

機能部材の耐荷性能に関する解析的検討

日鉄建材株式会社 ○國領ひろし，笠原啓，大隅久

1. はじめに

鋼製透過型砂防堰堤における機能部材は、機能面（捕捉性能）では「土石流を捕捉する目的で配置される部材」とされ、構造面（耐荷性能）からは「礫の衝突時に部材が破断せず、所定の位置に留まっていればよく、塑性変形を許容できる部材」とされている。これまで、鋼製透過型砂防堰堤を構成する構造部材への礫衝突を対象とした耐荷性能に関する研究は数多くなされてきたが、礫捕捉のための機能部材に対する実験や解析などの研究はあまり見当たらない。

そこで、本研究では図－1に示すような構造部材（縦部材）から張り出して設置される機能部材を対象に、礫衝突時の耐荷性能とその安全性を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－2に示すような機能部材を両側の構造部材（以下、縦部材）から張り出したタイプ（Type1）、片側の縦部材から張り出したタイプ（Type2）、および両側の縦部材に跨るように配置したタイプ（Type3）の3タイプであり、縦部材の純間隔を礫直径の1.0倍となるように配置し、その間に機能部材を設置するものとした。各部材の断面寸法は表－1に示すとおりで、機能部材は直径 $D190.7\times$ 板厚 $t8.2$ mm の鋼管、縦部材は2種類（ $D500\times t22$ mm および $D600\times t22$ mm）の鋼管をそれぞれ使用し、礫は直径 1.0m の球状体とした。要素は、3次元ソリッド要素を用い、支点となる縦部材の上端および下端は、全自由度を拘束する境界条件とした。また、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。

载荷は、礫を Y 方向に静的に強制移動（漸増载荷）させるものとした。これは、既往の研究²⁾より静的な押し込み解

析と礫衝突解析で得られた荷重－へこみ変形関係が概ね一致することが報告されており、本研究でも礫衝突を想定し、機能部材が破断に至るまでの耐荷性能を把握することを目的としたためである。解析ケースは、機能部材モデル 3 タイプ、縦部材 2 種類の全 6 ケースである。

2.2 材料特性

表－3に、解析に使用した材料物性値を示す。鋼管は一般構造用炭素鋼鋼管（STK490）、鋼板は溶接構造用圧延鋼材（SM490）とし、礫は剛体とした。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。また、本研究では鋼管材料の延性破壊の評価として Cockcroft-Latham の式を用い、破壊の閾値を相当塑性ひずみが 0.2040（公称伸び 23 %）となった時点とした。すなわち、相当塑性ひずみが 0.2040 を超えた場合に要素を削除することで鋼管の破断を表現するものとした。

3. 解析結果

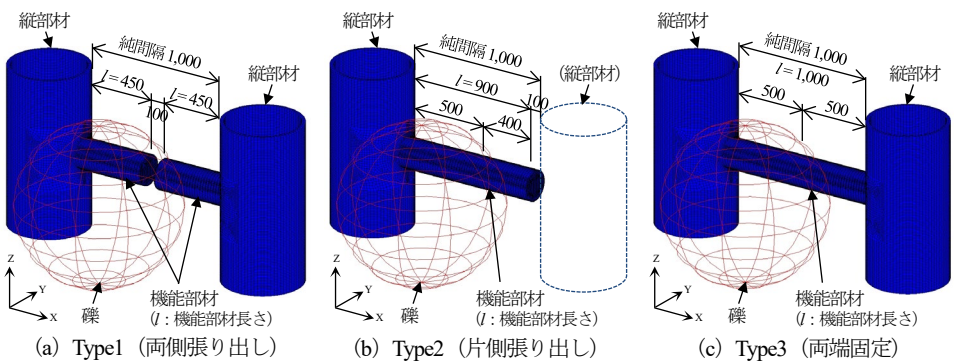
3.1 変形特性

図－3に、各タイプの荷重－載荷点変位関係を示す。ここでの変位は、礫が最初に機能部材に接触した節点の Y 方向変位を示している。これより、各タイプとも縦部材の違い（ $D500\times t22$ mm および $D600\times t22$ mm）による最大荷重に至るまでの荷重および変位の差は僅かであり、縦部材直径が機能部材の耐荷性能に与える影響は小さいことがわかる。

縦部材 $D500$ mm のケースについて着目すると、まず、Type1 の場合、载荷初期から荷重 500 kN 付近までは荷重が急増する。このときの相当塑性ひずみ分布は、図－4(a)に示すとおりであり、縦部材と機能部材の接合部にひずみが発生し、はり変形が進行していることがわかる。その後、荷重とともに変位も大きくなり、最大荷重は 680 kN となった。



図－1 機能部材の一例（下流視）



図－2 解析モデル（単位：mm）

表－1 断面寸法

名称	形状・寸法 (mm)
機能部材	$D190.7\times t8.2$ (径厚比 $D/t=23$)
構造部材 (縦部材)	$D500\times t22$ (径厚比 $D/t=23$) $D600\times t22$ (径厚比 $D/t=27$)
礫	直径 1,000 (球状体)

注) D は直径、 t は板厚を示す。

表－3 材料物性値

名称	材質	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	STK490	7.85	2.0×10^5	0.3	315	490	23
鋼板	SM490	7.85	2.0×10^5	0.3	315	490	17

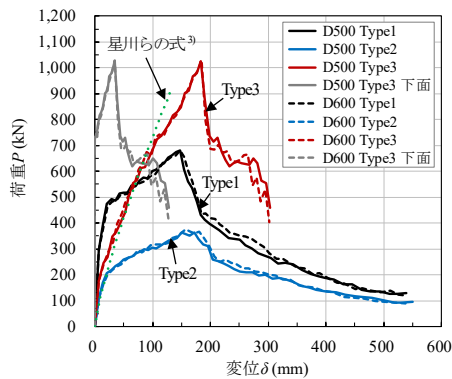


図-3 荷重-載荷点変位関係

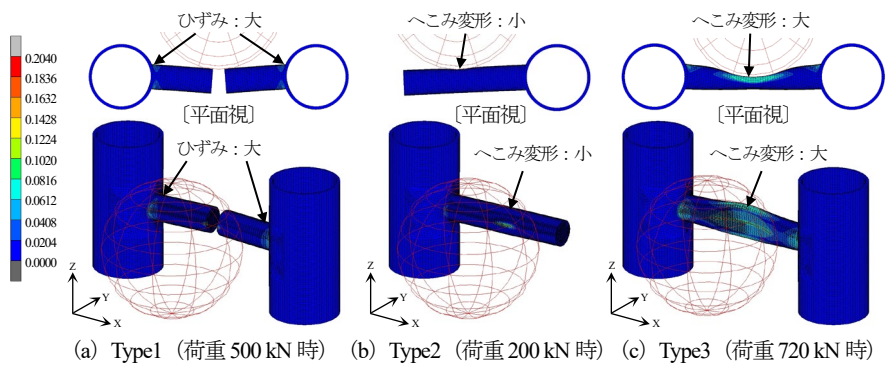


図-4 相当塑性ひずみ分布（縦部材 D500×t22 mm の場合）

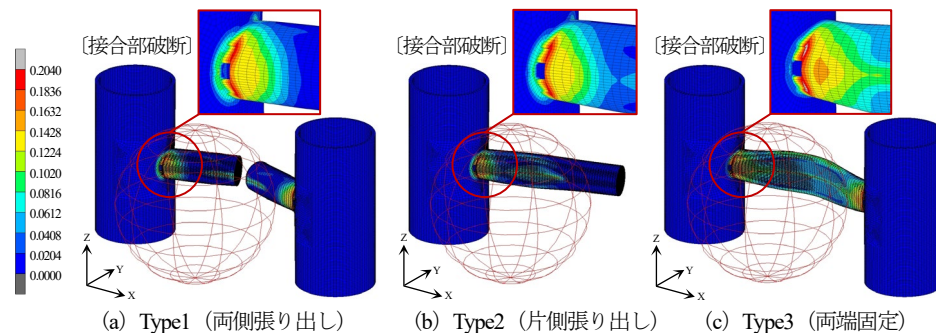


図-5 相当塑性ひずみ分布（最大荷重時：縦部材 D500×t22 mm の場合）

表-4 機能部材の吸収エネルギー

	Type1	Type2	Type3
最大荷重 P_{max} (kN)	680	364	1,027
最大荷重時の変位 δ (mm)	681	374	1,028
機能部材吸収 E (kJ)	147	171	184
	147	173	185
縦部材 E_d (kJ)	79	48	113
	80	48	115
	29		
	34		

注) 上段：縦部材 D500 mm の場合
下段：縦部材 D600 mm の場合

次に、Type2 の場合、荷重 200 kN 付近までの荷重増加が顕著であり、その勾配は、図中に併記した鋼管のへこみ変形に関する星川らの式³⁾とほぼ一致している。このときの状況を図-4(b)に示すが、礫接触部の鋼管に若干のへこみ変形が生じていることがわかる。その後、荷重と変位は緩やかに増加し、最大荷重 364 kN に至るが、最大荷重は Type1 に比べて小さくなった。これは、Type1 は両側 2 本の機能部材で荷重に抵抗するのに対し、Type2 では片側 1 本の機能部材で抵抗するためである。一方、Type3 では、最大荷重 1,027 kN となり、Type1 および Type2 に比べて大きくなる。これは、はり形式の違いによるもので、荷重 720 kN 付近までは載荷点下面の変位はほとんど生じておらず、荷重-載荷点変位の勾配は星川らの式³⁾と概ね一致している。この状況は図-4(c)にも示すように、礫接触部のへこみ変形が先行して発生しており、その後、はり変形が生じることが認められた。

3.2 機能部材の損傷状況

図-5 に、各タイプにおける最大荷重時の相当塑性ひずみ分布（縦部材 D500 mm の場合）を示す。これより、各タイプとも縦部材と機能部材の接合部で大きなひずみが発生し、機能部材の破断は、概ね最大荷重時に生じることが認められた。なお、機能部材の破断は、機能部材の接合部（鋼管根元）で発生することが確認された。

3.3 機能部材の吸収エネルギー

機能部材が破断に至るまでの吸収エネルギー E は、図-3 の荷重-載荷点変位関係で囲まれた面積から得られ、次式で求めることができる。

$$E = \int_0^{\delta} P d\delta \quad (1)$$

ただし、 δ ：載荷点変位、 P ：荷重。

表-4 に、各タイプにおいて機能部材の吸収エネルギー E を算定した結果を示す。これより、縦部材 D500 mm の場合、Type1 で 79 kJ、Type2 で 48 kJ、Type3 では 113 kJ となり、Type3 が最も大きく、Type2 が最も小さくなる。この傾向は、縦部材 D600 mm の場合も同様である。一方、最上流面に配置する構造部材の礫衝突による鋼管のへこみ率は 10 %以下とされており¹⁾、縦部材のへこみ変形による吸収エネルギー E_d を星川らの式³⁾により求めると、D500×t22 mm で 29 kJ、D600×t22 mm では 34 kJ となる。つまり、機能部材が破断に至るまでの吸収エネルギー E は、縦部材のへこみ変形による吸収エネルギー E_d に比べ、十分大きいことが認められた。

4. まとめ

本研究の成果をまとめると、以下のようになる。

- 1) 本研究の範囲（縦部材板厚 22 mm の場合）では、縦部材の直径が機能部材の耐荷性能に与える影響は小さい。
- 2) 片側張り出しの機能部材は、両側張り出しの機能部材に比べて耐荷性能に劣り、吸収エネルギーも小さくなる。
- 3) 機能部材が破断に至るまでの吸収エネルギーは、礫衝突を受ける縦部材の吸収エネルギー（設計値）より大きい。

なお、今後、縦部材の板厚の影響や機能部材のサイズの違い、礫の偏心衝突などに対する検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) (一財) 砂防・地すべり技術センター：新編・鋼製砂防構造物設計便覧 鋼製砂防構造物委員会、令和 3 年版、2021。
- 2) 別府万寿博、濱田匠李：礫衝突を受ける鋼管はり部材の変形メカニズムに関する一考察、2021 年度砂防学会研究発表会概要集、pp.219-220、2021。
- 3) 星川辰雄、石川信隆、彦坂熙、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。