

1. はじめに

鉄骨造の梁ウェブには設備配管用の貫通孔が設けられることが多い。実際の設計では有孔部断面で梁の耐力が決まることがないように断面性能が無孔部と同等になるような補強を行うのが一般的である。また、貫通孔の直径を梁せいりの 1/3 以下にしたり、梁端の塑性化領域には貫通孔を設けられないなどの制約もある。

一方、梁端の塑性化領域に無補強の貫通孔を設けた場合、梁の耐力は低下し、梁降伏後の塑性変形は有孔部フランジの局部座屈変形が支配的となる。従って、通常は梁端で生ずる局部座屈変形が有孔部位置へと移動し、梁端溶接部近傍の塑性ひずみは低減されると考えられる。

ノースリッジ地震や兵庫県南部地震で指摘された梁端接合部の脆性破断は、梁端接合部へのひずみの集中に起因するとされている。その対策として、塑性化領域を梁端から離す RBS 工法¹⁾やハンチ補強、あるいは梁端のフランジ上にカバープレートを用いることで直接的にスカラップのひずみ集中を緩和する方法²⁾等が報告されている。しかし、これらの方法では部材製作の手間が増えたり、梁端の収まりが悪くなるなど実用上の問題は多い。

こうした現状を背景とし、本研究では梁端の塑性化領域に意図的に無補強のウェブ貫通孔を設け、鉄骨梁部材端部のひずみ集中による脆性破断を回避することで部材としての強震時の耐震性能を向上させるとともに設備計画上の高い利便性も兼ねた梁部材の可能性について検討するものである。

2. 有孔梁の耐力と貫通孔の位置

2-1 有孔梁の耐力

H 型断面鉄骨梁のウェブに円形貫通孔を設けた有孔梁の耐力はせん断力 Q と曲げモーメント M の相関式 (M - Q Interaction) から算定される³⁾。有孔部断面内の耐力は、Fig. 1 に示すように純曲げ時の耐力 M_{ph} 、曲げモーメントは作用せずにウェブ断面全体でせん断耐力を迎えた状態 Q_{ph} 、有孔部の断面内でせん断耐力

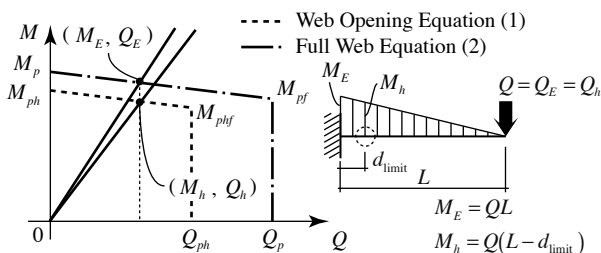


Fig. 1 M - Q Interaction and Access Limit of Web Opening to Beam End

Q_{ph} を保持しながら迎えた曲げ耐力 M_{phf} の 3 点を結んだ点線の M - Q Interaction として表現される。また無孔梁も同様にせん断耐力 Q_p 、曲げ耐力 M_p 、 M_{pf} を求め、その 3 点を結んだ一点鎖線の M - Q Interaction で耐力が表現される。

$$M_h = M_{ph} - (M_{ph} - M_{phf}) Q_h / Q_{ph} \quad \text{and} \quad Q_h < Q_{ph} \quad (1)$$

$$M_E = M_p - (M_p - M_{pf}) Q_E / Q_p \quad \text{and} \quad Q_E < Q_p \quad (2)$$

2-2 ウェブ貫通孔の位置

前節の耐力式を用いて梁端からの貫通孔の位置と全塑性耐力の関係について説明する。有孔梁が無孔梁と同等の耐力を有する条件は、梁端部と有孔部が全塑性耐力に同時に達する時の孔位置（梁端からの限界距離）より梁端部から離すことである⁴⁾。この理論と有孔部の全塑性状態における曲げ耐力の減少を利用し、限界距離より孔位置を梁端に近づけることで梁端より先に有孔部で塑性化を進行させる。

i) 貫通孔の梁端からの限界距離

自重は無視し、他端固定の片持ち梁を例に挙げる。ある H 型断面梁について貫通孔の開口率が決定すれば Fig. 1 のように耐力式が決定され、スパンが決まれば端部・有孔部それぞれに作用するせん断力と曲げモーメントの関係が明らかになる。端部が全塑性状態に達し、同じせん断力で有孔部も全塑性状態に達したときの梁端からの距離が限界距離である。ただし、この時孔部に働くせん断力 Q_h がせん断耐力 Q_{ph} を超えないようなスパンが必要であり、有孔部での曲げ降伏が生じることが前提条件となる。

ii) 全塑性耐力に対する貫通孔の位置の影響

限界距離の算定後、貫通孔の位置を決定するために Fig. 2 に示すように梁端よりも先に有孔部で全塑性に達したときについて考える。

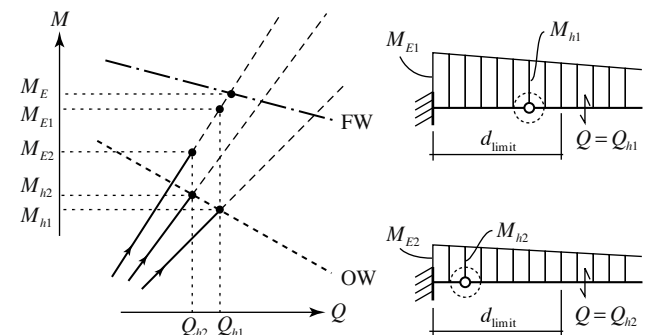


Fig. 2 Full Plastic M - Q Interaction at Opening Section

貫通孔を梁端と限界距離の間で動かすと限界距離に近い場所で全塑性に達した場合のせん断力 Q_{h1} と梁端に近い場所で全塑性に達した場合のせん断力 Q_{h2} を比べると Q_{h1} の方が高くなる。そして孔位置が梁端に

近い程、梁端が負担する曲げモーメントが全塑性耐力 M_E に対して余裕度が増え、梁端へのひずみ集中が緩和できると考えられる。

次にせん断スパンの影響を考察する。梁として主に使用される断面について梁せい D の半分の大きさの貫通孔を設けたとき、貫通孔の限界距離 d_{limit} に対する端部からの距離 x/d_{limit} と無孔梁の全塑性耐力 Q_E に対する Q/Q_E の関係を Fig. 3 に示し、 x/d_{limit} と無孔梁の梁端全塑性時の曲げ耐力に対する余裕度 $(M_E - M)/M_E$ の関係を Fig. 4 に示す。

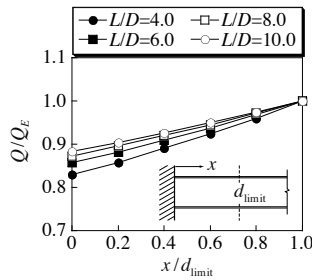


Fig. 3 $Q/Q_E - x/d_{\text{limit}}$ Relation

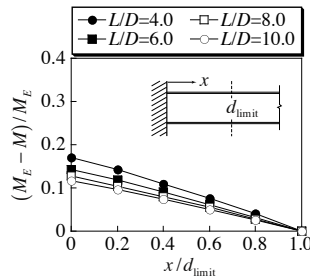


Fig. 4 $(M_E - M)/M_E - x/d_{\text{limit}}$ Relation

スパンが長ければ限界距離 d_{limit} は増えるが、貫通孔が梁端に極めて近くても全塑性耐力は 12% 程の減少であり、スパンが短くなれば減少率は増加する傾向がある。一方 Fig. 4 を見ると梁端の曲げ耐力の余裕度は貫通孔が梁端に近づく程増加する傾向があり、スパンが長い程増加率は低い。

3. 接合部実験による検証及び塑性変形能力

2 章で検討した効果の検証のため、ト字型柱梁溶接接合部の繰り返し載荷実験を行い、無孔梁と有孔梁の塑性変形能力を比較する。

3-1 実験概要

Fig. 5 に示すような加力フレームを用い、静的な繰り返し載荷を行った。載荷方法は梁端部の全塑性モーメント M_p の時の変形角 θ_y を基に整数倍のサイクルを正・負方向各 2 回ずつ行った。使用した梁は $H300 \times 150 \times 6.5 \times 9$ (SS400)、柱は $H300 \times 300 \times 15 \times 15$ (SS400) であり Fig. 6 に試験体形状を示す。貫通孔の直径は梁せいの半分、位置は無孔梁の全塑性耐力の約 95% となるように限界距離 288mm から 78mm 梁端に近づけ

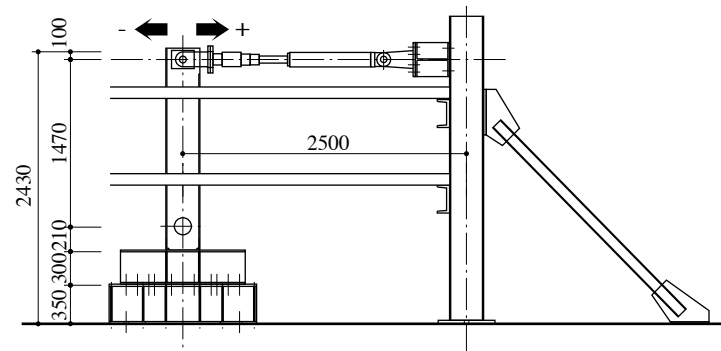


Fig. 5 Test Setup

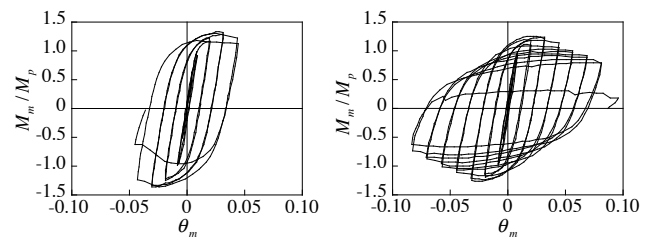
た 210mm とした。試験体は貫通孔の無い無孔梁 (FW 試験体) が 4 体、有孔梁 (OW 試験体) が 4 体の計 8 体行った。鋼材の引張試験結果を Table 1 に示す。

Table 1 Mechanical Properties

	E (t/cm ²)	σ_y (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	Elong. (%)
Flange	1977	3.22	4.62	28.9
Web	1958	4.26	5.21	22.3

3-2 荷重変形関係

無孔梁及び有孔梁の平均的な結果であったそれぞれ FW03 と OW03 について無孔梁の梁端部における全塑性モーメント M_p にて無次元化した M_m/M_p を縦軸にとり、層間変形角を横軸にとった $M_m/M_p - \theta_m$ 層間変形角関係を Fig. 7(a)(b) に示し、実験終了時の破断箇所を Photo 1 に示す。



(a) FW03 (b) OW03
Fig. 7 $M_m/M_p - \text{Drift Angle Relation}$



(a) FW03 (b) OW03
Photo 1 Fracture Part

FW03 では $3\theta_y$ の 2 回目正方向のサイクルで最大耐力 M_{max} に達した後 $4\theta_y$ の 1 回目のサイクルでスカラップ底に亀裂が発生し M_{max} の 90% まで耐力が低下した。2 回目負方向のサイクルでスカラップ底の亀裂が進展した結果、引張側のフランジ中央部が破断し、その後 $5\theta_y$ の一回目正方向のサイクルで先程破断したフランジ中央部が圧縮側に転じたとき全断面に破断が進展し、耐力が極端に低下した (Photo 1(a))。

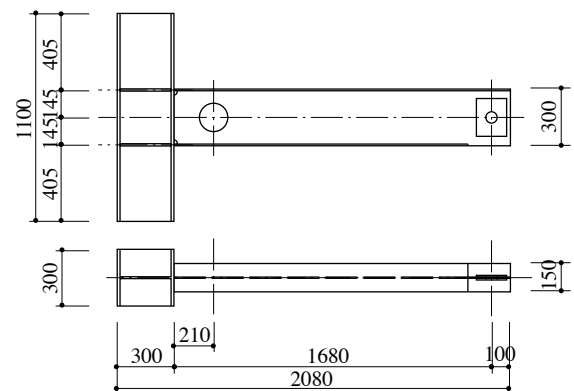


Fig. 6 Test Specimen

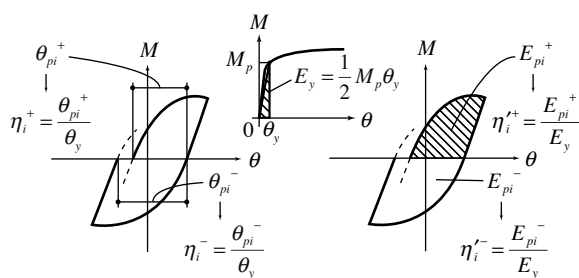
Table 2 Maximum Strength and Plastic Deformation Capacity

Specimen	Maximum Moment ($M_{\max}/M_p$)		$\eta = \Sigma \theta_p / \theta_y$								$\eta' = \Sigma E_p / E_y$							
	+	-	$M_{\max}$	90% $M_{\max}$	80% $M_{\max}$	70% $M_{\max}$	60% $M_{\max}$	50% $M_{\max}$	40% $M_{\max}$	Fracture	$M_{\max}$	90% $M_{\max}$	80% $M_{\max}$	70% $M_{\max}$	60% $M_{\max}$	50% $M_{\max}$	40% $M_{\max}$	Fracture
FW01	1.34	1.34	26	40	55	76	-	-	-	98	59	91	122	160	-	-	-	187
FW02	1.29	1.28	28	34	88	111	-	-	-	120	62	76	177	212	-	-	-	220
FW03	1.33	1.36	26	48	-	-	-	-	-	56	60	110	-	-	-	-	-	124
FW04	1.32	1.35	26	47	-	-	-	-	-	54	59	106	-	-	-	-	-	120
FW	Average	1.32	1.33	27	42	72	84	-	-	82	60	96	149	186	-	-	-	163
	COV	0.0164	0.0270	0.04	0.16	0.33	0.26	-	-	0.40	0.02	0.16	0.26	0.20	-	-	-	0.30
OW01	1.28	1.30	28	42	77	123	137	165	-	182	63	96	167	248	269	309	-	335
OW02	1.21	1.25	28	35	67	110	211	211	246	266	62	75	136	208	353	353	393	404
OW03	1.26	1.26	28	43	69	127	187	219	-	238	63	95	145	248	338	380	-	389
OW04	1.25	1.27	28	42	78	125	182	232	269	287	62	93	164	243	324	381	417	451
OW	Average	1.25	1.27	28	40	73	121	179	207	257	243	63	90	153	237	321	356	395
	COV	0.0236	0.0170	0.00	0.09	0.08	0.06	0.17	0.14	0.06	0.19	0.01	0.11	0.10	0.08	0.11	0.09	0.12

OW03 では $3\theta_y$ のサイクルで $M_{\max}$ に達した後、各サイクルで徐々に耐力が低下し、 $6\theta_y$ の二回目負方向のサイクルで引張側のウェブフィレット部に亀裂が発生した。変形が進むにつれ圧縮側のウェブフィレット部が破断し、引張側有孔部のフランジ中央部に亀裂が発生した。 $7\theta_y$ のサイクル終了まで耐力は $50\%M_{\max}$ を保持していたが、 $8\theta_y$ の一回目正方向のサイクルで有孔部のフランジ中央部が破断し、その後引張側のウェブ全断面が破断し、耐力が低下した (Photo 1(b))。

3-3 累積塑性変形倍率

Table 2 に各試験体における最大耐力 $M_{\max}$ と $M_{\max}$ に対して耐力が 90~40% まで低下したときの部材変形角から算出した累積塑性変形倍率 η 、荷重変形関係から吸収エネルギーにて算出した累積塑性変形倍率 η' を示した。算出方法を Fig. 8 に示す。

Fig. 8 Definition of η and η'

各試験体について耐力が $M_{\max}$ の 90% まで低下したときの η, η' 値は FW, OW 共に大きな差はないが、耐力が 80%, 70% と低下するに従って変形能力に差が出ており貫通孔により変形能力が上昇していることがわかる。FW の中には $M_{\max}$ の 80% まで耐力が低下する前に梁端が破断した試験体が存在したが、OW では $M_{\max}$ の 50% まで耐力が低下してもいずれの試験体も全断面破断は起きなかった。

片側の全断面破断時の累積塑性変形倍率を比べるとどちらの評価でも平均値が 2~3 倍程 OW 試験体の方が優れている。変動係数では OW が 10~20% に対し、

FW は 30~40% であったことから累積塑性変形能力のばらつきも抑えられる結果となった。

4. 破断を考慮した有孔梁の塑性変形性能評価

3 章の検証実験において貫通孔を限界距離より梁端に近づけることで溶接部の破断が回避でき、塑性変形性能が上昇することが実証された。本章では FW 試験体のスカラップ底に発生した亀裂が進展することで梁端の破断に繋がることに着目し、延性亀裂発生条件式を用いて亀裂発生時までの吸収エネルギー量により塑性変形性能の評価を行う。

4-1 延性亀裂発生条件

Fig. 9 に示すように延性亀裂は応力が集中する箇所の応力三軸度 S と局所真ひずみ e_{local} の関係が (3) 式の条件を満たしたときに発生する⁵⁾。従ってスカラップ底の応力三軸度 S と局所真ひずみ e_{local} に関して有限要素法 (FEM) を用いることで (3) 式との対応を図る。

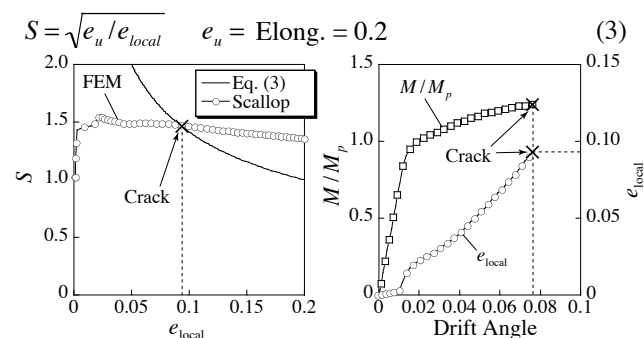


Fig. 9 Definition of Deformation Capacity with the Criterion for Ductile Crack Initiation

4-2 有限要素法解析概要

梁部材としての塑性変形性能評価のため Fig. 10 に示した解析モデルを用い、変位制御の弾塑性解析を行う。基本梁断面は実験と同じく H300×150×6.5×9 とし、プログラムは MSC. Marc Mentat 2000 を用いた。フランジ及びウェブは 8 節点 solid 要素でメッシュを作成し、Fig. 11 に示した材料特性を要素に入力し、局部座屈発生のため材長に渡り初期不整を入力した。

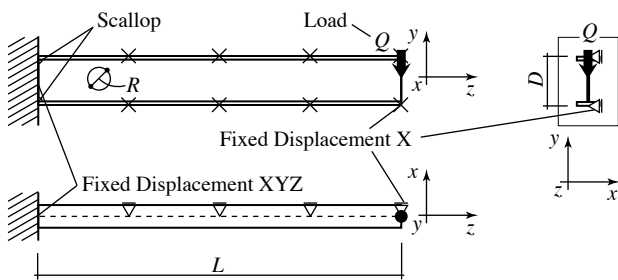


Fig. 10 Analytical Model

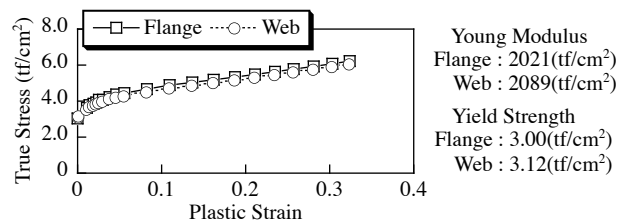


Fig. 11 Material Property

4.3 貫通孔の開口率による塑性変形能力の影響

せん断スパン比 (L/D) が 4.0, 5.6, 8.0, 12.0 の場合について 2 章の理論より全塑性耐力が無孔梁の 95% となる位置に貫通孔を設けた場合の開口率 (R/D) の影響を考察する。ただし、せん断スパンと開口率の組合せによっては有孔部がせん断降伏する場合や貫通孔が梁端から出てしまう場合は除いた。無孔梁の吸収エネルギー量 E_{FW} で無次元化した E/E_{FW} と開口率の関係を Fig. 12 に示す。尚 3, 4 節では亀裂発生条件式と交わらない場合は耐力が各々の最大耐力の 70% 低下するまでの吸収エネルギー量について評価を行った。

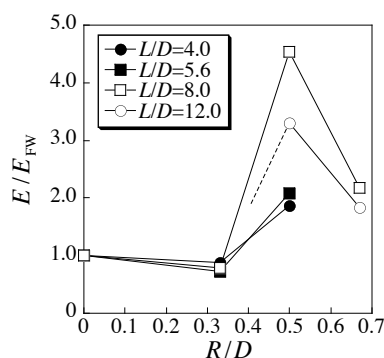


Fig. 12 E/E_{FW} - R/D Relation

R/D が 0.33 の貫通孔を設けた場合、どのようなせん断スパンでも貫通孔がスカラップに接近するため応力三軸度が無孔梁に比べて高い値をとるため、亀裂発生が早まり吸収エネルギー量が無孔梁を下回る結果となった。

R/D が 0.50 の場合、 L/D が 8.0 のとき最適値を取り、吸収エネルギー量が無孔梁の約 4.5 倍となった。 L/D が 8.0 から小さくなると徐々に吸収エネルギー量が減少するが最低でも無孔梁の 2 倍程の結果となった。

開口率が 0.67 の場合はせん断スパンの影響は少なく無孔梁の約 2 倍の吸収エネルギー量であった。

4.4 貫通孔の位置による塑性変形能力の影響

3 節で吸収エネルギー量が高かった $R/D = 0.50$ につ

いての貫通孔の位置による影響を考察する。 L/D が 5.6 と 8.0 の場合についての E/E_{FW} と限界距離 d_{limit} に対する梁端からの距離 x/d_{limit} の関係を Fig. 13 に示す。

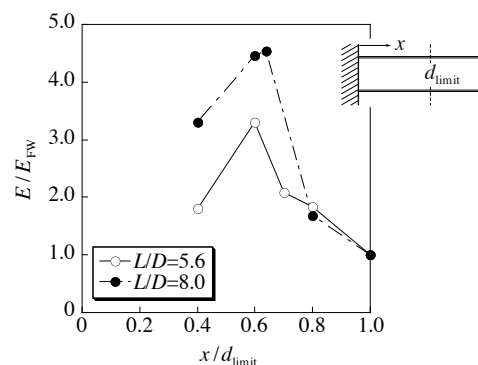


Fig. 13 E/E_{FW} - x/d_{limit} Relation

孔位置が梁端から限界距離の 80% の距離ではどちらのせん断スパンでも無孔梁の 2 倍弱の吸収エネルギー量があった。限界距離の 60% 前後の孔位置にピークがあり、 L/D が 8.0 では無孔梁の約 4.5 倍吸収エネルギー量が増加した。しかし、限界距離の 40% の位置では貫通孔がスカラップに接近するため亀裂発生が早まり、吸収エネルギー量が減少した。この結果から少し耐力を犠牲にしても貫通孔を限界距離の 60% 前後の位置に設置すれば吸収エネルギー量が増加することが分かった。

5. まとめ

1. 梁端の塑性化領域に無補強貫通孔を設けることによって、スカラップ底を起点とする梁端の破断が回避できる。
2. 累積塑性変形倍率で変形能力を比較した結果、有孔梁は平均値が 2~3 倍上昇し、変動係数が半分以下に抑えられた。
3. 有限要素法解析と延性亀裂発生条件を用いて塑性変形性能を評価した結果、有孔梁の変形能力はせん断スパン・孔位置・開口率の影響を受け、最大で無孔梁の 4 倍以上のエネルギー吸収が見込める。

本研究で明らかにしたことの一般性及び変形能力を上昇させるための適用範囲について今後詳細に検討する必要がある。

【参考文献】

- 1) 中島正愛, マイケル D エンゲルハート他: ノンスカラップ工法と RBS 工法による柱梁接合部の塑性変形能力-改良型溶接柱梁接合部の実大実験-その 1-, 日本建築学会構造系論文集, 第 526 号, pp177-184, 1999 年 12 月
- 2) 田中直樹他: カバープレート付き鉄骨はり角形鋼管柱接合部の弾塑性挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第 546 号, pp143-150, 2001 年 8 月
- 3) 福知保長他: 円形孔を有するはりの耐力と設計法 3. 実用的耐力算定式の提案, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 357 号, pp44-51, 1985 年 11 月
- 4) 加藤勉他: 鉄骨梁貫通孔の梁端からの限界距離について, 日本建築学会構造系論文集, 第 496 号, pp105-112, 1997 年 6 月
- 5) 稲葉雄一郎, 桑村仁: 切欠き付きの鋼板の応力-ひずみ解析における有限要素法の適応性と延性亀裂発生条件 (鉄骨接合部の応力-ひずみ状態 その 2), 日本建築学会構造系論文集, 第 534 号, pp137-144, 2000 年 8 月