

衝撃的突き上げを受ける変断面鋼管短柱のシミュレーション解析

SIMULATION ANALYSIS OF STEEL TUBULAR STUB COLUMN SUBJECTED TO IMPULSIVE LOADS BY PUSH-UP MOTION

森 雅美*・石川信隆**・香月 智***

Masami MORI, Nobutaka ISHIKAWA and Satoshi KATSUKI

*防衛大学校講師 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

**工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

***工博 防衛大学校助教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

キーワード：衝撃突き上げ実験，変断面鋼管短柱，局部座屈，非線形動的解析

(push-up impact test, steel tubular stub column with nonuniform thickness, local buckling, nonlinear dynamic analysis)

1. 緒 言

先の兵庫県南部地震の被害形態には，衝撃的上下動地震動について検討すべき破壊形態や意見が多く見られた^{1)~4)}．これを踏まえて，地震動自体の観測の再検討^{5),6)} やRC橋脚柱の輪切り状ひび割れ破壊を対象とした研究^{7)~10)}，および衝撃的上下動による鋼管橋脚柱の軸対称局部座屈現象に関する研究^{11)~13)} も行われてきた．一方，この鋼管橋脚柱の軸対称局部座屈現象については，従来の水平地震動によって説明が可能とする研究も多く行われ¹⁴⁾，水平力による交番曲げにより局部座屈現象を再現できることから，水平地震動の方が主たる支配要因と考えられるようになっている¹⁵⁾．しかし，最近の鳥取県西部地震(2000.10.6)では1gを超える上下動の観測値が残されていたことが報告される¹⁶⁾ など，新しい知見も得られ，上下地震動の影響を必ずしも無視できない情報も得られてきた．

著者ら^{17),18)} は，衝撃的上下動による鋼管橋脚の軸対称局部座屈の可能性の検討も必要との観点から，変断面鋼管短柱の衝撃突き上げ実験を行い，断面変化部直上での軸対称局部座屈波形を再現し得ている．本研究は，非線形動的有限要素法を用いて，変断面鋼管短柱の衝撃突き上げ実験結果のシミュレーション解析を試みたものである．

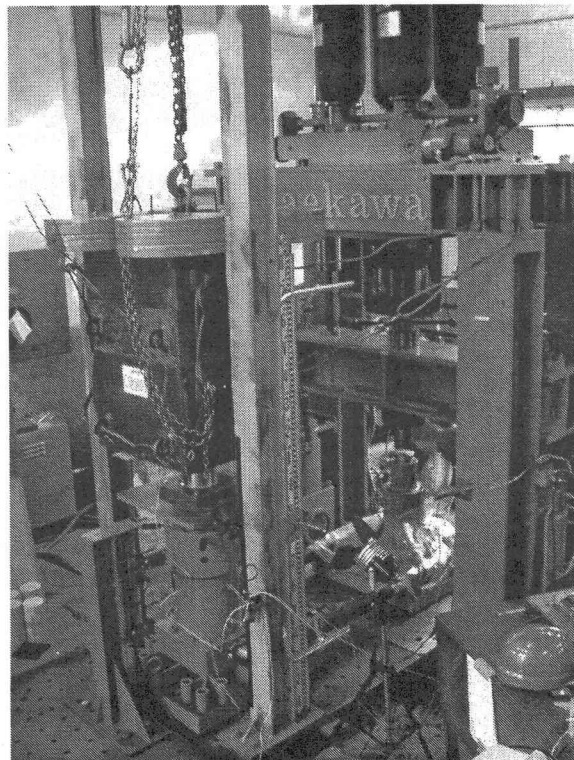


写真-1 衝撃突き上げ実験装置の概要

2. 衝撃突き上げ実験の概要

2.1 実験装置

写真-1 および図-1 に衝撃突き上げ実験装置^{7),9)} の概要を示す．この装置は，高速変形負荷装置に図-1 の突き上げ装置を併用して，鉛直下方向から供試体を強制変位させることにより衝撃的上下動を模擬するものである．この最大突き上げ速度は約1.4m/s，最大突き上げ強制変位量は50mmである．

2.2 供試体

供試体は，被災鋼製円筒橋脚 P-584 海側¹⁹⁾ を参考にして作製した図-2 に示す縮尺約1/16 の中央部に断面変化部を有する変断面鋼管短柱である．管種は，JIS G 3454 の STPG 370-SH125A SCH20 の圧力配管用炭素鋼鋼管(外径139.8mmの熱間仕上継目無鋼管)であり，内面と外面を機械切削によって減厚した．寸法・諸元は，外径 $D=138.4\text{mm}$ ，全長 $l=126\text{mm}$ ($l/D=0.91$)，上側断面の管厚 $t_1=1.6\text{mm}$ ($D/t_1=86.5$)，下側断面の管厚 $t_2=2.1\text{mm}$ ($D/t_2=65.9$ ， $t_2/t_1=1.31$) である．

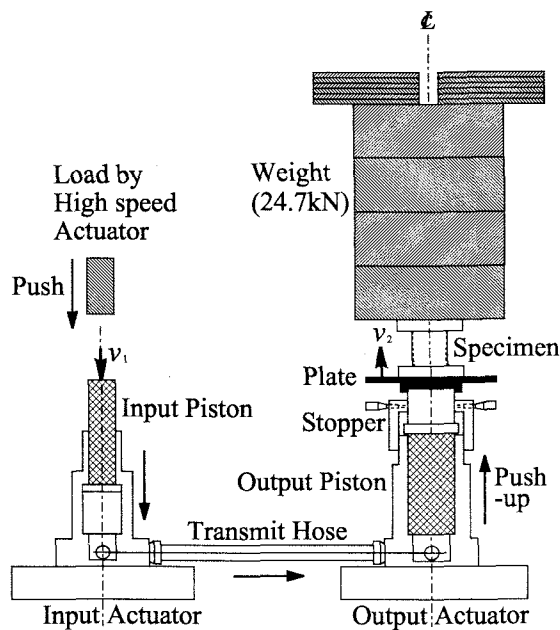


図-1 突き上げ装置

鋼管には、両端縁を完全固定とするために上下の板厚42mmの鋼板を接合している。鋼管と鋼板の接合にあたっては、溶接接合では鋼管の溶接部に残留応力が生じ局部座屈波形の発生部位等への影響が懸念されるため、両鋼板に切削加工した円環状の溝（幅：10mm、深さ：3mm）にエポキシ系接着材を充填して鋼管に固着し、鋼管と両鋼板を一体化した。

この供試体は、M10 ボルトにより下部鋼板を突き上げ板に固定している。上部鋼板には上部工を模擬して、図-1 に示す重錘（合計重量：約24.7kN）を上載した。後述の表-1 の鋼管の降伏応力から算定した軸力比 (P/P_y) は約0.13 である。重錘と上部鋼板とは、重心を一致させるためのガイドボルトを通してているが、実験装置の破損防止のためナットでの締め付けは行わず、固定軸力の働かない切断状態とした。表-1 に材料諸元を示す。表中、鋼管の材料定数は引張試験より求め、エポキシ系接着剤の材料定数は文献²⁰⁾ を参考にした。

2.3 計測項目

図-3 に示すように、加速度を下部鋼板 (a_l)、上部鋼板 (a_u) と重錘 (a_w) に取り付け加速度計により、また外部不動点から張り出されたレーザー式変位計により下部鋼板 (u_l) と重錘 (u_u) の変位を計測した。供試体の表面の軸ひずみは、同図に示す位置に貼付したひずみゲージ (G1~G6) により計測した。これらのデータは、A/D コンバーターで $1\mu s$ 間隔にデジタル化して保存した。以上の数値データの計測と並行して、撮影時間 $1/4,500$ 秒の高速ビデオを用いた局部座屈発生過程の記録撮影を行った。

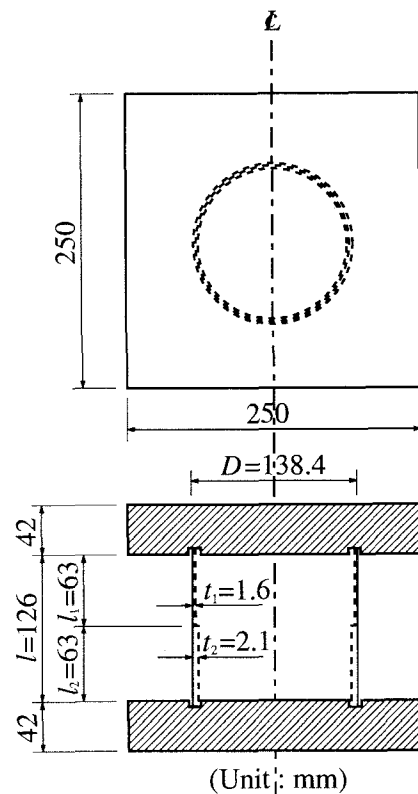


図-2 供試体の形状・寸法

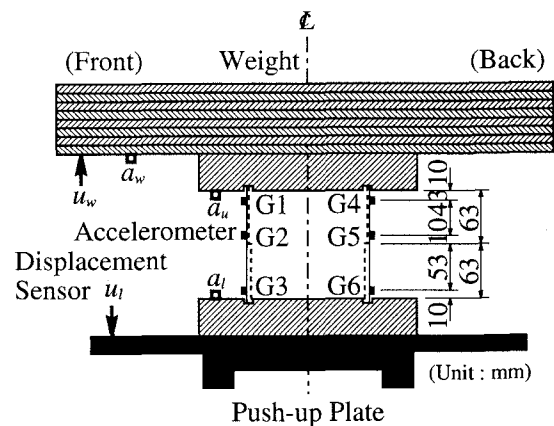


図-3 計測項目

2.4 実験ケース

衝撃突き上げ実験での実験パラメータは、突き上げ速度（入力速度）と突き上げ強制変位量である。実験は、静的局部座屈荷重の値を超えるような突き上げ速度 v (m/s) と突き上げ強制変位量 u (mm) の組み合わせを考え、表-2 に示すような計13ケースを行った。

2.5 局部座屈モード

今回の実験では図-4 に示す4通りの局部座屈モードが見られた。局部座屈モードの分類を表-2 の括弧内

表-1 材料諸元

	Pipe	Plate	Weight	Adhesive
Material	STPG370	SS400	SS400	Epoxy
Young's Modulus E (GPa)	206	206	206	21.5
Poisson' Ratio ν	0.3	0.3	0.3	0.3
Yield Stress σ_y (MPa)	307	235	235	29.4
Tangent Modulus E_t (MPa)	2059	2059	2059	215
Density ρ (kg/m ³)	7850	7850	7850	1900

表-2 実験ケースと実験結果（局部座屈モード）

u (mm) v (m/s)	2.5	5	10	20
0.8 (Medium Speed)			M10-1(D)	M20-1(D)
1.0 (Low-High Speed)		LH5-1(B)	LH10-1(-) LH10-2(-)	
1.2 (Med.-High Speed)		MH5-1(B)	MH10-1(C) MH10-2(C)	
1.4 (High Speed)	H2.5-1(A)	H5-1(B) H5-2(B)	H10-1(C) H10-2(C)	

[註] 括弧内の英字は、図-4 に示す局部座屈モードを示し、- は実験不良を示す。

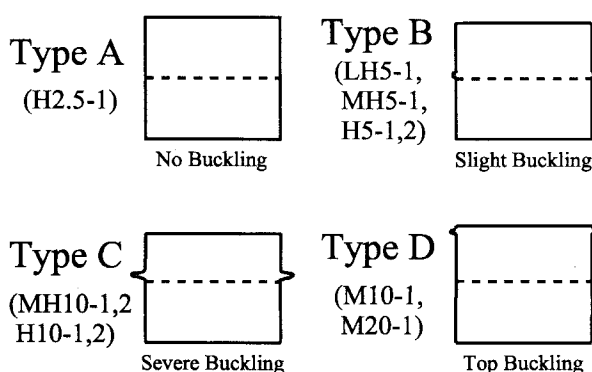


図-4 局部座屈モード

の英字で示す。

Type A は局部座屈がいずれの箇所にも発生しなかったモード、Type B は断面変化部直上にやや薄っすらと環状の軸対称局部座屈が発生したモード、Type C は断面変化部直上に極めて明瞭に大きな環状の軸対称局部座屈が発生したモード、また Type D は断面変化部直上ではなく鋼管短柱の上端部で発生した局部座屈モードで、これは突き上げ時（加速領域）ではなく突き上げ後（停止領域）の重錘の落下・衝突によって発生したものであることを高速ビデオの観測結果から確認している。

2.6 入力および応答特性

ここでは実験結果の一例として、断面変化部直上にやや薄っすらと環状の軸対称局部座屈が発生した Type B の H5-1（高速，5mm，1本目）を取り上げ、衝撃突き上げ時の入力特性と応答特性について検討する。

図-5(a)～(d) は、それぞれ下部鋼板の入力加速度 a_l ，上部鋼板の応答加速度 a_u ，下部鋼板の入力速度 v_l と上部鋼板の応答速度 v_u の時刻歴を示す。入力速度 v_l と応答速度 v_u は、それぞれ入力加速度 a_l と応答加速度 a_u の時間積分より求めている。

入力加速度（図-5(a)）は、約6.9msまでの最大値約145gの不規則な振動を繰り返す波形の領域とそれ以降の230gを越える高周波成分を多く含む波形の領域とに大別される。前者は油圧により突き上げ板が突き上げられて上昇を続ける加速領域、後者は突き上げ板がストッパーにより強制的に急停止された後の停止領域である。入力速度（図-5(c)）は、約6.9msまでの加速領域ではほぼ直線的に増大して約1.2m/sの最大値に達し、それ以降の停止領域では急減している。応答加速度（図-5(b)）の最大値は、加速領域では約34g、停止領域では約59g、応答速度（図-5(d)）の最大値は、加速領域内の約6.7msで約0.48m/sとなり、入力値の最大値に比しそれぞれ約23～25%と約40%に低減している。このように加速度と速度の応答値が低減する理由は、本実験ケースで発生した局部座屈波形の形成に突き上げの入力エネルギーが吸収されたためと考えられる。

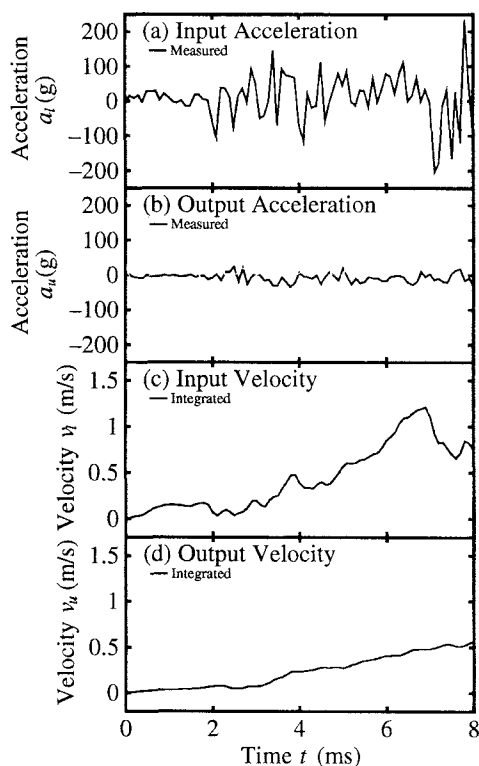


図-5 Type B (H5-1) の入力と応答特性の時刻歴

3. 衝撃突き上げ実験のシミュレーション解析

数値解析には汎用非線形構造解析プログラム MARC Ver.K7.2²¹⁾ を用い、変断面鋼管短柱の非弾性局部座屈挙動を考慮した複合非線形動的解析を行った。

3.1 解析モデル

幾何形状と荷重条件の対称性から、供試体と重錘の手前の1/2を解析対象とした。図-6に示すように、変断面鋼管短柱の管壁の中立軸位置に4節点 Shell 要素、上・下鋼板、重錘とエポキシ系接着材に8節点 Solid 要素、切断状態にある上部鋼板と重錘の間に4節点 Gap/Friction 要素を配置した3次元の要素分割を行った。変断面鋼管短柱の板厚方向は11層分割、円周方向は20等分割とした。軸方向分割は、衝撃突き上げ実験で断面変化部より上方約5mmの位置で局部座屈波形が発生したことに鑑み、上側断面では、断面変化部より上の20mmの間を10等分割して軸方向弾性座屈波長 $1.72\sqrt{R_1 t_1} \approx 18\text{mm}$ (R_1 : 平均半径) の中に9要素を配置して細分化し、それ以外の部分は漸増的に要素長を増加させた。

3.2 材料定数と入力速度

解析に用いた材料定数は表-1に示す通りである。供試体の基部に入力する加速度として、図-5(a)に示す加速度の時刻歴を用いた。

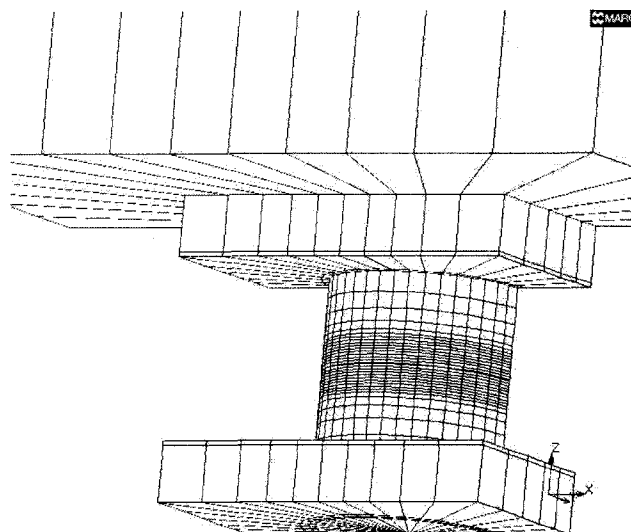


図-6 要素分割

3.3 解析方法と解析条件

変断面鋼管短柱の非弾性局部座屈挙動を考慮するため、構成則は供試体と重錘とも von Mises の降伏条件と等硬化則を用い、Updated Lagrangian 法により幾何学的非線形性を考慮した複合非線形動的解析を行った。動的平衡方程式の直接積分には Newmark の β 法 ($\beta = 1/4$) を、非線形解析には Newton-Raphson 法を用いた。解析継続時間は加速領域の6.9msとし、直接積分の時間刻み Δt は、Bathe ら²²⁾ の提唱する条件 (系の1次固有周期の1/126程度) を満たすよう設定し、 $\Delta t = 1 \times 10^{-5}\text{s}$ とした。なお本解析例においては、解析モデル (Shell 要素と Solid 要素) の自重による初期応力を考慮し、減衰は無視した。

3.4 解析結果および考察

(1) 局部座屈波形

衝撃突き上げ実験終了後の局部座屈波形を写真-2に、時刻 $t=6.9\text{ms}$ での解析結果の局部座屈波形を図-7に示す。図-7より解析結果は、写真-2の環状の局部座屈波形をよく再現し得ていることがわかる。

(2) 時刻歴応答

図-8(c)~(e)は、それぞれ加速領域 (約6.9msまで) での荷重、軸変位、上部の軸圧縮ひずみ (G1,G4)、断面変化部の軸圧縮ひずみ (G2,G5) と下部の軸圧縮ひずみ (G3,G6) の解析結果 (実線) と実験結果 (破線、一点鎖線) の時刻歴応答を比較したものである。図中、(a) の荷重 P は下側断面 ($A_2=9.0\text{cm}^2$) の軸ひずみ ϵ_a に軸剛性 EA_2 を乗じて算定 ($P=EA_2\epsilon_a$) したものである。実験結果の軸圧縮ひずみは G3 と G6 の計測値の平均値としている。

荷重の最大値 (座屈荷重) は、解析結果では約207kN、実験結果では約243kN となり、解析結果は実

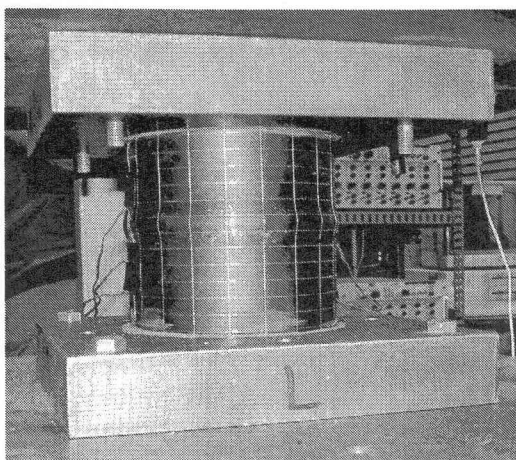


写真-2 Type B (H5-1) の局部座屈波形 (実験結果)

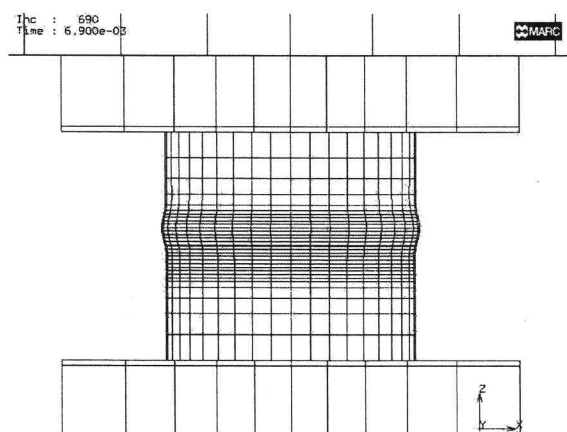


図-7 Type B (H5-1) の局部座屈波形 (解析結果:t=6.9ms)

験結果を約15% 過小評価していることがわかる。これは、解析で鋼管素材のひずみ速度効果を考慮していないためと考えられる。

(b)の軸変位 δ は、下変位 u_l と上変位 u_u の相対変位 ($\delta = u_l - u_u$) として求めている。(b), (c)と(e)より、解析結果は約3.5ms以降で軸変位 δ は実験結果より大きくなり、上側、下側断面の軸圧縮ひずみ ϵ_a は小さくなるものの、両者は概ね一致していることがわかる。

(d)の断面変化部の軸圧縮ひずみ ϵ_a は、解析結果では約3.7ms、実験結果では約4.6msから急増している。両者の急増開始時刻に差異があるのは、局部座屈波形の発生位置が解析結果では断面変化部の上方約10mmとなり、実験結果の場合より約5mm上になったためである。

(3) 荷重～変位関係

図-9は、解析結果と実験結果の荷重～変位関係を比較したものである。これより、解析結果は局部座屈荷重を過小評価するものの、概ね実験結果の傾向を捉えていることがわかる。

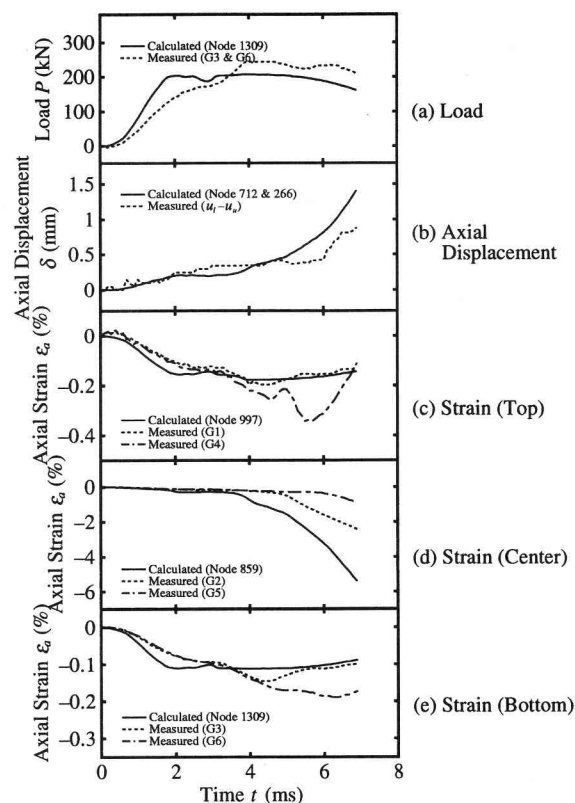


図-8 Type B (H5-1) の時刻歴応答

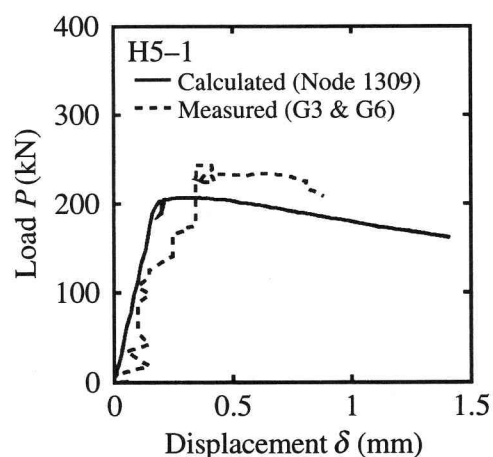


図-9 Type B (H5-1) の荷重～変位関係

4. 結 言

本研究は、先に行った変断面鋼管短柱の衝撃突き上げ実験結果のシミュレーション解析を行ったものである。本研究によって得られた成果を要約すれば以下のようになる。

1. 汎用プログラムMARCを用いて衝撃突き上げを受ける変断面鋼管短柱の塑性局部座屈挙動を良く説明することができた。
2. 解析結果は局部座屈荷重を若干過小評価するが、ひずみ値は概ね実験結果をシミュレートすることが認められた。

謝辞： 本研究の実験に当たっては、武蔵工業大学増田陳紀教授、トピー工業（株）鈴木一孝（当時武蔵工業大学大学院工学研究科土木工学専攻学生）、防衛大学校大野友則教授と別府万寿博助手のご支援を受け、また元防衛大学校第45期本科学学生佐野浩之君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 園田恵一郎：阪神大震災における土木構造物の衝撃的破壊について、第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.327-336, 1996.6.
- 2) 園田恵一郎，小林治俊，中島大使：地震による土木構造物の衝撃的破壊について，兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊に関するシンポジウム，pp.37-44, 1997.3.
- 3) 泉博充：見逃されている衝撃的上下動，土木学会誌，Vol.80, p.38, 1995.11.
- 4) 高田直俊：「突き上げるような上下動」はどこへいった，土と基礎，44-3, pp.13-15, 1996.3.
- 5) 清野純司：衝撃的地震動についての一考察，(続) 兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊に関するシンポジウム，pp.107-116, 2000.3.
- 6) 大野友則，井元勝慶：衝撃的地震動の計測記録における問題点，(続) 兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊に関するシンポジウム，pp.117-123, 2000.3.
- 7) 別府万寿博，香月智，石川信隆，宮本文穂：衝撃突き上げ装置によるRC橋脚モデルの輪切り状ひび割れに関する実験的研究，土木学会論文集，No.577/I-41, pp.165-180, 1997.10.
- 8) 大野友則，喜多龍一郎，藤掛一典：軸方向に衝撃力を受けるRC円柱試験体の圧縮破壊メカニズムに関する実験的研究，土木学会論文集，No.584/I-42, pp.229-242, 1998.1.
- 9) 別府万寿博，香月智，石川信隆，宮本文穂：衝撃上下動を受けるコンクリート柱供試体の鋼板巻立て補強効果について，土木学会論文集，No.620/V-43, pp.215-231, 1999.5.
- 10) 原田耕司，石川信隆，香月智，太田俊昭，日野伸一：下方向からの衝撃力を受けるRC柱の波動場から振動場への移行状態に関する実験的研究，土木学会論文集，No.662/V-49, pp.135-148, 2000.11.
- 11) 奥田洋一，園田恵一郎，高田直俊：高架橋橋脚モデルの線爆装置による衝撃破壊実験，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，I-B298, pp.592-593, 1999.9.
- 12) 谷村眞治：兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊について（破壊メカニズムに関する定量的検討），兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊に関するシンポジウム，pp.61-68, 1997.3.
- 13) 大野友則，水野淳，藤掛一典，河西良幸，喜多龍一郎：衝撃的地震動により鋼製橋脚に生じた局部座屈の発生メカニズムに関する研究，日本建築学会構造系論文集，第500号，pp.113-121, 1997.10.
- 14) 例えば，井浦雅司，熊谷洋司，小牧理：横力と一定軸力を受ける円筒シェルの終局状態に関する研究，土木学会論文集，No.556/I-38, pp.107-118, 1997.1.
- 15) 例えば，兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震による道路橋の震災に関する調査中間報告書（案），1995.3.
- 16) 清野純史：2000年10月6日鳥取県西部地震被害調査報告 1. 地震の概要及び土木構造物関連，地震工学ニュース No.176, pp.2-7, 2001.1.
- 17) 森 雅美，石川信隆，鈴木一孝，増田陳紀：衝撃的突き上げを受ける変断面鋼管の局部座屈現象に関する実験的研究，第28回関東支部技術研究発表会講演概要集，I-35, pp.70-71, 2001.3.
- 18) 森 雅美，石川信隆，香月智，鈴木一孝，増田陳紀：衝撃的突き上げを受ける変断面鋼管短柱の動的塑性局部座屈強度，土木学会第56回年次学術講演会講演概要集，I-B081, pp.162-163, 2001.10.
- 19) 中村秀治：鋼製円筒橋脚の動的弾塑性座屈解析，土木学会論文集，No.549/I-37, pp.205-219, 1996.10.
- 20) Osswald/Mennges（武田邦彦監修）：エンジニアのためのプラスチック材料工学，シグマ出版，pp.9-17.
- 21) 日本マーク（株）：MARC Manual, Vol.A～E, Ver. K7.2, 1998.2.
- 22) Bathe, K.J., Ozdemir, H. and Wilson, E.L.: Static and Dynamic Geometric and Material Nonlinear Analysis, Report No. UCSESM 74-4, Struct. Eng. Lab., Univ. of California, Berkeley, Calif., 1974.2.