

I-14

鋼管柱模型の弾塑性応答性状におよぼす加振履歴の影響

室蘭工業大学	フェロー	松岡健一
北海道開発局	正員	池田憲二
日本製鋼所	正員	小枝日出夫
室蘭工業大学	正員	小室雅人
室蘭工業大学	○学生員	渡部弘信

1. はじめに

平成7年1月の兵庫県南部地震では、これまで比較的靱性が高いと考えられていた鋼製橋脚においても多くの損傷が見られた。損傷の原因は、上部工の慣性力に起因する弾塑性座屈によるものと考えられている。このような座屈破壊に対する鋼製橋脚の耐震性を向上させるために、これら鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する実験的・解析的研究が各研究機関で精力的に行われている。一般的に動的載荷実験において、振動台を用いる応答実験¹⁾の場合には実験装置が大がかりになることや多大な実験費用を要することより、擬似的な応答実験であるハイブリッド地震応答実験²⁾が行われることが多い。一方、鋼製橋脚の断面形状に着目すると、円形断面橋脚は矩形断面橋脚に比べて単位重量当たりの強度が大きいことより、力学的に有利であると考えられる。しかしながら、この種の円形断面橋脚（以下、鋼管橋脚）に関する研究報告は比較的少ないのが現状である。

このような観点から、本研究では鋼管橋脚の耐震設計に必要な基礎データを得ることを目的として、簡易振動台を用いた鋼管橋脚模型の基部加振実験を行った。なお、本研究では、鋼管橋脚の動的応答性状におよぼす入力加速度および加振周波数の影響に関して検討を行った。また、過去に実施した繰り返し加振実験結果³⁾との比較により加振履歴の影響に関しても検討している。

2. 実験概要

2.1. 試験体

本研究では、入力加速度および加振周波数が異なる場合の鋼管橋脚模型の動的応答性状について検討するため、試験体は全て同一形状のものを使用した。図-1に試験体の形状および寸法を、表-1にその寸法および各パラメータを示す。表中の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ 、径厚比パラメータ R_t はそれぞれ以下の(1)、(2)式によって定義される。

$$\bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{ys}}{E_s}}, \quad R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_{ys}}{E_s} \sqrt{3(1-\nu_s^2)} \quad (1), (2)$$

ここで、 L ：荷重点高さ、 r ：断面二次半径、 E_s ：弾性係数、 σ_{ys} ：降伏応力、 R ：平均半径、 t ：板厚、 ν_s ：ポアソン比である。試験体の鋼管部は、厚さ 5.7 mm の圧力配管用炭素鋼管(JIS G3454 STGP370 90A 熱間仕上継目無鋼管)を所定の長さに切断し、施盤により内外面を切削して製作した。なお、製作精度を保つために、試験体は2本の鋼管を突合わせ溶接して所定の長さとしている。板厚および径の加工公差は ± 0.05 mm である。また基部は剛体変形をできるだけ防ぐため、図-1に示すように凸状の台座に鋼管を差し込み、外側に板厚 9 mm の鋼製リングをはめ込むことにより固定している。試験体の上端部には橋梁部工の質量を模擬した鉛塊を固定するため、幅 200 mm、板厚 25 mm の正方形板を周溶接する

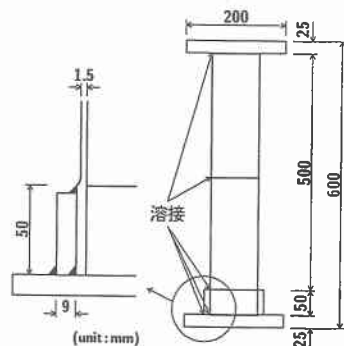


図-1 試験体の形状および寸法

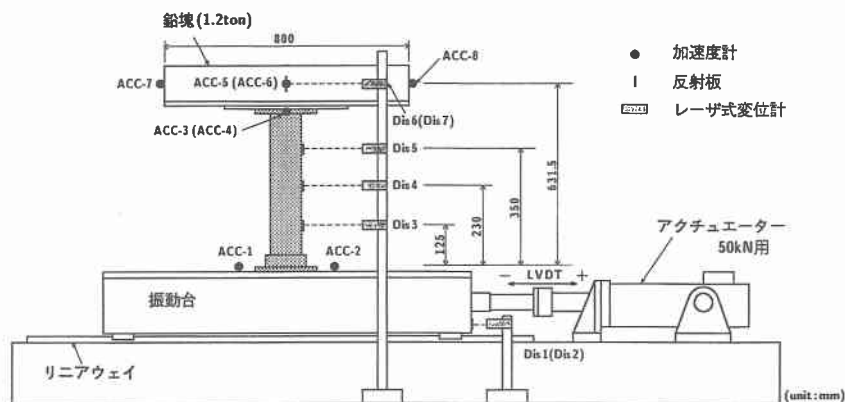
表－１ 試験体寸法および試験体パラメータ

荷重点* 高さ L (mm)	鋼管 高さ L' (mm)	半径 R (mm)	板厚 t (mm)	細長比 パラメータ λ	径厚比 パラメータ R_t
631.5	500	48.0	1.5	0.479	0.086

表－２ 引張試験結果

降伏応力 σ_{ys} (MPa)	引張強さ σ_u (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
336	452	206	0.3

* 荷重点高さは、試験体基部から鉛塊重心位置高さである



図－２ 実験装置の概要

ことにより取り付けている。また、試験体の機械的性質を調べるために、鋼管から JIS 6 号試験片を製作して引張試験を行った。表－２にはこの引張試験結果を示している。

2.2. 実験装置および実験方法

図－２に簡易振動台を用いた実験装置の概要を示す。簡易振動台は 2 本のリニアウェイ上に設置しており、ボールジョイントを介して最大荷重 50 kN、油圧源吐出量 31.7 l/min のアクチュエーターに接続されている。本アクチュエーターは加振振幅の能力が 0.5 Hz 以下に対して 50 mm、1 Hz で 40 mm、15 Hz で 2 mm と折線状に変化するものである。試験体上部には橋梁上部工の質量を模擬した全質量 1.2 ton の鉛塊 (800×800×185 mm) を設置し加振実験を行った。本実験では、鋼管橋脚模型の動的挙動特性を把握するために、歪ゲージ式加速度計 (容量 2 G) を振動台、試験体頂部、鉛塊重心位置高さの加振方向およびその鉛直方向の計 8 ヶ所、またレーザ式変位計を振動台、試験体、鉛塊の高さ重心位置の計 7 ヶ所に設置した。計測は全てデジタルレコーダにより一括収録している。なお、サンプリング周波数は 1 kHz である。

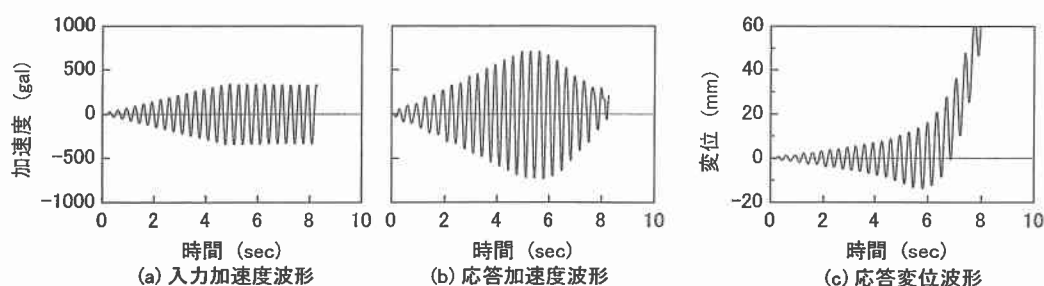
実験は、1) アクチュエーターをシャットダウンさせることにより試験体に自由振動状態を励起させ、最低次固有振動数および減衰定数を求める実験、2) 所定の入力加速度および加振周波数を設定して行う加振実験の 2 種類について行った。過去に実施した同一試験体による入力加速度を段階的に増加させた加振実験 (以下、繰り返し加振実験) では加振開始からシャットダウンまで約 8 秒と設定しているが、本研究では加振時間を繰り返し加振実験の 1.5 倍である 12 秒とした。

表－３に加振実験の条件および固有振動数、入力加速度、破壊形式の一覧を示す。表中には、過去に実施した繰り返し加振実験結果も併せて示している。なお、試験体の名称は第 1 項が加振周波数 (Hz)、第 2 項が加振方法 (I: 繰り返し加振, S: 単一加振) である。単一加振実験における設定入力加速度は、繰り返し加振実験結果をもとに試験体の基部近傍が降伏 (f2.5-I) あるいは倒壊 (f3.0-I, f5.0-I) した加速度と同一とした。その他の実験ケース (f4.0-I, f7.0-I) は、別途実施した単調載荷実験結果³⁾と 1 自由度系モデルによる加速度応答倍率を参考に、最大水平耐力 H_u 相当の慣性力が試験体上部に作用するように入力加速度を設定した。

表－3 加振実験の条件および固有振動数、入力加速度、破壊形式の一覧

試験体名	加振方法	最低次固有振動数 (Hz)	入力加速度 (gal)	実験終了後における破壊形式	座屈高さ (mm)
f2.5-S	単一加振	4.13	375	B側基部に残留歪発生	-
f3.0-S		4.16	375	BにのみEFBが発生 B側に倒壊	15
f4.0-S		4.13	250	A側にのみEFBが発生	100
f5.0-S		4.16	750	A側に局部座屈発生 B側に局部座屈発生	100 40
f7.0-S		4.09	1125	A側基部に残留歪発生	-
f2.5-I	繰り返し加振	4.08	125,250,375	A側基部に残留歪発生	-
f3.0-I		4.17	125,250,375	A側にのみEFBが発生 A側に倒壊	10
f5.0-I		4.09	125,250,375,500,625,750	A側にのみEFBが発生 A側に倒壊	15

A側：アクチュエーター側，B側：反アクチュエーター側，EFB＝Elephant Foot Bulge



図－3 加速度波形および応答変位波形の一例 (f3.0-S, $f_i = 3$ Hz, $\alpha_i = 357$ gal)

3. 実験結果

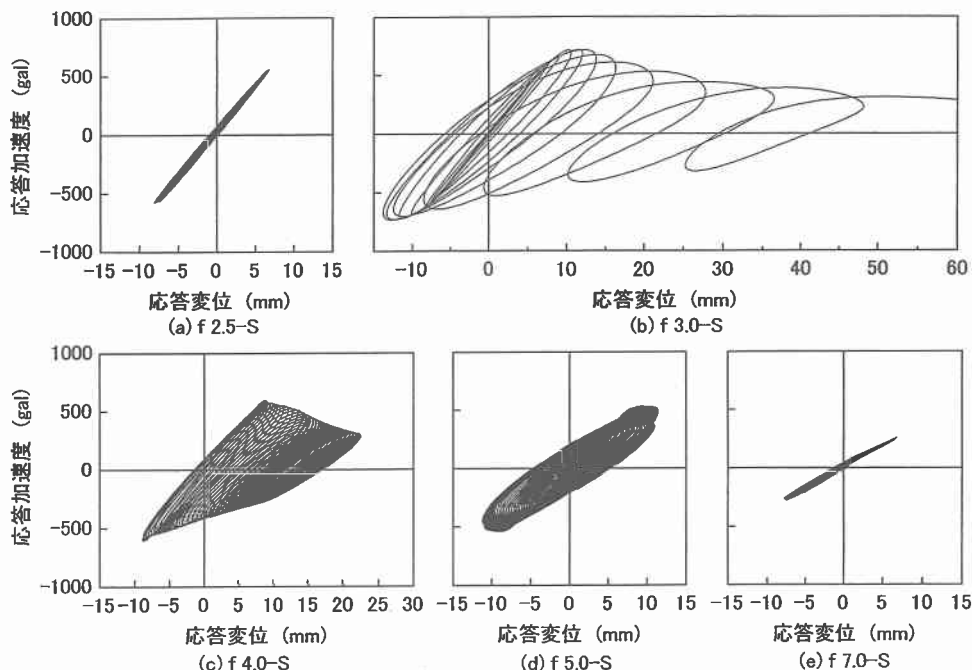
3.1. 最低次弾性固有振動数

表－3に実験から得られた最低次弾性固有振動数を示す。表より，最低次固有振動数は 4.1 ～ 4.2 Hz であることがわかる。また，減衰定数は，2.7 ～ 3.6 % 程度であった。

3.2. 応答加速度および応答変位

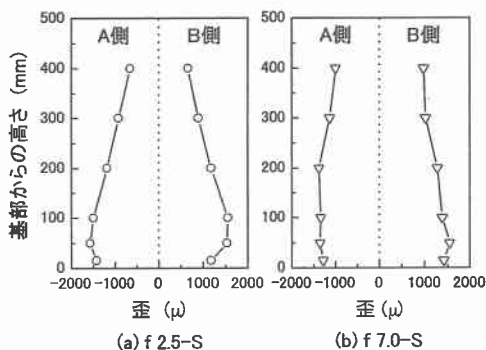
図－3には入力加速度波形および応答波形の一例として，試験体 f3.0-S に関する振動台の入力加速度波形，鉛塊重心位置の応答加速度波形および応答変位波形を示している。全実験データは，高周波成分を除去するため加振周波数の 2.5 倍でローパスフィルター処理を行っている。(a)図より，入力加速度波形は加振開始後ほぼ線形に増幅し，5 秒程度で所定の振幅となり定期的に振動していることがわかる。なお，本試験体は加振開始から 8 秒付近で倒壊したため，図には倒壊前までの波形を示している。一方，(b)図より鉛塊重心位置の応答加速度波形は，定常加振状態に至らず振幅が最大値に達した後，徐々に減少していることがわかる。これは，基部近傍に発生した局部座屈によって加振エネルギーが吸収され，試験体上方に伝達されないためと考えられる。また，(c)図の応答変位波形において，鉛塊振幅の中心が一方方向に移動しながら振動していることより，試験体が倒壊していく状況がわかる。

図－4には，鉛塊重心位置の応答加速度－応答変位に関するヒステリシスループを示している。(a)図より試験体 f2.5-S の，ヒステリシスループは弾性的な性状を呈していることがわかる。実験時には試験体基部に残留歪の発生が確認されているが，部材全体としては未だ大きな損傷を受けていないものと推察される。一方，(b)図に示す試験体 f3.0-S の場合には，加振開始後間もなく振動の中心が一方方向に移動しながら振動していることがわかる。また，(c)図より共振周波数に近い 4.0 Hz で加振した試験体 f4.0-S の場合は，加振直後は試験体 f2.5-S と同様な弾性応答性状を示しているが，その後振動の中心が移動しループ面積が増大してい



図－４ 鉛塊重心位置における応答加速度－応答変位履歴曲線（単一加振）

ることがわかる。これより、試験体に局部座屈が発生しているものと推察される。なお、試験体は倒壊に至らず、鉛塊重心位置で約 17 mm の残留変位を生じている。試験体 f5.0-S の場合（(d)図）は、試験体 f4.0-S と同様にループを形成しているものの、振動の中心はほとんど移動せず、振幅のみが増大している。（e）図の最も高い周波数で加振した f7.0-S は、（a）図の試験体 f2.5-S と同様に弾性的な応答性状を呈しているが、初期勾配は他の 4 ケースと比較して小さく示されていることがわかる。この現象を考察するため、図－５に弾性状態における試験体高さ方向の軸歪分布を示す。（a）図より、試験体 f2.5-S の場合には、基部近傍の歪が最も大きく、高さ方向に行くにつれて歪が減少する紡錘型分布で片持ち梁の曲げ歪に近い分布性状を示している。一方、（b）図に示すように、試験体 f7.0-S の場合には、軸歪が高さ方向にほぼ一様に分布しており、試験体全体が等曲げ荷重を受けている状態に類似している。これより、f2.5 の場合には最低次の曲げモードが励起されているのに対して、f7.0 の場合には鉛塊のロッキング振動により鋼管に等曲げモードの振動が励起されたものと推察される。

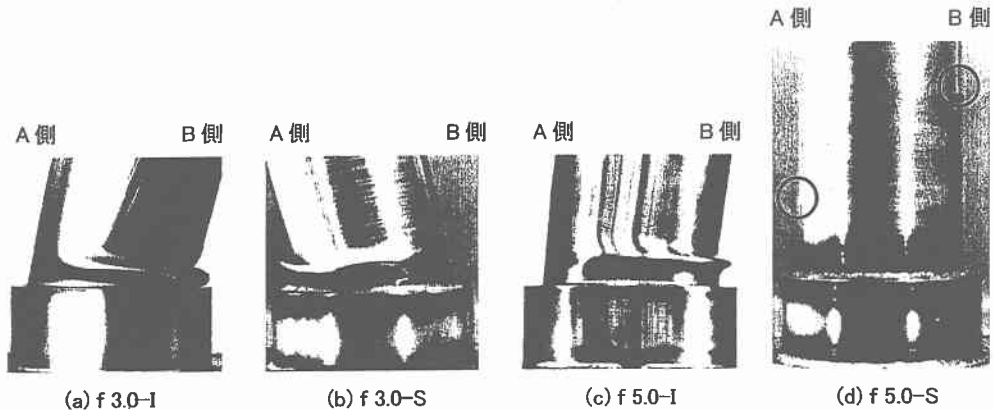


図－５ 試験体高さ方向の軸歪分布（弾性状態時）

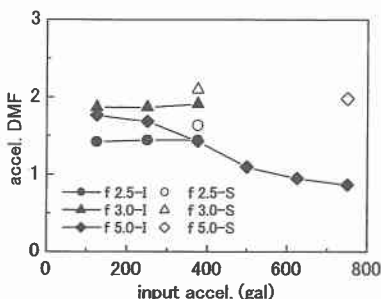
ために、図－５に弾性状態における試験体高さ方向の軸歪分布を示す。（a）図より、試験体 f2.5-S の場合には、基部近傍の歪が最も大きく、高さ方向に行くにつれて歪が減少する紡錘型分布で片持ち梁の曲げ歪に近い分布性状を示している。一方、（b）図に示すように、試験体 f7.0-S の場合には、軸歪が高さ方向にほぼ一様に分布しており、試験体全体が等曲げ荷重を受けている状態に類似している。これより、f2.5 の場合には最低次の曲げモードが励起されているのに対して、f7.0 の場合には鉛塊のロッキング振動により鋼管に等曲げモードの振動が励起されたものと推察される。

3.3. 局部座屈発生状況

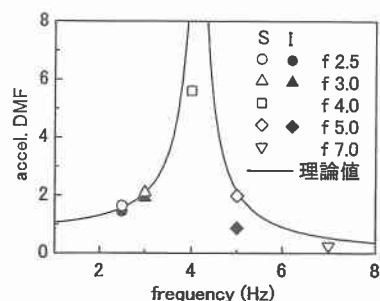
図－６には、実験終了後における試験体基部近傍の局部座屈発生状況を示している。（a）、（c）図に示す繰り返し加振実験に関して比較すると、試験体 f3.0-I および f5.0-I はそれぞれ A 側の基部近傍に EFB（Elephant Foot Bulge）型の局部座屈が発生して倒壊していることがわかる。また、（b）、（d）図に示す単一加振実験に関して比較すると、試験体 f3.0-S では EFB が B 側の基部近傍に発生して倒壊している。一方、試験体 f5.0-S は A 側の基部より上方 100 mm 付近および B 側の基部より上方 40 mm 付近でそれぞれ局部



図－6 実験終了後における鋼管基部近傍の局部座屈発生状況



図－7 加速度応答倍率



図－8 加速度応答倍率と理論応答倍率の比較

座屈が発生していることがわかる。また、繰り返し加振実験と単一加振実験の局部座屈形状を比較すると、試験体 f3.0-I および f3.0-S の場合には、倒壊方向は異なるものの、座屈形状、座屈高さともに両者でほぼ一致していることがわかる。また、試験体 f5.0-I および f5.0-S の場合は、試験体 f5.0-S では2箇所の異なる位置で局部座屈が発生しているのに対し、試験体 f5.0-I ではEFBが発生し倒壊に至っている。これは、試験体 f5.0-I において6回におよぶ繰り返し加振により徐々に塑性化が進行したためと考えられる。

3.4. 加速度応答倍率

図－7に、単一および繰り返し加振実験における入力加速度と加速度応答倍率の関係を示している。図より、繰り返し加振実験における弾性域 ($\alpha = 125$ gal) での応答倍率は、単一加振実験結果とほぼ一致していることがわかる。しかしながら、試験体 f5.0-I では、入力加速度の増加とともに応答倍率が低下している。これは、繰り返し加振の場合は加振履歴の影響により試験体の塑性化が進行しているためと考えられる。

図－8に、全試験体について加速度応答倍率と加振周波数の関係を理論応答倍率と比較して示している。なお、ここでは1自由度系モデルを仮定し、以下の(3)式により理論応答倍率を求めている。

$$La = \sqrt{\frac{1+4h^2(\omega/n)^2}{\{1-(\omega/n)^2\}^2+4h^2(\omega/n)^2}} \quad (3)$$

ここで、 La : 加速度理論応答倍率、 h : 減衰定数、 ω : 加振周波数、 n : 固有振動数である。なお、ここでの減衰定数 h および固有振動数 n は実験結果に基づき、 $h = 3.6\%$ 、 $n = 4.1$ Hz と仮定した。また、繰り返し加振実験に関しては、最大入力加速度時における加速度応答倍率を用いている。図より、単一加振実験の加速度応答倍率と理論応答倍率を比較すると、試験体 f2.5-S および f3.0-S の加速度応答倍率は理論応答倍率とほぼ一致していることがわかる。一方、試験体 f4.0-S および f7.0-S では、応答倍率が理論値の $1/2$

程度に低下している。また、試験体 f5.0-S の場合にも若干の低下が見られる。次に、単一加振実験と繰り返し加振実験を比較すると、試験体 f2.5, f3.0 ではほぼ同程度の応答倍率を示している。一方、加振周波数が 5 Hz の場合には、単一加振実験の 1/2 程度まで低下している。これは、加振履歴により塑性化が進行したためと推察される。

3.5. 基部加振実験と静的載荷実験結果の比較

図-9 に、各試験体の最大応答加速度に鉛塊質量を乗じて得られる慣性力（換算水平荷重 H ）と応答変位 δ の関係をそれぞれ降伏水平荷重 H_y および降伏水平変位 δ_{yE} で無次元化したものを示す。ここで、 H_y は弾性梁理論に基づき、基部最外縁が降伏するときの水平荷重、 δ_y は別途実施した静的載荷実験結果から得られた H_y 時における変位量である。なお、図中には、同一試験体における静的単調および繰り返し載荷実験結果も併せて示している。

図より、単一加振実験と繰り返し加振実験における最大入力加速度時に着目して比較すると、入力加速度が等しい場合には、加振履歴の影響により繰り返し加振実験における水平荷重 H/H_y は、単一加振実験より低下することがわかる。一方、その時の応答変位に関しては単一加振実験の方が小さい。

次に、基部加振実験と静的載荷実験結果について比較・検討を行う。試験体の固有振動数である 4.1 ～ 4.2 Hz より低い周波数で加振した場合には、試験体 f3.0-I, f3.0-S, f4.0-S における最大水平荷重は静的載荷実験結果のそれに比べて増大する傾向にあることがわかる。また、試験体 f2.5-I および f2.5-S の場合には、静的最大耐力とほぼ同程度の値を示している。しかしながら、塑性化がそれほど進行しておらず、繰り返し加振実験において入力加速度を更に漸増させた実験を行った場合には、水平荷重は静的載荷実験よりも増大するものと推察される。一方、固有振動数より高い周波数で加振した試験体 f5.0-I, f5.0-S, f7.0-S では、水平荷重が静的載荷実験に比べて低下している。特にその傾向が著しい試験体 f7.0-S の場合には、先にも述べたように他の試験体と振動モードが異なることに起因しているものと判断される。

4. まとめ

本研究では、鋼管橋脚の耐震設計に必要な基礎データを得ることを目的として、小型鋼管橋脚模型を用いた加振実験を行い、入力加速度、加振周波数、および加振加速度の負荷履歴が動的応答性状におよぼす影響について比較・検討を行った。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると以下ようになる。

- 1) 単一加振と繰り返し加振実験における局部座屈の発生箇所およびその形態は必ずしも一致しない。
- 2) 加振周波数が固有振動数以下の場合、単一加振実験より得られる加速度応答倍率は理論応答倍率とほぼ一致する。
- 3) 加振周波数、入力加速度が等しい実験条件の場合には、繰り返し加振実験では単一加振実験に比べ加振履歴の影響により換算水平荷重は低下する。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 佐藤昌志, 小枝日出夫, 小室雅人, 小野信市: 正弦波加振を受けるコンクリート充填鋼管柱模型の弾塑性応答性状, 第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 土木学会, 185-192, 1998.11
- 2) 宇佐美勉, 才塚邦宏, 木曾英哉, 伊藤義人: ハイブリッド地震応答実験による鋼製橋脚の強震時挙動, 土木学会論文集, No.519/I-32, pp.101-1113, 1995
- 3) 小枝日出夫, 岸 徳光, 佐藤昌志, 小室雅人: 軸力と交番曲げを受ける円形鋼管柱の弾塑性挙動, 応用力学論文集, Vol.1, pp.1-10, 1998

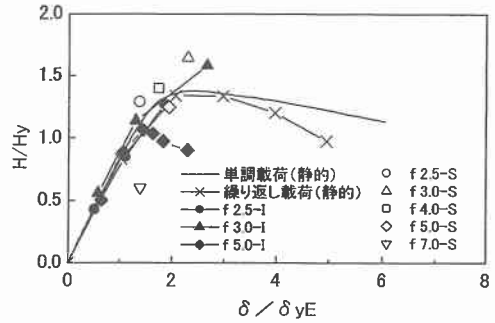


図-9 換算水平荷重と応答変位の関係