

I - 801

高速载荷を受ける砂中埋設鋼管の 吸収エネルギーに関する一考察

防衛大学校 ○（正）森 雅美 （正）佐藤絨志

1. まえがき 著者ら¹⁾は、地中構造物の耐衝撃性の評価のための基礎的研究として、乾燥砂中に埋設された鋼管の高速载荷実験を行い、埋設鋼管周辺の土圧応答と埋設鋼管のひずみ応答に関して検討した。ここでは、埋設鋼管の終局限界性能および砂の衝撃緩衝能力を検討していなかった。本報告は、乾燥砂中に埋設された鋼管の静的、低速および高速载荷実験を行うとともに、埋設鋼管のひずみ応答に基づいてひずみ速度効果を考慮した終局限界吸収エネルギーおよび砂の衝撃緩衝能力を定量的に評価する一手法を提示し、これらに及ぼす载荷速度の影響を検討したものである。

2. 模型実験の概要 埋設鋼管として、圧力配管用炭素鋼鋼管（JIS G3454 STPG370）の内面を切削加工して作成した外径 $D=114.3\text{mm}$ 、管厚 $t=1\text{mm}$ のFP（Flexible Pipe）、2mmのMP（Medium Pipe）と4.9mmのRP（Rigid Pipe）の3種類を用いた。地盤材料として、気乾状態の豊浦標準砂を用い、模型地盤は図-1に示す実験土槽（高さ70cm、幅80cm、奥行き20cm）内に各層毎に締固めにより作成（ $\rho_s=1.56\text{t/m}^3$ ）し、土被り比 H/D を1,2,3の3種類に調整した。荷重は、模型地盤中央に設置した载荷板（ $228.6\times 190\times 32\text{mm}$ ； $B/D=2$ ）に一点集中载荷した。静的载荷実験にはサーボアクチュエータを、低速および高速载荷実験には高速変形負荷装置を用いた。

3. 埋設鋼管の吸収エネルギー

（1）埋設鋼管の終局限界吸収エネルギーの算定手順 図-2は埋設鋼管のひずみ応答に基づいて、ひずみ速度効果を考慮した終局限界吸収エネルギー U^T および砂の衝撃緩衝能力 U を算定する手順を概略的に示したものである。すなわち、①土-構造物系としての荷重～変位（载荷板）関係より外力エネルギー V を算定する。②埋設鋼管のひずみ応答に対してひずみ速度効果を考慮した弾塑性解析を行い、吸収エネルギー U^T および断面諸量を算定する。③埋設鋼管の吸収エネルギー～変位関係を通常の部材の荷重～変位関係に相当するものとみなし、そのピーク値から終局限界吸収エネルギー U^T を求める。④実験上のエネルギー損失を無視し、外力エネルギー V から埋設鋼管の吸収エネルギー U^T を差し引いたものが砂の吸収エネルギー U と仮定することにより砂の衝撃緩衝能力を求める。

（2）ひずみ速度効果を考慮した弾塑性解析 図-3に示す鋼管部材に対して、（1）の②の具体的手順を示せば以下になる。①繊維挙動：埋設鋼管（材質STPG370）の力学特性のひずみ速度依存性は不明である。そこで、高橋ら²⁾が鉄筋材料に対して提案した上昇伏点変化率を用い、ひずみ速度依存性をもつBi-linear型の応力～ひずみ関係を仮定する。②断面挙動：鋼管部材の縦断面の単位長部分（矩形断面）に関して、鋼管内外面の実測ひずみにに対して①のひずみ速度効果を導入した弾塑性解析を行い、吸収エネルギー U および断面諸量の定式化を行う。③部材挙動：②で離散的に得られた吸収エネルギー U_i （ $i=1\sim 8$ ）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 にわたって積分することにより、鋼管部材としての吸収エネルギー

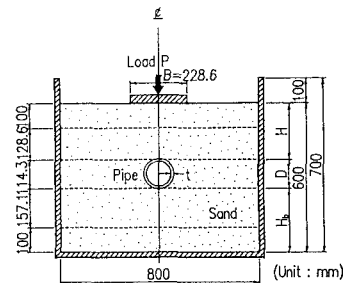


図-1 模型地盤の作成方法

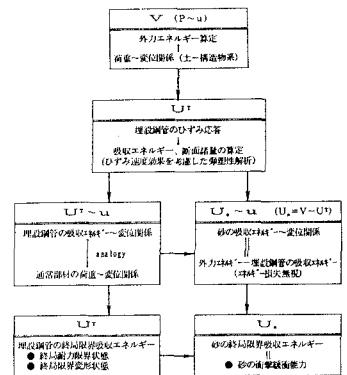


図-2 埋設鋼管の終局限界吸収エネルギーの算定手順

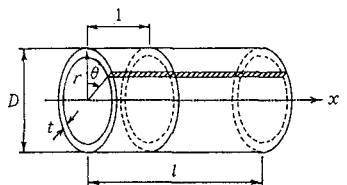


図-3 鋼管部材

ギー U^T を算定する。

(3) 解析結果と考察 ここでは一例として、土被り比 H/D および鋼管の剛性 D/t に関しての中間的ケースである $H/D=2$ におけるMPの場合を取り挙げ、静的 ($v=0.18 \times 10^{-4} \text{m/sec}$)、低速 ($v=0.04 \text{m/sec}$) および高速載荷実験結果 ($v=4.36 \text{m/sec}$) から載荷速度の影響を検討する。

図-4と5は各々静的、低速および高速載荷の各場合の埋設鋼管の吸収エネルギー U^T の外力エネルギー V と弾性限界ひずみエネルギー（純曲げ状態） U_s^T との比、すなわちエネルギー吸収率 U^T/V と吸収エネルギー比 U^T/U_s^T を変位 u に関して示したものである。図中、低速載荷についてはひずみ速度効果を考慮した場合（Considered）を示し、高速載荷についてはひずみ速度効果を考慮した場合（Considered）と無視した場合（Neglected）とを区別している。

図-4より、静的および低速載荷とも埋設鋼管の U^T/V は約5%以下であり、埋設鋼管にはほとんど外力エネルギー V が伝達されないことが認められる。一方、高速載荷においては、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^T/V を約2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には、変位の増大に伴い U^T/V は急激に増大して約80%に達し、変位 $u=25 \text{mm}$ 付近まではほぼ一定値を保持した後急激に減少して変位 $u=40 \text{mm}$ 付近において約20%程度に低下し、砂の吸収エネルギーの方が大きくなることがわかる。変位 $u=25 \text{mm}$ 付近で U^T/V が急激に減少するのは、埋設鋼管の塑性ヒンジの発生に伴い耐荷力を喪失するためと考えられる。

図-5より、静的および低速載荷とも埋設鋼管の U^T/U_s^T は約1.0以下であり、弾性限界ひずみエネルギー U_s^T に近い状態であることがわかる。一方、高速載荷においては、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^T/U_s^T を約2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には、変位の増大に伴い U^T/U_s^T は急激に増大して変位約 $u=25 \text{mm}$ において約1.41の第1のピークに達し、変位 $u=40 \text{mm}$ 付近まではほぼ一定値を保持した後、再び増加傾向に転じ変位約 $u=62 \text{mm}$ において約2.66の第2のピークに達することがわかる。埋設鋼管は砂の中に埋設されており、通常の部材実験のように実験的に荷重～変位関係を直接計測できない。そこで、 $U^T/U_s^T \sim u$ 関係を通常の部材の荷重～変位関係に相当するものとし、第1のピークを最大耐荷力の発揮時点としての終局耐力限界状態に、第2のピークを変形の増大に対して耐荷力が急激に低下する終局限界変形状態に相当するものとみなすこととする³⁾。すると、 U^T/U_s^T は終局耐力限界状態に対しては約1.41、終局限界変形状態に対しては約2.66にも達することがわかる。このことは、載荷速度の増大に伴う外力エネルギーに対するエネルギー吸収率の増大に対応して埋設鋼管の持つ靱性が十分に発揮されたことを示しており、衝撃的外力を受けるこの種構造物の安全設計における十分な靱性の重要性を示している。

4. あとがき 本報告では、埋設鋼管の終局限界吸収エネルギーおよび砂の衝撃緩衝能力に及ぼす載荷速度の影響を一部明らかにした。これらに及ぼす土被り比、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、実験に際しては東京ガス(株)より実験消耗品の補助を受け、元防衛大学校第38期本科学学生尼子将之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：構造工学論文集 Vol.38A, pp.1417～1430, 1992.3. 2) 首藤・松本・高橋・大野：土木学会第45回年講, I-228, pp.486～487, 1990.9. 3) 高橋・大野・太田・日野：土木学会論文集, No.432/I-16, pp.99～108, 1991.7.

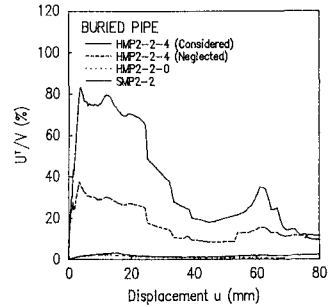


図-4 埋設鋼管のエネルギー吸収率

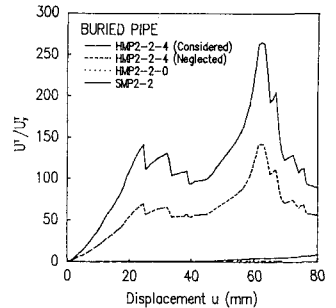


図-5 埋設鋼管の吸収エネルギー比