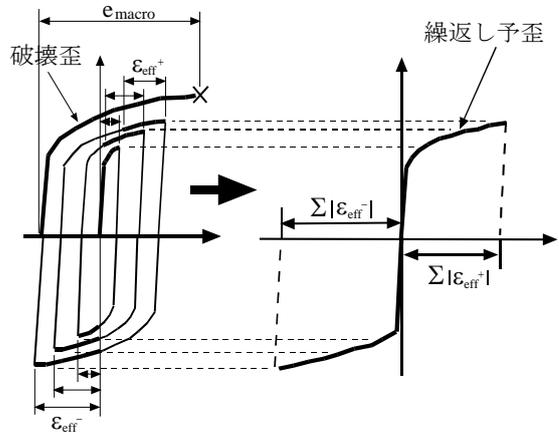


図-16 繰返し予歪と破壊歪の定義

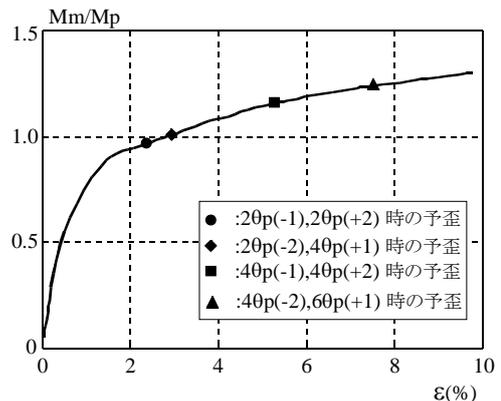


図-17 繰返し予歪量

強度上昇量は靱性の低下と密接な関係があることから、先ず繰返し負荷による強度変化量($\Delta\sigma_{fPD}$)を算定し図-18に示す。WES2808では素材強度から予歪材の強度推定式が提案されており、これに依った。

(3) 繰返し負荷による靱性変化

梁端が繰返しによる歪を蓄積して靱性が劣化する。この靱性の低下量は、繰返しによって材料の破壊靱性遷移曲線を高温側に移行させる働きがあるとする考えのもと、WES2808では温度移行量(ΔT_{PD})を求めることによって靱性の低下を評価している。温度移行量は3章(2)で算定した強度変化量の関数として与えられている。

繰返しによる温度移行量を図-19に示す。初期サイクル20p(+1)によって28.2℃の温度移行量がある。靱性の変化量は材料の破壊靱性遷移曲線を高温側に移行させることによって評価する。したがって、CTOD試験結果より求めた材料の限界CTOD-遷移関係を、図-20に示すように高温側に移行させ、実験時の温度(今回は10℃)でのC

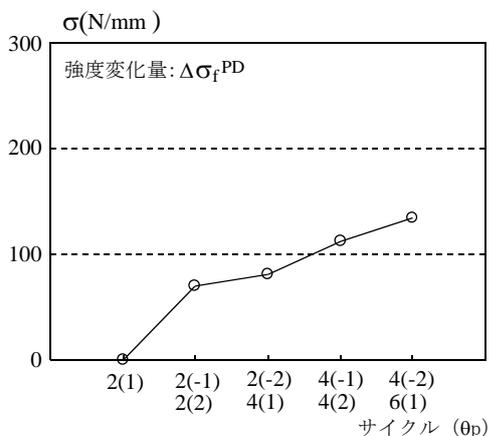


図-18 繰返しによる強度変化量

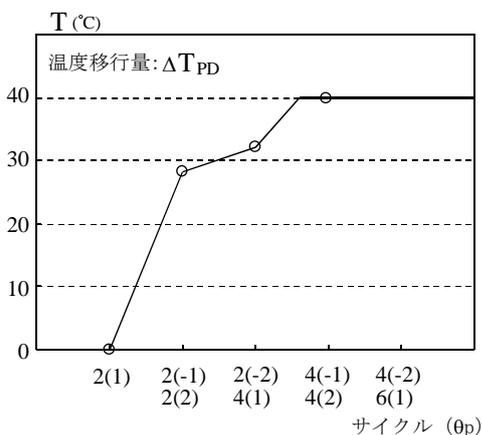


図-19 繰返しによる温度移行量

TOD値を読みとり、靱性の劣化量とする。この場合、初期サイクル20p(+1)の载荷を行うことにより、限界CTODは初期値から0.163mm低下することになる。

(4) 破壊限界CTOD

数値解析結果をもとに、欠陥先端の応力分布を比較し、CTOD試験片の破壊限界CTOD($\delta_{c,3p}$)と、実大試験体の破壊限界CTOD($\delta_{c,Struc.}$)との関係を検討する。CTODモデルと、実大モデルS23について、最大主応力が材料の降伏点の3倍となる等応力線をCTOD $\delta=0.62, 0.93mm$ について描き、図-21に示す。CTODモデルとほぼ同じ応力状態であった。よって、本評価においては実大試験体とCTOD試験片の欠陥先端の応力状態を等価とみなし、CTOD試験より得られた破壊限界CTOD値で実大試験体を評価することとした。

(5) 脆性破壊評価

本評価では実大解析モデルの欠陥先端の開口変位をCTOD($\delta_{Struct.}$)としている。この梁端部のCTOD($\delta_{Struc.}$)-塑性率関係と、4章(1)~(4)において、破壊を想定する部位の繰返し負荷による靱性劣化を評価した破壊限界CTOD

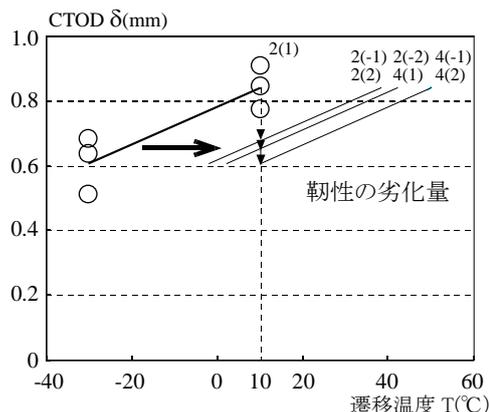


図-20 繰返しによる靱性変化量

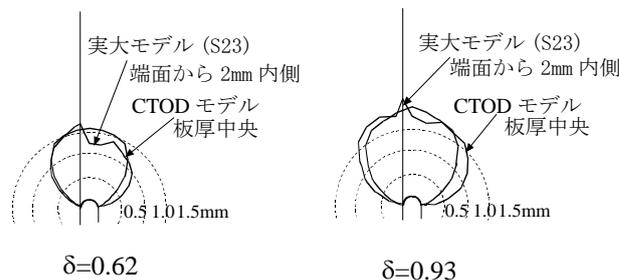


図-21 最大主応力分布 (PS=3σ_y)

($\delta_c, Struc.$) - 塑性率関係を図-22 に示すように重ね合わせ、脆性破壊評価を行う。脆性破壊の評価は、梁端部のCTOD ($\delta_{Struc.}$) が破壊限界CTOD ($\delta_c, Struc.$) を越えた時点で破壊が生じるとする。

(6) WES2808 評価

本評価による結果と比較するため、WES2808 による評価を行う。算定にあたっては以下に示す諸条件を仮定した。

- 1) 繰返し予歪の算定については、端面から 5mm 内側の局所歪を 4 章 (1) の図-15 に示したように繰返し予歪に変換して用いた。
- 2) 繰返し負荷による強度変化量の算定については、WES2808 の手順により求めた。
- 3) 繰返し負荷による靱性変化量の算定については、WES2808 の手順により求めた。
- 4) 破壊限界CTODについては、シャルピー試験による簡易評価が提案されており、本実験でのシャルピー試験結果を用いて求めた。本研究で実施したCTOD試験の結果と比較し、図-23 に示す。

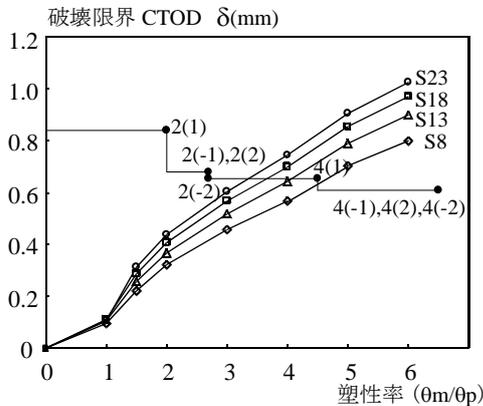


図-22 脆性破壊の予測

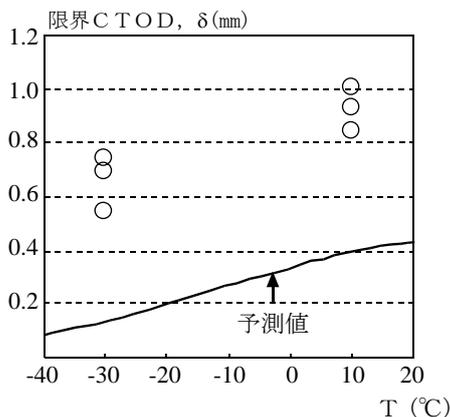


図-23 CTOD遷移曲線の比較

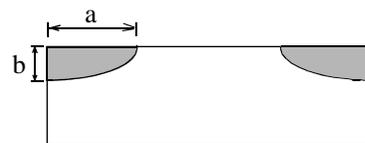
5) WES2808 では、破壊限界CTOD ($\delta_c, 3p$) と構造要素の破壊限界CTOD ($\delta_c, Struc.$) の相関には塑性拘束補正係数(β)の関係があるとしているのでその手順により求めた。

6) WES2808 では、亀裂特性寸法 (a) の算定については、WES2805 の手順で算定するとあるが、梁フランジ始末端の欠陥については、算定方法が記載されていないため、図-24 に示す取り方で定義して算定した。

7) WES2808 では、構造要素におけるCTOD ($\delta_{Struc.}$) の値を、局所歪 (ϵ_{local}) と亀裂特性寸法 (a) を変数とした「CTOD設計曲線」を与えている。CTOD設計曲線と本評価との比較を図-25 に示す。ここでは比較のため、CTOD設計曲線に用いる局所歪は図-15 に示す本評価で用いた端面における値とした。

(7) 塑性変形能力の比較

以上より得られた結果を実験値と比較する。表-5 および図-26 にスケルトン塑性変形倍率での比較を、表-6 および図-27 に累積塑性変形倍率での比較を示す。本評価では、試験体 S13 に対して実験値と予測値の比が 0.52 と過大評価する程度が大きい。他の3体の試験体に対しては、実験値と予測値の比は、0.67~0.88 となり、概ね良い対応を示すと共に、欠陥長さの増大に伴うスケルトン塑性変形倍率の低下の傾向を良く予測している。



S23 : \bar{a} = 7.1mm S13 : \bar{a} = 5.4mm
S18 : \bar{a} = 6.4mm S8 : \bar{a} = 3.8mm

図-24 亀裂特性寸法の仮定

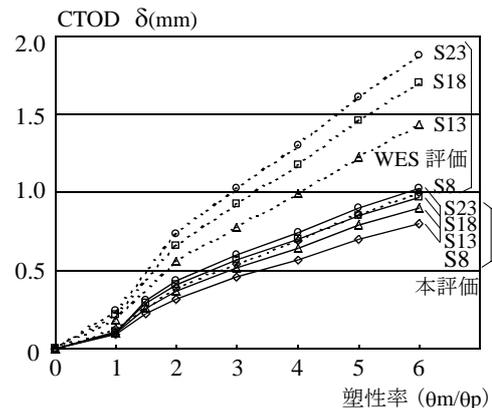


図-25 解析値とCTOD設計曲線の比較

表-6 予測結果（累積塑性変形倍率）

	本評価			WES2808 評価		
	実験値	予測値	実験値 / 予測値	実験値	予測値	実験値 / 予測値
	η	η		η	η	
S23	2.0	6.7	0.30	2.0	29.3	0.07
S18	3.5	7.0	0.50	3.5	36.2	0.10
S13	6.5	10.2	0.64	6.5	46.7	0.14
S8	14.1	25.4	0.56	14.1	60.4	0.23

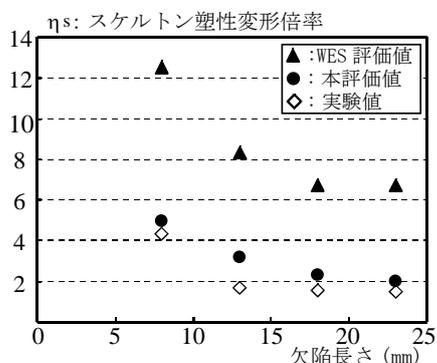


図-26 スケルトン塑性変形倍率での比較

表-5 予測結果（スケルトン塑性変形倍率）

	本評価			WES2808 評価		
	実験値	予測値	実験値 / 予測値	実験値	予測値	実験値 / 予測値
	η_s	η_s		η_s	η_s	
S23	1.49	2.01	0.74	1.49	6.76	0.22
S18	1.52	2.27	0.67	1.52	6.76	0.22
S13	1.66	3.17	0.52	1.66	8.38	0.20
S8	4.35	4.94	0.88	4.35	12.55	0.35

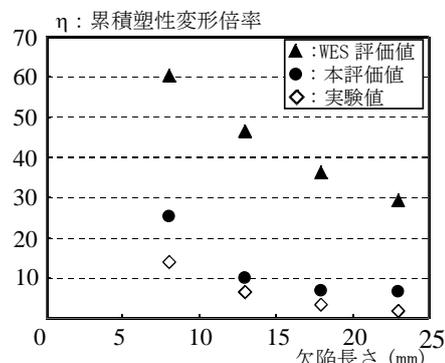


図-27 累積塑性変形倍率での比較

これに対し、WES2808 による評価では、実験値を予測値が 3~5 倍過大評価する結果となった。

5. まとめ

柱梁接合部の脆性破壊時期を予測するにあたり、WES2808 を踏まえて検討を行った結果以下のことが明らかとなった。

- 1) 本評価法による予測値は、実験のスケルトン塑性変形倍率の脆性破壊時期を 1.0~1.9 倍の範囲で過大評価するが、欠陥長さの増大に伴う変形能力の低下の傾向は概ね、良く対応している。一方、WES2808 による評価では、2.8~5.0 倍の過大評価となる。
- 2) 繰返し履歴に伴う予歪量は、単調載荷時の数値解析結果より予測することができる。
- 3) WES2805 の CTOD 設計曲線は、溶接終始端の欠陥に対する CTOD を過大評価する。
- 4) 本実験で用いた CTOD 試験片の欠陥近傍における応力状態は、実大実験の欠陥近傍の応力状態と概ね等価と見なすことができる。

あとがき

本報で行った実大実験では、溶接部の材質不均質の影響を排除した試験体を意図的に使用し、WES2808 で靱性のバラツキ要因以外の影響因子

について検討したものである。実際の溶接接合部の評価（前報 1)の試験体での評価）は今回得られた情報を踏まえ、破壊起点の正確な CTOD 情報を把握し、再度検討することが必要と考える。

謝辞

本研究は、神戸大学と駒井鉄工との共同研究として行われたものであり、神戸大学大学院教授田淵基嗣博士および神戸大学工学部助教授田中剛博士には多大なるご指導をいただきました。また実験を行うに際し、AW 検定協議会（東日本）の援助を受けました。関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 吉村鉄也・横山幸夫：梁端部の溶接欠陥が梁の塑性変形能力に及ぼす影響（その 3），駒井技報，VOL.23，pp. 5-11，2004.3
- 2) 日本溶接協会：WES-2808「動的繰返し大変形を受ける溶接構造物の破壊性能評価方法」2003 年 10 月
- 3) 日本溶接協会：WES-2805「溶接継手の脆性破壊発生および疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法」1997 年 3 月

