

## 鋼部材の実験で用いられる載荷履歴と地震荷重下における耐震性能評価

Experimental study on the loading protocol used in cyclic loading seismic test of steel members

東京工業大学 建築物理研究センター 山田 哲

### (研究計画ないし研究手法の概略)

鋼部材の繰り返し載荷実験を行う際、我が国では建築研究所と鋼材倶楽部によって提案された載荷履歴が、米国ではSACの標準載荷履歴が用いられることが多い。標準的な載荷履歴を用いることは、多くの実験結果を統一的に評価できるという点で意義深い。一方、一方で単一の載荷履歴のみでの実験が一般化することの影響が危惧される。地震荷重は、直下型地震、海洋型地震あるいは最近注目されるようになった長周期地震動と様々な性質を有している。また、応答解析で得られる部材の履歴は、漸増変位振幅を基本とする標準的な載荷履歴とは大きく異なる。様々なタイプの地震入力を受ける可能性のある建物の耐震性能を評価する上で、部材実験は複数の載荷履歴の組み合わせで行うべきなのか、あるいは標準的な載荷履歴で行った実験結果を様々なタイプの入力にうまく適用できる方法はあるのかという事は不明であり、これを明らかにすることは耐震設計の基本情報を部材実験から得る上で必要不可欠である。

また、本研究の対象となる梁端接合部の破断によって決まる塑性変形能力については、純鉄骨部材を用いて実験することが一般に行われており、実験結果に基づく塑性変形能力評価式の提案などが行われているが、実際の建物では梁を床スラブと一体化して合成梁とすることが一般的である。条件が明確な純鉄骨部材の変形能力評価式自体は塑性変形能力の指標として重要な意味を持つが、一般的な建物で用いられる合成梁では、正曲げと負曲げで断面内の応力状態が異なることから、直接適用することはできない。もちろん、合成梁についても純鉄骨部材同様に多くの実験を行い部材レベルで破断によって決まる変形能力の評価式を構築することも考えられるが、合理的ではない。純鉄骨部材における梁端接合部近傍のフランジが破断する条件が解析的に追跡できれば、床スラブの影響を反映した解析を行うことで、合成梁の塑性変形能力を評価することができると考えられる。本研究では、梁端接合部近傍のフランジにおける歪履歴に着目し、純鉄骨部材における梁端部近傍フランジが、様々な載荷履歴のもとで破断に至る条件をこれまで行ってきた実験の結果および数値解析により検討する。

具体的な手法であるが、数値積分による面内解析にバウシinger効果を考慮した応力度-歪度関係のモデル<sup>1)</sup>を適用し、繰り返し曲げを受ける梁の解析を行う。この解析法は図1に示すように、部材に作用する外力が変化し、各断面に作用するモーメントに変化があった場合、平面保持の仮定の下で断面内の力の釣り合いを解くことで、各断面に作用するモーメントの増分に対する曲率の増分を求め、材長にわたり曲率を積分することで外力に対する変形を求めるといものである。解析においては、梁端接合部におけるウェブのモーメント伝達効率低下の影響を文献<sup>2)</sup>を参考にして、図2に示すように曲げ応力が伝達できない領域を設けることで考慮した。ここで、無効領域の断面成方向の長さ $h_r$ は、梁成を $H$ 、フランジ板厚を $t_f$ 、スカラップによる断面欠損の梁成方向長さを $S_r$ 、鋼構造接合部設計指針<sup>3)</sup>による梁ウェブ接合部の無次元化曲げ耐力を $m$ として、

$$h_r = \sqrt{1 - \frac{m \cdot \sigma_{yw}}{\sigma_{uw}}} \cdot (H - 2 \cdot t_f - 2 \cdot S_r) \quad (1)$$

とする。これは、無効断面を除くウェブの断面が、一様にウェブ材の引張強さ $\sigma_{yw}$ に達するとしたときの終局モーメントが、鋼構造接合部設計指針12)によるウェブの終局モーメント $M_{wu}$ と等しくなるよう、柱フェイス位置での無効領域を設定したものである。なお、文献11)では直角二等辺三角形(図2における $\triangle ABC$ )の無効領域を設けているが、スカラップが存在する場合、スカラップ位置の手前で無効領域に相当するウェブの曲げ応力はフランジに流れることから、スカラップの存在する範囲においては無効領域は変化しないものとして、長方形(図2における $\square ABED$ )の領域を設定し、これらの直角二等辺三角形( $\triangle ABC$ )および長方形( $\square ABED$ )に外接する五角形の無効領域を設定した。なお、直角二等辺三角形の頂点Cが、EDより柱フェイス側にある場合は、長方形 $\square ABED$ を無効領域とする。

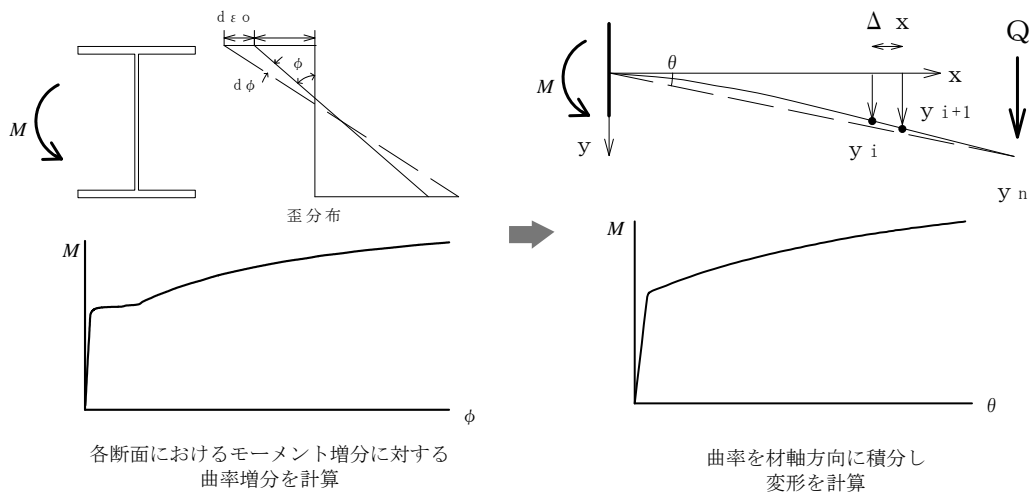


図1 数値積分による面内解析法の概要

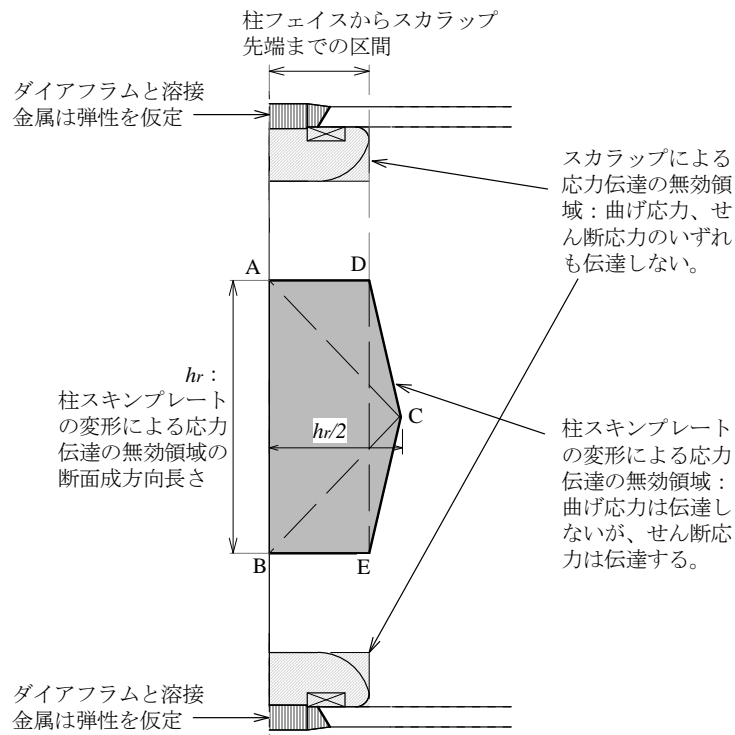


図2 接合部近傍のモデル化

- 1) 山田 哲, 今枝知子, 岡田 健: バウシinger効果を考慮した構造用鋼材の簡潔な履歴モデル, 日本建築学会構造系論文集 第559号, pp. 225-232, 2002.9
- 2) 鈴木孝彦, 石井 匠, 森田耕次, 高梨晃一: 欠陥を有する柱梁溶接接合部の破断性状に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第6巻 第23号, pp. 149-164, 1999.9
- 3) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2006

### (実験調査によって得られた新しい知見)

表1に示す既往の実験結果を用いて、解析結果との比較検討を行う。解析では、断面の高さ方向について、フランジを板厚方向に5分割、ウェブのフランジに近い35mmの領域を5mmずつ7分割、残りの部分を均等に19分割し、材長方向については10mmずつ均等に分割し、実験と同じ载荷履歴を与えて荷重-変形関係を求めた。なお、柱について素材試験を行っていないNo. 1~5の各試験体については、BCR295材の降伏点の規格下限値295N/mm<sup>2</sup>を用いてウェブのモーメント効率を算定したが、モーメント伝達効率が高く規格下限値を用いても $m=1$ となることから、影響は無い。解析による荷重-変形関係と実験での荷重-変形関係の比較を図3に示す。解析値と実験結果は良く対応していることがわかる。

表1 実験結果のデータベース

No	試験体名	文献	梁断面	梁鋼種	カラップ形状		S <sub>yf</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>uf</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>yw</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>uw</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	L (mm)	柱断面	柱鋼種	S <sub>yc</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	载荷履歴
					R(mm)	R2(mm)									
1	载荷履歴1	4)	H-400×200×8×13	SN400	35	10	282	452	352	514	1900	□-400×400×19	BCR295	—	漸増変位振幅
2	载荷履歴2	4)	H-400×200×8×13	SN400	35	10	282	452	352	514	1900	□-400×400×19	BCR295	—	漸減変位振幅
3	载荷履歴3	4)	H-400×200×8×13	SN400	35	10	282	452	352	514	1900	□-400×400×19	BCR295	—	定変位振幅(±3?p)
4	载荷履歴4	4)	H-400×200×8×13	SN400	35	10	282	452	352	514	1900	□-400×400×19	BCR295	—	定変位振幅(±4?p)
5	载荷履歴5	4)	H-400×200×8×13	SN400	35	10	282	452	352	514	1900	□-400×400×19	BCR295	—	定変位振幅(±5?p)
6		5)	H-400×200×8×13	SS400	30	5	314	443	368	471	1900	□-400×400×19	STKR400	358	漸増変位振幅
7		5)	H-400×200×8×13	SS400	30	5	314	443	368	471	1900	□-400×400×19	STKR400	358	漸増変位振幅
8	試験体3	6)	H-300×150×6.5×9	SS400	25	5	334	475	375	494	1375	□-250×250×9	STKR400	364	単調载荷
9	試験体4	6)	H-300×150×6.5×9	SS400	25	5	334	475	375	494	1375	□-250×250×6	STKR400	312	単調载荷

データベースの実験では、破断箇所に近い位置での歪履歴を得るため、断面の上下フランジに塑性ゲージを貼り、载荷中の歪履歴を計測した。塑性ゲージを貼付した断面の位置と、塑性ゲージの配置であるが、No. 1~5については図4(1)に示すように、スカラップ底より少し離れた柱のスキムプレートから80mmの位置のフランジ表裏に9枚の塑性ゲージを貼り、No. 6, No. 7については図4(2)に示すように、スカラップ底に近い60mm (No. 7については55mm)の位置に、No. 6については表面に5枚、No. 7については表裏に9枚の塑性ゲージを貼り、No. 8, 9については図4(3)に示すようにスカラップ先端に近い50mmの位置のフランジ表裏に9枚の塑性ゲージを貼った。これらの塑性ゲージによる計測値の平均値を、梁端部フランジの歪の実験結果とする。

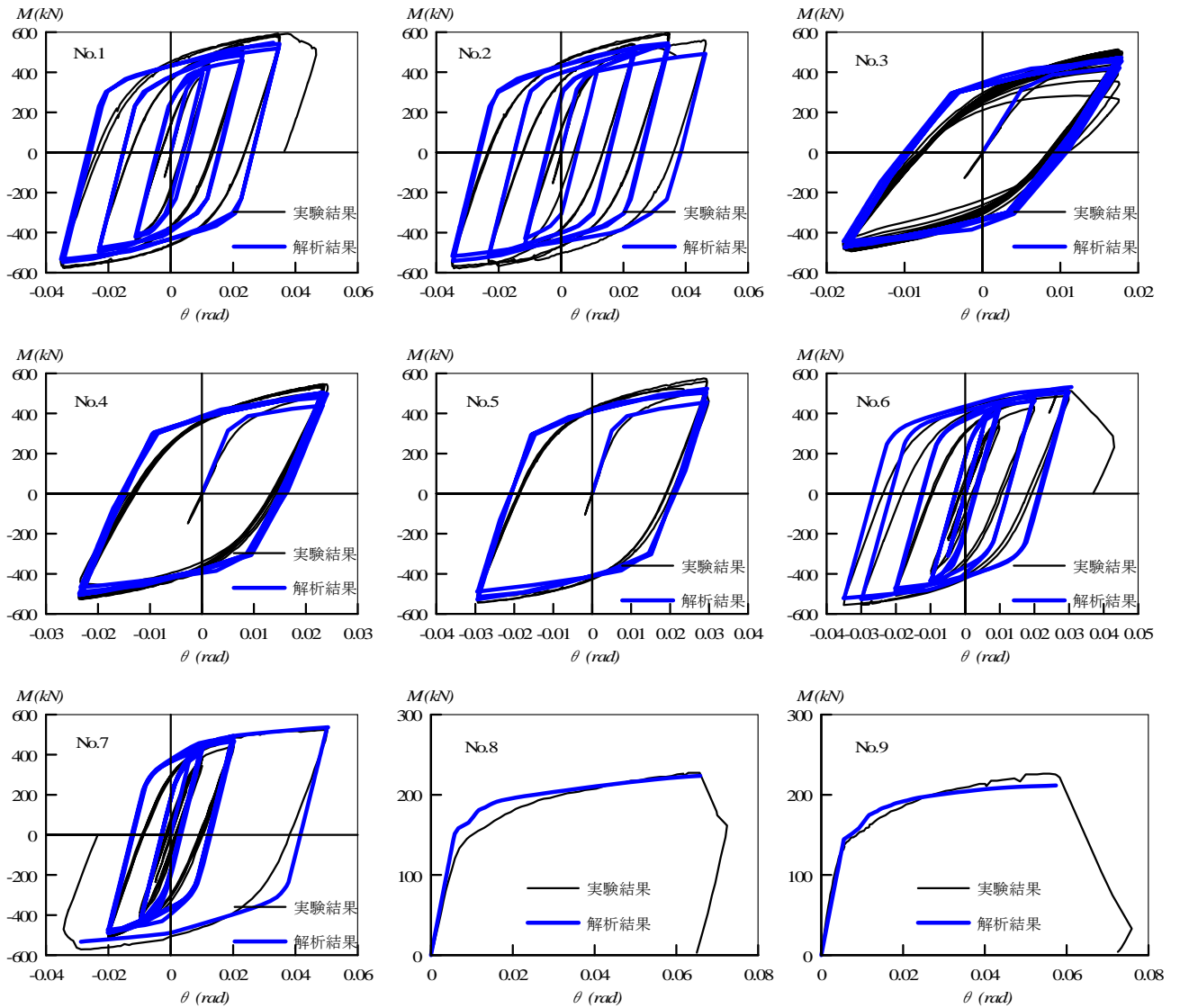


図3 実験結果と解析結果の比較1 荷重-変形関係の比較

図5には、各試験体の上下フランジにおける歪履歴の計測と解析結果を比較して示す。スカラップの無い部分にゲージを貼付したNo. 1~5では、実験値が解析値をやや上回り、スカラップのある部分にゲージを貼付したNo. 6~9では、実験値が解析値をやや下回る傾向が見られるが、全体的には解析値と実験値は概ね対応している。

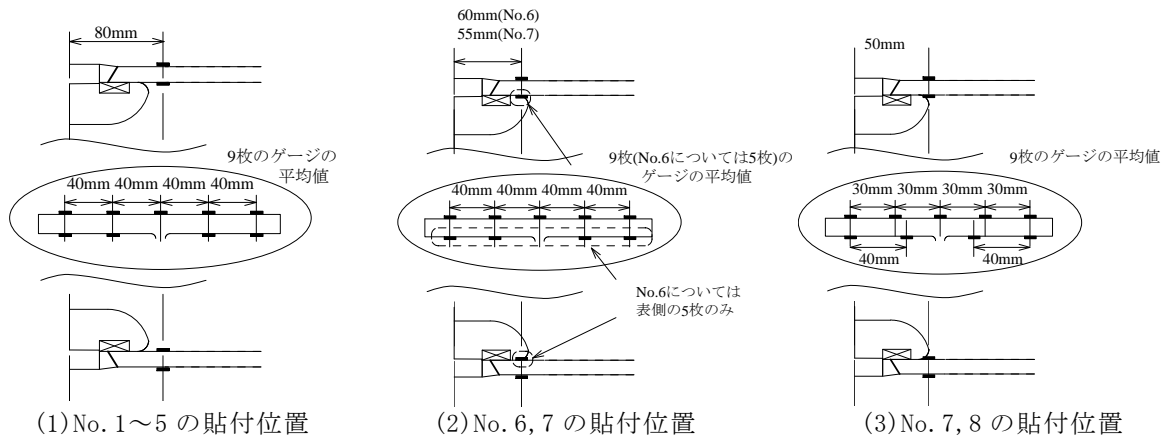


図4 梁端フランジへの塑性ゲージの貼付位置

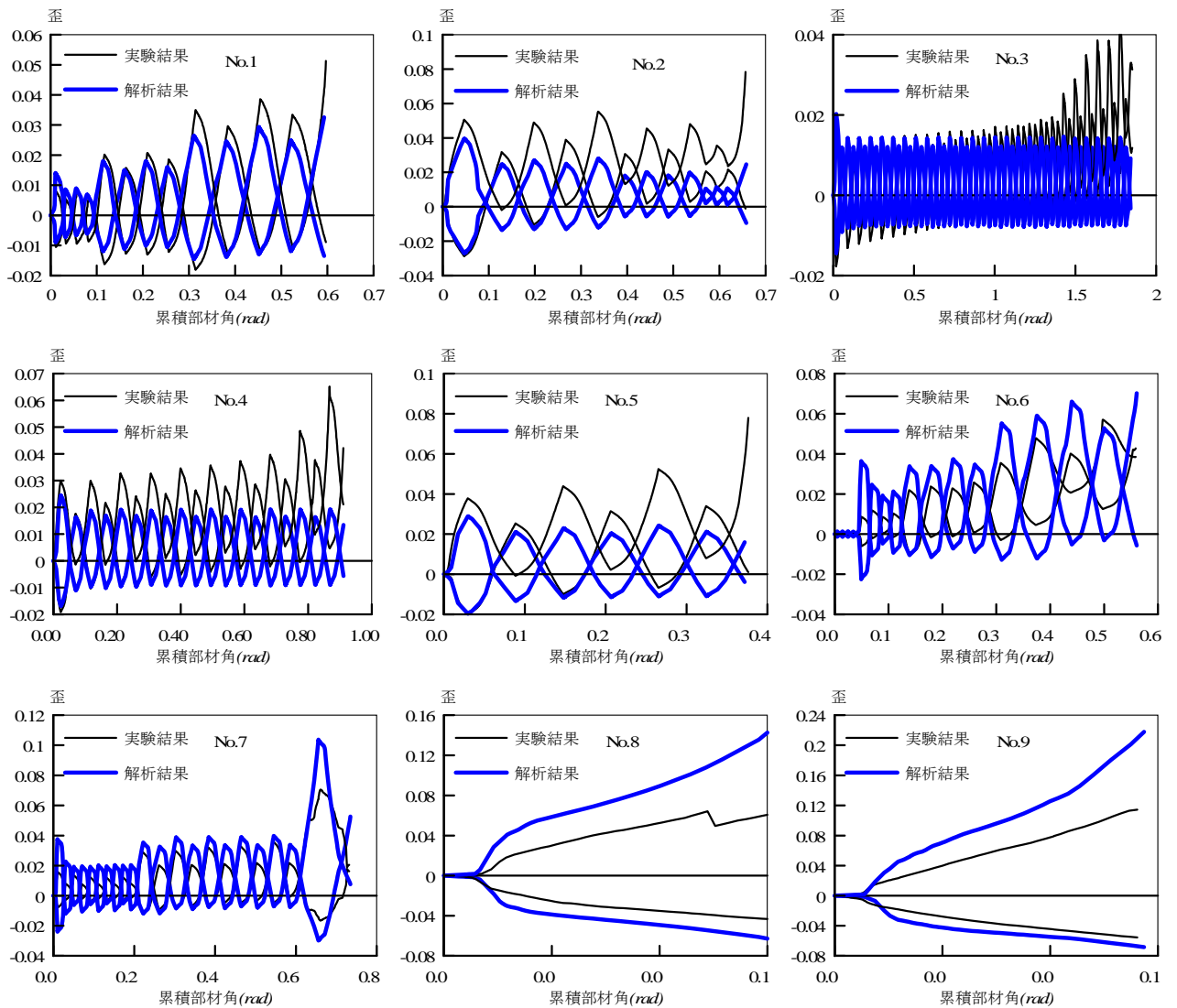


図5 実験結果と解析結果の比較2 歪履歴の比較

各試験体のスカラップ底位置の断面でのフランジ表面について、解析で得られた対数歪の履歴から引張側骨格曲線の累積塑性歪倍率と全累積塑性歪倍率を抽出し、 $n_s^+/n_0$ と $n_T/n_0$ の履歴として細破線で図6に示す。ここで、 $n_T$ は破断までの正側・負側それぞれの骨格曲線およびバウシンガー部での履歴塑性歪 $\epsilon_s^+$ 、 $\epsilon_s^-$ 、 $\epsilon_B^+$ 、 $\epsilon_B^-$ の総和を降伏歪 $\epsilon_y$ で除した値であり、 $n_0$ はフランジ材の素材試験結果における一様伸びまでの塑性歪を降伏歪 $\epsilon_y$ で除した値、 $n_s^+$ は破断までの正側の骨格曲線での履歴塑性歪 $\epsilon_s^+$ を降伏歪 $\epsilon_y$ で除した値であり、いずれも累積塑性歪倍率として表している。図中●は同じ荷重履歴のもとで実験において梁端部フランジが破断した点に対応する点である。梁端部フランジが破断に至る点での $n_s^+/n_0$ と $n_T/n_0$ の間には、荷重履歴によらず概ね式(2)で表すことができる関係が成り立っている。

$$\eta_T/\eta_0 = 7 \cdot (1 - \eta_s^+/\eta_0) - 0.5 \quad (2)$$

$$(0.22 \leq \eta_s^+/\eta_0 \leq 0.82)$$

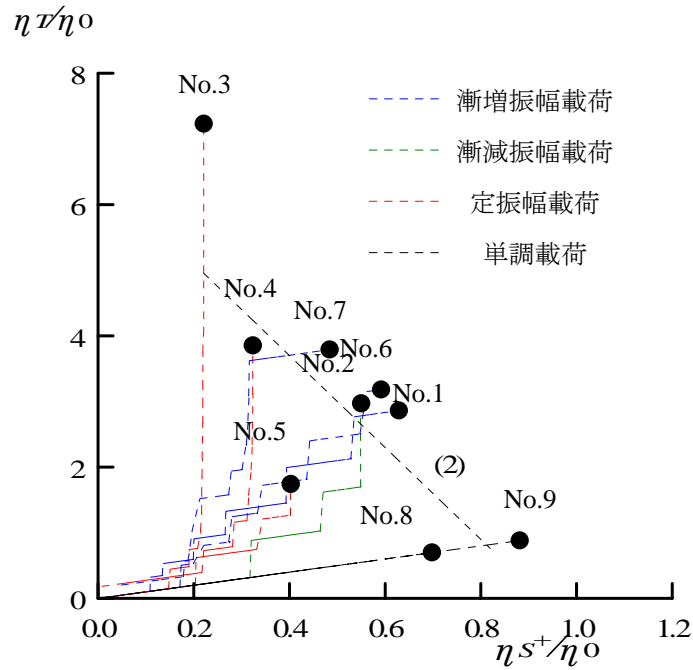


図6  $\eta s^+/\eta_0$ と $\eta r/\eta_0$ の関係

次に、地震荷重を受ける骨組の中では、どのような履歴を経て破断に至るかを検討するため、図7に示す4層の平面骨組の応答解析を行い、得られた部材端回転角を用いて部材解析を行った。解析モデルの柱は□-350×350×19(BCP 325)、梁はH500×200×10×16(SN400B)であり、柱脚と柱の剛性比は1.0と設定した。また、解析ではP-Δ効果を考慮している。解析のパラメータは入力波と入力レベルであり、兵庫県南部地震 神戸 NS波、十勝沖地震 八戸 EW波、東北地方太平洋沖地震 仙台 NS波にそれぞれ係数を掛けて入力し、解析の後半で梁が破断すると予測される程度を入力を行った。

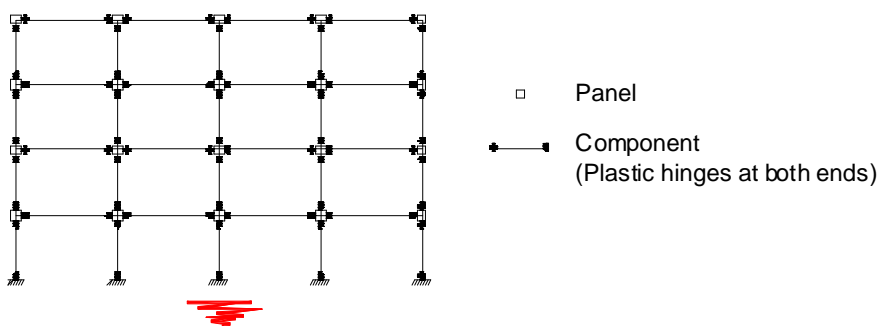


図7 解析モデル(平面骨組)

応答解析結果に基づく部材解析結果を図8に示す。図中には、一般的な梁の繰り返し载荷実験で行われている、同じ振幅で2回ずつ繰り返し载荷を行う漸増変位振幅载荷および定変位振幅载荷による実験結果も併せて示す。一般に行われている2回ずつ同じ振幅で繰り返し载荷を行う漸増変位振幅载荷は、応答解析結果の平均的な挙動を押さえているが、直下型の地震では一方向载荷に近い経路をたどり、長周期型の地震では定振幅载荷に近づく傾向がある。様々な入力特性を検討する上では、単調载荷および定振幅载荷も組み合わせて実験を行うことが望ましい。

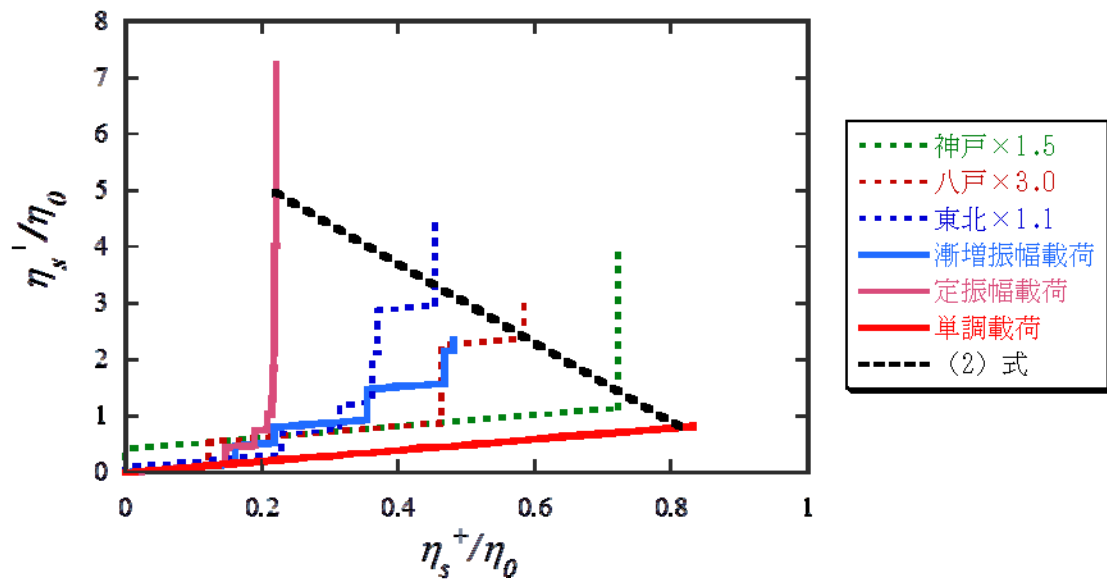


図8 応答解析に基づく部材解析における $\eta_s^+/\eta_0$ と $\eta_s^-/\eta_0$ の関係

- 4) 角野大介, 焦 瑜, 島田侑子, 吉敷祥一, 山田 哲: 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実験方法/その2 実験の結果と考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1分冊, pp. 567-570, 2008.9
- 5) 小林亜希: 繰り返し荷重を受ける鋼材の終局エネルギー吸収能力の評価, 平成17年度東京工業大学修士論文
- 6) 岡田 健, 松本由香, 山田 哲: H形鋼梁の変形能力に柱梁接合部における継手効率が及ぼす影響の評価, 日本建築学会構造系論文集 第568号, pp. 131-138, 2003.6

**( 発 表 論 文 )**

山田 哲, 焦 瑜, 吉敷 祥一: 任意の载荷履歴を受ける梁の延性破壊によって決まる塑性変形能力, 鋼構造年次論文報告集 第19巻, 2011年11月(投稿中)