

巨大地震時の鋼材の統一的基準による破断予測手法に関する研究 研究報告書

兵庫県立大学 環境人間学部 講師 水島 靖典

1. はじめに

想定を超えるような巨大地震¹⁾に対しても建物の安全性を確保するためには、部材がどのように損傷して倒壊に至るかを検証し、回避する必要がある。建築物の中でも数多くの大規模建築に適用される鋼構造建物は、建物全体が倒壊に至る過程において、様々な形状の部材が、繰返し大変形を受けることで、鋼材に破断が生じる可能性がある。そのため各部材が繰返し大変形を受けて破断する現象を予測し回避することは巨大地震による鋼構造建物の倒壊を防ぎ、人命を守るためには極めて重要な要素の一つである。

地震時における部材の破断を予測するためには、部材の形状・場所の違いを考慮しながら、繰返し変形を受けて破断する現象を予測する必要がある。形状・場所によって、強く圧縮応力を受けるところ、引張応力場が形成される箇所など様々な応力状態が存在することが予想される。このような多様な応力状態下で、鋼構造建物の構造部材は、地震による繰返し塑性変形を受けることになる。このように繰返し塑性変形を受けて、その繰返し数が 10^3 のオーダー以下で破断に至る現象を低サイクル疲労と呼ぶ。更に地震動を受ける鋼構造建物のように $10^0\sim 10^2$ のオーダーで破断に至る現象は極低サイクル疲労などと呼ばれる。

鋼構造部材の破断に関しては、数多くの研究が存在するがいまだに応力状態の違いを考慮した低・極低サイクル疲労破断を予測する技術は確立していない。まず、建築構造分野では、「部材」を用いた実験的研究によって鋼構造部材の破断を予測する研究が数多く存在する²⁾。しかしながら部材実験によって全ての鋼構造部材の破断を予測するためには、形状が変わるごとに異なる実験を実施する必要があり、費用・時間的制約から実質的に不可能である。また、制震ダンパーなどに関する研究で、素材レベルでの低サイクル疲労に関する研究も報告されているが³⁾、各研究の中で試験体形状を変化させて応力状態の違いを考慮している例は申請者らの知る限り存在しない。一方で、応力状態の変化を考慮するために「応力三軸度(相当応力/静水圧応力)」と呼ばれる指標を用いて破断ひずみを予測する手法が、機械部品の塑性加工の分野などで報告されている⁴⁾。しかしながら、一方向変形のみを対象とした研究がほとんどであり、地震のように繰返し変形を受ける状況に関する研究は報告されていない。

そこで本研究では、地震における鋼材の破断を予測するために必要な「形状による応力状態の違い」と「繰返し塑性変形」の両方を考慮した「低・極低サイクル疲労曲面」の構築を最終目標とする。その第一歩として、鋼構造建築物に一般的に用いられる建築構造用圧延鋼

材（SN 材）を対象とした、切欠き試験体を用いた極低サイクル疲労実験を行う。低サイクル疲労実験では切欠き試験体に引張、圧縮の強制変位を与え、そのひずみ分布を非接触三次元画像計測装置によって計測する。圧縮時の座屈を防止しつつ、画像計測を可能にする試験体補剛治具を、非線形有限要素解析を用いて設計する。設計された試験装置を用いて、切欠き試験体が大振幅の繰返し変形を受けた時の破断繰返し数を取得する。

2. 応力状態の違いを考慮した極低サイクル疲労実験装置

Fig.1 に実験のセットアップ図、Fig.2 に実験状況の写真を示す。円弧上切欠き部を有する試験体に圧縮時の座屈変形を抑制するための補剛材を設置し、油圧式アクチュエータを用いて一方向引張・圧縮の繰返し変形を与えた。試験体中心部をデジタル画像計測専用カメラで撮影した。

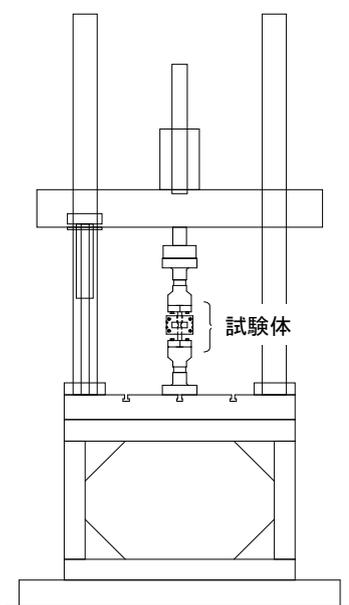


Fig.1 セットアップ概要

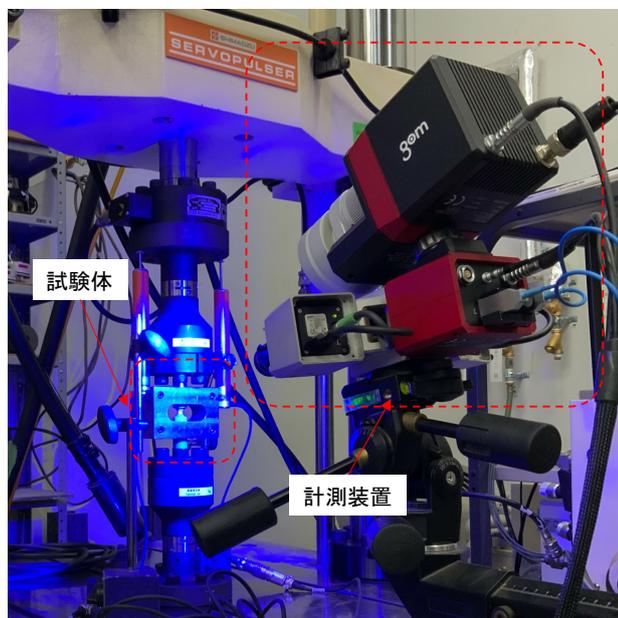


Fig.2 実験状況写真

2.1. 試験体および補剛材

Fig.3 に試験体図を示す。試験体は試験片断面内の応力状態を変化させるため切欠き形状をパラメータとし、切欠き半径 $r=1.0\text{ mm}$, 6.0 mm , ∞ (平滑) を有する試験体 3 種類それぞれ R1, R6, S を設定した。両端部を拡幅し、専用の治具で拘束した。材料は全て SN490B 材とした。Table 1 に試験体に用いた鋼材の化学的性質を、Table 2 に機械的性質をそれぞれ示す。

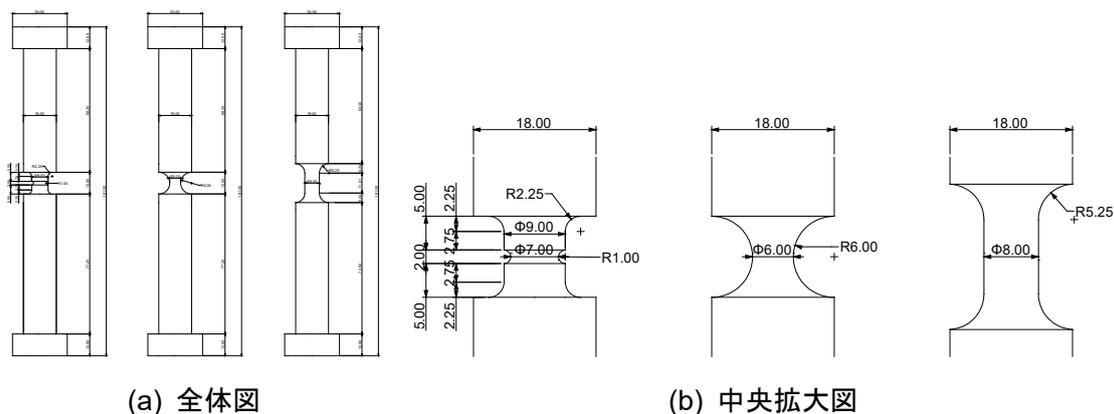


Fig.3 試験体概要

Table 1 化学的性質

鋼種	化学成分(%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cr
SN490B	0.18	0.55	1.65	0.03	0.015	0.01	0.01	0.04

Table 2 機械的性質

降伏応力度 (MPa)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)	降伏比 (%)	シャルピー吸収 エネルギー(0°C) (J)
361	527	28	68	139

Fig.4 に補剛材の概要を示す。補剛材は実験中に切欠きを有する試験部を観察、撮影できるように観測窓を設置した。下部は支点となるように試験片直径と穴直径が一致するように設計寸法を設定した。上部は実験中の試験片と補剛材の摩擦の影響を可能な限り避けるために 0.1 mm の設計クリアランスを設定した。補剛材は半割可能な形状とすることで、上下端に拡幅部を有する試験片に装着可能にした。実験中は全て共通の補剛材を用いた。

2.2. 非線形有限要素解析による補剛材寸法の設計

(1) 解析モデル

上部のクリアランスは実験中に試験片に座屈が生じた際にも、座屈変形によるひずみの偏りが 10%未満になるように、接触を考慮した非線形有限要素解析を用いて検討した。解析モデル図を Fig.5 に示す。検討対象は、線形座屈固有値解析の結果、最も座屈が生じやすいと考えられる切欠き半径 $r=6.0$ mm の試験体とした。試験片、補剛材ともに 8 節点 6 面体要素ソリッド要素を用いてモデル化した。補剛材下部と試験片は、それぞれの節点を共有し完全に一体化しているものとしてモデル化した。試験片材軸方向のメッシュサイズは切欠

き試験部については 0.3 mm 程度、そのほかの部分については 5.0 mm 程度をそれぞれ基準とし、円周方向は 20 分割した。補剛材上部と試験片の間にはクリアランスを設けた上で、ペナルティ法に基づく接触条件を設定した。接触部の摩擦係数は 0.3 とした。補剛材の材料モデルには線形弾性体を、試験片の材料モデルには塑性化後の相当応力-相当塑性ひずみ関係を他直線近似した弾塑性体をそれぞれ用いた。

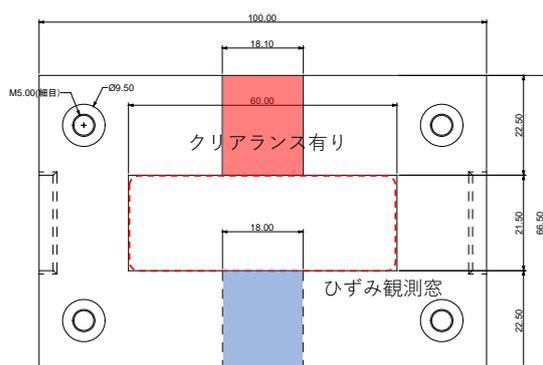


Fig.4 補剛材概要

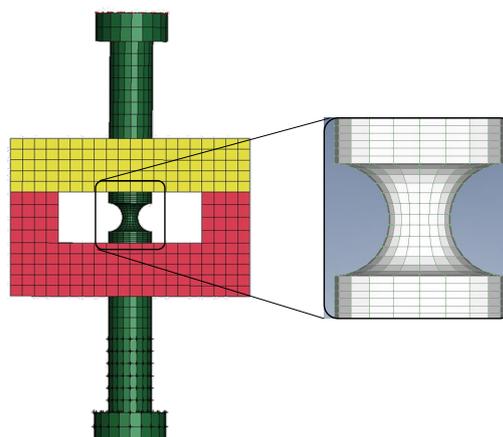
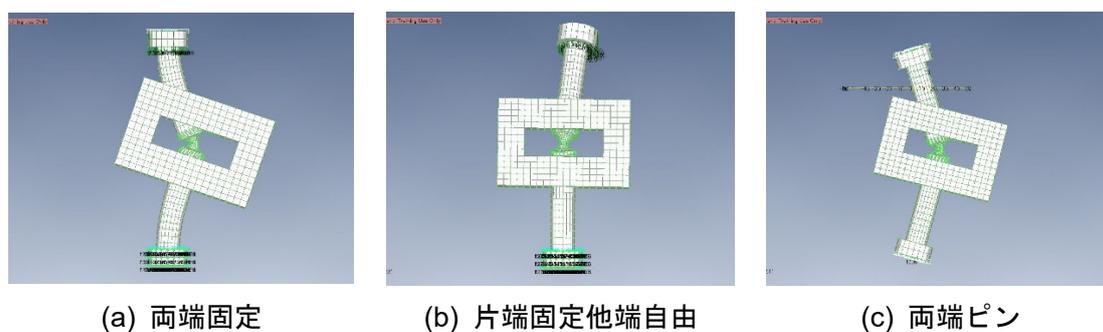


Fig.5 座屈変形抑制検討モデル概要

線形座屈固有値解析から Fig.6 に示す 3 つの境界条件時の座屈モードを用いて試験片全長に対して 1/500 の初期不整を与えた。線形固有値解析では補剛材はモデル化しているものの補剛材と試験片の接触は無視した。



(a) 両端固定

(b) 片端固定他端自由

(c) 両端ピン

Fig.6 初期不整として用いた座屈モード

解析パラメータとして、補剛材上部孔と試験片とのクリアランスを採用し、クリアランス 0.5 mm、0.3 mm の 2 ケースについて解析を行い、座屈発生時に生じる周方向でのひずみ差について検討を行った。

(2) 解析結果

Fig.7 に頂部鉛直変位と切欠き底におけるひずみの関係を示す。ひずみは周方向反対側の 2 か所で出力している。切欠き底の軸方向ひずみの最大値を ϵ_1 、最小値を ϵ_2 として出力して

いる。鉛直変位が増大しても ϵ_1 と ϵ_2 の差異は急激に増大することなく推移していることから、補剛材によって座屈後の横方向変形が抑制されていることがわかる。クリアランス 0.5mm では ϵ_1 が約 0.10 のとき、 ϵ_2 は約 0.08 のひずみが生じており、その差は 23.9%だった。クリアランス 0.3 mm では、切欠き底軸方向ひずみの差異は 11.9%であった。クリアランスを 60%に低減することで、切欠き底軸方向ひずみの周方向での差は 50%に低減されている。そこで、本実験では補剛材上部孔と試験片のクリアランスを 0.1 mm の設計寸法で製作することとした。これにより、切欠き底の周方向でのひずみ差は十分に 10%未満に抑制できると予想される。

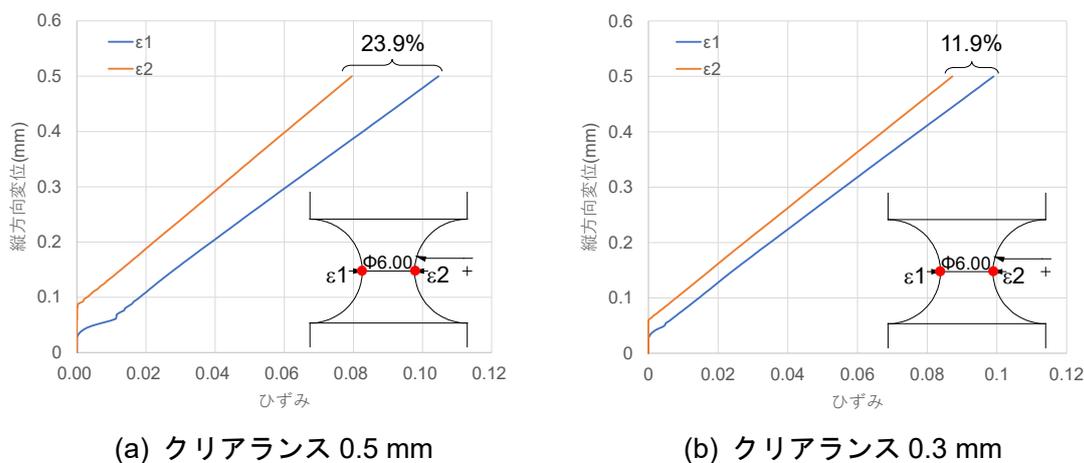


Fig.7 鉛直変位一切欠き底ひずみ関係

2.3. 画像相関法による局所ひずみの測定

本研究ではひずみ振幅をパラメータの一つとして実施するが、最小半径 1 mm の切欠きを有しているため、試験中のひずみを通常のひずみゲージで計測することが不可能である。そこで、本研究ではデジタル画像相関法(Digital Image Correlation、以下 DIC)を用いて試験片のひずみを計測した⁵⁾⁻⁸⁾。DIC ではデジタルカメラにより Fig.8 に示すように試験体表面に塗布されたスペckルパターンと呼ばれるランダム模様を撮影する。このランダム性を基にして、変形前の輝度分布パターンと変形後の輝度分布パターンの相関が高い領域を探索し、その移動量を用いて変位、ひずみ分布を計測する手法である。

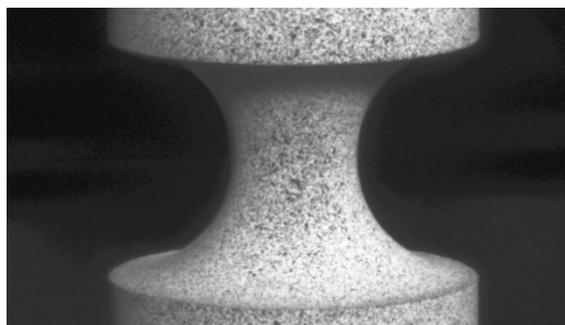


Fig. 8 試験体に塗布したスペckルパターン例

3. 実験結果

Fig.9 に DIC によるひずみ計測例を示す。Fig.10 には Fig.8(b) で計測した切欠き底でのひずみ履歴を示す。ひずみ振幅 $\Delta\varepsilon$ は Fig.8 内に示すように、ひずみ最大値と最小値の絶対値の平均値として定義した。各試験体の実験結果をひずみ振幅 $\Delta\varepsilon$ ごとに整理した実験結果一覧を Table 3 に示す。 N_{cr} は亀裂発生回数であり、初期亀裂を目視で確認した時の繰返し数である。 $N_{97.5}$ および N_{95} は引張側ピーク荷重がそれぞれ最大荷重の 97.5% および 95% に低下したときの繰返し数である。 N_f は完全に試験片が破断し引張荷重が 0 になったときの繰返し数である。

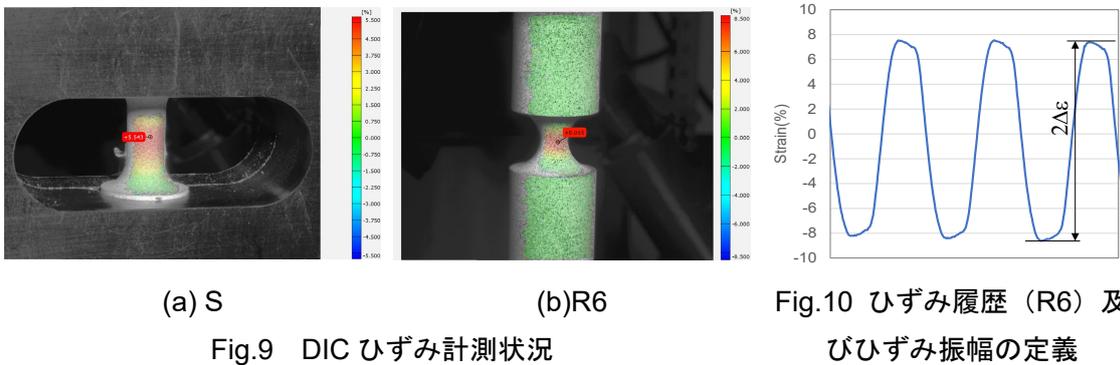


Table 3 実験結果概要

試験体	$\Delta\varepsilon$ (%)	N_{cr}	$N_{97.5}$	N_{95}	N_f
R1	2.8	66	98	113	167
	4.5	20	40	46	65
	6.4	14	29	33	43
	10	10	17	20	27
R6	2.2	115	147	159	197
	5.6	18	21	23	26
	8.2	15	17	18	17
S	3.8	73	102	110	109
	5.4	28	28	39	42
	9.4	-	13	13	13

Fig.11 に試験体ごとに最大ひずみ振幅を与えたケースの荷重－変位関係を示す。塑性変形中の非圧縮性より、どの試験体でも引張側よりも圧縮側の方が高い荷重値を示している。いずれの試験体においても、2 サイクル目から履歴曲線がほぼ定常化している。R1 においては、亀裂発生後に引張側最大荷重が徐々に低下する傾向を示している。これに対して R6、S では、わずかな荷重低下が生じたのちに急激に荷重低下が生じ、破断に至っている。

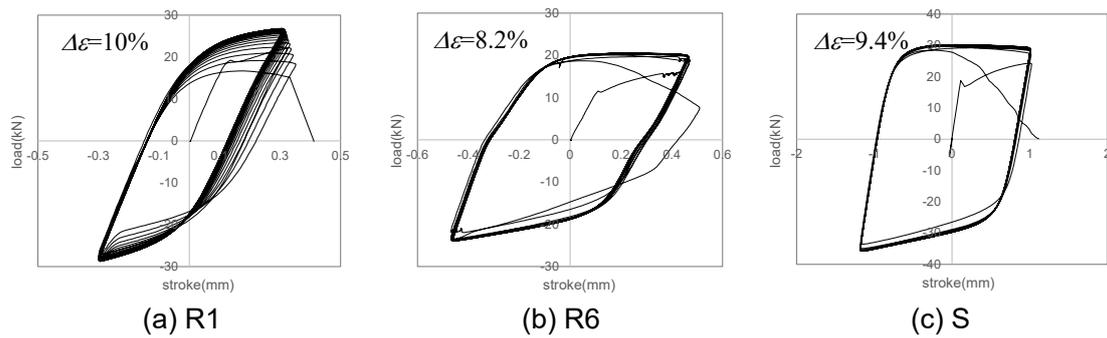


Fig.11 荷重変形関係

Fig.12 にひずみ振幅 $\Delta\varepsilon$ と N_{cr} および $N_{97.5}$ 、 N_{95} 、 N_f の関係をそれぞれ示す。また、実験結果から得られた回帰曲線を式(1)として示す。全てのひずみ振幅-繰返し数関係は両対数軸グラフ上でおよそ直線関係を示していることから、Manson-Coffin 則がほぼ成立することがわかった。Manson-Coffin 則では、本来は塑性ひずみ振幅と弾性ひずみ振幅の影響を分離した二項で表現すべきであるが、本研究ではひずみ振幅が約 2%~10%と大振幅領域を対象としていることから、弾性ひずみの影響は無視して単一の項として回帰曲線を求めた。 $\Delta\varepsilon$ - N_f 関係内には過去の研究結果⁹⁾¹²⁾をまとめた回帰曲線を参考のために示す。一軸引張状態である S 試験体を用いた実験結果から求められる回帰曲線は既往の研究の実験結果とおおよそ一致していることがわかる。

$N_{97.5}$ 、 N_{95} とともに N_{cr} よりも大きな値を示しており試験体表面で確認された亀裂の進展により最大荷重が低下していることが示唆される結果となった。ひずみ振幅 $\Delta\varepsilon$ が 5%を越えるような範囲では R1 において最も少ない繰返し数で亀裂が確認され、次に R6、S という順序になった。すなわち切欠き半径が小さい試験体の方が早期に亀裂が確認された結果となった。一方で、同じくひずみ振幅 $\Delta\varepsilon$ が 5%を越える領域において $N_{97.5}$ および N_{95} 、 N_f では R1 試験体の繰返し数が最も多くなっている。Fig.9 の塑性ひずみ振幅-繰返し数関係の両対数軸グラフ上で切欠き半径が小さくなるにつれて傾きがやや大きくなっていることがわかる。それに伴って、ひずみ振幅がおおよそ 5%を越えるような範囲では R1 の繰返し数が最も大きくなっているが、ひずみ振幅がおおよそ 3%以下の範囲では R1 の繰返し数は S よりも小さくなっている。

R1	$\Delta\varepsilon = 39.4 \cdot N_{cr}^{-0.644}$	$\Delta\varepsilon = 83.6 \cdot N_{97.5}^{-0.747}$	$\Delta\varepsilon = 94.7 \cdot N_{95}^{-0.751}$	$\Delta\varepsilon = 100 \cdot N_f^{-0.706}$	(1)
R6	$\Delta\varepsilon = 35.4 \cdot N_{cr}^{-0.588}$	$\Delta\varepsilon = 35.2 \cdot N_{97.5}^{-0.558}$	$\Delta\varepsilon = 36.7 \cdot N_{95}^{-0.558}$	$\Delta\varepsilon = 32.6 \cdot N_f^{-0.513}$	
S	$\Delta\varepsilon = 33.6 \cdot N_{cr}^{-0.518}$	$\Delta\varepsilon = 25.4 \cdot N_{97.5}^{-0.422}$	$\Delta\varepsilon = 27.2 \cdot N_{95}^{-0.425}$	$\Delta\varepsilon = 27.7 \cdot N_f^{-0.428}$	

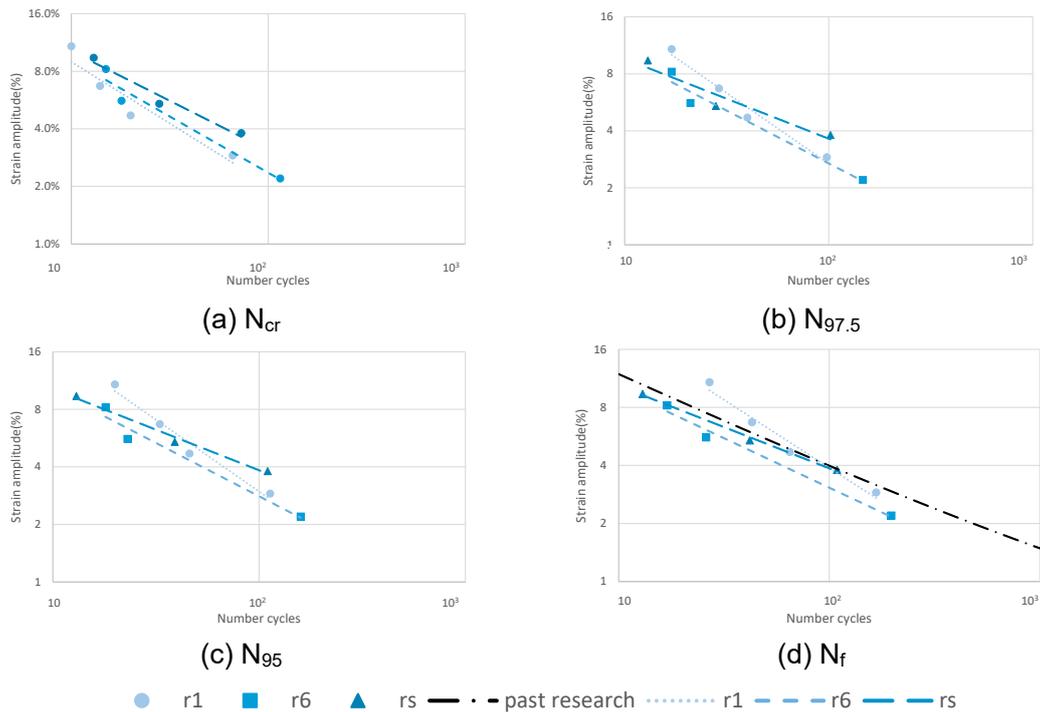


Fig.12 ひずみ振幅—繰返し数関係

4. まとめ

本研究で建築構造物の地震時の破断現象に着目し、応力状態の違いを考慮した鋼材の低サイクル疲労特性について検討を行った。3種類の形状の異なるSN490材の試験体を用いることで応力状態を変化させて、それぞれの試験体に対して引張、圧縮の繰返し疲労試験を行った。得られた知見等を以下に示す。

- ・ 圧縮変形中に生じる試験片の座屈変形の抑制しつつ、DICでのひずみ計測が可能な補剛材の形状を、非線形有限要素解析を用いて設計した。これによりひずみゲージの設置が不可能な切欠き試験体において実験中に発生しているひずみを計測することができた。
- ・ これらの試験体、観測装置、補剛材を用いて低サイクル疲労実験を行った結果、同程度のひずみ振幅であっても試験体形状の違いによって破断繰返し回数に差異が生じることがわかった。
- ・ 切欠き半径が小さくなるほど、ひずみ振幅—破断繰返し数関係を表す両対数軸グラフ上での回帰曲線の傾きが大きくなった。

今後は更に形状およびひずみ振幅のパラメータを増やすことによって、鋼材の応力状態の違いを考慮した低サイクル疲労「曲面」の構築を目指す。

参考文献

- 1) 上町断層帯地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針, 大阪府域内内陸直下型地震に対する建築設計用地震動及び設計法に関する研究会, 2011.7
- 2) 吹田啓一郎、田中剛、佐藤篤司、真鍋 義貴、津嘉田敬章、蘇鐘鈺：梁端部接合部の最大曲げ耐力が変形能力に及ぼす影響 -塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その 1-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.664, pp.1135-1142, 2011
- 3) 佐伯英一郎、杉沢充、山口種美、望月晴雄、和田章：低降伏点鋼の低サイクル疲労特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.472, pp.139-147, 1995
- 4) 山下朋広、根石豊、志賀聡、野口泰隆：低応力三軸度領域における延性破壊限界, 日本塑性加工学会誌, Vol.58, No.678, pp.617-623, 2017
- 5) W. H. Peters, W. F. Ranson: Digital imaging techniques in experimental stress analysis, *Optical Engineering*, Vol.21(3), pp.427-431, 1982
- 6) H. A. Bruck, S. R. McNeill, M. A. Sutton, W. H. Peters: Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correlation, *Experimental Mechanics*, Vol.29(3), pp.261-267m 1989
- 7) 李志遠、王慶華、有川秀一、米山聡：面内変位分布計測におけるデジタル画像相関法とサンプリングモアレ法の比較研究、*実験力学*、Vol.15、No.4、pp.303-308、2015
- 8) 山本悠人、畑明仁、河村圭亮、氏家大介：高忠実度モデルを用いた RC 部材の破壊予測解析とデジタル画像相関法による妥当性評価 -実験と解析を融合した RC 構造の破壊現象を捉える試み-、*大成建設技術センター報*、第 51 号、pp.02-1-02-8、2018
- 9) 中込忠男、岩本剛、加村久哉、下川弘海、原山浩一：低降伏点鋼を用いた鋼管補剛平鋼ブレースの疲労特性に関する実験的研究、*日本建築学会構造系論文集*、No.530、pp.155-161、2000
- 10) 原山浩一、中込忠男、堀江竜巳：履歴ダンパー用鋼材の疲労特性に関する実験的研究、*日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）*、C-1、構造 III、pp.505-506、2004
- 11) 岩田衛、中田安洋、前田泰史、和田章：履歴ダンパーの疲労特性に関する研究 -（その 1）軸降伏型部材の実験概要-、*日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）*、C-1、構造 III、pp.733-734、1995
- 12) 笠井和彦、大木洋司、ポーンブット スリヤモンコン、徐養会：溶接を伴わない厚肉せん断パネルの弾塑性共同と低サイクル疲労に関する基礎的研究、*日本建築学会構造系論文集*、No.586、pp.195-202、2004