

(21) 高速载荷を受ける砂中埋設鋼管の履歴吸収エネルギーに関する一考察

A CONSIDERATION ON A HYSTERETIC ABSORBED ENERGY OF A STEEL PIPE BURIED IN DRY SAND UNDER HIGH-SPEED LOADINGS

森 雅美*、佐藤 紘志**
Masami MORI and Hiroshi SATO

*防衛大学校講師 土木工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード：地中構造物、高速载荷、終局限界、ひずみ速度効果
(*underground structure, high-speed loadings, ultimate limit, strain-rate effect*)

1. はじめに

原子力発電所や重化学工業プラント等の社会的に重要な施設に付随する地中構造物では、耐震性のみならず偶発的な飛来物の落下、衝突あるいは燃料、火薬の爆発等の衝撃荷重に対しても十分な安全性が確保されている必要がある。しかし、土への衝突体の貫入、発生する衝撃土圧の伝播・減衰特性、土の衝撃緩衝能力、埋設構造物の動的終局限界性能、周囲の土との動的相互作用等、耐衝撃性に係る多くの問題が未解明のまま残されている。このため、衝撃的外力を受ける地中構造物の設計法は未だ十分確立されておらず、合理的な耐衝撃設計法の確立に向け理論的、実験的研究が急がれている現状にある¹⁾。衝撃的外力を受ける地中構造物の安全性の照査にあたっては、その生起確率を考慮すると、埋設構造物の動的終局限界性能を設計指標として行うのが合理的であり、その把握には慣性力や応力波の影響を分離し得る高速载荷実験を行うことが望ましい。

本研究は上記の観点から、地中構造物の耐衝撃限界状態設計法上、重要な設計指標となる動的終局限界性能を定量的に評価することを目的としたものである。すなわち、乾燥砂中に埋設された鋼管の高速载荷実験を行うとともに、実測ひずみ応答に基づいてひずみ速度効果を考慮した履歴吸収エネルギーを算定する弾塑性解析の基本式を定式化し、履歴吸収エネルギーが限界値に達するときを埋設鋼管の動的

終局限界状態と定義する一方法を提案するものである²⁾。同時に、実測ひずみ応答から履歴を考慮した断面力を算定する弾塑性解析の基本式を定式化し、埋設鋼管の断面挙動に基づき動的終局限界状態の定義の妥当性の検証を行うとともに、物理的破壊構との対応性を検討した³⁾。

2. 模型実験の概要

埋設鋼管として JIS G 3454 (圧力配管用炭素鋼鋼管) の熱間仕上継目無鋼管 STPG370 S-H 100A を用い、高速変形負荷装置 (防衛大学校全学共同利用器材) により鋼管素材の高速引張载荷実験と砂中埋設鋼管の高速载荷実験を実施した。

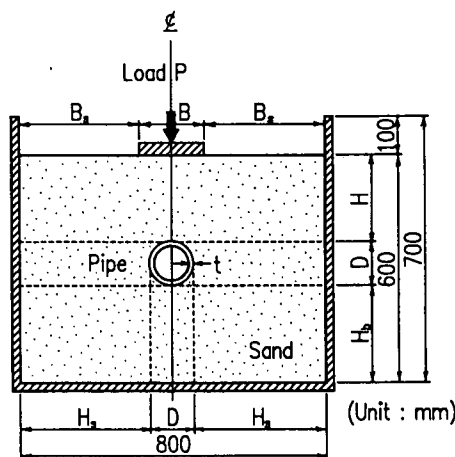


図-1 模型実験の概要

2.1 鋼管素材の高速引張載荷実験

鋼管の管軸方向より採取した3体の JIS 12 号試験片を用い、載荷速度を静的載荷（ひずみ速度： $\dot{\epsilon} = \text{約 } 10^{-3} \text{ 1/sec}$ ）、低速載荷（約 0.02 1/sec）と高速載荷（約 11 1/sec）の3段階に設定した載荷実験を行った。計測項目は、荷重、変位と試験片のひずみである。

2.2 砂中埋設鋼管の高速載荷実験

模型地盤は、気乾状態の豊浦標準砂を用い、図-1に示す実験土槽（内法：高さ 70cm、幅 80cm、奥行き 20cm）内で締固めにより作成し、鋼管の内面を切削加工して作成した外径 $D=114.3\text{mm}$ 、管厚 $t=2\text{mm}$ 、管長 $l=195\text{mm}$ の MP (Medium Pipe) を土層内に埋設した。乾燥密度は $\rho_d=1.56\text{t/m}^3$ に、土被り比は $H/D=2$ (H :土被り高) に調整した。荷重は、模型地盤中央に設置した載荷板 ($228.6 \times 190 \times 32\text{mm}$; $B/D=2$) に一点集中載荷した。計測項目は、載荷体の荷重、変位と鋼管のひずみ（内外面とも管頂より 45° 間隔で8箇所）である。

3. ひずみ速度効果を考慮した鋼管縦断面の弾塑性解析

3.1 動的応力～ひずみ履歴関係

2.1の高速引張載荷実験より、上降伏応力変化率（動的上降伏応力 ${}_d\sigma_{y,u}(\dot{\epsilon})$ と静的上降伏応力 ${}_s\sigma_{y,u}$ の比）と下降伏応力変化率（動的下降伏応力 ${}_d\sigma_{y,l}(\dot{\epsilon})$ と静的下降伏応力 ${}_s\sigma_{y,l}$ の比）とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ との関係はそれぞれ図-2(a)と(b)中の黒丸のように得られた。これらの実験結果に基づき、上降伏応力変化率と下降伏応力変化率のひずみ速度依存性はそれぞれ次式で定式化される。

$$\frac{{}_d\sigma_{y,u}(\dot{\epsilon})}{{}_s\sigma_{y,u}} = 10^{a_1 \log \dot{\epsilon} + b_1} + c_1 \quad (1a)$$

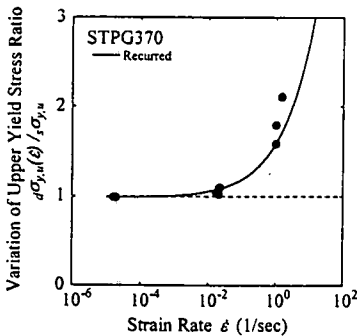


図-2(a) 上降伏応力変化率

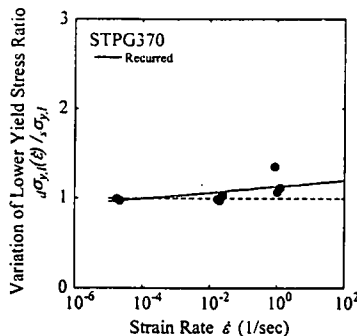


図-2(b) 下降伏応力変化率

$$\frac{{}_d\sigma_{y,l}(\dot{\epsilon})}{{}_s\sigma_{y,l}} = a_2 + b_2 \log \dot{\epsilon} \quad (1b)$$

ここに、

$$a_1 = 0.4623, b_1 = -0.2234, c_1 = 0.9860$$

$$a_2 = 1.133, b_2 = 0.03423$$

である。

降伏応力のひずみ速度依存性に基づき、ひずみ速度効果を考慮した動的応力～ひずみの履歴関係を定式化するにあたり、以下の仮定を設けた。

- 1) 縦弾性係数 E はひずみ速度依存性を持たない。
 - 2) 降伏応力 ${}_d\sigma_y(\dot{\epsilon})$ は上降伏応力 ${}_d\sigma_{y,u}(\dot{\epsilon})$ と下降伏応力 ${}_d\sigma_{y,l}(\dot{\epsilon})$ の平均値で与える。
 - 3) ひずみ硬化域の接線係数 E_t は、ひずみ速度依存性を持たず、 $E_t/E=0.003$ とする。
- すると、図-3の各履歴段階での動的応力とひずみは次式のように一般表示⁴⁾される。

$$\sigma(\dot{\epsilon}) = E^* \{ \epsilon - \epsilon^*(\dot{\epsilon}) \} \quad (2)$$

ここに、 E^* と $\epsilon^*(\dot{\epsilon})$ は各履歴段階によって定まる定数で、表-1のように判別決定される。

3.2 断面力

2.2の砂中埋設鋼管の高速載荷実験は、鋼管部材の管軸に垂直な面内の平面ひずみに近い条件下で行われている。このため、図-4に示す円筒

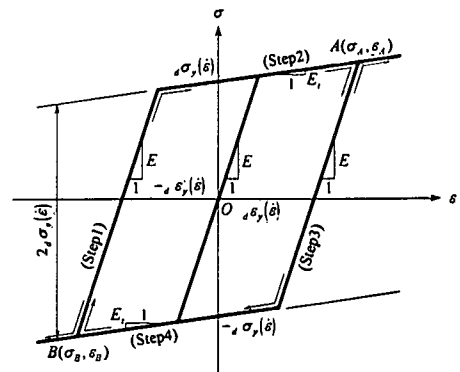


図-3 動的応力～ひずみ履歴関係

表-1 判別条件

Discrimination	Step	E^*	$\epsilon^*(t)$	Substitution
if $\epsilon_B < \epsilon < \epsilon_A$ and $V = -1$	1	E	$\epsilon_B - \nu_B/E$	
if $\epsilon \geq \epsilon_A$	2	E_t	$\epsilon_A - \nu_A/\mu E$	$\epsilon_A = \epsilon, \epsilon_B = \epsilon - 2\epsilon_y(t)$
		μE	$\epsilon_A - \nu_A/\mu E$	$\nu_A = \nu, \nu_B = \nu - 2\nu_y(t)$ $V = 1$
if $\epsilon_B < \epsilon < \epsilon_A$ and $V = 1$	3	E	$\epsilon_A - \nu_A/E$	
if $\epsilon \leq \epsilon_B$	4	E_t	$\epsilon_B - \nu_B/\mu E$	$\epsilon_A = \epsilon, \epsilon_B = \epsilon - 2\epsilon_y(t)$
		μE	$\epsilon_B - \nu_B/\mu E$	$\nu_B = \nu, \nu_A = \nu + 2\nu_y(t)$ $V = -1$
Initial Conditions			$\nu_A = \nu_y(t), \epsilon_A = \epsilon_y(t)$ $\nu_B = -\nu_y(t), \epsilon_B = -\epsilon_y(t), V = -1$	

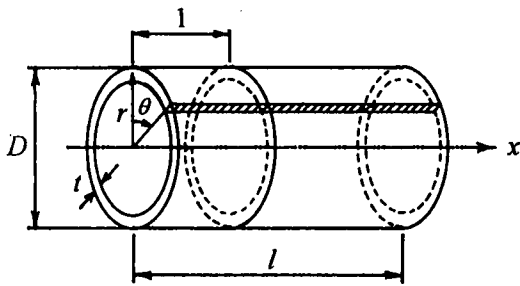


図-4 鋼管部材

シェルの管軸方向のはり挙動は無視でき、円周方向のリング挙動が支配的な奥行き単位長のリングの横断面の問題に帰着される。

(1) ひずみ分布

いま、図-4に示す単位長の管壁縦断面の図心点Cを原点とし、Cより下方にy軸をとる。縦断面の上下縁の実測ひずみ ϵ_t と ϵ_c に対するひずみ分布は、平面保持の法則を仮定すれば、上縁と下縁での降伏の有無により表-2のように上下部弾性、下部塑性、上部塑性と上下部塑性状態の4通り得られる。

(2) 応力分布

ϵ_t と ϵ_c に対応するひずみ速度効果を考慮した現段階の動的応力 $\sigma_t(\dot{\epsilon})$ と $\sigma_c(\dot{\epsilon})$ は、式(2)の動的応力~ひずみ履歴関係より得られる。両者がともに負荷の場合は、表-2のように上下部弾性状態に対しては引張弾性域と圧縮弾性域、下部塑性状態

に対しては引張塑性域と圧縮弾性域、上部塑性状態に対しては引張弾性域と圧縮塑性域、また上下部塑性状態に対しては引張塑性域、圧縮塑性域と中立弾性域から構成される現段階の応力分布が得られる。以前に塑性負荷された $\sigma_t(\dot{\epsilon})$ もしくは $\sigma_c(\dot{\epsilon})$ が現段階で除荷または再負荷の場合には、下部塑性、上部塑性と上下部塑性状態に対する現段階の応力分布は、塑性負荷(Plastic Loading; PL)から弾性除荷(Elastic Unloading; EU)、塑性除荷(Plastic Unloading; PU)、もしくは弾性再負荷(Elastic Reloading; ER)に推移し、上下部弾性状態を含め、計25通りとなる。

除荷または再負荷の場合の弾塑性応力分布を求める手順⁵⁾は、以下のようになる。除荷の場合は、除荷が起こるAまたはB(図-3参照)での基準の弾塑性応力分布から除荷応力分布を差し引けば現段階の弾塑性応力分布が得られる。再負荷の場合は、基準の弾塑性応力分布から除荷応力分布を差し引き、さらに弾性再負荷応力分布を足し合わせる。以上より、25通りの応力分布が求まる。

(3) 縦断面の断面力

軸力Nが図心点Cに作用すると仮定すれば、断面における釣合式は次式

$$N = \int \sigma dy \quad (3a)$$

$$M = \int \sigma y dy \quad (3b)$$

表-2 ひずみ分布、応力分布と無次元化断面力

		(a) Elastic	(b) Lower End Yield	(c) Upper End Yield	(d) Lower/Upper End Yield
Strain Distribution					
Thrust	$\frac{N_t}{N_y}$	$\int_{-t/2}^{t/2} (c,y+c_t) dy / N_y$	$\int_{-t/2}^{t/2} (c,y+c_t) dy / N_y$	$\int_{-t/2}^{t/2} (c,y+c_t) dy / N_y$	$\int_{-t/2}^{t/2} (c,y+c_t) dy / N_y$
	$\frac{N_c}{N_y}$	$\int_{-t/2}^{t/2} (c,y+c_t) dy / N_y$	$\int_{-t/2}^{\eta_1} (c,y+c_t) dy / N_y$	$\int_{-t/2}^{\eta_2} (c,y+c_t) dy / N_y$	$\int_{-t/2}^{\eta_1} (c,y+c_t) dy / N_y$
	$\frac{N_n}{N_y}$				$\int_{\eta_1}^{\eta_2} (c,y+c_t) dy / N_y$
	$\frac{N}{N_y}$	$\frac{N_t}{N_y} + \frac{N_c}{N_y}$	$\frac{N_t}{N_y} + \frac{N_c}{N_y}$	$\frac{N_t}{N_y} + \frac{N_c}{N_y}$	$\frac{N_t}{N_y} + \frac{N_c}{N_y} + \frac{N_n}{N_y}$
Moment	$\frac{M_t}{M_p}$	$\int_{-t/2}^{t/2} (c,y+c_t) y dy / M_p$	$\int_{-t/2}^{t/2} (c,y+c_t) y dy / M_p$	$\int_{-t/2}^{t/2} (c,y+c_t) y dy / M_p$	$\int_{-t/2}^{t/2} (c,y+c_t) y dy / M_p$
	$\frac{M_c}{M_p}$	$\int_{-t/2}^{t/2} (c,y+c_t) y dy / M_p$	$\int_{-t/2}^{\eta_1} (c,y+c_t) y dy / M_p$	$\int_{-t/2}^{\eta_2} (c,y+c_t) y dy / M_p$	$\int_{-t/2}^{\eta_1} (c,y+c_t) y dy / M_p$
	$\frac{M_n}{M_p}$				$\int_{\eta_1}^{\eta_2} (c,y+c_t) y dy / M_p$
	$\frac{M}{M_p}$	$\frac{M_t}{M_p} + \frac{M_c}{M_p}$	$\frac{M_t}{M_p} + \frac{M_c}{M_p}$	$\frac{M_t}{M_p} + \frac{M_c}{M_p}$	$\frac{M_t}{M_p} + \frac{M_c}{M_p} + \frac{M_n}{M_p}$

のようになり、上式に応力分布を表す式を代入すれば、軸力Nと曲げモーメントMが得られ、式(3)をそれぞれ静的降伏軸力 $N_y (= t_s \sigma_y)$ と静的全塑性モーメント $M_p (= t^2 \sigma_y / 4)$ で無次元化すれば表-2のようになる。なお、積分は、解析的に行うことが煩雑であるため、Simpsonの積分公式を用い数値的に行う。

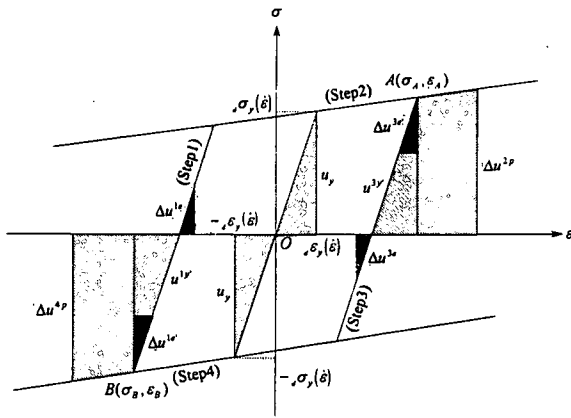


図-5 履歴ひずみエネルギー (単位体積)

3.3 履歴吸収エネルギー

(1) 繊維の履歴吸収エネルギー

図-5は、双一次型の応力～ひずみ履歴関係において、各 Step における単位体積当たりのエネルギー増分 ($\Delta u^{1e}, \Delta u^{1e}, \Delta u^{2p}, \Delta u^{3e}, \Delta u^{3e}, \Delta u^{4p}$) と弾性限界エネルギー (u^{1e}, u^{3e}) を模式的に示したものである。上添字の数字は Step を、“e”は弾性 (elastic) を、“p”は塑性 (plastic) を示しており、elastic の場合は“”の有無により解放 (release) と吸収 (absorb) を区別している。単位体積当たりの吸収エネルギーの増分関係は次式のように表される。

$$u^{i+1} = u^i + \Delta u \quad (4)$$

ここに、 u^{i+1} は現段階 $i+1$ の吸収エネルギー、 u^i は前段階 i の吸収エネルギー、また Δu は $i \sim i+1$ 間の吸収エネルギー増分である。 Δu は、Step1 においては $\sigma \geq 0$ であれば u^{1e} を差し引いてから Δu^{1e} を足し合わせ、同様に Step3 においては $\sigma < 0$ であれば u^{3e} を差し引いてから Δu^{3e} を足し合わせれば求められる。

(2) 縦断面の履歴吸収エネルギー

3.2 で述べたように、上下縁の応力が除荷ま

たは再負荷する場合は、負荷の場合の単純な応力分布から複雑な応力分布に変化し、この変化を忠実に追跡してエネルギー増分を求めることは困難である。ここでは簡単のため、除荷または再負荷の場合の応力分布も負荷の場合と同じと仮定する。この仮定に基づき、単位体積当たりのエネルギー増分と弾性限界エネルギーを単位長の縦断面の全面積に亘って積分すれば、管壁縦断面のエネルギー増分と弾性限界エネルギーが算定でき、それぞれ表-3 に示すように得られる。ここで、静的弾性限界吸収エネルギー (純曲げ状態) $U_y (= tE_y \epsilon_y^2 / 16)$ で無次元化している。また、縦断面の履歴吸収エネルギーの増分関係は、繊維の場合と同様の次式で表される。

$$U^{i+1} / U_y = U^i / U_y + \Delta U / U_y \quad (5)$$

4. 解析結果と考察

ここでは一例として、 $H/D=2$ で埋設された $D/t=57$ の MP に関する高速載荷実験結果 HMP224 (載荷速度: $v=5.32\text{m/sec}$) を取り挙げる。

4.1 断面力

鋼管横断面の右半部の各管壁縦断面 (S1~S5、管頂より 45° 間隔) の無次元化軸力 N/N_y と無次元化曲げモーメント M/M_y の時刻歴をそれぞれ図-6 と 7 に示す。図中、実線と破線はそれぞれひずみ速度効果を考慮 (Considered) した場合と無視 (Neglected) した場合を示している。

図-6 より、 N/N_y に及ぼすひずみ速度効果は下半部 (S4 と S5) では殆ど認められず上半部 (S1, S2 と S3) で顕著であり、特に S2 では約 51% の影響が認められる。 N/N_y は、下半部では 0.3 以下、上半部では S1 で時刻 $t=16.2\text{msec}$ 、S2 で

24.8msec、S3 で 19.2msec 以降を除き

0.5 以下になっている。このことから、下半部では全継続時間に亘って、上半部では 16.2msec までは軸力挙動はさほど顕著ではなく、概ね曲げ挙動が卓越してい

表-3 無次元化吸収エネルギー

		(a) Elastic	(b) Lower End Yield	(c) Upper End Yield	(d) Lower/Upper End Yield
Neutral Region	U_e				$\int_{-u_y}^{u_y} \Delta u dV / U_y$
	U_y				$-\frac{1}{\epsilon_y^2 (E_y - E)} (\epsilon_y^2 + \epsilon_y^2)$
Tension Region	$\frac{\Delta U_i}{U_y}$	$\int_{u_{i-1}}^{u_i} \Delta u dV / U_y$	$\int_0^{u_y} \Delta u dV / U_y$	$\int_0^{u_y} \Delta u dV / U_y$	$\int_0^{u_y} \Delta u dV / U_y$
	$\frac{U_i}{U_y}$	$\int_{u_{i-1}}^{u_i} u^e dV / U_y$	$\int_0^{u_y} u^e dV / U_y$	$\int_0^{u_y} u^e dV / U_y$	$\int_0^{u_y} u^e dV / U_y$
Compression Region	$\frac{\Delta U_i}{U_y}$	$\int_{-u_{i-1}}^{-u_i} \Delta u dV / U_y$	$\int_{-u_y}^0 \Delta u dV / U_y$	$\int_{-u_y}^0 \Delta u dV / U_y$	$\int_{-u_y}^0 \Delta u dV / U_y$
	$\frac{U_i}{U_y}$	$\int_{-u_{i-1}}^{-u_i} u^e dV / U_y$	$\int_{-u_y}^0 u^e dV / U_y$	$\int_{-u_y}^0 u^e dV / U_y$	$\int_{-u_y}^0 u^e dV / U_y$
Remarks	Δu = Increment of Strain Energy (Unit Volume), u^e = Elastic Limit Strain Energy (Unit Volume), $U_y = \frac{1}{6} E_y \epsilon_y^3 t$ = Elastic Limit Strain Energy (Pure Bending), ϵ_y = Static Yield Strain				

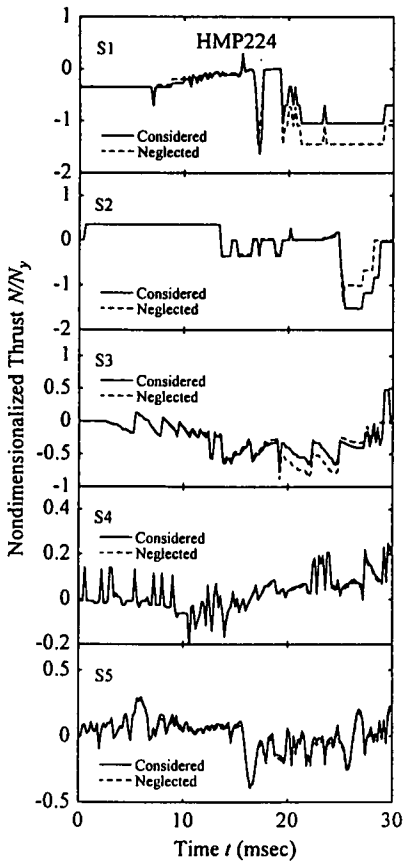


図-6 無次元化軸力の時刻歴

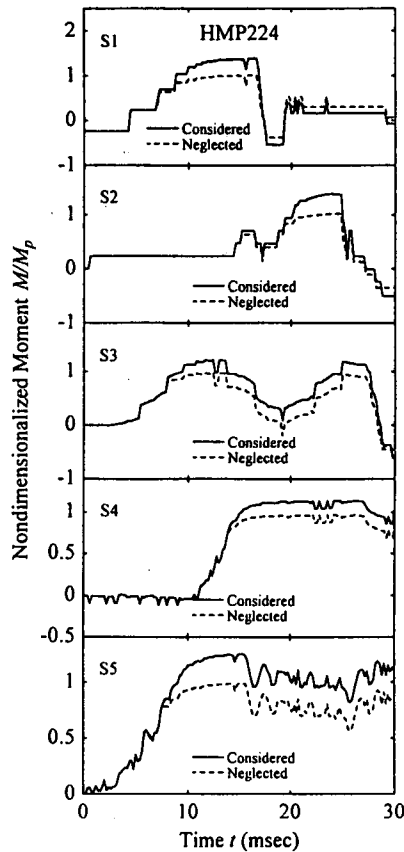


図-7 無次元化曲げモーメントの時刻歴

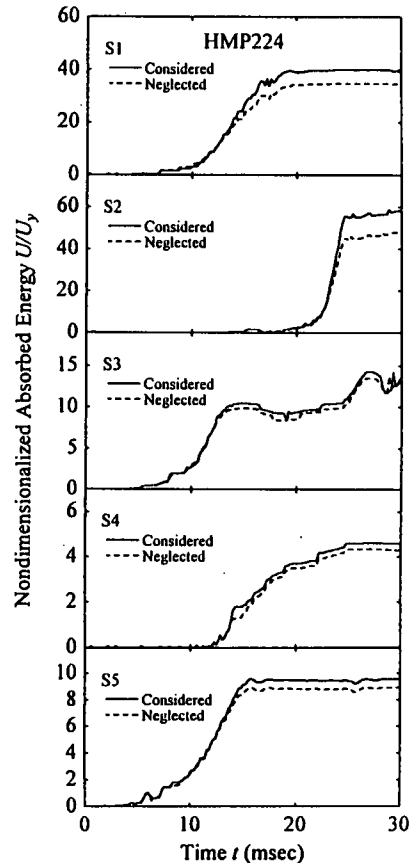


図-8 無次元化履歴吸収エネルギーの時刻歴

るといえる。

図-7より、 M/M_p に及ぼすひずみ速度効果は上半部で顕著であり、特にS1では約36%の影響が認められる。以下、ひずみ速度効果を考慮(Considered)した場合について考察する。下半部の M/M_p は、S5では初期から急増して15.6msecで1.24、S4では10.8msec以降急増して19.0msecで1.13となり、ひずみ速度効果を考慮した場合の全塑性モーメントに達し、塑性ヒンジが形成された状態になったものと考えられる。その後、S5では不規則な増減を繰り返すものの、両者とも概ね一定値を保持している。これは前述のように、下半部では曲げ挙動が卓越していることから、両者とも全塑性モーメント状態を概ね保持していることを示している。

上半部の M/M_p は、S3では5.2msec以降急増して13.6msecで1.20の全塑性モーメントに達し、その後19.2msecまで漸減している。S1では4.4msec以降急増して16.6msecで1.39の全塑性モーメントに達した後、17.6msecまで-0.54に急減し、19.2msecから再び急増して19.6msec以降

0.16の一定値を保持するとともに、 $N/N_y = -1.05$ となる。これは、縦断面挙動が全塑性モーメント状態から圧縮降伏状態に急変し、縦断面の曲げ抵抗が限界に達した状態と考えられる。17.6msecでS1の縦断面挙動が急変すると、S2の M/M_p は急増して24.8msecで1.37の全塑性モーメントに達した後に25.4msecまで急減し、 $N/N_y = -1.52$ の圧縮降伏状態に縦断面挙動が急変する。19.2msecでS1の M/M_p の急減が終了すると、S3の M/M_p は急増して27.2msecで1.13の全塑性モーメントに達した後、急減している。

4.2 履歴吸収エネルギー

鋼管横断面の右半部の各管壁縦断面(S1~S5)の無次元化履歴吸収エネルギー U/U_y の時刻歴を図-8に示す。これは、3.3で述べたように、除荷または再負荷の場合には、その応力分布の変化を忠実に追跡してエネルギー増分を求めることが困難であることから、簡便的に応力分布を仮定して求めたものである。同図における除荷または再負荷の範囲は、S1では16.6~19.4msec、S2では24.6~30.0msec、S3では12.4~19.0msec、S4

では22.2~30.0msec、またS5では14.6~25.8msecとなる。

図-8より、ひずみ速度効果は上半部(S1~S3)で顕著であり、特にS2では約23%の影響が認められる。以下、ひずみ速度効果を考慮した場合について考察する。載荷開始から5msec近傍までは、基礎砂厚部を鋼管が剛体沈下するため U/U_y の増加は殆どない。また、5msec近傍から11.0msecまでの間ではS1、S3とS5の U/U_y は急増しており、リングの2次の曲げ変形モードになっている様子が窺われる。鋼管の剛体運動が概ね止まる5msec近傍を過ぎると、上半部では、S3の U/U_y は5.2msec以降急増して13.6msecで10.2に達し、その後19.0msecまで漸減している。S1の U/U_y は、6.8msec以降急増して19.4msecで39.6の一定値に達する。その後、S2の U/U_y は直線的に急増して24.6msecで55.8の一定値に達し、S3の U/U_y は13.6msecからの漸減傾向から漸増傾向に転じ、S2の U/U_y が一定値に達する25msec近傍から急増して26.6msecで14.3に達し、その後増減があるものの概ね一定値を保持している。

以上の上半部の U/U_y の挙動は、鋼管横断面での塑性変形能力によって管壁縦断面間にひずみが円滑に伝達されている様子をよく示している。また、S1とS2の U/U_y が一定値に達する時刻19.4msecと24.6msecは、それぞれ4.1で述べた管壁縦断面の断面挙動が曲げ挙動から軸力挙動に急変する時刻19.4msecと25.4msecに、S3の U/U_y が一定値に達する時刻26.6msecは M/M_y が急減する時刻27.2msecに概ね対応しており、縦断面の曲げ抵抗が限界に達した状態と考えることができる。このことから、 U/U_y が一定値に達するときは除荷または再負荷の範囲にあり、その算定値は厳密性に欠いているものの縦断面の曲げ抵抗が限界に達した状態という明確な物理現象点を捕捉し得ており、簡便的な応力分布の仮定は概ね妥当であったものと判断できる。従って、 U/U_y が一定値、すなわち限界値に達するときを管壁縦断面の動的終局限界状態と定義できるものと考えられる。このように縦断面の動的終局限界状態を定義すれば、S1、S2とS3での無次元化終局限界吸収エネルギーはそれぞれ $U/U_y=39.6$ 、55.8と14.3と求めることができる。

下半部では、5msec近傍を過ぎると、S5の

U/U_y は4.8msec以降急増して15.6msecで9.6、S4の U/U_y は11.0msec以降急増して250msecで4.6の一定値に達するが、断面挙動に急変がなく断面の曲げ抵抗にまだ余裕がある状態と考えられ、動的終局限界状態とは見なせないものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、砂中埋設鋼管の履歴吸収エネルギーが限界値に達するときを埋設鋼管の動的終局限界と定義する一方法を提案し、断面挙動に基づき動的終局限界状態と物理的破壊機構との対応性を検討した。その結果、砂中埋設鋼管の縦断面の動的終局限界状態は、管壁縦断面の曲げ抵抗が限界に達して、縦断面挙動が曲げから軸力挙動に急変する時点に対応していることを示した。

最後に、高速載荷実験には防衛大学校全学共同利用器材高速変形負荷装置を使用し、実験に際しては、元防衛大学校第40期本科学生長田雄一、馬場智也両君の協力を得たことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 森 雅美・佐藤紘志：高速載荷を受ける砂中埋設鋼管の土圧特性，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1417-1430，1992.3.
- 2) 森 雅美・佐藤紘志：高速載荷を受ける砂中埋設鋼管の履歴吸収エネルギーに関する一考察，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，I-557，pp.1114-1115，1995.9.
- 3) 森 雅美・佐藤紘志：高速載荷を受ける砂中埋設鋼管の断面挙動に関する一考察，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，I-B207，pp.414-415，1997.9.
- 4) 太田俊昭：新体系土木工学8 構造物の非弾性解析 第3章，技法堂出版，pp.79-86，1980.1.
- 5) ホッジ，P.G.：構造物の塑性解析 第5章，倉西正嗣他共訳，コロナ社，pp.124-151，1961.