

## 剛・柔構造の境界条件に着目した土石流対策構造物の設計荷重の考え方

防衛大学校 堀口 俊行

(一財) 砂防・地すべりセンター 井上 隆太

## 1. 緒言

複合化災害や想定外外力への対応として、砂防構造物には、従来の剛性の高い剛構造に加え、ネット構造物に代表される柔構造が適用されるようになってきた。これらの構造物は、恒久的対策から緊急的対策まで要求される機能や性能が異なるものの、作用荷重の評価においては、構造特性の違いを十分に反映しないまま、同様の設計荷重の考え方が適用されている場合が少なくない。このため、構造物の変形特性や応力評価の前提が変化しているにもかかわらず、従来の設計基準に基づく評価が踏襲されている点が課題として残されている。特に、ネット構造物は、土石流作用下における設計荷重および荷重分布の取り扱いが必ずしも明確ではない。土石流設計荷重に基づく評価手法は剛構造を対象として体系化されている。一方で柔構造では構造の変形に伴って荷重が再配分されるため、剛構造に対して想定された荷重分布をそのまま適用することは合理的とは言い難い。

そこで本研究は、剛構造のように局所的な荷重集中を仮定することも、また落石対策構造のように大変形を前提とすることも適切でない構造状態を「境界構造」と定義する。そして、境界構造の設計上の考え方および区分方法を整理するとともに、実験結果に基づく検討を通じて、構造の境界となる剛性比  $\eta$  について考察するものである。

## 2 境界構造に向けた考え方

## 2.1 各構造物の区分

ここでは、構造物の区分として、剛構造、境界構造、柔構造としての概念を導入する。剛構造は、現在でも使用されているコンクリート堰堤や鋼製堰堤のように剛で形成されているものである。一方で、柔構造は落石対策で使用されているネット構造物であり、落石の入力エネルギーを柔な構造物でエネルギーを散逸させて荷重を小さくさせるものである。その中間に値するものとして境界構造を導入する。この境界構造は、落石衝突時に見られるような衝撃的かつ短時間の作用を受ける柔構造とは本質的に異なる挙動を示すものである。すなわち、境界構造は面的かつ比較的持続的に作用する土石流を受け止める構造として位置付けられる。土石流作用下では、構造物には流体的・粒子的成分を含む外力が面状に作用し、構造の変形に伴って荷重が空間的に再配分される。このため、従来の落石防

護柵等で用いられてきた大変形・エネルギー吸収という設計思想をそのまま適用することは必ずしも合理的ではない。その境界をここでは定義し、構造物の特性や機能特性を理解した上で設計荷重を導入する。

2.2 剛性比  $\eta$  の導入

境界構造の判定は剛性比  $\eta$  に基づくふり分けとして整理する。これは、構造物全体の变形挙動を考慮した構造特性に準じた指標である。そのため、構造全体の応答を代表する等価剛性を導入し、特に剛構造以外の構造特性において、構造特性を表す指標として用いる。

$$\eta = \frac{k_{eq}}{k_{ref}} \quad (1)$$

ここで、 $k_{eq}$ : ネット構造の等価剛性、 $k_{ref}$ : 剛構造側の基準剛性である。等価剛性は厳密値ではなく、実験・解析および既往の知見に基づく代表値として扱う。

柔・剛構造に対して同一条件下で実験を行った結果、両者の荷重-変位関係および変形形態は大きく異なることが確認された。例えば、代表点における等価剛性を

$$k_{eq} \approx \frac{F}{\delta} \quad (2)$$

として整理すると、剛構造と柔構造で  $k_{eq}$  が明確に異なる領域に位置づけられ、剛性比  $\eta$  による領域区分の妥当性を支持する結果が得られた。本研究では、この区分概念に基づき、設計要領における整理指標として剛性比を導入する。なお、剛性比  $\eta$  は、構造物側の応答特性を一つの指標に集約でき、設計段階で一貫して評価可能な、最小かつ実務的な指標であるためである。境界構造の挙動は、構造剛性に加えて、入力的时间特性や作用の空間的広がりなど、複数の要因に支配される。しかし、これらの要因は設計初期段階での定量化が困難であり、設計要領として一貫した指標として用いることは難しい。一方、剛性比  $\eta$  は構造物全体の荷重-変位関係を通じて評価される等価剛性に基づく指標であり、時間的・空間的影響を含んだ構造応答を代表的に表現することができる。

## 2.3 各種荷重特性と領域区分について

以下の3つの区分について、剛性比  $\eta$  に基づき構造の力学的状態を整理した。これは、剛構造から柔構造までを連続的な問題として捉えるための区分である。

1) 剛構造 (領域 I): 従来の土石流設計荷重 (荷重成分・分布・作用高) に準拠して評価できる構造状態とし、剛性比

表-1 各種領域における力学状態と設計

領域 I: 剛構造 ( $\eta \geq \alpha$ )	領域 II: 境界構造 ( $\beta \leq \eta \leq \alpha$ )	領域 III: 柔構造 ( $\beta \leq \alpha$ )
<ul style="list-style-type: none"> <li>柔構造がほぼ剛体化</li> <li>変形が剛構造側へ</li> <li>荷重が面に分配</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>柔・剛が同程度に変形</li> <li>荷重が再配分される</li> <li>応力が“生成され始める”</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ほぼ全変形が柔構造側</li> <li>剛体は「反力を出すだけ」</li> <li>応力はまだ生まれない</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>応力 <math>\sigma</math></li> <li>曲げ・せん断</li> <li>安定計算</li> <li>→ 応力設計 OK</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>張力 + 集中心力</li> <li>変位制御</li> <li>部材力</li> <li>→ 提案設計の概念</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>最大張力 <math>T_{max}</math></li> <li>力積 <math>I</math></li> <li>変位 <math>\delta</math></li> <li>→ エネルギー設計 OK</li> </ul>

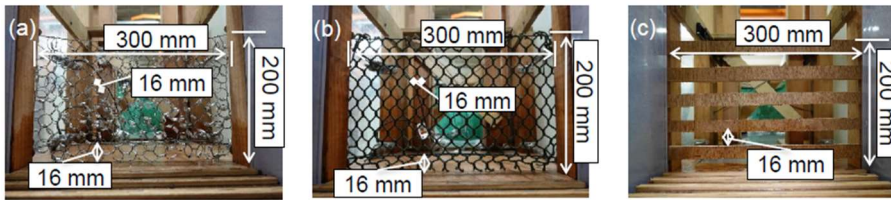


図-1 対象とした柔・剛構造モデル

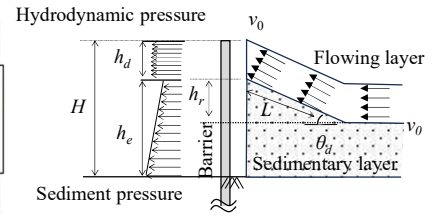


図-2 境界構造の荷重分布

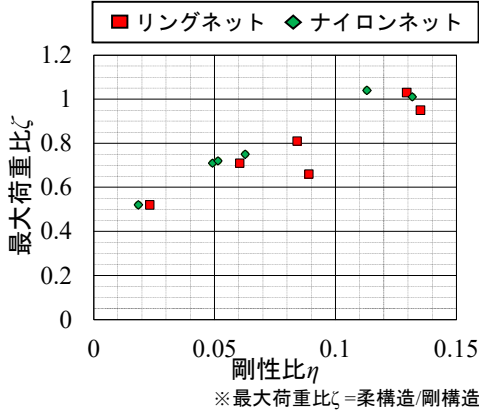


図-3 最大荷重比  $\zeta$  と剛性比  $\eta$  の関係

$\eta$  が概ね  $\beta$  以上となる領域と定義する ( $\eta \geq \beta$ )。

2)境界構造 (領域 II) : 土石流作用下において、構造の変形に伴う荷重の再配分が支配的となる構造状態であり、本研究で提案する標準荷重分布モデルを適用する領域とする。剛性比は、柔・剛いずれの影響も無視できない範囲として、 $\alpha \leq \eta \leq \beta$  と定義する。

3)柔構造 (領域 III) : 落石等の作用において変位やエネルギー吸収が支配的となる構造状態であり、本稿では詳細な設計手法の検討は行わない。剛性比が  $\eta \leq \alpha$  となる領域を柔構造と定義する。

ここで  $\alpha$  は、柔構造側への遷移を表す設計上の区分値であり、その具体的な設定については今後の検討課題とする。なお、表-1 に設計の力学状態や設計で使用する量などについて簡単に示している。

### 3. 実験結果を利用した提案手法の検討

#### 3.1 実験の概要<sup>2),3)</sup>

実験は、長さ 4.350 mm、幅 300 mm、深さ 500 mm の実験水路を実施した。水路の河床勾配は  $\theta = 0 \sim 20^\circ$  の範囲で調整可能であり、河床勾配  $\theta = 15^\circ$  に設定した。水路底面には、石礫型土石流に見られる流下中の礫の分級現象を促進するため、堰堤より上流側全面にわたり設置間隔 20 mm、栈高さ 5 mm、栈幅 10 mm の底面粗度を配置した。荷重計測部には、ロードセルを 4 つ配置し、作用荷重を計測した。図-1 に示すように柔構造には、直径  $\phi 1.0$  mm のステンレスワイヤで製作した目合 16 mm のネットを用い、併せて同形状のナイロン製ネットも使用した。比較対象として剛構造は、木材モデルを用いた。なお、土石流は流量を 3 段階に設定し、各条件において作用荷重を計測した。

#### 3.2 実験で得られた作用荷重の考察

詳細な実験結果については文献<sup>2),3)</sup>に示しているため、本稿では概要を述べる。荷重計測の結果、流速の違いにより、柔構造と剛構造に作用する最大荷重の大小関係が変化することが確認された。これは、土石流が面的に作用する

場合、柔構造においても必ずしも落石時のような顕著な緩衝効果が発現しない可能性を示している。一方で、荷重の立ち上がり特性や荷重速度に着目すると、構造物を介して伝達される荷重は柔構造の方が小さい傾向が認められた。すなわち、最大荷重値のみでは把握できない応答特性の違いが存在することが示された。さらに、ロードセルごとの反力分布を整理すると、従来の剛構造を前提とした設計荷重分布とは異なる分布形状で土石流が作用していることが確認された(図-2)。これは、柔構造の変形に伴い、土石流のせり上がり挙動や礫の運動形態が変化し、荷重が再配分されるためと考えられる。

#### 3.3 実験結果から得られた剛性比 $\eta$

図-3 に示すように、剛性比  $\eta$  と最大荷重比との関係を整理した結果、 $\eta$  が概ね 0.05~0.1 付近を境に最大荷重比が 0.8 より小さくなることが分かった。さらに、 $\eta$  が小さい領域では、構造の変形が支配的となり、荷重は主としてエネルギー吸収型の挙動を示すことが示唆される。一方、剛性比  $\eta$  が増加する (0.1 より大きい) と最大荷重比は上昇し、荷重伝達型の挙動へ移行する傾向が見られた、この結果は、構造剛性の増加に伴い、荷重再配分が顕著となることを示唆しており、本研究で定義した境界構造の存在を実験的に示したものである。ただし、本値は構造形式および入力条件に依存する可能性があり、一般化については今後の検討課題とする。

#### 4. 結言

本研究は、柔構造および剛構造を用いた実験を行った結果、同一の外力条件においても、両者の荷重-変位関係および変形形態は大きく異なることが確認された。代表点における等価剛性を用いて整理すると、剛構造と柔構造は明確に異なる剛性比  $\eta$  の領域に位置付けられ、構造特性の違いが応答挙動に強く影響することが示された。これらの結果は、構造特性に基づいて設計領域を区分するという考え方を示しており、剛構造と柔構造の中間的な挙動を示す「境界構造」の存在を示唆するものである。特に、境界構造においては荷重の再配分が支配的となることから、荷重分布の取り扱いが設計上重要であることを示した。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：土石流・流木対策設計技術指針解説，国総研資料第 905 号，2016.4.
- 2) 宮原邑太，堀口俊行：石礫型土石流の流速が柔構造物に及ぼす荷重緩衝効果の効果，砂防学会誌，Vol.78，No.5，pp.14-23，2026.
- 3) Yuta Miyahara, Toshiyuki Horiguchi : STUDY ON VELOCITY OF BOULDER FLOW ON IMPACT LOAD ON FLEXIBLE BARRIERS, 15<sup>th</sup> SILOS, 2025.