

振幅が変動する载荷履歴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3 -

EFFECT OF VARIABLE AMPLITUDE LOADING PROTOCOL ON DEFORMATION CAPACITY

Deformation capacity of welded beam-to-column connections subjected to repeated plastic strain Part 3

吹田 啓一郎*, 田中 剛**, 真鍋 義貴***, 高塚 康平***

Keiichiro SUITA, Tsuyoshi TANAKA, Yoshiki MANABE
and Kouhei TAKATSUKA

This paper presents results of full-scale loading tests of welded moment connections subjected to variable amplitude cyclic loadings. The tests were conducted by two types of loading protocols, i.e. the two different constant amplitudes and the random amplitudes. The deformation capacity of specimens are compared with predicted deformation capacity based on the relationships between crack propagation and number of cycles obtained from the constant amplitude cyclic loading tests. The predicted deformation capacity well corresponds to experimental results by the two different constant amplitude loadings, but for the random amplitude loadings, the modification to consider loadings in the elastic range is needed.

Keywords : beam-to-column connection, deformation capacity, cyclic loading test, loading protocol, crack propagation

柱梁接合部, 変形能力, 繰返し载荷実験, 载荷履歴, 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^{1)~3)}. 本研究はこのような場合に対応する鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力を評価することを目的としている. 塑性域における一定振幅繰返し载荷実験を手始めとして, 梁フランジ溶接部の破壊に大きく影響すると考えられるパラメーターと塑性変形能力を結びつけた評価方法の構築を目的とする^{4), 5)}.

本論文では前報(その1)⁴⁾の一定振幅繰返し载荷実験と同じ試験体に対し, 振幅が二段階に変動する二段階振幅繰返し载荷と, 長周期地震動を受ける超高層建物の梁端接合部に生じると予測される応答を载荷するランダム振幅繰返し载荷による実験を行い, 振幅が変動する場合の変形能力を評価する方法を提案する.

前報(その1)の一定振幅繰返し载荷実験はSN490B材のH形鋼梁にノンスラップ工法を用いた通しダイアフラム形式の柱梁溶接接合部を対象としており, 破断までの繰返し数 N_F と载荷振幅の塑性率 μ の間に(1)式, 図1の関係を得ている.

$$N_F = 357\mu^{-2.44} \quad (1)$$

変動振幅载荷に関する既往の実験研究を見ると, 中込ら^{6)~8)}は柱梁溶接接合部を対象に, 風荷重から中小地震を想定して降伏応力またはそれを下回る程度の応力レベルを中心に一定振幅, 変動振幅による载荷実験を行い, 二段階振幅载荷の場合に与えた振幅の差の大きさが破断までの変形能力に影響することなどを示している. また, 周ら⁹⁾, 山田ら¹⁰⁾は柱梁溶接接合部あるいはそれを模した試験体に様々な履歴の変動振幅载荷実験を行っており, その中で振幅が漸増する履歴と漸減する履歴を比較し, 漸減する振幅に対する変形能力

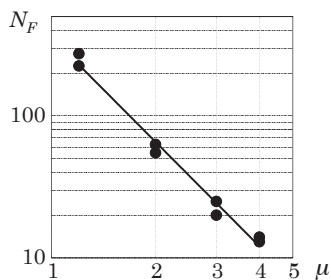
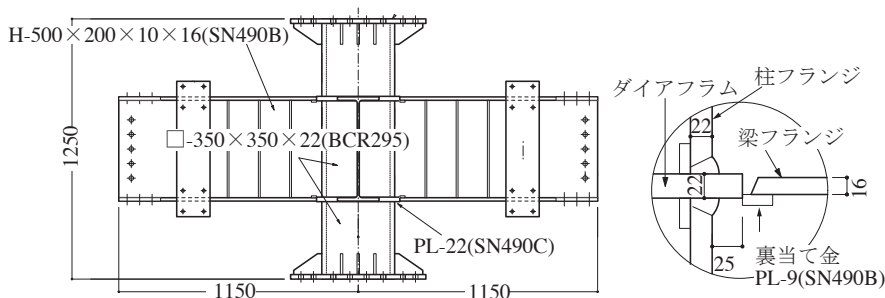
図1 一定振幅繰返し载荷実験による N_F - μ 関係

図2 試験体の形状と接合部詳細 (単位: mm)

本研究は文献(11), (12)で発表した内容に新たな実験結果と検討を加えたものである。

* 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士(工学)

** 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士(工学)

*** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程

Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Kobe University, Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ.

が、漸増する振幅に対するものより大きくなることを示している。これらの研究から振幅の大きさだけでなくその載荷順序が接合部の変形能力に影響することが明らかであるが、その要因や大きさを定量的に予測する方法はまだ示されていない。

本論文では2種類の載荷履歴を用いた実験の結果に対して、載荷履歴が試験体の変形能力に与える影響を亀裂の進展に着目して損傷度の観点から検討する。前報（その1）の一定振幅繰返し載荷実験の結果を基に梁フランジ溶接部に生じる亀裂の進展を定量的に評価し、さらに破断までの変形能力との関係や載荷振幅の影響を定量的に評価することで、振幅が変動する載荷履歴に対して変形能力を評価する手法を提案する。

2. 実験方法

試験体は文献4)、5)のNSSシリーズと同じで、梁のH形鋼の製造ロットも同一である。図2に示すように柱は□-350×350×22 (BCR295)、梁はH-500×200×10×16 (SN490B)、通しダイアフラムは板厚22mm (SN490C)である。梁フランジの溶接はノンスラップ工法による完全溶込み溶接で、溶接ワイヤーにはYGW11を使い、裏当て金の取り付けや組立て溶接の方法はJASS 6¹³⁾に従い、エンドタブはセラミックス製の固形タブを用いた。梁のH形鋼のシャルピー衝撃試験の結果、0℃における平均のエネルギー吸収はフランジが101J、フィレット部が47Jであった。載荷には図3に示す載荷装置を使用し、柱端はピン支持とし、梁の先端に取り付け

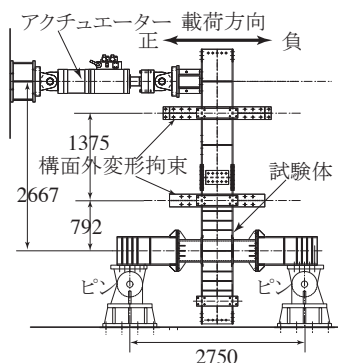


図3 載荷装置 (単位: mm)

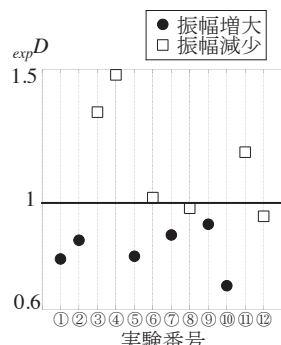


図5 二段階振幅繰返し載荷実験による破断までの損傷度

表1 二段階振幅繰返し載荷実験の結果

実験番号	実験名	μ_1	N_1	d_1	μ_2	N_2	$expD$
①	NSS-1.2-0.47-4.0A	1.2	108	0.47	4.0	5	0.79
②	NSS-1.2-0.47-4.0B					6	0.86
③	NSS-4.0-0.58-1.2A	4.0	7	0.58	1.2	173	1.34
④	NSS-4.0-0.58-1.2B					197	1.48
⑤	NSS-1.2-0.73-4.0	1.2	167	0.73	4.0	1	0.80
⑥	NSS-4.0-0.83-1.2	4.0	10	0.82	1.2	50	1.02
⑦	NSS-2.0-0.43-4.0	2.0	28	0.43	4.0	6	0.88
⑧	NSS-4.0-0.58-2.0	4.0	7	0.58	2.0	27	0.98
⑨	NSS-2.0-0.64-4.0A					4	0.92
⑩	NSS-2.0-0.64-4.0B	2.0	42	0.64	4.0	1	0.69
⑪	NSS-4.0-0.25-2.0A	4.0	3	0.25	2.0	61	1.19
⑫	NSS-4.0-0.25-2.0B					46	0.95

μ_1 : 前半の振幅の塑性率

N_1 : μ_1 による繰返し数

N_{F1} : μ_1 による破断までの繰返し数

d_1 : N_1/N_{F1}

μ_2 : 後半の振幅の塑性率

N_2 : μ_2 による繰返し数

たアクチュエータで載荷した。梁は中間で横補剛され、柱との接合部近傍でリブ補強されて横座屈や局部座屈の発生が抑えられている。梁の全塑性モーメント ($bM_p=740\text{kN}\cdot\text{m}$) に対応する梁部材回転角 θ の弾性成分 θ_p は 0.00753rad であり、載荷振幅の大きさは $\mu=\theta/\theta_p$ で定義される梁の塑性率を用いる。

3. 実験結果

3.1 二段階振幅繰返し載荷実験

二段階振幅繰返し載荷実験は8種類の載荷履歴により全12体行った。載荷履歴は前半に塑性率 μ_1 の振幅で所定の回数で載荷した後、後半の塑性率 μ_2 の振幅で試験体が破断するまで載荷を続けた。表1に実験の一覧を示す。表中の N_1 は μ_1 の振幅による繰返し数、 N_2 は μ_2 の振幅による繰返し数である。 d_1 は振幅 μ_1 の載荷による損傷度で、(1)式により求められる μ_1 の破断までの繰返し数を N_{F1} とすると、 N_1/N_{F1} で求められる。実験名称は「NSS- μ_1 - d_1 - μ_2 」の形で表し、同一条件の実験を区別するために末尾に A, B を付ける。 $expD$ は破断時の損傷度の実験値で、載荷された各振幅の繰返し数 N_i を (1) 式の破断までの繰返し数 N_{Fi} で除した値を実験で破断が起こった時点まで足し合わせたものとして、(2)式により定義する。

$$expD = \sum_i \frac{N_i}{N_{Fi}} \quad (2)$$

実験番号①②と③④は振幅の塑性率1.2と4.0の組合せで、それぞれの塑性率の損傷度をおよそ0.5に設定している。⑤⑥は塑性率1.2と4.0の組合せで前半に載荷する塑性率の損傷度を大きく設定している。⑦⑧は塑性率2.0と4.0の組合せで、それぞれの塑性率の損傷度をおよそ0.5に設定している。⑨⑩と⑪⑫は同じく塑性率2.0と4.0の組合せで塑性率2.0による損傷度が大きくなるように設定している。表1の①②⑤⑦⑨⑩は後半の振幅が前半よりも大きい振幅増大、③④⑥⑧⑪⑫は後半の振幅が小さい振幅減少となる履歴である。

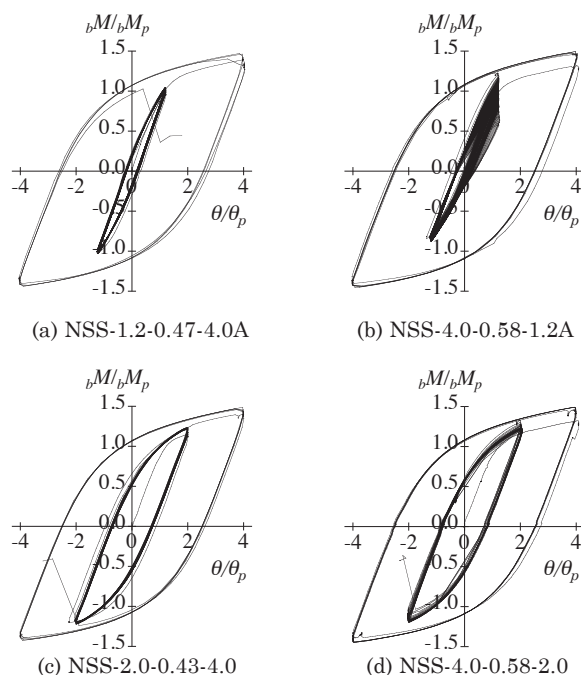


図4 二段階振幅繰返し載荷による曲げモーメント-回転角関係

実験結果の一例として図4に実験番号①③⑦⑧の曲げモーメント-回転角関係を示す。縦軸の曲げモーメントは梁の全塑性モーメント M_p で除しており、図4(a), (c)の振幅増大の実験は耐力が低下せず破断に至るのに対し、図4(b), (d)の振幅減少の実験は耐力が低下した後に破断に至ることが分かる。図5に各実験の $expD$ を示す。振幅減少の実験の方が、振幅増大の実験に比べて $expD$ が大きくなる傾向があることが分かる。また、変動振幅載荷による変形能力を評価する方法として一般的なマイナー則によれば損傷度 $D=1.0$ で限界に至ることになるが、この法則が当てはまらないことが分かる。この傾向は文献9)、10)の実験と同様である。

3.2 ランダム振幅繰返し載荷実験

ランダム振幅繰返し載荷による実験は全4体行なった。載荷履歴は長周期地震動を受ける高層建物の時刻歴応答解析を行い、得られた応答の中から決定した。解析に用いたモデルを図6に示す。文献1)

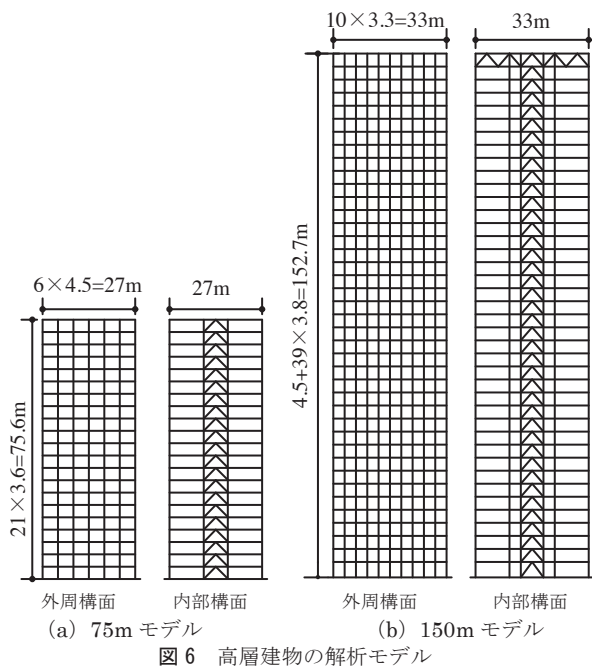


図6 高層建物の解析モデル

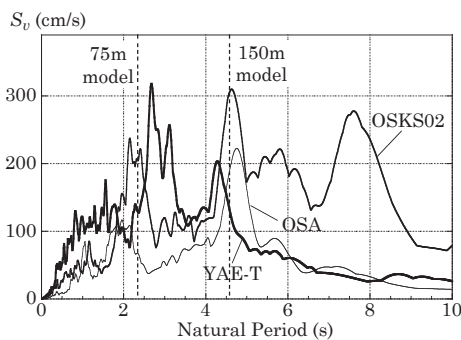


図7 予測波の疑似速度応答スペクトル (減衰定数 0.02)

表2 時刻歴応答解析に用いた予測波

予測波名	予測地点	継続時間 (s)
東南海 (鈴木・岩田) OSK02 ¹⁴⁾	此花	170
南海 (釜江) OSA ¹⁵⁾	中央区	440
東南海 (鶴来) YAE-T ¹⁶⁾	弥栄	300

に用いられている初期高度成長期に設計された一般的な高層建物のモデルで高さが75mと150mのモデルがある。それぞれの1次固有周期は2.34sと4.58s、 A_i 分布の水平力による降伏せん断力係数は0.128と0.059、保有水平耐力(最大層間変形1/75)を D_s (構造特性係数)に換算した値は0.511と0.438である。いずれも外周構面と内部構面の2つの構面で構成された平面骨組で、剛床仮定により2つの構面の各層が同一水平変位となるように設定した。この2つのモデルを表2に示す南海・東南海地震の予測波^{14)~16)}による時刻歴応答解析を行い、梁端に生じた応答の中から累積塑性変形倍率が大い外周構面の履歴を採用した。予測波の疑似速度応答スペクトルと各モデルの1次固有周期を図7に示す。時刻歴応答解析にはCLAP¹⁷⁾を用いた。解析で得られた履歴から塑性率の振幅が1以上の大きい応答を含む部分を抽出した載荷履歴を図8に示す。履歴①は全体に塑性率2程度の振幅を何度も繰返す履歴、履歴②は塑性率2程度の振幅が数回しかない履歴、履歴③は塑性率4程度の大きな振幅が含まれる履歴、履歴④は塑性率3程度の大きな振幅と小さな振幅が交互に繰返される履歴である。この載荷履歴を試験体が破断するまで繰返し載荷し、図中には実験で破断が起こった時点を示す。実験の一覧を表3に、実験から得た曲げモーメント-回転角関係を図9に示す。4種類の履歴の中で1回の入力による損傷が最も大きいのは振幅が塑性率4程度のNSS-R3であり、4回目の入力で破断した。

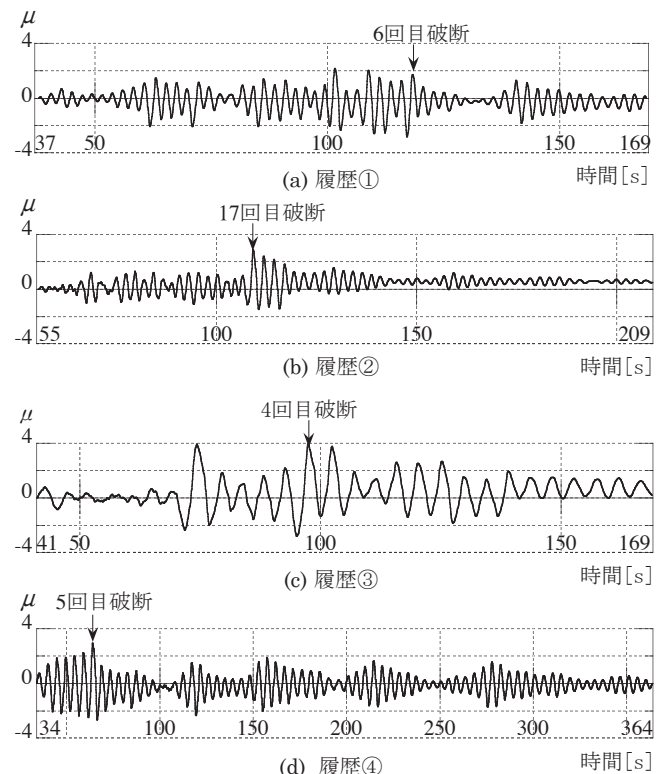


図8 ランダム振幅繰返し載荷の履歴

表3 ランダム振幅繰返し載荷実験一覧

実験名	載荷履歴	入力回数	モデル	入力波	層	R_{max}	μ_{max}	η
NSS-R1	①	6回	75m	OSK02	10	0.0104	2.83	44.2
NSS-R2	②	17回	75m	YAE-T	10	0.0108	2.90	14.2
NSS-R3	③	4回	150m	OSK02	10	0.0116	3.99	51.3
NSS-R4	④	5回	150m	OSA	15	0.0094	2.95	61.4

(R_{max} : 最大層間変形角(rad), μ_{max} : 梁の最大塑性率, η : 梁の累積塑性変形倍率は、時刻歴応答解析の結果を示す)

他の履歴はこれより多くの入力回数で破断しており、本論文で検討した条件下では、ノンスラップ工法で十分な最大曲げ耐力を有する梁端接合部は、これらの長周期地震の予測波による応答に対して十分な塑性変形能力を有すると考えられる。

4. 亀裂進展曲線

破断に結びつく主要な亀裂は実験中に梁フランジ溶接端部に生じ、フランジ母材側ボンド部に沿って実験の進行と共にフランジ幅方向に進展する。この亀裂の進展は①亀裂が発生しない段階、②亀裂が

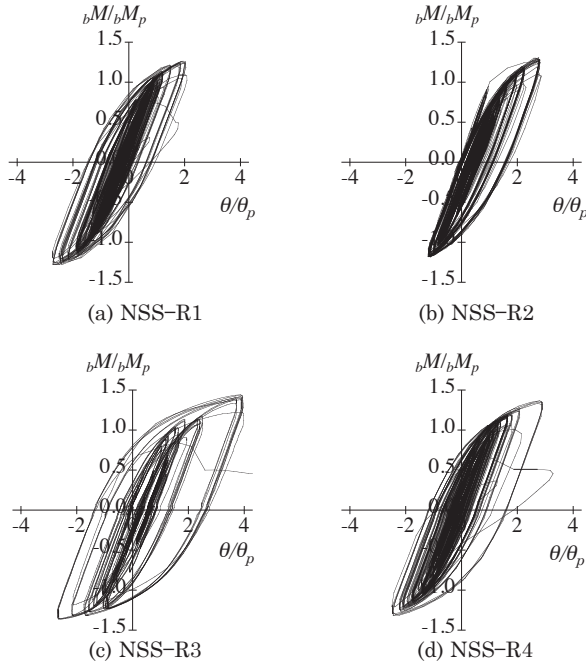


図9 ランダム振幅荷重による曲げモーメント-回転角関係

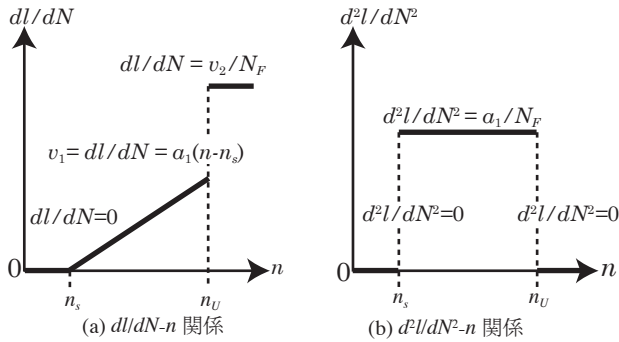


図10 亀裂進展の定式化の考え方

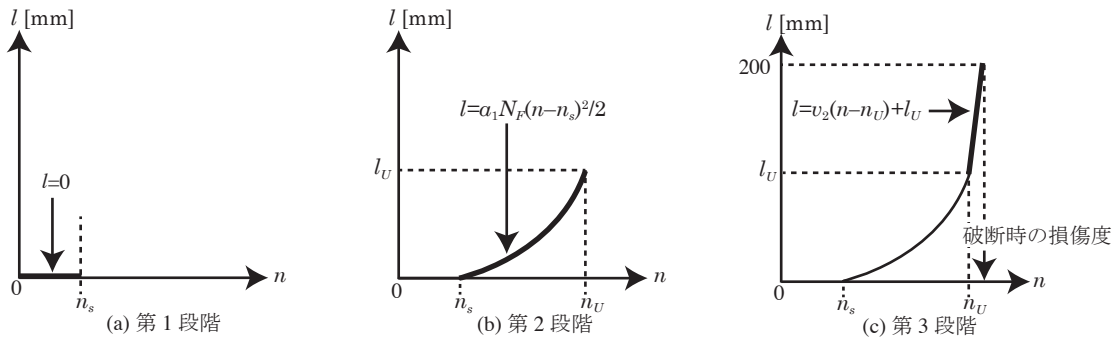


図11 亀裂進展曲線の作成方法

徐々に進展する段階、③亀裂が一気に進展して破断に至る段階の3段階に分けることができる。前報^{4,5)}では接合部の耐力が最大耐力の90%まで低下した時点を終局と定義し、終局を第2段階と第3段階の境界として扱うことにより一定振幅荷重による亀裂の進展を表す亀裂進展曲線を作成した。しかし、このような定義で亀裂進展曲線を定式化すると本論文の図4や図9に示す変動振幅の履歴に対しては耐力が最大耐力の90%に低下した時点の終局を定めることができず、実験結果の評価には適していない。そこで、本論文では接合部が破断した時点を基準とする亀裂進展曲線の作成方法を新たに検討した。主要な亀裂の進展を定式化するための考え方を図10に示す。図中の n は繰返し数 N を N_F で除した値で、損傷度を表す。図10(a)は $dl/dN-n$ 関係、図10(b)は d^2l/dN^2-n 関係を示す。 $dl/dN-n$ 関係は第1段階で0、第2段階で線形に増加し、第3段階で急激に一定の値に増加すると考える。(a)の関係を N について積分すると、亀裂長さ l と n の関係は亀裂進展の各段階について以下の式で表される。なお、(4)式は桑村による討論¹⁸⁾に示される(3)式と同じ意味であり、前報(その2)⁵⁾の(13)式で N_g を N_F に代えたものである。

$$\text{第1段階} \quad l = 0 \quad (0 \leq n \leq n_s) \quad (3)$$

$$\text{第2段階} \quad l = a_1 N_F (n - n_s)^2 / 2 \quad (n_s < n \leq n_U) \quad (4)$$

$$\text{第3段階} \quad l = v_2 (n - n_U) + l_U \quad (n_U < n) \quad (5)$$

l : 亀裂長さ [mm]

N : 繰返し数 [cycle]

n_s : 第1段階と第2段階の境界の n

n_U : 第2段階と第3段階の境界の n

l_U : 第2段階と第3段階の境界の亀裂長さ [mm]

v_1 : 第2段階の亀裂進展の速度 [mm/cycle]

a_1/N_F : 第2段階の亀裂進展の加速度 [mm/cycle²]

v_2/N_F : 第3段階の亀裂進展の速度 [mm/cycle]

一定振幅荷重実験から得られた(3)～(5)式中の各係数と塑性率 μ との関係を回帰分析することにより、亀裂進展曲線を作成する。3つの段階について亀裂進展曲線を作成する方法を図11に示す。第1段階が終わり亀裂が発生し始めるときの損傷度 n_s は一定振幅荷重の場合、図12(a)に示す実験結果より、振幅の塑性率 μ によらず一定とみなせるので平均値をとる。変動振幅荷重の場合は、(7)式の右辺の値が(6)式に示す n_s の平均値に達したときとする。

$$\text{一定振幅} \quad n_s = 0.22 \quad (6)$$

$$\text{変動振幅} \quad n_s = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_{Fi}} \quad (7)$$

ただし、 N_i : i 番目の振幅の繰返し数

N_{Fi} : i 番目の振幅による破断までの繰返し数

l_U は第 2 段階と第 3 段階の境界の亀裂長さであり、その実験値は破断する 1 サイクル前の亀裂長さである。亀裂進展曲線を作成する際には、亀裂進展曲線の長さが l_U に達したときの損傷度を n_U とし、第 2 段階と第 3 段階の境界とする。 n_s , l_U , a_1 , v_2 と振幅との関係を回帰分析した結果を図 12 に示す。●が実験から得られた値^(注1)であり、これを回帰分析すると図中に直線で示すように (8) ~ (10) 式の関係が得られる。これらの回帰分析値を用いて 4 種類の一定振幅に対して作成した亀裂進展曲線を図 13 に示す。ここで $\mu=1.2$ の曲線だけ $l=200\text{mm}$ のときに $n=1$ を超えているのは、(8) ~ (10) 式の値と実験値との差が他の振幅よりも大きいことによる。

$$l_U = -26.4 \mu + 152 \quad (8)$$

$$a_1 = 5.37 (\mu - 1) \quad (9)$$

$$v_2 = 11353 \mu^{-1.23} \quad (10)$$

以上の亀裂進展曲線の係数は、前報 (その 1)⁴⁾ では、本論文 (6) 式の n_s を 0.23、同 (9) 式の右辺の係数を 3.85、同 (5) 式の n_U に該当する値は亀裂進展曲線が急増する点の n_g を用いて 0.92 としていたが、本論文の値は異なっている。これは前述の理由で繰返し数 N を n に基準化する値を終局時の N_U から破断時の N_F に変更したためである。

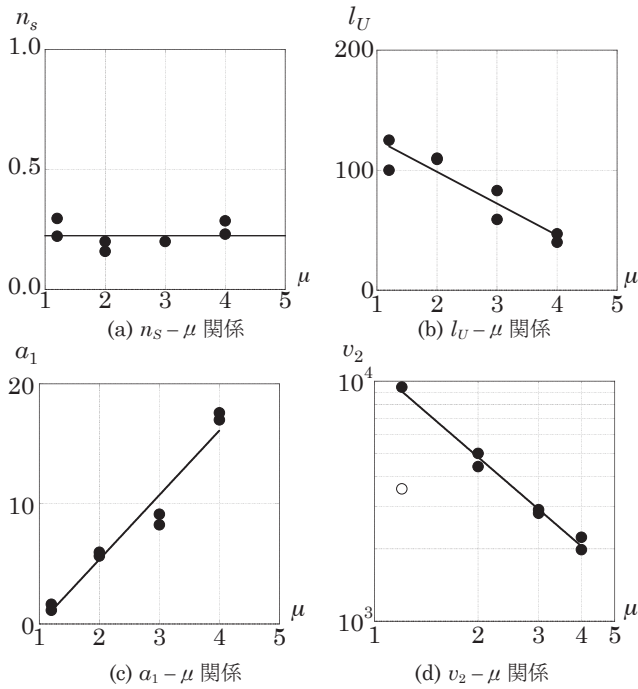


図 12 係数の回帰分析結果

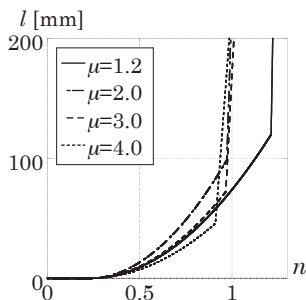


図 13 一定振幅繰返し载荷による亀裂進展曲線

5. 変動振幅载荷における破断時の損傷度の予測

亀裂進展曲線を用いて変動振幅载荷実験の損傷度を予測する方法を NSS-R1 を例に示す。実験で得た梁の塑性率の時刻歴を図 14 に示す。ただし、载荷装置の性能と試験体観察のため、図 8 の応答解析の履歴よりも時間軸が長くなっている。このような塑性率の履歴にレインフロー法¹⁹⁾を用いて半サイクル毎の塑性率の履歴と個数を抽出した結果を図 15 に示す。

この塑性率の履歴から破断時の損傷度を予測する方法を図 16 に示す。塑性率の履歴の各塑性率に対応する一定振幅の亀裂進展曲線から、载荷された損傷度分の亀裂進展曲線を取り出す。取り出す範囲は、前の振幅で亀裂進展曲線が到達した長さから次の半サイクルで実際に载荷された損傷度分である。今、 i 番目の塑性率 μ_i により N_i 回の繰返しを受けたとき、これを i 番目の载荷と呼ぶことにする。(1), (6), (8), (9), (10) 式により i 番目の载荷での N_{Fi} , n_s , l_{Ui} , a_{1i} , v_{2i} が得られる。また (4) 式より亀裂長さが l_{Ui} に達したときの n すなわち n_{Ui} が得られ、これらの係数を用いて (3) ~ (5) 式により亀裂進展曲線が表される。 $i-1$ 番目の载荷終了時の亀裂長さ l_{i-1} を亀裂の開始点として、これに i 番目の载荷による $n_i=N_i/N_{Fi}$ だけ無次元化繰返し数 n が増加したときの亀裂の長さ l_i が (3) ~ (5) 式の該当する式により求められる。このようにして、亀裂進展曲線を各半サイクル毎に順次つなぎ合わせた曲線が梁フランジの幅 (200mm) に達した時点の無次元化繰返し数 n 、すなわち損傷度を破断時の損傷度の予測値とし、これを $caID$ で表す。ランダム振幅繰返し载荷実験で破断した時点に至ってもまだ予測で破断に至らない場合は、その前の入力と同じ履歴を受けたものとして破断に至るまで計算した。

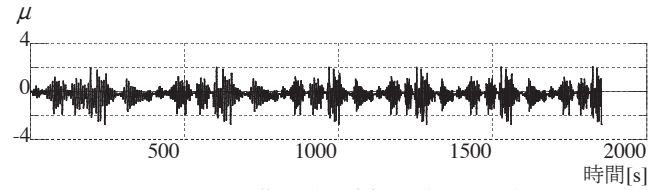


図 14 梁の塑性率の時刻歴 (NSS-R1)

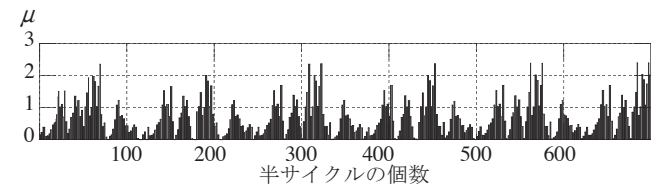


図 15 取り出した塑性率の履歴 (NSS-R1)

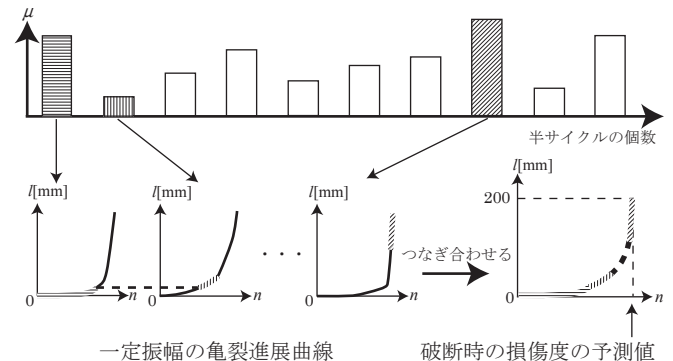


図 16 破断時の損傷度を予測する方法

6. 破断時の損傷度の予測値と実験値の比較

各実験から得られた破断時の損傷度の予測値 $_{cal}D$ と実験値 $_{exp}D$ を以下に示す. いずれも実験値は (2) 式により算定し, 予測値は (3) ~ (5) 式で表される亀裂進展曲線を用いて 5 章に示す方法により求めた値である.

一定振幅載荷の結果を表 4 と図 17 に比較して示す. 同一条件の実験でも試験体毎に亀裂の進展に個体差があるため, 回帰分析で得

表 4 一定振幅繰返し載荷による破断までの損傷度

実験名	損傷度		$_{cal}D/_{exp}D$
	$_{exp}D$	$_{cal}D$	
NSS-1.2A	1.22	1.18	0.97
NSS-1.2B	1.00	1.19	1.19
NSS-2.0A	0.99	0.97	0.98
NSS-2.0B	0.82	0.97	1.18
NSS-3.0A	0.99	0.99	1.00
NSS-3.0B	0.83	0.85	1.02
NSS-4.0A	1.01	0.97	0.96
NSS-4.0B	1.08	0.97	0.90

表 5 二段階振幅繰返し載荷による破断までの損傷度

実験名	損傷度		$_{cal}D/_{exp}D$
	$_{exp}D$	$_{cal}D$	
NSS-1.2-0.47-4.0A	0.79	0.93	1.18
NSS-1.2-0.47-4.0B	0.86	0.94	1.09
NSS-4.0-0.58-1.2A	1.34	1.23	0.92
NSS-4.0-0.58-1.2B	1.48	1.21	0.82
NSS-1.2-0.73-4.0	0.80	0.88	1.10
NSS-4.0-0.83-1.2	1.02	1.25	1.23
NSS-2.0-0.43-4.0	0.88	0.88	1.00
NSS-4.0-0.58-2.0	0.98	1.06	1.08
NSS-2.0-0.64-4.0A	0.92	0.83	0.90
NSS-2.0-0.64-4.0B	0.69	0.82	1.19
NSS-4.0-0.25-2.0A	1.19	0.98	0.82
NSS-4.0-0.25-2.0B	0.95	0.98	1.03

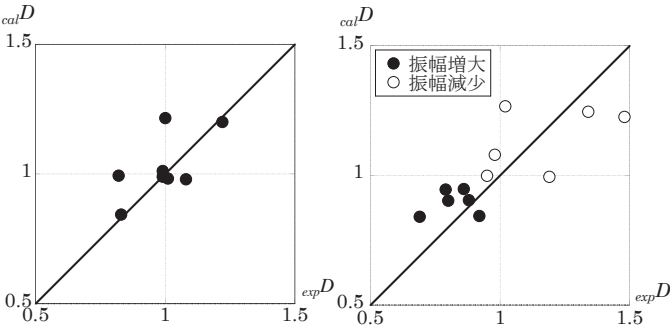


図 17 一定振幅載荷の $_{cal}D$ と $_{exp}D$ 図 18 二段階振幅載荷の $_{cal}D$ と $_{exp}D$

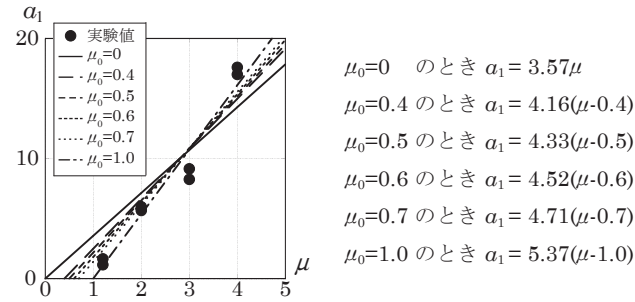
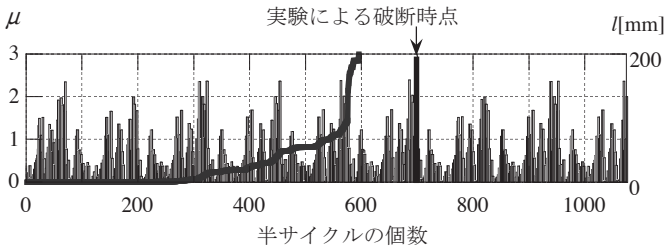
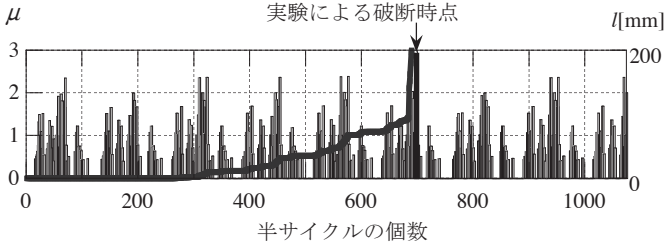


図 19 各 μ_0 に対応する α_1 の回帰分析値

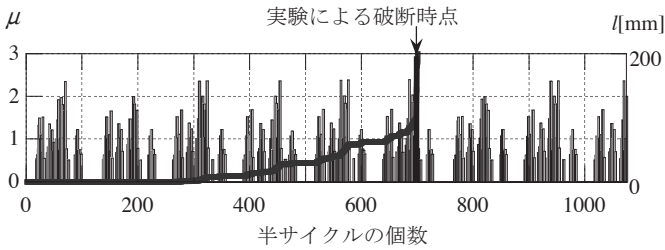
$\mu_0=0$ のとき $\alpha_1=3.57\mu$
 $\mu_0=0.4$ のとき $\alpha_1=4.16(\mu-0.4)$
 $\mu_0=0.5$ のとき $\alpha_1=4.33(\mu-0.5)$
 $\mu_0=0.6$ のとき $\alpha_1=4.52(\mu-0.6)$
 $\mu_0=0.7$ のとき $\alpha_1=4.71(\mu-0.7)$
 $\mu_0=1.0$ のとき $\alpha_1=5.37(\mu-1.0)$



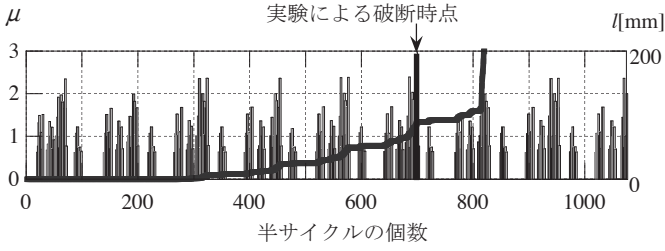
(a) $\mu_0=0$



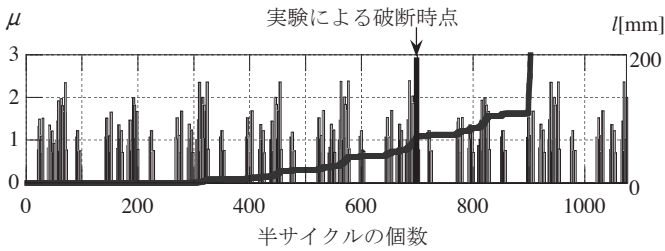
(b) $\mu_0=0.4$



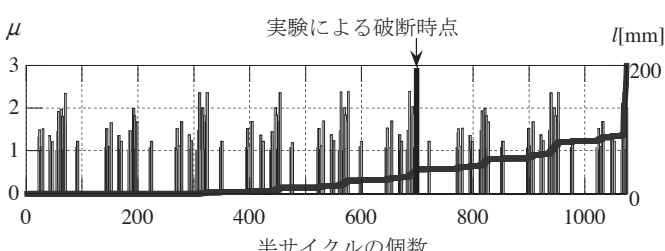
(c) $\mu_0=0.5$



(d) $\mu_0=0.6$



(e) $\mu_0=0.7$



(f) $\mu_0=1.0$

図 20 NSS-R1 の亀裂進展の予測結果と μ_0 の影響

た平均的な亀裂進展との差により、プロットにばらつきが見られる。実験値 $expD$ が 1.0 とならないのは、(2) 式の N_{Fi} に回帰分析で得た (1) 式の N_F を用いており、個々の実験値とは値が異なるからである。

二段階振幅載荷による実験の予測値 $calD$ と実験値 $expD$ の比較を表 5 と図 18 に示す。半数以上が 10% 以下の誤差であり、誤差が大きいものでも 20% 程度の誤差で予測できている。振幅増大を●、振幅減少を○で表しており、振幅減少の方が $expD$ が大きくなる傾向が見られるが、 $calD$ も同様の傾向を示しており、予測は載荷する振幅の順序の影響を捉えていると判断される。

次にランダム振幅載荷の結果を示す。ランダム振幅載荷には振幅の塑性率 μ が 1 を下回る振幅の載荷が含まれており、 $calD$ の計算に考慮する振幅の下限値を μ_0 としたとき、 μ_0 の値により $calD$ の値は変

わる結果となった。すなわち、初めに損傷に寄与するのは塑性域の振幅 ($\mu > 1$) のみと考えて $\mu_0 = 1.0$ として損傷度を計算したが、いずれの履歴でも予測値は変形能力を過大評価する結果となった。

そこで $\mu_0 < 1$ のサイクルも考慮に入れて損傷度を計算することにより、破断時の損傷度 $calD$ を実験値 $expD$ に近づけることを試みた。ただし、 $\mu_0 < 1$ の範囲にも亀裂進展曲線を適用するには a_1 を定義し直す必要がある。ここでは $\mu_0 < 1$ の条件による一定振幅載荷実験のデータが無いので、 $\mu_0 > 1$ の実験結果から図 19 に示すように μ_0 を 1 以下に変えた場合の a_1 の回帰分析を求めて予測に用いた。図 20 に NSS-R1 について、 μ_0 を 0, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 1.0 とした場合に、それぞれ損傷に考慮する塑性率の履歴と、その履歴により作成される亀裂進展曲線を示す。 $\mu_0 = 0.5$ としたときに、実験による破断時点に最も近い時点で亀裂進展曲線は 200mm に達しており、精度よく予測できる結果となった。他の 3 種類の履歴についても $\mu_0 = 0.5$ とした場合の結果を図 21 に示す。また、図 22 に μ_0 と損傷度予測の精度の関係を示す。4 種類のランダム振幅載荷について μ_0 の影響を調べると、この評価法ではいずれも $\mu_0 = 0.5$ とした場合に最も実験に近い結果となった。本来は $\mu < 1$ の範囲を含む一定振幅載荷実験に基づいて亀裂進展式の係数を同定すべきであり、ここでは $\mu > 1$ の範囲から外挿して得られた係数を用いているので予測の精度は十分ではないが、 $\mu < 1$ のある範囲の大きさの振幅では亀裂が進展して損傷に影響することを示していると考えられる。

7. 結論

変動振幅による載荷履歴が梁端接合部の変形能力に与える影響を検討するため、SN490B 材の H 形鋼梁が通しダイアフラム形式のノンスラップ工法で溶接接合された柱梁接合部を対象に、二段階振幅繰返し載荷実験とランダム振幅繰返し載荷実験を行った。幅 200mm の梁フランジ溶接部について、一定振幅繰返し載荷実験に基づいて破断に結びつく主要な亀裂の進展を定式化し、得られた亀裂進展曲線から変動する振幅に対して損傷度を予測する方法を提案した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 塑性率 1.2 ~ 4.0 の範囲での二段階振幅繰返し載荷実験の結果、20% 程度の誤差で破断までの損傷度を予測できた。振幅減少の方が振幅増大よりも破断時の損傷度は大きくなり、亀裂進展曲線を用いた予測においても同様の結果を得た。
- (2) 亀裂進展曲線を用いて長周期地震動による応答を模したランダム振幅の破断時の損傷度を予測した結果、損傷に寄与する振幅の下限値を塑性率 0.5 とした場合に最も実験に近い結果を得た。ただし、 $\mu < 1$ の範囲の亀裂進展式の精度についてはさらに検討が必要である。

謝辞

本研究は科学研究費・基盤研究 (A)(No.21246087) の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 吹田啓一郎, 北村有希子, 五藤友規, 岩田知孝, 釜江克宏: 高度成長期に建設された超高層建物の長周期地震動に対する応答特性 (想定南海トラフ地震の関西地域における予測波を用いた検討), 日本建築学会構造系論文集, 第 611 号, pp.56-61, 2007.1
- 2) 山田祥平, 北村有希子, 吹田啓一郎, 中島正愛: 初期超高層ビル柱梁接合

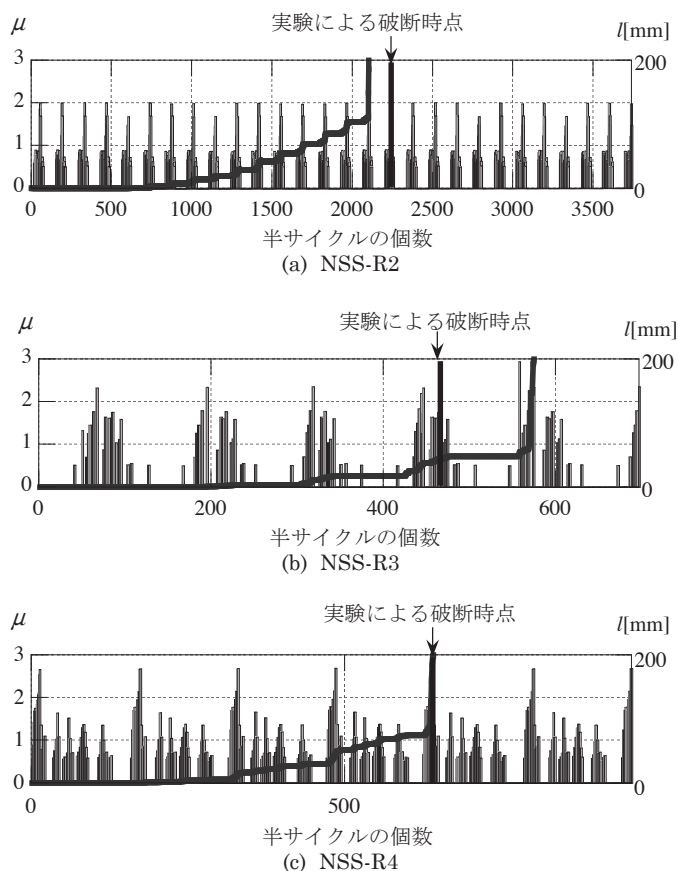


図 21 $\mu_0 = 0.5$ の場合の亀裂進展の予測と実験結果の比較

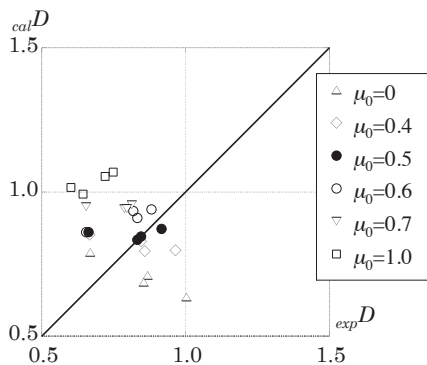


図 22 μ_0 と損傷度予測の精度の関係

- 部の実大実験による耐震性能の検証, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 623 号, pp.119-126, 2008.1
- 3) 吹田啓一郎, 北村有希子, 橋田勇生: 初期超高層建物柱梁接合部が保有する変形性能と接合部改良効果の検証, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 636 号, pp.367-374, 2009.2
- 4) 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, pp.1135-1142, 2011.6
- 5) 高塚康平, 真鍋義貴, 吹田啓一郎, 田中剛, 津嘉田敬章, 蘇鐘鈺: スカラップの有無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 2), 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻第 673 号, pp.453-459, 2012.3
- 6) 大熊武司, 中込忠男, 小川秀雄, 村井正敏, 上遠野明夫, 河合良道, 久保田一男, 津下一英, 下村祥一, 竹田篤司, 相場雅彦, 加藤貴志, 岩田衛: 鋼構造柱梁溶接接合部の累積疲労損傷に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C, その 1 ~ その 2, pp.1145-1148, 1993.9, その 3 ~ その 4, pp.1429-1432, 1994.9, その 5 ~ その 6, pp.559-562, 1995.8, その 7, pp.647-648, 1996.9, その 8, pp.363-364, 1997.9, その 9, pp.439-440, 1998.9, その 10 ~ その 11, pp.613-616, 1999.9, その 12, pp.707-708, 2000.9
- 7) 小川秀雄, 大熊武司, 中込忠男: 大型試験体を用いた両振り一定振幅載荷の疲労強度: 鋼構造柱梁溶接接合部の累積疲労損傷評価その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 535 号, pp.149-156, 2000.9
- 8) 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
- 9) 周志光, 伊藤拓海, 桑村仁: 曲げ材の破断変形能力に対するノッチ形状と塑性率振幅の影響 (鉄骨柱-梁溶接接合部の形状ノッチおよび材質ノッチその 6), 日本建築学会関東支部研究報告集 I, 材料・施工・構造・防火・環境工学 (79), pp. 265-268, 2009.03
- 10) 山田哲, 焦喩, 柴田篤宏, 島田侑子, 古敷祥一: 繰り返し荷重を受ける梁部材のエネルギー吸収能力 (その 1) (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造 III, pp.567-570, 2008.07
- 11) 真鍋義貴, 吹田啓一郎, 田中剛, 高塚康平: 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載荷履歴が変形能力と亀裂進展に及ぼす影響), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 51 号・構造系, pp.253-256, 2011.6
- 12) 真鍋義貴, 吹田啓一郎, 田中剛, 高塚康平: 二段階変動振幅による載荷履歴が変形能力と亀裂進展に及ぼす影響, (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 7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造 III, pp.1037-1038, 2011.9
- 13) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書: JASS6 鉄骨工事, 第 9 版, 2007
- 14) W. Suzuki, T. Iwata, K. Asano, N. Yamada: Estimation of the source model for the foreshock of the 2004 off the Kii Peninsula earthquakes and strong ground motion simulation of the hypothetical Tonankai earthquake using the empirical Green's function method, Earth Planets Space, No.57, pp.345-350, 2005
- 15) K. Kamae, H. Kawabe, K. Irikura: Strong Ground Motion Prediction for Huge Subduction Earthquakes using a Characterized Source Model and Several Simulation Techniques, Proceedings of 13th WCEE, Paper No.655, 2004.8
- 16) 鶴来雅人, 趙伯明, Petukhin Anatoly, 香川敬生: 南海・東南海地震の大阪府域における強振動予測, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.501-512, 2005.3
- 17) 小川厚治, 多田元英: 柱・梁接合部パネルの変形を考慮した静的・動的応答解析プログラムの開発, 第 17 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp.79-84, 1994.12
- 18) 桑村仁: 「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 -」に対する討論, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻第 671 号, pp.131-132, 2012.1
- 19) American Society for Testing and Materials: Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis, ASTM Standard E1049-85, 2005

注

注 1) 図 12(d) 中に○で示す NSS-1.2A の v_2 は他と比べて著しく逸脱しているのでこの回帰分析からは除いた。

(2012年4月7日原稿受理, 2012年9月10日採用決定)