

III-398 剝離と滑動を考慮した土-構造物系の相互作用解析

防衛大学校(正)○森 雅美・小暮幹太・(正)佐藤紘志

1. まえがき 著者らは、衝撃荷重を受ける土-構造物系の動的応答解析手法を確立することを目的として、在来の有限要素法による非線形動的応答解析法にひずみ速度効果を考慮した土の構成方程式を導入することを試み、主にひずみ速度効果による影響について検討してきた¹⁾。しかし、このような高速荷重の作用する衝撃現象に対して、土と構造物の境界面において、部分的に生じる可能性がある剝離、滑動現象を考慮していなかった。本研究では、高速荷重の作用下における構造物と土との部分的な剝離や滑動現象の問題をジョイント要素を導入した有限要素法により検討することを目的とした。ここでは、まず、粘土の構成モデルおよびジョイント要素の基本式について述べ、さらに数値計算例として、衝撃波を受ける粘土中に埋設されたパイプの動的挙動に関する模型実験²⁾を取り上げ、実験結果と数値解析結果との比較検討を行った。

2. 粘土の構成モデルおよびジョイント要素の基本式 本研究では、粘土の構成モデルとしてひずみ速度効果を考慮した Cap モデルを用い、粘土とパイプの境界面にジョイント要素を導入して2次元の非線形動的応答解析³⁾を行った。

(1) 粘土の構成モデル ひずみ速度効果を考慮した Cap モデルの降伏関数は、Drucker-Prager の降伏関数と楕円型 Cap の降伏関数によって表現され、各々次式のように表わされる¹⁾。

$$F_f = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} - k = 0, F_c = (J_1 - L)^2 + R^2 J_2 - (X - L)^2 = 0 \quad (1)$$

ここに、 J_1 =応力の1次不変量、 J_2 =偏差応力の2次不変量、 $\alpha = 2\sin\phi_u / [\sqrt{3}(3-\sin\phi_u)]$ 、 $k = 6c_u \cos\phi_u / [\sqrt{3}(3-\sin\phi_u)]$ 、 ϕ_u =内部摩擦角、 c_u =非排水粘着力、 R =楕円の長軸と短軸の比、 L =楕円の頂点での J_1 、 $X = J_1$ 軸と楕円との交点である。上記の強度定数 ϕ_u と c_u は実験的に確認されたひずみ速度依存性をもつので、ひずみ速度 $\dot{\gamma}_{oct}$ に応じて F_f と F_c の両方が図-1のように移動することになる。

(2) ジョイント要素 本研究では、土要素およびパイプ要素に8節点アイソパラメトリック要素を用いるので、ジョイント要素は、図-2に示すような6節点で構成される厚さ $t=0$ のアイソパラメトリック要素とした。全体座標系 (x, y) におけるジョイント要素の剛性マトリックス k とコンシステント質量マトリックス m は、仮想仕事の原理より各々次式のように導かれる⁴⁾。

$$k = T^t \bar{k} T, m = T^t \bar{m} T \quad (2)$$

ここに、 $\bar{k} = \int_{-1}^1 \bar{B}^T \bar{D} \bar{B} J d\xi$ 、 $\bar{m} = \int_{-1}^1 \rho \bar{N}^T \bar{N} J d\xi$ 、

$$T = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ L & 0 \\ \text{Sym.} & L \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix}, \lambda = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix},$$

$$\bar{B} = [\bar{N}_1 \ \bar{N}_2 \ \bar{N}_3 \ -\bar{N}_1 \ -\bar{N}_2 \ -\bar{N}_3],$$

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix}, \bar{N} = \begin{bmatrix} \bar{N}_1 & \bar{N}_2 & \bar{N}_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{N}_1 & \bar{N}_2 & \bar{N}_3 \end{bmatrix},$$

$J = ds/d\xi$ 、 $\bar{N}_i = N_i I$ ($i=1,2,3$)、 I =単位マトリックス、

$N_1 = -\xi(1-\xi)/2$ 、 $N_2 = \xi(1+\xi)/2$ 、 $N_3 = 1-\xi^2$ 、 $\xi = (2/l)s$ 、

ρ =質量密度、 k_s =せん断剛性、 k_n =垂直剛性、 θ =全体座標系 (x, y) に対する局所座標系 (s, n) の反時計回りの傾角である。

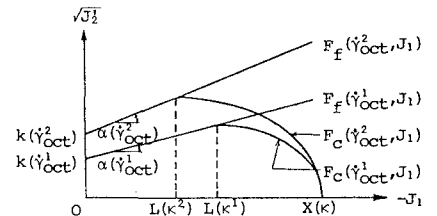


図-1 Capモデルのひずみ速度による変化

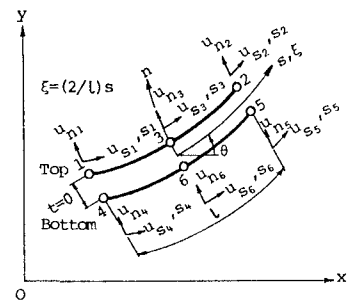


図-2 ジョイント要素

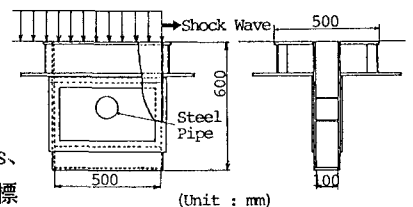


図-3 土槽および載荷方法

3. 解析モデル

今回解析の対象としたのは、入射波を明確に把握でき、しかも再現性のある応力波が得られるショックチューブによる衝撃波発生装置を用いて、応力波を土中に伝播させたときの粘土中のパイプの動的応答に関する模型実験²⁾の結果である（図-3）。解析モデルとしては、実験結果と比較を行うため、図-4に示すようにパイプを中心として放射状に分割したメッシュを用いた。また、外力としては、図-5に示すように実験データ（実線）を一点鎖線のように理想化したうえで、図-4 要素分割図

等価節点外力に置換して各節点に与えた。Cap モデルに必要な土質パラメータは次のようにした。粘土の弾性係数 E は、波動伝播速度より求まる体積弾性係数とポアソン比（ここでは、 $\nu=0.45$ と仮定）から計算し、 $E=2.32 \text{ MPa}$ とした。硬化パラメータに用いる等方圧縮応力と塑性体積ひずみとの関係を示すパラメータである W と D は、等方圧縮試験結果から求め、 $W=0.021$ 、 $D=2.77 \text{ MPa}^{-1}$ とし、楕円比としては $R=2.5$ を与えた。また、ジョイント要素のせん断および垂直剛性は両者とも $k_s=k_n=9.8 \times 10^7 \text{ kN/m}^3$ と仮定した。なお、質量密度は両者とも $\rho=1.45 \text{ kN} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$ とし、減衰定数は $h=0.2$ とした。

4. 解析結果と実験結果の比較 図-6は、外径 $D=100\text{mm}$ 、厚さ $t=2 \text{ mm}$ (RP) の場合のパイプ頂部における鉛直変位～時間関係を、また図-7は同じくパイプ底部における作用土圧～時間関係を示したものである。これより、 $t=10 \text{ ms}$ まではジョイント要素を導入した場合と導入しない場合の計算結果には、それほど差が認められないが、時間の経過とともに、ジョイント要素を導入した場合の方が、変位は若干大きくなり、また土圧は小さくなっている。このことは、時間の経過と共にパイプ表面での相対変位が大きくなるため、ジョイント要素導入の影響が現れてくることによるものと考えられる。

5. あとがき 本研究は、粘土の構成モデルにひずみ速度効果を考慮したうえで、さらに境界面にジョイント要素を導入して高速荷重を受ける土と構造物の動的相互作用を数値解析により考察したものである。その結果、ジョイント要素導入の効果がある程度まで明らかにすることができたが、まだ実験結果との対応などに不十分な部分を残している。実験条件のモデル化の問題を検討することやジョイント要素の構成関係を弾塑性にすることなどが今後の課題である。なお、本研究で用いた実験データは、防衛庁施設学校研究部の藤本第3研究室長が防衛庁技術研究本部第4研究所で行ったものである。

（参考文献） 1) 藤本・森・石川：構造工学論文集 Vol.31A, pp.451-464, 1985.3. 2) 藤本：構造工学論文集 Vol.31A, pp.439-450, 1985.3. 3) Bathe, K.H. et al.: Struct. Eng. Lab., Univ. of California, Feb. 1974. 4) Buragohain, D.N. et al.: Proc. of ASCE, Vol.104, No.ST 1, pp.205-209, Jan. 1978.

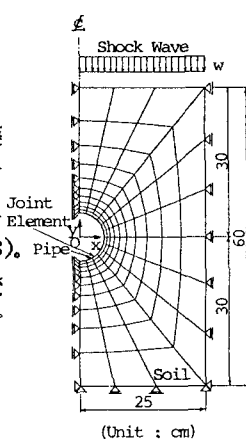


図-4 要素分割図

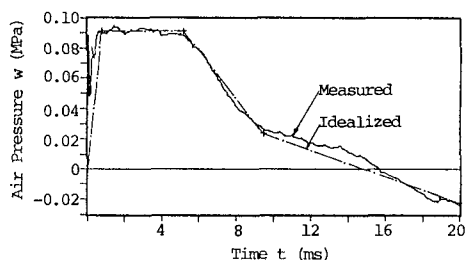


図-5 実験による外力と理想化した外力

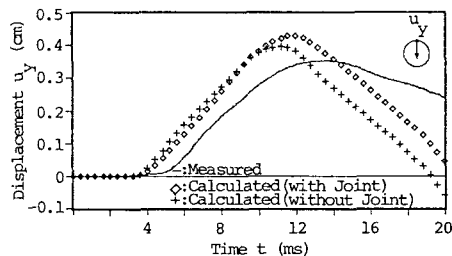


図-6 RP頂部の変位の計算結果と実験結果の比較

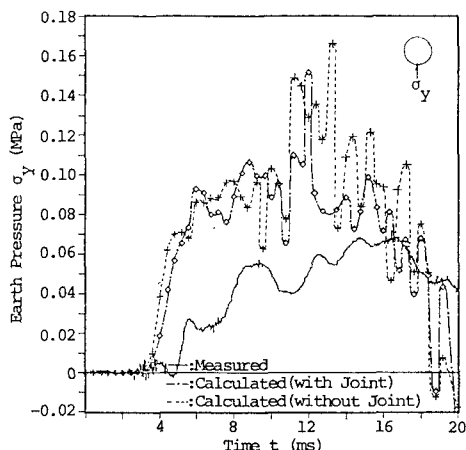


図-7 RP底部の土圧の計算結果と実験結果の比較