

I-B 125 高速載荷を受ける砂中埋設鋼管の履歴吸収エネルギーの相似性に関する一考察

防衛大学校 ○(正)森 雅美 (正)佐藤絢志

1. まえがき 一般に、爆発・衝突による構造物の応答は局部的応力波応答と全体的弾塑性応答からなり、各応答の発生機構が全く異なるため完全な相似則は成立しないと言われている。しかし、高速載荷では全体的弾塑性応答が卓越するため、対象が地中構造物の場合には土質材料の力学特性の拘束圧依存性に問題が残るもの、相似則の適用が可能であることが予想される。本報告は、先に提示した¹⁾地中構造物の終局限界吸収エネルギーの相似性を検討することを目的として、地中構造物の爆発²⁾及び落錐衝突実験³⁾で用いられた Replica相似則と類似の高速載荷条件下での動的相似則を誘導するとともに3種類の寸法の砂中埋設鋼管の高速載荷実験を行い、実験結果に基づく動的相似則の適用性の検証を試みたものである。

2. 動的相似則 動的相似則は、材料及び加速度の取扱いにより Replica相似則と Froude相似則の2種類に大別される。Froude相似則は、模型に原型と異なる模擬材料を用いて加速度相似比を1とするもので、重力場において重力効果による自重応力を再現できる方法であるが、原型の材料と応力～ひずみ関係が相似な模擬材料を見つけることが困難であるため適用例は少ない。Replica相似則は、模型に原型と同じ材料を用いて加速度相似比を長さ相似比の逆数とするもので、この条件は遠心模型実験装置による遠心力場で満たされるが、実験が困難で経費が高価となる。このため通常は、重力効果を無視した重力場での Distorted Replica相似則が用いられ、適用例として Murphyら²⁾による爆発実験及び Youngら³⁾による落錐衝突実験等が挙げられる。

これらの爆発及び落錐衝突実験の場合と類似の高速載荷実験条件下での現象に関与する物理量及び π ナンバーを表-1に示す。表中、土に関する物理量 η_1 と η'_1 は応力の、また物理量 η_2 と η'_2 はひずみ速度効果を考慮するために粘性の次元を有する。また、埋設鋼管のひずみを従属する物理量に選定している。表-1の π ナンバーに相似条件を適用すれば、原型と幾何的に相似な模型を用いることにより π_2 の相似条件が、模型と原型で同一材料を用いることにより π_3 、 π_4 、 π_5 、 π_6 及び π_7 の相似条件が満たされる。しかし、 π_5 と π_{10} 及び π_9 と π_{12} の各々の相似条件が互いに相反するため、ひずみ速度効果を表す π_{10} 及び重力加速度の影響を表す π_{12} を無視すれば、表-2に示す Replica相似則が得られる。この相似則では、

表-1 物理量及び π ナンバー

No.	構成要素	記号	定義	次元	
1	從変量	ϵ	ひずみ		$\pi_1 = \phi$ ナンバー $\pi_i = \phi_i (\pi_2, \dots, \pi_{12})$
2		P	地表面過圧	PL^{-2}	$\pi_2 = \frac{\lambda_1}{D}$
3	荷重	V	載荷速度	LT^{-1}	$\pi_3 = \frac{\eta_{10}}{\eta_{10}}$
4		t	時間	T	$\pi_4 = \frac{\eta_1}{\eta_1}$
5		g	重力加速度	LT^{-2}	$\pi_5 = \frac{\eta_2}{\eta_2}$
6		D	外径	L	$\pi_6 = \frac{\rho}{\rho_0}$
7		λ	他の諸元	L	$\pi_7 = \frac{\eta_1}{\eta_1}$
8	構造	η_1	機械的係数	PL^{-2}	$\pi_8 = \frac{\eta_1}{P}$
9		η'_{10}	せん断弾性係数	PL^{-2}	$\pi_9 = \frac{\rho}{P}$
10		ρ_r	密度	$PL^{-1}T^2$	$\pi_{10} = \frac{\eta_2 V}{P D}$
11		η_1	垂直応力下の性質	PL^{-2}	$\pi_{11} = \frac{V_t}{D}$
12		η'_{10}	せん断応力下の性質	PL^{-2}	$\pi_{12} = \frac{g D}{V^2}$
13	土	η_2	垂直応力下の性質	$PL^{-1}T$	
14		η'_{10}	せん断応力下の性質	$PL^{-1}T$	
15		ρ	密度	$PL^{-1}T^2$	

表-2 Replica相似則

物理量	次元	相似比
q	PLT	$q' = \frac{\eta_2}{\eta_2}$
長さ	L	n
質量	$PL^{-1}T^2$	n^3
時間	T	n
密度	$PL^{-1}T^2$	1
ひずみ		1
応力・圧力	PL^{-2}	1
速度	LT^{-1}	1
加速度	LT^{-2}	$\frac{1}{n}$
ひずみ速度	LT^{-1}	$\frac{1}{n}$
力	F	n^2
エネルギー	PL	n^3
備考	$\frac{1}{n}$	模型縮尺

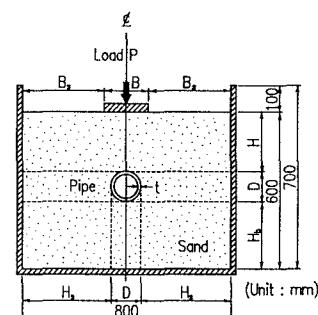


図-1 実験土槽

表-3 実験条件

模型	長さ相似比 D/D	鋼管 D (mm)	ρ_s (kg/m³)	Y (m/s)	U/D	D/t	幾何相似条件						H_1/D	H_2/D	H_3/D
							B/D	B/D	B _s /D	H/D	H _s /D	H _s /D			
Model-1	1.445	114.3	1,580	5.62	0.75	57	1.71	1.50	2.75	1.02	3.25	3.00			
Model-2	2.165	76.3	1,576	5.44	0.86	57	2.56	1.50	4.49	1.05	5.87	4.74			
Model-3	1.000	165.2	1,543	5.43	0.77	57	1.18	1.50	1.67	1.02	1.82	1.92			

速度相似比が $V^*=1$ となる。また、重力効果を無視しているため、土質材料の自重応力に起因する拘束圧依存性を考慮できない。

3. 実験結果及び考察 (1) 模型実験の概要

高速載荷実験には高速変形負荷装置を用いた。模型地盤は、図-1に示す実験土槽（内法：高さ70cm、幅80cm、奥行き20cm）内に豊浦標準砂を締固めて作成し、模型管は、表-3に示す最大寸法のModel-3を基準にした3種類の相似比の鋼管を用いた。表中、相似条件は極力満たすように設定した。しかし、幾何パラメータ π_2 の中で B_s/D 、 H_s/D と H_s/D は、高速載荷装置のテストベッドの空間の大きさの制約から相似則に基づいた寸法の実験土槽を用いることが不可能で同一実験土槽を用いたため満たされていない。

(2) 実測ひずみ応答及び履歴吸収エネルギー

ここでは、実測ひずみ応答及びこれに基づく履歴吸収エネルギーの相似性について検討を行う。なお、以下に示す実験結果は全て表-2の相似比に基づいて実物換算している。

図-2は実測ひずみ応答の一例として、管頂での外面ひずみ（G1）を換算時間に関して示したものである。これより、各Modelともひずみの時間的変化と最大ひずみまでの到達時間はほぼ一致している。しかし、最大ひずみに関しては、Model-1とModel-3では概ね一致しているが、Model-2ではModel-1とModel-3の約1/6となっている。

図-3は埋設鋼管の履歴吸収エネルギー U_p と弾性限界ひずみエネルギー（純曲げ状態） U^T_y との比、すなわち履歴吸収エネルギー比 U_p/U^T_y を換算時間に関して示したものである。これより、Model-1とModel-3では U_p/U^T_y の限界値として定義される終局限界吸収エネルギー比には約15%の差異があるが、 U_p/U^T_y の時間的変化と終局限界までの到達時間はよく一致しており、相似性がよいことが認められる。しかし、Model-2では、終局限界吸収エネルギー比はModel-3のものとはほぼ一致しているが、 U_p/U^T_y の時間的変化と終局限界までの到達時間はModel-1とModel-3のものとは異なっており、相似性が悪いことが認められる。このことは、i)動的相似則がひずんでおり、重力効果を無視していることの影響と、ii)幾何パラメータ π_2 が完全に満たされていないことの影響が複合した結果と考えられる。i)に関しては、重力効果の影響が顕著であるならばModel-1とModel-2の U_p/U^T_y の時間的変化の相似性も悪くなるはずであることから、本実験の相似比の範囲($n=1\sim 2.165$)内では重力効果の影響はさほど顕著ではなく、主要な原因是ii)にあるものと考えられる。ii)に関しては、Model-1とModel-3($n=1\sim 1.445$)では土槽側壁及び底壁からの反力の影響がほぼ同程度であると考えられるのに対し、Model-2($n=2.165$)になると側壁等の影響が顕著に小さくなるためと考えられる。このことから、Model-1とModel-3よりModel-2の方が側壁等の影響が小さく、実験精度がよいことになる。

4. あとがき 本報告では、砂中埋設鋼管の履歴吸収エネルギーの相似性を検討した。その結果、誘導した動的相似則自体の問題、また模型実験において同一実験土槽を用いたための問題を含んでいるが、終局限界吸収エネルギーの相似性は概ね認められることを明らかにできたものと思われる。最後に、高速載荷実験には防衛大学校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・佐藤：土木学会第50回年次学術講演会論文集、I-557, pp.1114-1115, 1995.9. 2)Murphy et al.: AFSWC-TDR-62-2, 1962.1. 3)Young et al.: Proc. of ASCE, No. EM3, 1964.6.

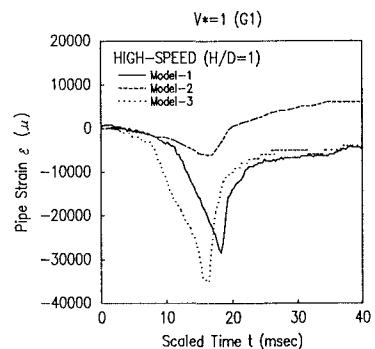


図-2 ひずみ～換算時間関係

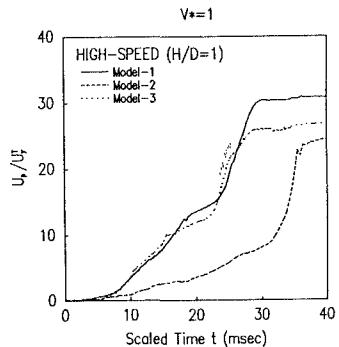


図-3 履歴吸収エネルギー比～換算時間関係