

礫衝突角度の違いによる鋼管部材の挙動解析

日鉄建材株式会社 ○國領ひろし, 大隅久, 笠原啓

1. はじめに

鋼製透過型砂防堰堤は、土石流中に含まれる礫等の衝突を受ける構造物であり、これまで最上流面に配置される鋼管部材を対象に、礫等が直角方向に衝突するものとして耐荷性能や安全性評価に関する研究が数多くなされてきた。一方で、近年では土石流の越流による落下礫の衝突に対する安全性も求められている。しかしながら、鋼製透過型砂防堰堤の下流側に配置される鋼管部材の多くは上流側から下流側へ傾斜しており、傾斜した鋼管部材への礫衝突に対する実験や解析等の研究はあまり見当たらない。

そこで、本研究では鋼製透過型砂防堰堤の下流側に配置される鋼管部材に着目し、越流落下礫の衝突に対する挙動、すなわち礫の入射角（衝突角度）が異なる場合の鋼管部材の挙動について解析的に検討するものである。

2. 解析条件

2.1 解析モデル

解析は、有限要素法による非線形解析汎用コード MSC. Marc を用いて実施した。解析モデルは、図-1 に示すようなスパン 6,000 mm の両端固定の中空鋼管はりモデルで、礫を鋼管はり中央部に衝突させるものとした。鋼管部材の断面寸法は、直径 $D500\text{ mm}$ × 板厚 $t17\text{ mm}$ （径厚比 $D/t=29$ ）、礫は直径 1 m の球状体で、鋼管と礫の接触面には摩擦係数 0.3 とする接触条件を設定した。

礫は、鉛直方向（Z 方向）に速度 $v_z=14\text{ m/s}$ で衝突させるものとした。これは、落下高 $h=10\text{ m}$ の自由落下に相当する速度（ $v_z=\sqrt{2gh}$ ）である。また、土石流の越流を想定した場合、落下礫は水平方向にも速度を有することが考えられるため、水平方向（X 方向）の速度を考慮する場合は、土石流の流速を勘案して水平方向速度 $v_x=2.5\text{ m/s}$ とした。

解析ケースは、表-1 に示すように礫の衝突角度 4 ケースおよび礫の水平方向速度 2 ケースの全 8 ケースである。

2.2 材料特性

表-2 に、解析で使用した材料物性値を示す。鋼管は一般構造用炭素鋼管（STK490）、礫は弾性体とした。鋼材の構成側は、トリリニア型の応力-ひずみ関係を用い、降伏条件には von-Mises の条件を適用し、等方硬化するものとした。

3. 解析結果

3.1 相当塑性ひずみ分布

解析結果の一例として、図-3 に礫の衝突角度 $\theta=90^\circ$ 、図-4 に $\theta=30^\circ$ の場合の相当塑性ひずみ分布をそれぞれ示す。なお、各図の(a)は礫の水平方向速度 $v_x=0\text{ m/s}$ 、(b)は $v_x=2.5\text{ m/s}$ の場合を示している。これより、図-3 の衝突角度 $\theta=90^\circ$ の場合に比べ、図-4 に示す $\theta=30^\circ$ の場合では、礫衝突部およびより固定部に発生する塑性化領域（ここでは、 $1,575\mu$ 以上の領域）が小さくなる。また、 $\theta=90^\circ$ の場合で

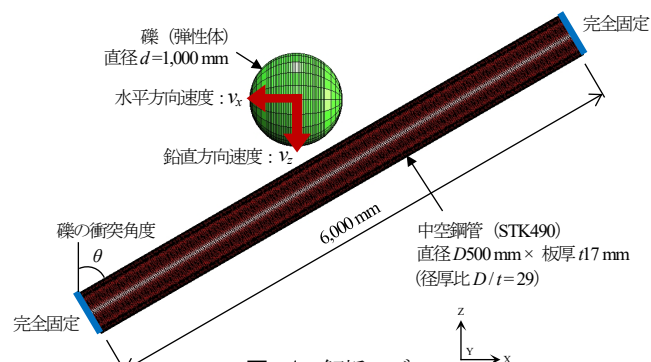


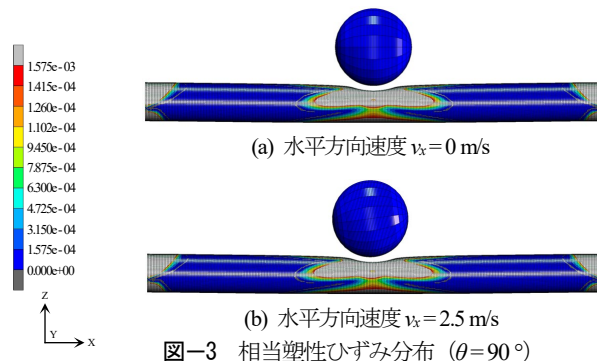
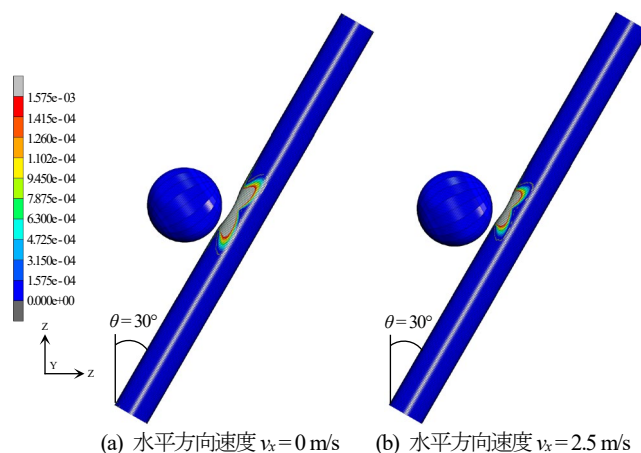
図-1 解析モデル

表-1 解析ケース

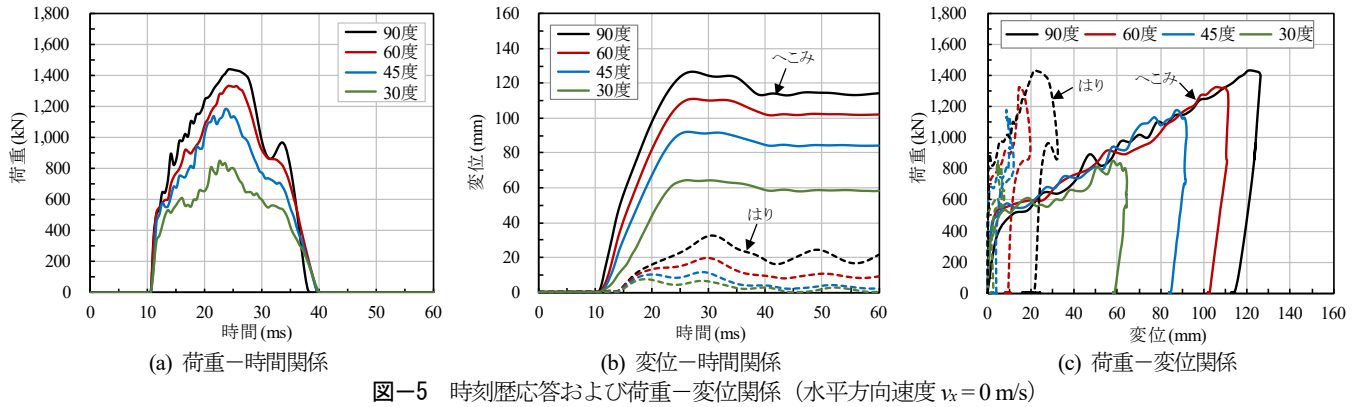
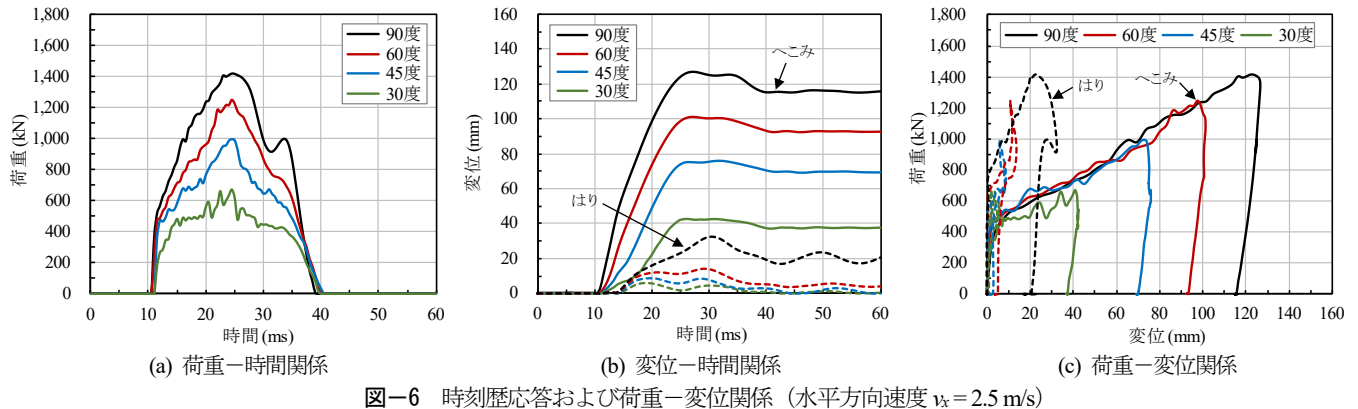
礫の衝突角度 $\theta(^{\circ})$	礫速度 (m/s)		ケース数
	鉛直方向 v_z	水平方向 v_x	
90	14	0	8 ケース
60			
45			
30			

表-2 材料物性値

名称	密度 (g/cm^3)	ヤング率 (MPa)	ポアソン比	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)
鋼管	7.85	2.0×10^5	0.30	315	490	21
礫	2.60	5.0×10^4	0.23	—	—	—

図-3 相当塑性ひずみ分布 ($\theta=90^\circ$)図-4 相当塑性ひずみ分布 ($\theta=30^\circ$)

は、礫の水平方向速度 v_x の違いによる相当塑性ひずみ分布


 図-5 時刻歴応答および荷重-変位関係 (水平方向速度 $v_x = 0 \text{ m/s}$)

 図-6 時刻歴応答および荷重-変位関係 (水平方向速度 $v_x = 2.5 \text{ m/s}$)

に大きな違いは見受けられないが、 $\theta = 30^\circ$ では、 $v_x = 0 \text{ m/s}$ に比べて $v_x = 2.5 \text{ m/s}$ のほうが礫衝突部の塑性化領域が小さくなることを確認された。

3.2 変形特性

図-5に、水平方向速度 $v_x = 0 \text{ m/s}$ の場合の時刻歴応答および荷重-変位関係を示す。ここでの荷重は礫の接触反力、変位は衝突点のへこみ（実線）およびはり変位（破線）を示している。まず、図-5(a)の荷重-時間関係より、最大荷重は衝突角度 $\theta = 90^\circ$ で 1,435 kN、 $\theta = 60^\circ$ で 1,326 kN、 $\theta = 45^\circ$ で 1,178 kN、 $\theta = 30^\circ$ では 849 kN となり、衝突角度 θ が小さくなると最大荷重も小さくなる。また、図-5(b)の変位-時間関係から、最大へこみおよびはり変位は、衝突角度 $\theta = 90^\circ$ でそれぞれ 126 mm および 32 mm であるが、 $\theta = 30^\circ$ ではそれぞれ 64 mm および 7 mm となり、最大荷重と同様に衝突角度 θ が小さくなると各変位とも小さくなることを確認された。図-5(c)は、各時刻歴応答から荷重-変位関係を求めたもので、最大荷重までの吸収エネルギーを算出すると、衝突角度 $\theta = 90^\circ$ で 133 kJ、 $\theta = 60^\circ$ で 102 kJ、 $\theta = 45^\circ$ で 72 kJ、 $\theta = 30^\circ$ で 35 kJ となる。つまり、 $\theta = 90^\circ$ では、礫の衝突エネルギー ($1/2 m v_z^2 = 133 \text{ kJ}$) をほぼ吸収しているが、衝突角度 θ が小さい場合には、吸収エネルギーが小さくなる、すなわち、鋼管に作用する衝突エネルギーが小さくなることを認められた。ここで、礫の鉛直方向速度 v_z を鋼管直角方向に作用する速度成分 ($u = v_z \sin \theta$) に分解して衝突速度を求め、各衝突角度による礫の衝突エネルギーを算出すると、 $\theta = 60^\circ$ で 100 kJ、 $\theta = 45^\circ$ で 67 kJ、 $\theta = 30^\circ$ では 33 kJ となり、概ね一致することが確認された。

図-6に、水平方向速度 $v_x = 2.5 \text{ m/s}$ の場合の時刻歴応答

および荷重-変位関係をそれぞれ示す。図-6(a)および図-6(b)をみると、衝突角度 θ が小さくなると最大荷重および最大変位も小さくなっており、 $v_x = 0 \text{ m/s}$ の場合と同様な傾向を示している。ここで、 $v_x = 0 \text{ m/s}$ の場合と比較すると、衝突角度 $\theta = 90^\circ$ の場合は、最大荷重 1,425 kJ、最大へこみ 127 mm、最大はり変位 32 mm でほぼ同じ値となる。つまり、水平方向速度の影響をあまり受けていない。一方、衝突角度 θ が小さい場合は、最大荷重で 5%~20%程度、最大へこみで 10%~35%程度小さくなり、衝突角度が小さくなるほど、その傾向が顕著となる結果となった。つまり、衝突角度 θ が小さいほど水平方向速度 v_x の影響を受けやすく、鋼管に作用する荷重および変位が小さくなることを確認された。これは、水平方向速度 v_x が鋼管部材から離れていく方向に作用しているためと考えられる。また、図-6(c)に示す荷重-変位関係から吸収エネルギーを求めると、衝突角度 $\theta = 90^\circ$ で 133 kJ、 $\theta = 60^\circ$ で 87 kJ、 $\theta = 45^\circ$ で 54 kJ、 $\theta = 30^\circ$ で 21 kJ となり、 $v_x = 0 \text{ m/s}$ の場合と比べて鋼管に作用する衝突エネルギーも小さくなることがわかった。

4. まとめ

本研究の成果をまとめると、以下ようになる。

- 1) 礫の衝突角度が小さくなるほど、鋼管に作用する荷重および変位（へこみおよびはり変位）は小さくなる。
- 2) 礫の衝突角度が 90° （鋼管に鉛直）の場合は、礫の水平方向速度の影響をほとんど受けない。
- 3) 一方、衝突角度が小さくなると、水平方向速度の影響が大きくなり、礫に水平方向の速度が生じる場合は、同じ落下高であっても礫の衝突エネルギーは小さくなる。今後、鋼管板厚や継手の影響も考慮した検討が必要である。