

汎用コードを用いた礫衝突による鋼管のへこみ変形解析

防衛大学校建設環境工学科 ○香月 智 九州大学大学院 小林憲治
 防衛大学校理工学研究科 白石博文 同建設環境工学科 梶田幸秀
 防衛大学校理工学研究科 坊原尚記 砂防鋼構造物研究会 肥後野孝倫

1. 緒言

近年、環境への配慮からスリット化された鋼製透過型砂防えん堤が各地で建設され、最も新しい例では平成16年7月、福井県前谷川で発生した土石流を捕捉(写真-1)したのは記憶に新しい¹⁾。この構成部材である中空鋼管は、へこみ変形することで巨礫の衝突エネルギーを吸収し、構造全体で捕捉後の土石流および堆砂圧荷重に抵抗している²⁾。ところで、礫衝突と中空鋼管のへこみ変形については、これまでに星川らが修正エリナス式³⁾を提案し、提案式は現行設計法²⁾にも適用されているが、汎用解析コードを用いた報告例は少なく、既成果の信頼性向上のためにも異なる手法による検証が必要と考えられる。そこで、本研究は著者らが先に行った中空鋼管に対する重錘落下衝突実験を、非線形問題解析プログラムLS-DYNA Ver.960を用いて解析し、汎用コードによる検証を試みたものである。

2. 中空鋼管に対する重錘落下衝突実験⁴⁾

2.1 供試験体

中空鋼管は、一般構造用炭素鋼管(JIS G3444 材質STK400)であり、直径139.8mm、長さ1000mm、肉厚3.5mmおよび4.5mmとした。

2.2 重錘落下衝突実験

実験は、図-1に示すようにスパン長600mmで単純支持した鋼管はり中央部に、先端部が半球状で質量200kgの重錘を落下させた。表-1に示す重錘落下高さは既存のへこみ変形による吸収エネルギーに関する式(1)および式(2)から決定した。計測項目は図-2に示すように衝突点におけるへこみ変形量 δ_L とし、損傷の進展を示す物理量として定義したへこみ率(δ_L / D)を算定した。

$$E_d = \frac{1}{4} K \sigma_{y,d} t^2 \frac{\delta_L^{1.8}}{1.8 D^{0.8}} \dots \dots \dots (1)$$

$$H = \frac{E_d}{W} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、

$$K = 161 \left(\frac{D_0}{D} \right)^{0.11} \dots \dots \dots (3)$$

E_d : 鋼管のへこみ変形による吸収エネルギー, $\sigma_{y,d}$: 鋼管材料の動的降伏応力度, t : 鋼管肉厚, δ_L : 鋼管のへこみ変形, D : 鋼管外径, D_0 : 巨礫の直径, H : 重錘落下高さ, W : 重錘重量。



写真-1 土石流捕捉後、満砂した砂防えん堤

表-1 重錘落下高さ

鋼管径D(mm)	肉厚t(mm)	No	重錘落下高さH(m)
139.8	3.5(40)	1	0.11
		2	0.20
		3	0.40
		4	0.70
		5	1.00
		6	1.50
		7	2.00
139.8	4.5(31)	1	0.15
		2	0.30
		3	0.70
		4	0.90
		5	1.70
		6	2.60
		7	3.80

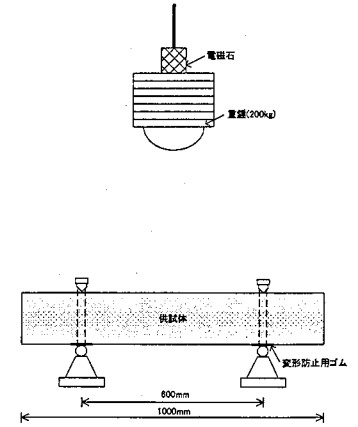


図-1 重錘落下衝突実験概要

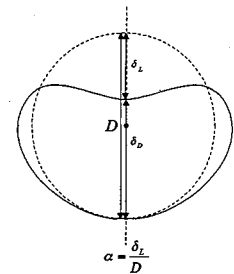


図-2 計測項目

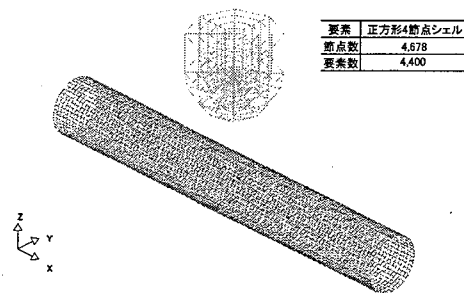


図-3 解析モデル(モデル1)

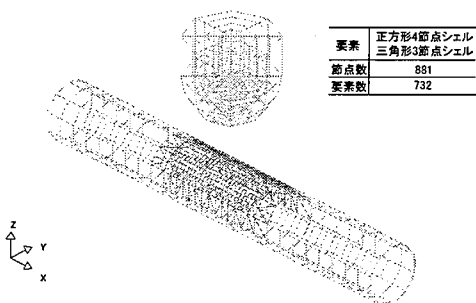


図-4 解析モデル(モデル2)

3. 衝撃応答解析手法

衝撃応答解析は、有限要素法による非線形問題解析汎用プログラムLS-DYNA Ver.960を用いた。

表-2 材料物性値

	質量密度 (kg/mm ³)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	降伏応力 (N/mm ²)	硬化係数 (N/mm ²)
鋼管	7.84 × 10 ⁻⁵	210.2	0.3	378.4	1699.3
重錘	3.37 × 10 ⁻⁴	205.8	0.5	-	-

3.1 解析条件

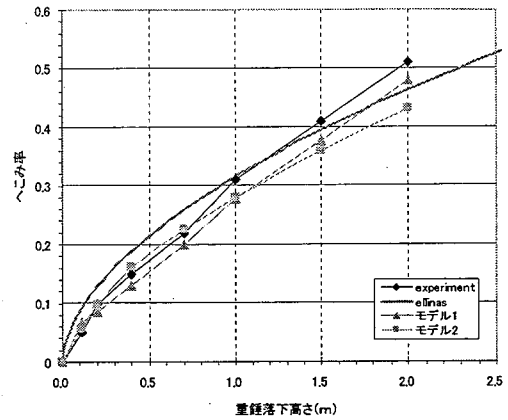
本解析では、鋼管の要素分割方法の異なる2種類のモデルを用いた。図-3に示すモデル1は、鋼管を全て1辺約10mmの正方形4節点シェル要素とした。また、図-4に示すモデル2は重錘が接触する鋼管部のみを1辺約10mmの正方形4節点シェル要素および三角形3節点シェル要素とし、その他は約40mmの正方形4節点シェル要素とした。重錘は図-3,4に示すように、直径220mmの円柱先端部が半球状となるモデルとし、8節点ソリッド要素とした。表-2に解析に用いた物性値を示す。また、接触要素には接触反力を作用させ、接触面には摩擦の影響を考慮し静止摩擦係数を0.1とした。支점에相当する要素はY軸方向の回転のみ許し、他は固定する境界条件とした。解析では、重錘を自由落下させ、重錘衝突点における鋼管上部および下部の鉛直方向変位差により、へこみ変形量を求めた。

3.2 鋼管の物性モデル

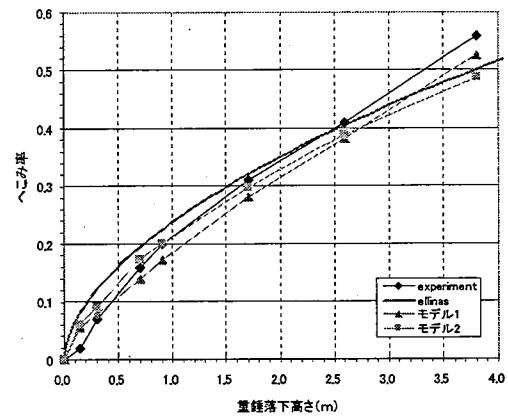
鋼管の応力～ひずみ関係には、Bi-Linear型の弾塑性モデルを用いた。また、降伏条件はVon-Mises型を適用し、等方硬化するものとした。

4. 実験結果との比較・検証

図-5にへこみ率～重錘落下高さ関係の実験結果および解析結果を示す。図中にはエリナス式から算定される結果についても合わせて示す。まず、実験値とエリナス式の値を比較すると、実験値はエリナス式より小さなへこみ率となっている。これは、エリナス式から算定されるへこみ率が重錘の衝突エネルギーを完全にへこみ変形のみで吸収すると仮定して得られる計算結果であるのに対し、実験ではわずかにはり変形および両支点部でのへこみ変形も発生したため、完全な衝突部のへこみ変形のみエネルギー吸収となっていないためと考えられる。一方、解析結果と実験値を両モデルで比較すると、全体的な傾向としては、両ケースとも概ね実験を再現していると考えられるが、重錘落下高さを1.0mより大きくすると実験値との誤差が徐々に大きくなり、小さなへこみ率となっている。特にモデル2においては両肉厚とも最大落下高さで約10%へこみ率が異なり、衝突部付近のみメッシュを細かく分割しても実験を精度良くシミュレートできないことがわかる。しかしながら、要素数4400のモデル1では実験値との誤差も最大で約5%となり、実験を概ね再現していると考えられる。このように、LS-DYNAによる解析では解析結果に対してメッシュ依存性が大きく、精度良く解析を行うには、適切な要素分割が必要であることを確認できた。



(a) t=3.5mm



(b) t=4.5

図-5 へこみ率～重錘落下高さ関係

5. 結言

本研究は、汎用コードLS-DYNAを用いて重錘落下衝突実験で生じる鋼管のへこみ変形をシミュレートすることを目的として2種類のモデルを用いて解析を行った。

以下に本研究での成果を示す。

1. LS-DYNAによって得られる結果は、重錘落下高さが増大するに伴い、実験値との誤差も大きくなる傾向が得られた。
2. 鋼管全体を細かくメッシュに分割したモデルを用いた場合、最大でも約5%の実験結果との誤差となり、実験を概ね再現する結果が得られた。
3. LS-DYNAを用いても、適切な要素分割を行えば既往の修正エリナス式から推定されるへこみ率とほぼ等しい値が得られることが確認できた。

参考文献

- 1) 社団法人砂防学会：砂防学会誌，vol.57, No.3(通巻 254号)，p.47-52, 2004.9.
- 2) 鋼製砂防構造物設計便覧：(財)砂防・地すべり技術センター，平成13年版。
- 3) 星川辰雄，石川信隆，彦坂 照，阿部宗平：局部変形とひずみ速度効果を考慮した鋼管固定はりの衝撃応答変位，土木学会論文集，No.513/I-31, pp.101-115, 1995.4.
- 4) 白石博文，梶田幸秀，香月智，石川信隆，松村和樹，嶋文示：礫衝突による損傷を受けた中空鋼管の残存耐力評価実験，構造工学論文集，vol.48A, 2002.3.