

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8 長周期地震動による応答を模したランダム載荷による亀裂進展と変形能力

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 載荷実験 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、累積塑性変形倍率、サイクル数を主な評価指標として、疲労の考え方に準じて累積の損傷度を分析している。

文献1)では一定振幅の正負交番繰返し載荷実験を行い、振幅と変形性能の関係を調べた。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で、ノンスラップ工法により接合されてお

り、図1に示す載荷装置を用いた。振幅は梁端の曲げモーメントが梁の全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4種類とした。実験から得た載荷振幅の塑性率 μ と破断までの繰返し数 N_F を表1と図2に示す。また、回帰分析の結果を図中の直線と(1)式で示す。

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

実験中に梁フランジ溶接端部に生じる亀裂は①亀裂が発生しない段階、②亀裂が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た。亀裂進展の各段階を定式化するために必要な係数と振幅の関係を分析し、実験で与えた載荷履歴から試験体に生じる亀裂の進展を予測するための亀裂進展曲線を作成した。

文献2)では文献1)と同じ試験体に二段階変動振幅繰返し載荷を行い、変動する振幅が変形能力に与える影響を調べた。実験は前半の振幅で所定の回数載荷した後、振幅を変えて接合部が破断するまで繰返し載荷した。この結果を表2に示す。本研究で実験による破断時の損傷度 $_{exp}D$ は*i*番目の振幅の繰

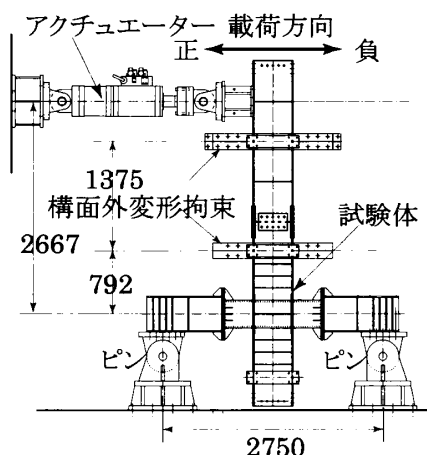
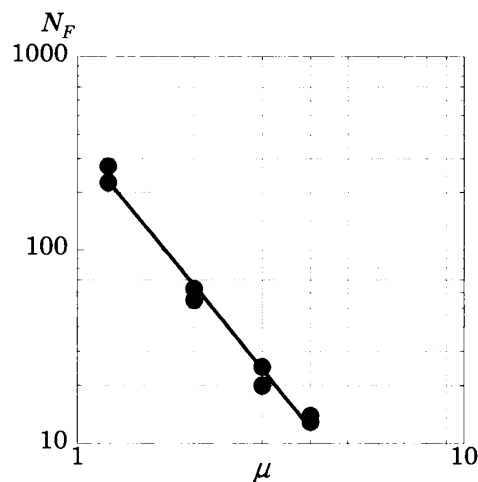


図1 載荷装置 (単位: mm)

表1 一定振幅繰返し載荷実験の結果

実験名	μ	N_F
NSS-1.2A	1.2	274
NSS-1.2B	1.2	225
NSS-2.0A	2.0	63
NSS-2.0B	2.0	55
NSS-3.0A	3.0	25
NSS-3.0B	3.0	20
NSS-4.0A	4.0	13
NSS-4.0B	4.0	14

図2 N_F - μ 関係

Deformation capacity evaluation of welded beam to column connection subjected to repeated plastic strain
(Part8: The crack propagation and deformation capacity of beam-to-column connection by random variable amplitude loading predicted by long-period ground motion)

MANABE Yoshiki, SUITA Keiichiro, TANAKA Tsuyoshi, TAKATSUKA Kouhei

返し数を N_i , 破断までの繰返し数を N_F として (2) 式で定義する.

$$D = \sum_{exp} \frac{N_i}{N_{Fi}} \quad (2)$$

同じ振幅, 損傷度の組合せで載荷の順序が異なる実験を比較すると, 後半に載荷する振幅の塑性率 μ_2 が前半の μ_1 よりも小さい振幅減少の実験の方が, 振幅増大の実験よりも $_{exp}D$ は大きくなる傾向がある.

本研究では文献 1), 2) と同じ試験体に, 長周期地震動が起こった際に建物の梁部材に生じると予測される応答を載荷した. この載荷をランダム載荷と呼び, ランダム載荷に対する試験体の変形能力を調べることで, 変動する振幅に対して有効な変形能力評価の手法を提案することを研究目的としている. これは他の実験研究でも指摘されている共通の傾向である.

2. ランダム載荷実験

文献 3) で作成した, 初期高度成長期に設計された一般的な超高層建物のモデルを図 3 に示す. 高さ 75m のモデルと 150m のモデルがある. これらのモデルに表 3 に示す南海・東南海地震の予測波による地震応答解析を行い, 得られた応答の中からランダム載荷の履歴を選んだ. 選んだ履歴を図 4 に示し, 実験の一覧を表 4 に示す. 図 4 には選んだモデル, 入力した予測波, 応答が生じた層, 破断した時点を示している. 載荷履歴は試験体が破断するまで同じ

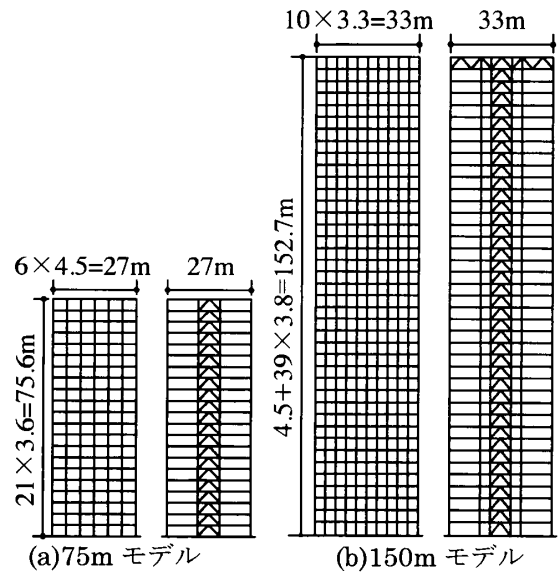
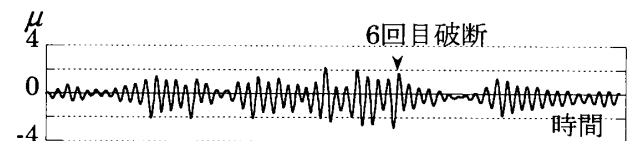


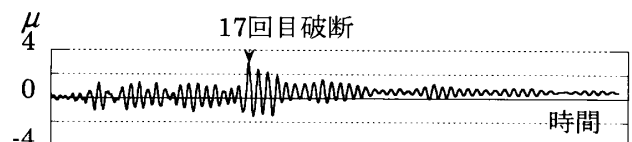
図 3 超高層建物の解析モデル³⁾

表 3 入力する予測波³⁾

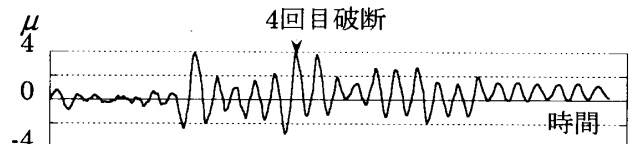
予測波名	予測地点	継続時間 (s)
東南海 (鈴木・岩田) OSK02	此花	170
南海 (釜江) OSA	中央区	440
東南海 (鶴来) YAE-T	弥栄	300



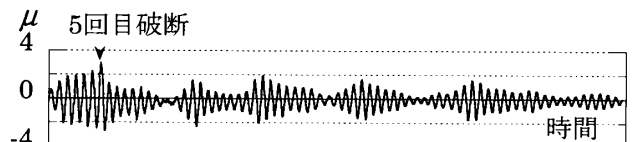
(a) 履歴① 75m モデル OSK02 10 層



(b) 履歴② 75m モデル YAE-T 10 層



(c) 履歴③ 150m モデル OSK02 10 層



(d) 履歴④ 150m モデル OSA 15 層

図 4 載荷履歴

表 2 二段階振幅変動振幅繰返し載荷実験の結果

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

μ_1 : 前半の塑性率 d_1 : $N_1 / \hat{N}_{F1}$
 N_1 : μ_1 の繰返し数 μ_2 : 後半の塑性率
 $\hat{N}_{F1}$: μ_1 の破断までの繰返し数 N_2 : μ_2 の繰返し数

表 4 ランダム載荷実験一覧

実験名	載荷履歴	破断までの入力回数
NSS-R1	履歴①	6 回目
NSS-R2	履歴②	17 回目
NSS-R3	履歴③	4 回目
NSS-R4	履歴④	5 回目

振幅で繰返し载荷した。

3. 亀裂進展曲線

文献 1), 2) では接合部の耐力が 90% まで低下した時点を基準に亀裂進展曲線を作成したが, 本論では接合部の破断した時点を基準として新たに亀裂進展曲線を作成する。亀裂の進展に対する考え方を図 5 に示す。\$n\$ は繰返し数を \$N_F\$ で除した値で損傷度を表し, 亀裂進展曲線は以下のように定義される。

・第 1 段階

$$l=0 \quad (0 \leq n \leq n_s) \quad (3)$$

・第 2 段階

$$l=a_1 N_F(n-n_s)^2/2 \quad (n_s \leq n \leq n_U) \quad (4)$$

・第 3 段階

$$l=v_2(n-n_U)+l_U \quad (n_U \leq n) \quad (5)$$

\$l\$: 亀裂長さ

\$N\$: 繰返し数

\$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

\$a_1\$: 第 2 段階の加速度

\$v_2\$: 第 3 段階の速度

一定振幅载荷実験の結果を回帰分析することにより各係数と振幅の関係を得て, 亀裂進展曲線を作成する。4 種類の一定振幅による亀裂進展曲線を図 6 に示す。

4. 破断時の損傷度の予測

亀裂進展曲線を用いて実験の損傷度を予測する方法を NSS-R1 を用いて説明する。NSS-R1 の梁の塑性率の時刻歴を図 7 に示す。このような時刻歴にレインフロー法を用いて, 塑性率の履歴と個数を抽出した結果を図 8 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 9 に示す。塑性率の履歴の各塑性率での一定振幅载荷による亀裂進展

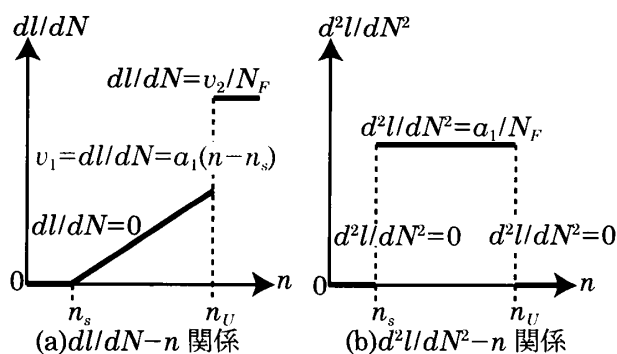


図 5 亀裂の進展の考え方

曲線から, 実際に载荷される損傷度分の亀裂進展曲線を取り出し, 順につなぎ合わせた曲線が梁フランジの幅 200mm に達した時点の損傷度を破断時の損傷度の計算値とし, これを \$calD\$ とする。

5. 破断時の損傷度の予測値と実験値の比較

一定振幅の \$calD\$ と \$expD\$ を図 10(a) に比較して示す。同一条件の実験でも試験体性能に若干の差があり, プロットがばらついている。二段階振幅の比較を図 10(b) に示す。振幅増大を ●, 振幅減少を ■ で表して

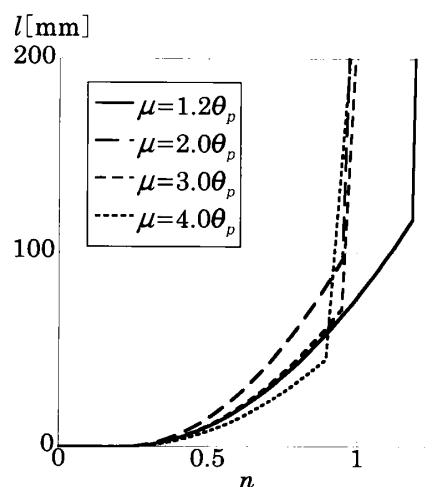


図 6 一定振幅载荷による亀裂進展曲線

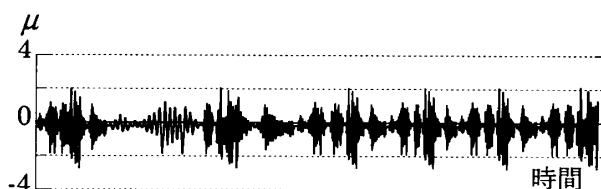


図 7 梁の塑性率の時刻歴 (NSS-1)

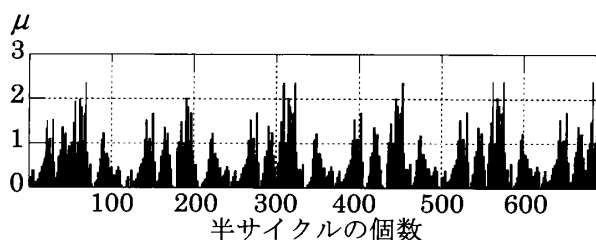


図 8 取り出した塑性率の履歴 (NSS-R1)

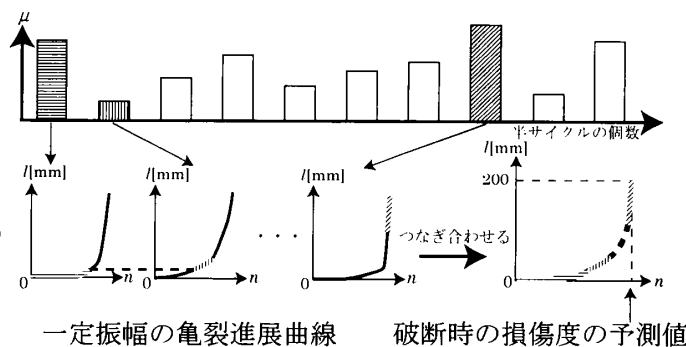


図 9 破断時の損傷度を予測する方法

いる。実験と同様に計算値も、振幅減少の方が破断時の損傷度が大きい傾向を示している。ランダム振幅では弾性域の载荷を多く含み、損傷に考慮する振幅の下限値 μ_0 により予測精度が変化した。図 11 に NSS-R1 の、 μ_0 を 0, 0.5, 1.0 と変動させたときの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。 $\mu_0=0.5$ のときに最も実験による破断時点に近い時点で亀裂進展曲線は 200mm に達しており、精度よく予測できている。図

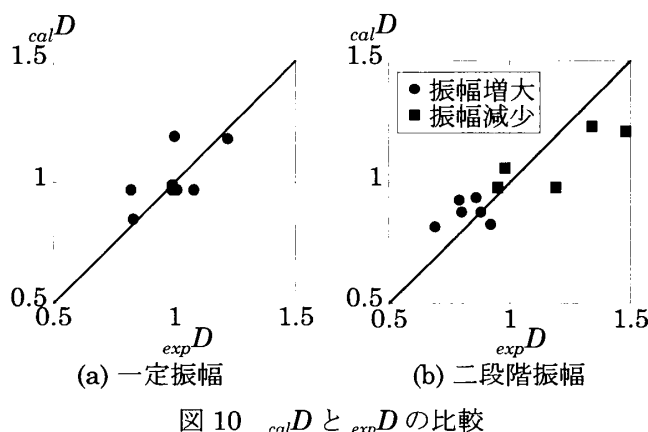


図 10 $cal D$ と $exp D$ の比較

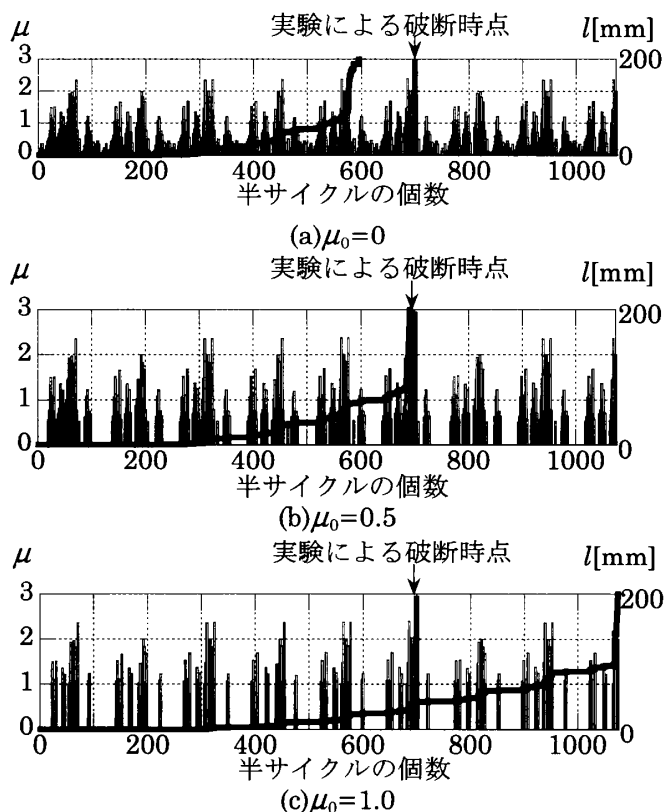


図 11 μ_0 が予測精度に与える影響 (NSS-R1)

12 に μ_0 と損傷度予測の精度の関係を示す。4 種類のランダム载荷ではいずれも $\mu_0=0.5$ で予測精度が最も高くなる結果となった。

5. まとめ

鋼構造柱梁溶接接合部に対し、地震応答を模したランダム载荷を行うことで、载荷履歴が変形能力に与える影響を調べた。接合部に生じる亀裂の進展に着目し、その様子を定式化することで载荷履歴に対する接合部の変形能力を予測し、ランダム载荷に対して予測が有効であることを確かめた。

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) 真鍋義貴, 吹田啓一郎, 佐藤篤司, 津嘉田敬章, 田中剛, 蘇鐘鉦: 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), 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) 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), 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
- 3) 吹田啓一郎, 北村有希子, 後藤友規, 岩田友孝, 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派を用いた検討 -, 日本建築学会構造系論文集, 第 611 号, pp.55-61, 2007.1

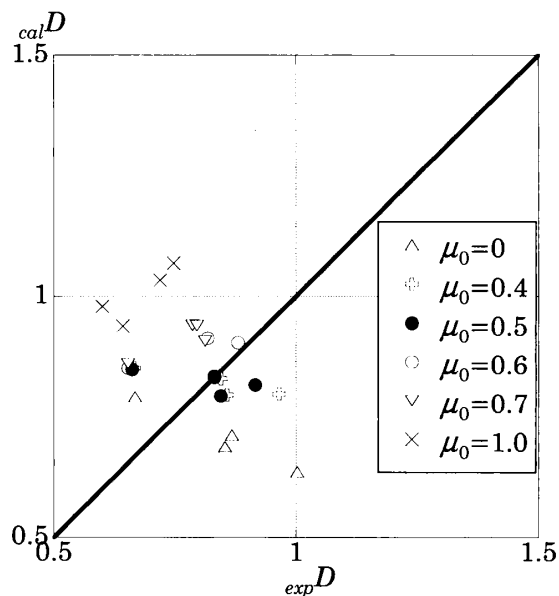


図 12 μ_0 と損傷度予測の精度の関係

※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 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程

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.

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