

I-557

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

防衛大学校 ○(正)森 雅美 (正)佐藤紘志

1. まえがき 著者ら¹⁾は、先に砂中埋設鋼管の高速载荷実験を行い、実測ひずみ応答に基づいて終局限界吸収エネルギーを定量的に評価する一手法を提示した。そこでは、応力～ひずみ関係に除荷の影響を考慮していなかった。本報告は、砂中埋設鋼管の塑性ひずみの累積に基づく履歴吸収エネルギーが限界に達するときに終局限界状態と定義する一方法を提案するものである。すなわち、まず、鋼管素材の高速引張载荷実験結果に基づき、ひずみ速度依存性を導入した動的応力～ひずみ履歴関係の定式化を行い、次いで、実測ひずみ応答から履歴吸収エネルギーを算定する基本式を定式化するとともに、先の砂中埋設鋼管の高速载荷実験結果に基づき、妥当性の検証および終局限界吸収エネルギーの定量的評価を試みたものである。

2. 動的応力～ひずみ履歴関係 先の実験に用いた埋設鋼管の管軸方向より採取したJIS 12号試験片の高速引張载荷実験を行い、降伏応力等の力学特性に及ぼすひずみ速度効果を定量的に評価した。これらの力学特性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～ひずみの履歴の関係を定式化するにあたり、以下の仮定を設けた。①動的応力～ひずみ関係は、図-1に示す履歴を考慮した双一次型にモデル化できるものとし、ひずみ速度依存性は降伏応力 σ_y に導入する。図中の弾性域の勾配は $E=2.06 \times 10^5$ MPaとし、塑性域の勾配 E_p 値は $E_p/E=0.003$ とする。②降伏応力 σ_y は上降伏応力 $\sigma_{y,u}$ と下降伏応力 $\sigma_{y,l}$ の平均値で与える。すると、図-1の各履歴段階(Step)での動的応力とひずみは、 $\sigma=E^*(\varepsilon-\varepsilon^*)$ のように一般表示される²⁾。ここに、 E^* 、 ε^* は各履歴段階によって定まる定数である。

3. 埋設鋼管の累積履歴吸収エネルギー (1) 履歴吸収エネルギー算定の弾塑性解析の基本式

先の実験は平面ひずみ条件下で行われているので、図-2の鋼管部材の縦断面の単位長部分(矩形断面)を取り出して考えることができる。鋼管内外面の実測ひずみに対して2.の動的応力～ひずみ履歴関係に基づく累積履歴吸収エネルギーを算定する弾塑性解析の基本式の定式化の具体的手順を示せば以下になる。

①単位長の縦断面の上下縁の実測ひずみに対して平面保持の法則を仮定し、ひずみ分布を求める。②上下縁の実測ひずみに対応する動的応力を2.の一般表示式より求めるとともに、弾性、下縁降伏、上縁降伏および上下縁降伏の各ひずみ状態に対して引張領域、圧縮領域および中立軸領域から構成される応力分布を仮定する。③過去の塑性履歴の最大点を表すAおよびBの基準点からの単位体積当たりのエネルギー増分 Δu および弾性限界エネルギー u^e を算定する。④③で得られた単位体積当たりのエネルギー増分 Δu および弾性限界エネルギー u^e を引張領域、圧縮領域および中立軸領域について面積分し、単位長当たりのエネルギー増分 ΔU および弾性限界エネルギー U^e を算定する。⑤前の荷重段階 i の履歴吸収エネルギー U^i とエネルギー増分 ΔU を加算し、現在の荷重段階 $i+1$ の履歴吸収エネルギー U^{i+1} を算定する。⑥⑤で離散的に得られた鋼管横断面における k 点($k=1 \sim 8$)での履歴吸収エネルギー U^{i+1}_k を円周方向に線形補間して単位長当たりの鋼管横断面の吸収エネルギーを算定し、さらに管軸方向に全長 l にわたって積分して鋼管部材としての履歴吸収エネルギー U_0 を算定する。

(2) 解析結果と考察 ここでは一例として、土被り比 $H/D=2$ (H :土被り高, D :外径)、径厚比 $D/t=57$ (t :管厚)のMP(Medium Pipe)に関する高速载荷実験結果 HMP2-2-4($v=4.36$ m/sec)を取り挙げる。

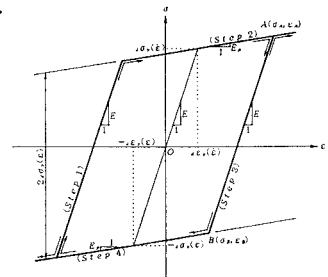


図-1 動的応力～ひずみ履歴関係

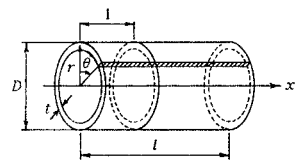


図-2 鋼管部材

図-3は埋設鋼管の管右半部の断面(S1～S5、管頂より45° 間隔)の履歴吸収エネルギー U を弾性限界ひずみエネルギー(純曲げ状態) U^T で無次元化した履歴吸収エネルギー比 U/U^T を変位 u に関して示したものである。以下、ひずみ速度効果を考慮した場合(Considered)について考察する。まず、埋設鋼管の管上半部(S1, S2, S3)に関しては、S1(管頂)では、変位 $u=44.7\text{mm}$ まで急激に直線的に増加して $U/U^T=910$ となり、S1での履歴吸収エネルギーの局所的な限界、すなわち終局限界に達すると考えられる。S2では、S1が終局限界に達する変位 $u=44.7\text{mm}$ 以降急激に直線的に増加して変位 $u=59.5\text{mm}$ で $U/U^T=439$ の終局限界に達する。S3(管側方)では、S1が終局限界に達した後、直線的に増加して変位 $u=75.6\text{mm}$ で $U/U^T=530$ の終局限界に達する。次に、管下半部(S4, S5)では、 U/U^T は管上半部(S1, S2, S3)のものに比し非常に小さく、弾性状態に近い状態にある。以上のことより、S3(管側方)が終局限界に達する変位 $u=75.6\text{mm}$ においては、管下半部(S4, S5)は終局限界に達していないものの管上半部(S1, S2, S3)が終局限界になっているため、埋設鋼管部材としての終局限界と定義できるものと考えられる。また、ひずみ速度効果は管頂に近いほど顕著であり、特に管頂では約80%の影響が認められる。

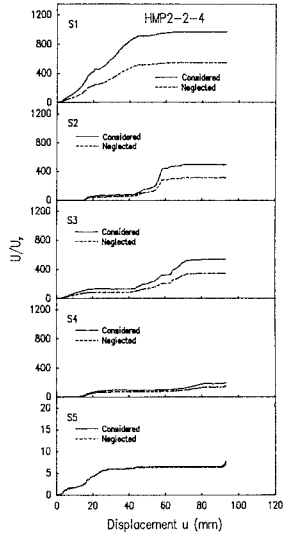


図-3 断面の履歴吸収エネルギー比

図-4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 との比、すなわち履歴吸収エネルギー比 U_p/U^T を変位 u に関して示したものである。図中、静的(SMP2-2)および低速载荷(HMP2-2-0)の場合も併記している。図-4より、静的および低速载荷とも U_p/U^T は約10以下であり、終局限界に達していないことがわかる。一方、高速载荷においては、ひずみ速度効果の影響が非常に大きく、考慮した場合には無視した場合に比し U_p/U^T を約1.6倍大きく見積もる傾向にある。またひずみ速度効果を考慮した場合は、変位の増大に伴い U_p/U^T は急激に増大して変位 $u=76.5\text{mm}$ 以降約397の一定値を保持する。これは、埋設鋼管部材としての履歴吸収エネルギーが限界に達した状態と考えることができ、ここを埋設鋼管の終局限界と定義することとする。すると、埋設鋼管部材としての終局限界吸収エネルギー比は、 $U_p/U^T=397$ と求めることができる。

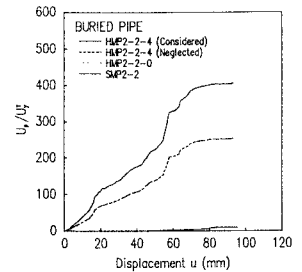


図-4 埋設鋼管の履歴吸収エネルギー比

図-5は土-構造物系としての荷重～変位関係を示したものである。これより、変位 $u=28.0\text{mm}$ で最大荷重(176.5 kN)に達し、変位 $u=74.8\text{mm}$ で耐力が急激に減少し土-構造物系としての終局限界に達していることがわかる。

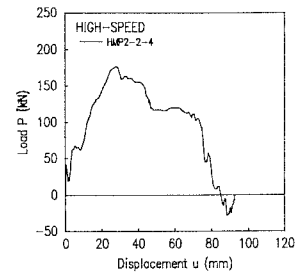


図-5 荷重～変位関係

以上のことより、断面の履歴吸収エネルギー比～変位関係、埋設鋼管の履歴吸収エネルギー比～変位関係および土-構造物系としての荷重～変位関係のいずれも変位 $u=75\text{mm}$ 近傍で終局限界に達していることがわかる。このことより、土-構造物系としての終局限界は、管側方が終局限界に達することに起因するという埋設鋼管の破壊機構の一端を明らかにできたものと思われる。

4. あとがき 本報告では、砂中埋設鋼管の終局限界吸収エネルギーの定量的評価を試みるとともに、破壊機構の一端を明らかにした。土被り比や埋設鋼管の剛性の影響については現在検討中であり、適当な機会に報告したい。最後に、高速引張载荷実験には防衛大学校共同利用器材高速変形荷重装置を使用し、実験に際しては、元防衛大学校第39期本科学士吉岡充、藪陽二郎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49回年講，I-801，pp.1598～1599，1994.9. 2) 太田：構造物の非弾性解析 第3章，pp.79～86，1980.1.