

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 6 二段階変動振幅による载荷履歴が変形能力と亀裂進展に及ぼす影響

2. 構造 - 10. 鉄骨構造 正会員 ○真鍋義貴 *¹ 同 吹田啓一郎 *² 同 田中剛 **³ 同 高塚康平 *⁴

柱梁接合部 塑性変形能力 载荷実験 接合部強度 亀裂進展

1. はじめに

長周期地震動のように継続時間が長い地震動を受ける鋼構造建物は、比較的小さな振幅による多数回の繰返し塑性変形に対する変形能力が問題となる。本研究はこのような場合にも対応した鋼構造柱梁接合部の変形性能を評価することを目的とし、疲労の考え方に準じて累積の損傷度を考慮することが有効と考え、累積塑性変形倍率、サイクル数を主な評価指標と考察してきた。

前報 1), 2) では梁が H-500×200×10×16(SN490B)、柱が□-350×350×22(BCR295) の通しダイアフラム形式の柱梁接合部を対象に、ノンスラップ工法により接合された試験体を用い、一定振幅の正負交番繰返し载荷実験から载荷する振幅と変形性能の関係を調べた。この際、梁が接合する柱鋼管壁の厚さを変えることにより、梁ウェブの全塑性モーメントに対する梁ウェブ接合部の曲げ耐力の比 m を変化させて梁端接合部の最大曲げ耐力をパラメータとし、それが変形性能や接合部のモーメント負担の割合に与える影響を調べた。十分な耐力を有する標準の試験体 NSS は $m=1.0$ とし、耐力の低い $m=0.47$ と 2 種類の試験体で実験を行った。また、文献 3) で

は更に 8 体の実験を追加し、前報の分析の精度を高めた。実験の载荷装置を図 1 に、実験結果を表 1 に示す。実験では、梁端の曲げモーメントが梁の前塑性モーメントに達したときの梁の回転角の弾性成分 θ_p を基準として、 $1.2\theta_p$, $2.0\theta_p$, $3.0\theta_p$, $4.0\theta_p$ の定振幅とした。表 1 の N_U は試験体が終局に至るまでのサイクル数、 η_U は終局までの累積塑性変形倍率である。また、以下では μ は梁の回転角に対する塑性率を表す。既往の実験から得られた知見は以下のとおりである。

1. μ - N_U , μ - η_U 関係は両対数軸上で線形の関係をとる。標準試験体 NSS に関してこの線形関係は次の回帰式で表される。

$$\log N_U = -2.32 \log \mu + \log 308 \quad (1)$$

$$\log \eta_U = -3.11 \log \mu + \log 197 \quad (2)$$

表 1 標準試験体 (NSS) の実験結果一覧³⁾

実験名	$bM_{\max}/bM_p$	$bM_{\max}/bM_p$	N_U	η_U
	正载荷	負载荷		
NSS-1.2A	1.06	1.06	235	207
NSS-1.2B	1.05	1.04	198	158
NSS-2.0A	1.26	1.26	61	186
NSS-2.0B	1.24	1.23	52	153
NSS-3.0A	1.41	1.39	25	155
NSS-3.0B	1.40	1.35	20	123
NSS-4.0A	1.48	1.46	13	127
NSS-4.0B	1.48	1.45	14	126

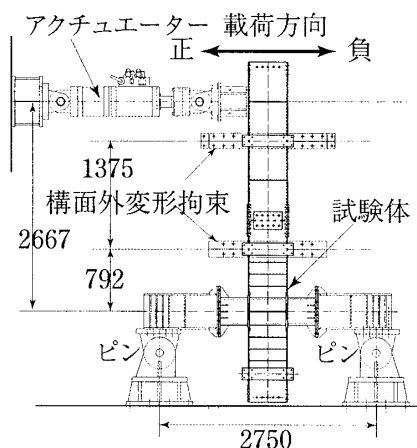


図 1 载荷装置 (単位: mm)

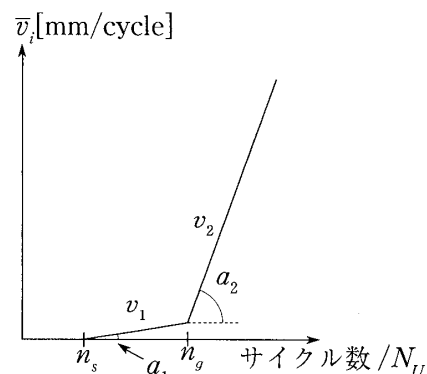


図 2 亀裂進展曲線に関する係数の定義

Deformation capacity evaluation of welded beam to column connection subjected to repeated plastic strain

(Part6:The effect of two-step variable amplitude loading to deformation capacity and crack growth)

MANABE Yoshiki, SUITA Keiichiro, TANAKA Tsuyoshi and TAKATSUKA Kohei

2. 梁フランジ溶接端部に生じる亀裂の進展は①亀裂が発生しない段階、②亀裂がゆっくり進展する段階、③亀裂が一気に進展して破断に至る段階の3つの段階に分けられる。

3. 実験で得た亀裂進展とサイクル数の関係から前述の段階ごとに亀裂進展速度 v_1 , v_2 を求め、図2に示す n_s , a_1 , n_g , a_2 を求めることで亀裂進展を二次曲線で示した。得られた曲線を亀裂進展曲線と呼び、図3に示す。図中の○は各振幅の終局に相当する亀裂長さ l_U である。

本研究ではこのようにして得られた一定振幅繰返し载荷の結果から、地震応答のようなランダムな振幅に対する接合部の変形能力を予測する研究の一環として、2種類の異なる振幅で繰返し载荷したときの変形性能の関係を調べる。試験体は前述の標準試験体NSSと同じものを用いる。この試験体では図3に示すように、亀裂の進展によって変形能力の限界を定量的に示しており、その関係を用いて2段階の振幅による繰返し载荷を受けたときの変形能力を予測し、実験結果と比較して

その妥当性を検討する。

2. 実験方法

標準試験体NSSに2段階変動振幅を载荷することで実験を行った。鋼材の機械的性質を表2に示す。まず前半は振幅 A_1 で所定の回数载荷した後、後半は振幅 A_2 で破断に至るまで载荷した。 A_2 による一定振幅载荷実験で得られた最大耐力の90%に低下した時点をおける終局とし、そこに至るサイクル数を N_U とした。 d_1 は A_1 で一定振幅繰返し载荷した際の終局までのサイクル数を N_{U1} とし、実際に载荷する回数を N_1 とすると、

$$d_1 = N_1 / N_{U1} \quad (3)$$

で定義される損傷度⁴⁾である。振幅 A_2 に関しても同様に d_2 , N_{U2} , N_2 を定義する。ここで d_2 と N_2 は以下の式で表される。

$$d_2 = 1 - d_1 \quad (4)$$

$$N_2 = d_2 N_{U2} \quad (5)$$

一定振幅繰返し载荷した際の終局までのサイクル数 N_U と最大耐力 $M_{\max}$ の平均を表3に示す。2段階の振幅による载荷履歴は文献4)の結果を参考に、振幅の組合せが塑性率1.2と4.0、2.0と4.0

表2 鋼材の機械的性質

部材	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断伸び (%)	降伏比 (%)
梁フランジ	351	547	43.3	64.2
梁ウェブ	386	554	42.4	71.0
ダイアフラム	356	511	27.0	71.0
溶接金属	470	597	31.4	81.9

表3 各振幅の終局時の状態量 (平均値)

振幅	1.2	2.0	3.0	4.0
N_U	216.5	56.5	22.5	13.5
$M_{\max}$ (kN・m)	756	884	990	1052
l_U (mm)	54	109.5	200	200

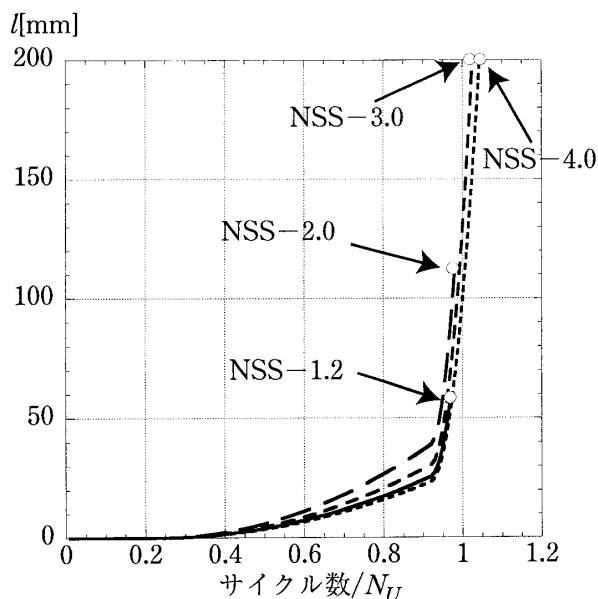


図3 亀裂進展曲線

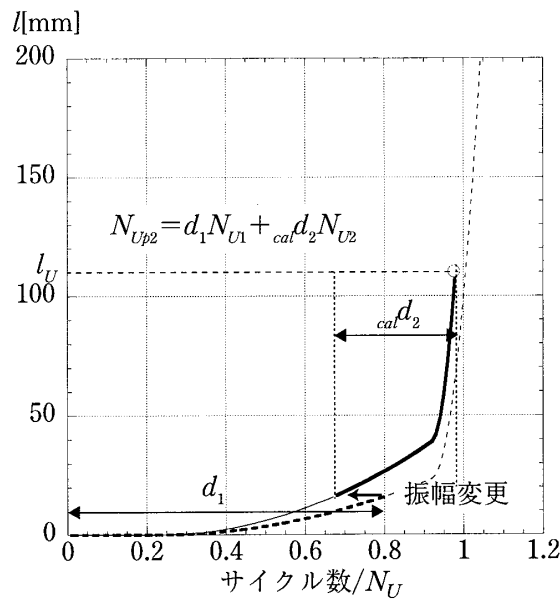


図4 N_{Up2} の求め方

の2種類, また大きい振幅4.0による損傷度が0.25と0.50の2種類とし, それぞれ載荷する振幅の順序が異なる実験を行った. 実験は6種類, 8体の試験体で行った. それぞれの実験名称と終局までのサイクル数の予想を表4に示す. 実験名称はNSS-A₁-d₁-A₂を意味する. NSS-1.2-0.5-4.0とNSS-4.0-0.5-1.2は同一条件で2体ずつ実験を行った.

N_{Up1} は $N_{Up1}=d_1N_{U1}+d_2N_{U2}$ で求めたマイナー則による予想終局サイクル数である. N_{Up2} は振幅を変更した際に振幅A₁の亀裂進展曲線から振幅A₂の亀裂進展曲線へ, 亀裂長さが同じ位置で別の曲線へ移動すると考え, 亀裂進展曲線が表2の実験から求めた終局時の亀裂長さ l_U に達したときに, 終局に至るといふ考えにより求めた予想終局サイクル数である. N_{Up2} の求め方を図4に示す. ただし図中の $cal d_2$ は亀裂進展曲線から求められるA₂の損傷度である. 表4中の $cal D$ は図3の亀裂進展曲線より図4に示すようにして求められる予想損傷度である.

3. 実験結果

3.1 変形性能

各試験体の載荷履歴を図5に, 実験結果一覧を表4に示す. 図中の $exp D$ は, 実験から求められた実際の損傷度で, 実験より求められる振幅A₂の損傷度を $exp d_2$ とすると $exp D=d_1+exp d_2$ で表される実験結果の損傷度である. 結果分かったことを以下に示す.

振幅を大振幅から小振幅の順に変更する載荷履歴の方が, 逆の順に載荷した場合よりも変形性能が大きい. 大振幅から小振幅の順に変化した実験と, 小振幅から大振幅の順に変化した実験の変形能力の差を表5に示す. 振幅が大きい載荷では耐力がある程度低下してから一気に試験体が破断するのに対して, 振幅が小さい載荷ではある程度耐力が低下した後の小振幅でも耐力がゆっくりと低下を続け, すぐには破断に至らない結果となっている.

表5の組合せ①の方が組合せ②よりも変形性能の差が大きいのは, 振幅が $2.0\theta_p$ のときは耐力が低下すると亀裂が一気に進展して耐力が急低下するサイク

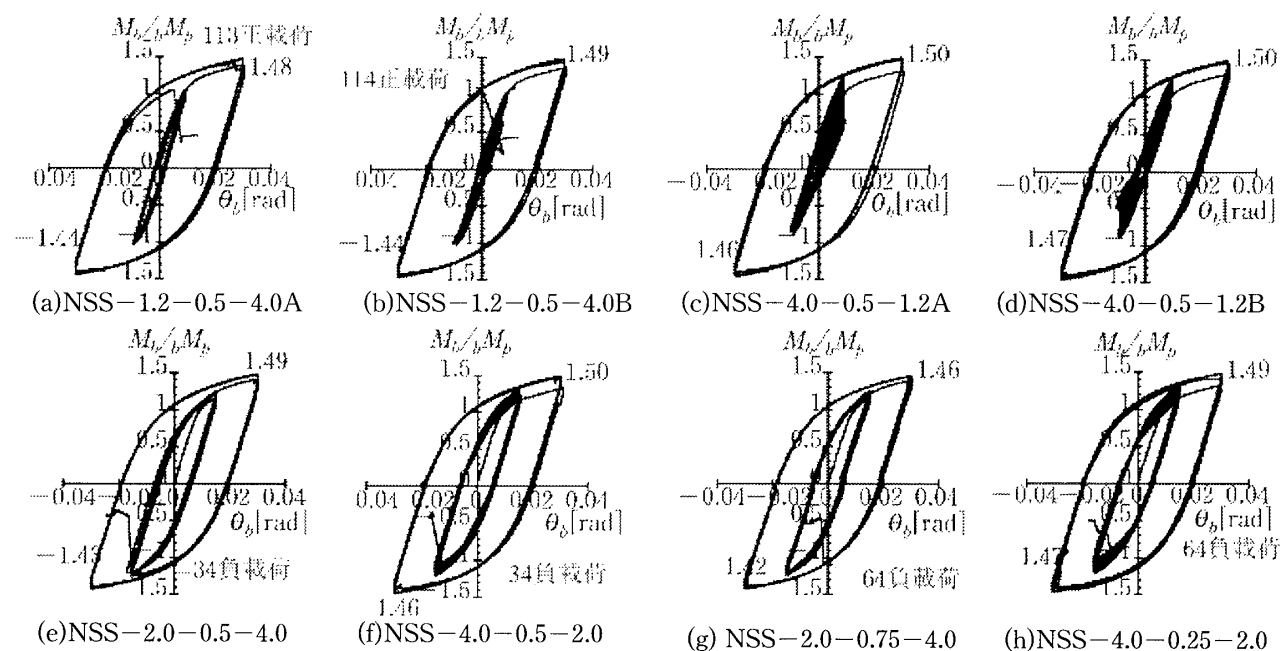


図5 載荷履歴

表4 実験の載荷履歴と終局予想および実験結果

実験名称	A ₁	N ₁	A ₂	N _{Up1}	N _{Up2}	cal D	N ₂	N _U	η_U	$exp D$
NSS-1.2-0.5-4.0A	1.2 θ_p	108	4.0 θ_p	115	116	1.03	5	113	119	0.87
NSS-1.2-0.5-4.0B	1.2 θ_p	108	4.0 θ_p	115	116	1.03	6	114	110	0.94
NSS-4.0-0.5-1.2A	4.0 θ_p	7	1.2 θ_p	115	113	0.99	125	132	152	1.10
NSS-4.0-0.5-1.2B	4.0 θ_p	7	1.2 θ_p	115	113	0.99	193	200	218	1.13
NSS-2.0-0.5-4.0	2.0 θ_p	28	4.0 θ_p	35	35	0.98	6	34	135	0.94
NSS-4.0-0.5-2.0	4.0 θ_p	7	2.0 θ_p	35	38	1.05	27	34	152	1.00
NSS-2.0-0.75-4.0	2.0 θ_p	42	4.0 θ_p	45	44	0.90	4	46	150	1.04
NSS-4.0-0.25-2.0	4.0 θ_p	7	2.0 θ_p	45	45	0.99	61	64	216	1.30

表5 振幅の順序による変形性能の差

組合せ	組合せ内容	ΔN_U	$\Delta \eta_U$	ΔD
①	(NSS-4.0-0.5-1.2) -(NSS-1.2-0.5-4.0)	53	71	0.21
②	(NSS-4.0-0.5-2.0) -(NSS-2.0-0.5-4.0)	0	17	0.06
③	(NSS-4.0-0.25-2.0) -(NSS-2.0-0.75-4.0)	18	66	0.26

ルがあるのに対して、振幅が $1.2\theta_p$ の場合はそれほど亀裂の進展速度が急ではないことによると考えられ、前後の振幅の差 $|A_1 - A_2|$ が大きい組合せ①の方が順序を入れ替えたことによる差が大きい結果となっている。

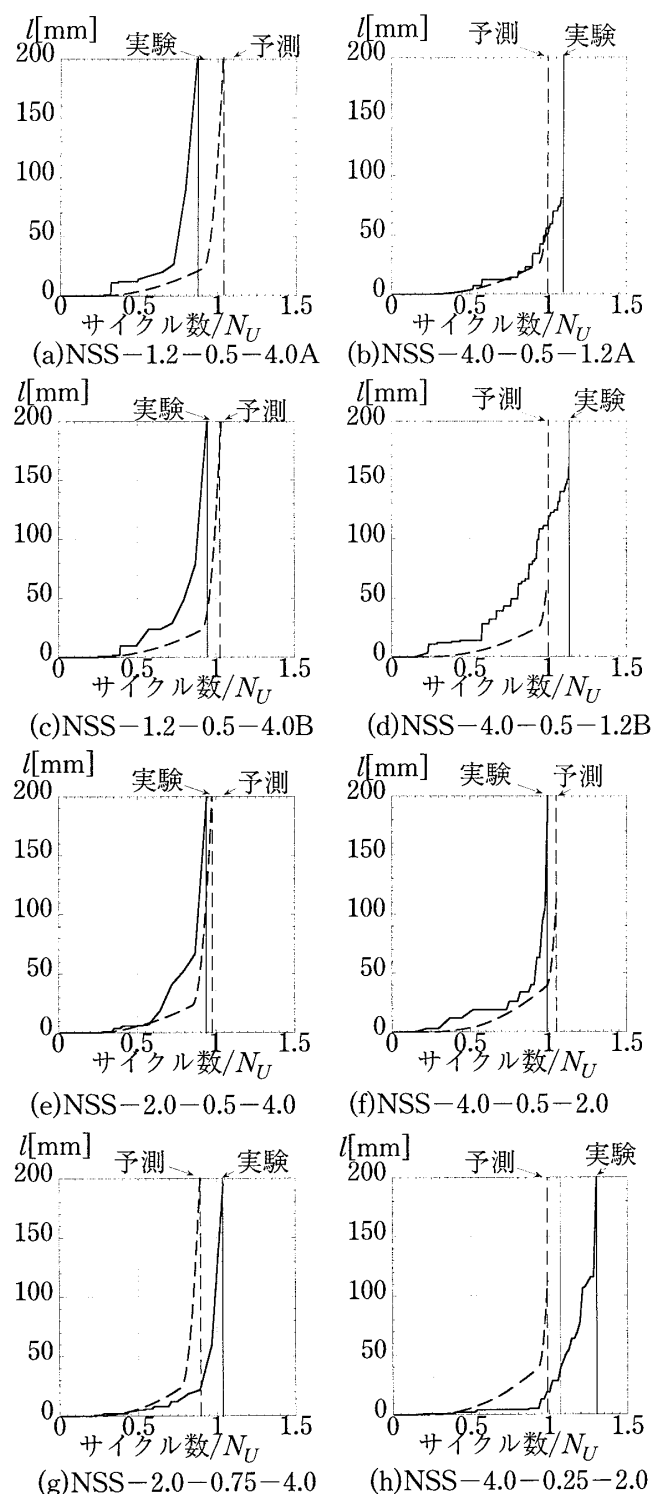


図6 亀裂進展曲線による予測と実験結果の比較

- * 1 京都大学大学院工学研究科建築学専攻・修士課程
- * 2 京都大学大学院工学研究科建築学専攻・教授・博士(工)
- * 3 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・教授・博士(工)
- * 4 京都大学工学部建築学科

組合せ②と③は振幅 $2.0\theta_p$ と $4.0\theta_p$ を組合せた実験で、 $4.0\theta_p$ による損傷度の設定が0.25と0.5の場合の比較である。組合せ③の方が組合せ②より変形性能の差が大きいのは、③のNSS-4.0-0.25-2.0において $4.0\theta_p$ の载荷による d_1 が0.25程度に小さいと、梁フランジ溶接端部に亀裂がほとんど発生せず、大振幅の影響が小さいためであり、ほぼ $2.0\theta_p$ 単独で载荷した場合と同様の変形性能を示す結果となっている。

3.2 亀裂進展曲線の検討

図3の亀裂進展曲線を横軸が d_1 の時点をつなぎ合わせた曲線と、実際の実験から得られた梁フランジ溶接端部の主要な亀裂の進展を比較して図6に示す。実線が実験結果、破線が亀裂進展曲線による予測である。(e)NSS-2.0-0.5-4.0と(f)NSS-4.0-0.5-2.0は亀裂進展曲線によって精度よく予測できている。亀裂進展曲線によって実験の振幅の組合せと損傷度が等しい場合は、後から载荷する振幅が小さい方が $calD$ が小さいことが予測されたが、実際の実験においても $expD$ が同様の傾向を示している。また、亀裂進展曲線により载荷する順番により D に最も差が出ると予測された(g)NSS-2.0-0.75-4.0と(h)NSS-4.0-0.25-2.0において、実際の実験においても、この2つの実験において $expD$ が最も大きな差を示した。

4. まとめ

標準試験体に2種類の振幅を組合せた変動振幅を加え、試験体の破断性状と変形能力を調べた。また、亀裂進展曲線を用いて、変動させる振幅の順序の影響、変形性能に最も影響を与える振幅と損傷度の組合せを予測し、実験により変形性能の大小関係を正しく予測できることを確かめた。

参考文献

- 1) 真鍋義貴, 吹田啓一郎, 佐藤篤司, 津嘉田敬章, 田中剛, 蘇鐘鈺: 塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁接合部の変形能力 その3), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第50号 構造系, pp.177-180, 2010.6
- 2) 津嘉田敬章, 田中剛, 吹田啓一郎, 真鍋義貴, 佐藤篤司: 塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁接合部の変形能力 その4), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第50号 構造系, pp.181-184, 2010.6
- 3) 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, 第76巻第664号, 2011.6
- 4) 中込忠男, 瀬戸洋平: 溶接継手の多段多重振幅における累積疲労損傷に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第74巻 第639号, pp.945-951 2009.5

Graduate student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ.
Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Kobe Univ. Dr. Eng.
Student, Undergraduate School of Architecture, Kyoto Univ.