

流れによる変形特性に着目した新しい ふとんかご設計の試み

PROPOSAL OF A NEW MECHANICAL DESIGN METHOD FOR GABION MATTRESSES CONSIDERING THEIR DEFORMATION CAUSED BY FLUID FORCES

藤田光一¹・諏訪義雄²・東高德³・平林桂⁴

Koh-ichi FUJITA, Yoshio SUWA, Takanori HIGASHI and Katsura HIRABAYASHI

¹ 正会員 工博 建設省土木研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

² 正会員 建設省土木研究所 (同上)

³ 正会員 建設省土木研究所 (同上)

⁴ 正会員 株式会社サンポー (〒400-0111 山梨県中巨摩郡竜王町竜王新町 2277-15 赤坂ソフトパーク)

This paper proposes a new mechanical design method for gabion mattresses, which control its deformation caused by fluid force less than tolerance. In order to establish this new design method, we carried out stiffness test of wire mesh and full-scale hydraulic experiment on gabion mattress. In hydraulic experiment, we studied on the relation of deformation of gabion and velocity. As the result, it was confirmed that the force acting on the wire mesh had the linear relation with the square of velocity. It was shown that a new type gabion mattress with small size stones could be used by increasing the stiffness of wire mesh.

Key Words: New mechanical design method, Gabion mattress with small size stones, Tolerance of deformation of gabion wire mesh, Critical tractive force, Fluid force making gabion wire mesh deform

1. ふとんかごの水理的性質と新しい設計 の考え方

ふとんかごは、金網でできた直方体のかごに中込材を詰めただけのもので、河岸や河床に設置し、洗掘・侵食を防止するための工法である。この工法は、コンクリートブロック等による工法と比べ中込材の間に空隙がありこれが生物の生育場所となりうるため、近年の多自然型川づくりにおいて使用頻度が高くなっている。

コロラド大学で行われた水理実験等^{1), 2)}によると流水中に置かれたふとんかごは、図-1に示すように流量が増加すると中込材に移動が生じて、下流に偏り、金網が中込材の抜けだしを押さえるように袋状に変形することが知られている。

従来の設計法^{1), 3)}では、水理実験によって中込材の移動限界掃流力を測定し、この限界掃流力が同じ粒径のルーズなリップラップの約2倍であったことから、設計限界掃流力として、中込材に働く無次元限界掃流力を $\tau_* = 0.10$ としている。しかし、この設計法では、金網の性能が反映されていないことから、中込材は大きな粒径が必要となる。このため、山から切り出した割栗石が使用されることが多く、その調達に際し環境面・経済面のコストがかか

る要因となっている。そこで本論文では、中込材に働く流体力と金網の剛性特性を考慮して、かごの変形を許容変形量以下に押さえる新しい力学設計法を提案する。この新しい設計法が確立されれば中込材の粒径が小さくでき、河床材料等の現地発生材を使用することが可能になると期待される。

図-2は、今回提案する設計法の概念図である。例えばふとんかご設置現場の設計流速が解っていれば、図-2(a)を用い流体力を受けた中込材が

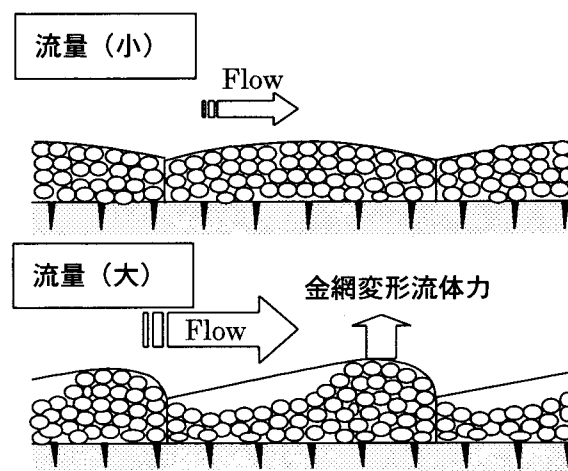


図-1 ふとんかごの流水による変形特性

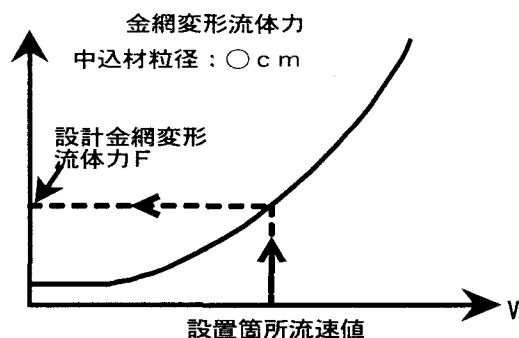


図-2 (a) 金網変形流体力と流速の関係

金網を押し上げる力(図-1参照。以降これを金網変形流体力と呼ぶ)設計金網変形流体力 F を算定できる。この設計金網変形流体力 F を図-2(b)の各種金網の変形と荷重の関係と比較することにより、許容変形量以下に抑える為に必要な金網種類を決定できる。

2. ふとんかご変形の力学特性に関する実物大水理実験による検討

実物大実験によりふとんかご変形の力学的な特性の検討を行った。まず、水理実験に使用する金網の変形特性を把握するために、金網の曲げ剛性試験を行った。次に、これらの金網で作られたふとんかごについて高流速水路実験を行い、流速と中込材の移動・金網の変形量の関係について調べた。

(1) ふとんかご材の曲げ剛性試験

a) 試験方法

水路実験で用いる幅:1.0m、長さ:1.64m、高さ:0.5mのふとんかごを用いて、線径 $\phi 1.6\text{mm}$ 、 2.5mm 、 4.0mm 、 5.0mm の4種類の溶接金網にかかる引張荷重と変形の関係について試験を行った。

b) 試験結果

図-3は、金網の曲げ剛性試験の結果である。こ

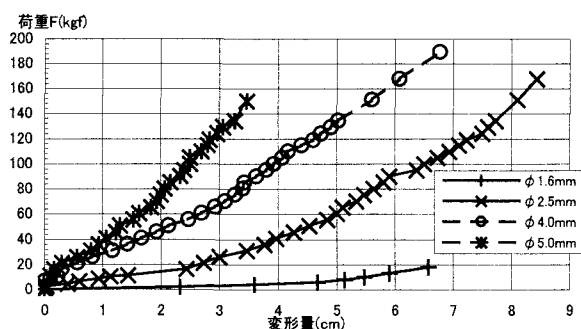


図-3 曲げ剛性試験結果

の図の線は、傾きが小さいほど金網自体の曲げ剛性

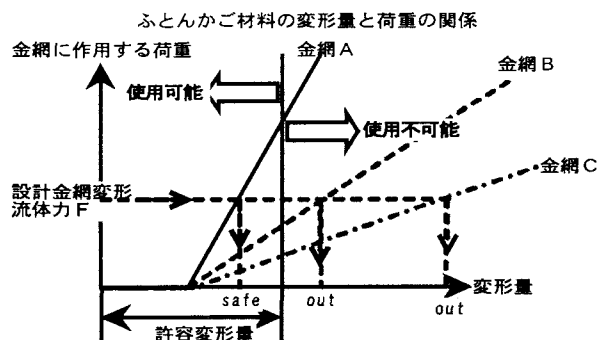


図-2 (b) ふとんかご材料と金網変形流体力の関係

が小さく変形しやすいことを示す。この変形量と荷重の関係図を用いれば、水理実験でふとんかごに生じる変形量からその時にふとんかごに作用した、金網変形流体力を算定することができる。

(2) 高流速水路実験

a) 実験方法

実験は、図-4に示すような厚さ20cm弱で最大流速7.6m/sまでの水脈を出すことができる高流速水路の中央部ピットに、水脈がふとんかご上面を流れるようにふとんかごを設置し、流速と変形量と荷重の関係を調べた。中込材は、平均粒径4.0cmの玉石と平均粒径0.83mmの粗目砂を約3:1の割合で混合したものをを用いた。通水は、流速が1.0m/sから7.6m/sまでの間で、ふとんかご内の中込材の移動状況及び金網の変形状況を見ながら、10段階に分けて行った。通水中に水面形とふとんかご中央部の(ふとんかご上流端から80cm地点)流速鉛直分布を測定し

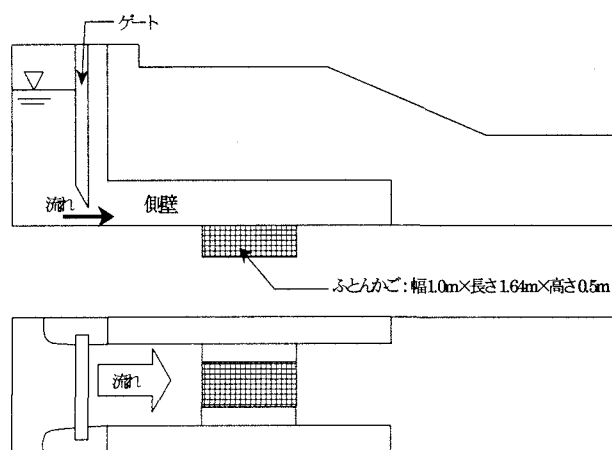


図-4 高流速水路

た。以降解析では、流速値は、鉛直分布の最大流速値を用いた。無次元掃流力 τ_* は、底面近傍の鉛直分布測定結果より対数則を仮定して算出した値を用いた。また、各通水後に中込材及び金網の変形量を測定した。

b) 実験結果

○流速と中込材洗掘量、金網変形量の関係

各種類の金網について、流速 v と金網変形量 ΔK 、中込材洗掘量 ΔS の関係を図-5に示す。この図より、すべての金網種類において流速の増加に伴い中込材の洗掘量、金網変形量が増加することがわかる。また、金網の剛性が強いものほど金網変形量が小さく、金網の剛性が弱くなるほど金網変形量が増加する。なお、 $\phi 2.5\text{mm}$ の最終的な金網変形量が $\phi 1.6\text{mm}$ よりも大きいのは、 $\phi 1.6\text{mm}$ のケースでは、実験途中から中込材の流出が起これ、金網の変形が

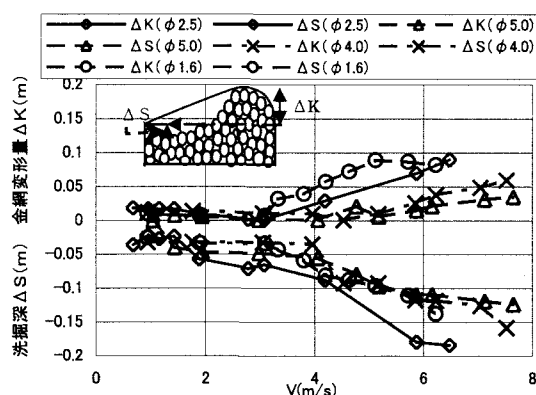


図-5 流速と洗掘量と金網変形量の関係

増加しなかったためと考えられる。

○流速と金網変形流体力の関係

各金網の変形量を、曲げ剛性試験により得られた変形量と荷重の関係から金網変形流体力に換算し、その時の流速 v との関係を示したものが図-6である。この図から、一定の流速以上になると金網変形流体力と流速 v の関係は、一つの直線に集約していく。このことから金網変形流体力は、金網の剛性や変形量に関わらず流速のみで決まることが解る。この線の近似線を入れてみると傾き約4.0の直線が引ける。ふとんかご上の流速がわかれば、実験で使っているかごの諸元及び中込材、金網については、この実験式から、金網変形流体力を算定することができ、許容変形量を決めれば今回提案している設計

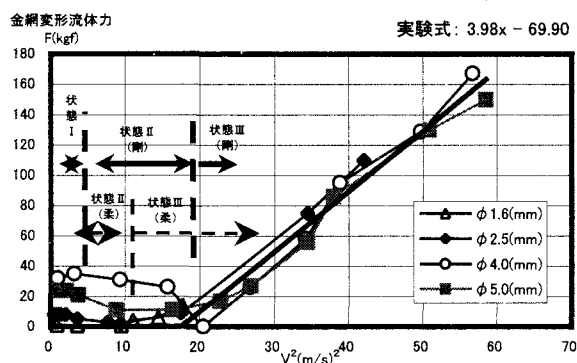


図-6 流速の2乗と金網変形流体力の関係

法の適用が可能である。ただし、ふとんかごの諸元、中込材の大きさ、金網の目合い等が変われば、この実験式をそのまま適用できない。そこで、流速と金網変形流体力の関係を一般化する検討を行う。

3. 考察

(1) 従来の設計法との関係

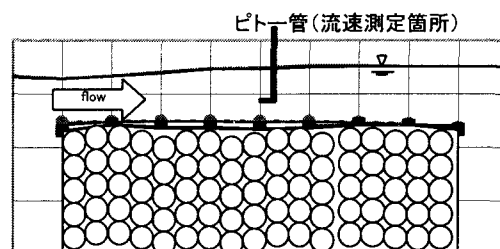


図-7 状態Ⅰの時のふとんかご形状

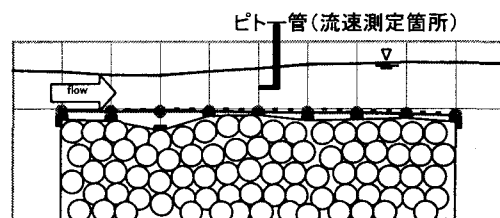


図-8 状態Ⅱの時のふとんかご形状

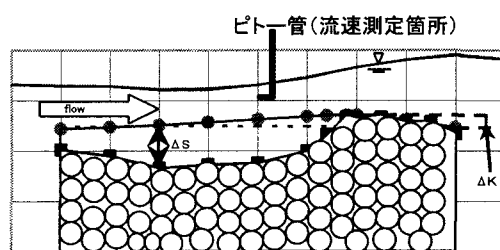


図-9 状態Ⅲの時のふとんかご形状

a) 状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲと無次元掃流力 τ_c

図-6を詳細に分析すると金網変形流体力の推移からふとんかごの変形を状態ⅠからⅢまでの3つに分けることができる。状態Ⅰは図-6に示す流速の範囲であり、中込材を充てんしたことによって金網に作用した力が初期値のまま維持されている状態である。この時かごは、図-7に示すように中込材が移動していない。この時の τ_c を算出すると0.02以下となっている。状態Ⅱは、図-6に示す流速の範囲であり中込材を充てんしたことによって

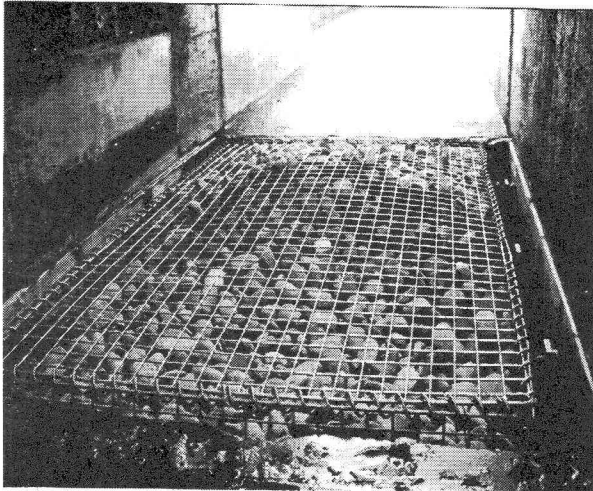


写真-1 状態Ⅲ時ふとんかご変形状況

金網に作用していた力が中込材が移動し始めたことにより減少して行き、移動した中込材に作用する流体力が再び金網に作用するまでの間の状態であり、かごは図-8のようになっている。金網に力が作用し始める τ_* は柔らかい金網では、0.06、剛なものでは、0.12 となっており、従来の設計法 0.10 前後となっている。状態Ⅰと状態Ⅱを区分する τ_* が、かご無しの中込材の移動限界無次元掃流力 0.047¹⁾ より小さく評価されるのは、中込材に混ぜた粗目砂が抜けたために、中込材の天端高が沈下し、金網に作用する力が減少したものと考えられる。もし、粗目砂を混ぜず、金網から抜けない粒径のみを用いれば、状態Ⅱは、無くなり、状態Ⅰになると推定される。状態Ⅲは、図-9 及び写真-1 に示すように、中込材が下流に偏って金網を押し上げている状態である。この金網を押し上げる金網変形流体力は、流速の2乗に比例して大きくなる。

(2) 金網変形流体力 F の理論的考察

流速と金網変形流体力の関係について考察を行う。金網変形流体力は、流体力の作用したふとんかご内の中込材が金網を押し上げる力である。この時の力の釣り合いについて以下の3つの考え方ができる。

第1は、流体力を受けた中込材が、下流側の中込材に乗り上げて回転しようとする運動を金網が押さえ込んで力が釣り合う考え方である。

第2は、流体力を受けた中込材が、下流側の中込材と金網の間等に滑り込むように押し込まれる運動を金網が押さえ込んで力が釣り合う考え方である。

第3は、中込材の移動によって発生した傾斜面に流れがぶつかることによって発生する動水圧が中込材を押し上げる土圧に変換され、その土圧を金網が押さえ込む力の釣り合いの考え方であり、これを

土圧に着目した考え方と呼ぶことにする。

a) 中込材の回転運動

図-10の、中込材に働く流体力と金網が押さえる力についてP点周りの力の釣り合いを考えると、

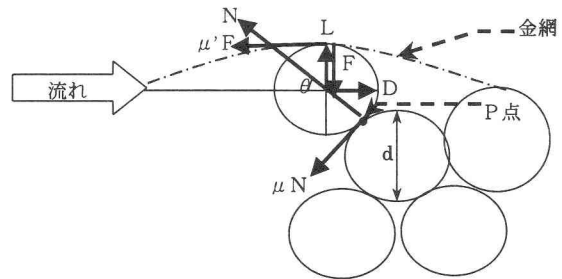


図-10 中込材の回転・滑動運動モデル

$$F \frac{d}{2} \cos \theta + \mu' F \frac{d}{2} (1 + \sin \theta) = \dots \dots \dots (1)$$

$(D \frac{d}{2} \sin \theta + L \frac{d}{2} \cos \theta) \frac{B}{d}$
ここに、F：金網が中込材を押さえ込む力＝金網変形流体力 (kgf)、D：中込材に働く抗力 (kgf)、L：中込材に働く揚力 (kgf)、 μ' ：中込材と金網の摩擦係数、B：ふとんかご幅 (m)、d：中込材直径 (m) また D、L は流速との関係より

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D A_D V^2, \quad L = \frac{1}{2} \rho C_L A_L V^2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$A_D = A_L = \frac{\pi}{4} d^2 \quad \dots \dots \dots (3)$$

ρ ：水の密度、 C_D ：抗力係数、 C_L ：揚力係数、 A_D 、 A_L ：投影面積 (m²)、V：流速 (m/s) と表せる。

(1) 式に (2)、(3) 式を代入し、F について解くと、

$$F = \frac{\pi}{8} \rho d B \left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta + \mu (1 + \sin \theta)} C_D + \frac{\cos \theta}{\cos \theta + \mu' (1 + \sin \theta)} C_L \right) V^2 \quad \dots \dots \dots (4)$$

となり、金網変形流体力 F と流速 V との関係式が導かれる。

b) 中込材の滑動運動

図-10の中込材について水平方向の力の釣り合いを考えると

$$D = \mu' F + \mu N \sin \theta + N \cos \theta \quad \dots \dots \dots (5)$$

と表される。また、Nは

$$N = D \cos \theta + F \sin \theta - L \sin \theta \quad \dots \dots \dots (6)$$

と表すことができる。ここに、 μ ：滑動する中込材とそれを支持する中込材の間に働く摩擦係数、N：滑動する中込材間に作用する垂直抗力 (kgf) であり、(6) 式を (5) 式に代入し、(2) 式、(3) 式を用いて F と V の関係に変換すると、

$$F = \frac{\pi \rho d^2}{8(\mu' + \mu \sin^2 \theta + \sin \theta \cdot \cos \theta)} \{C_D(1 - \mu \sin \theta \cdot \cos \theta - \cos^2 \theta) + C_L(\mu \sin^2 \theta + \sin \theta \cdot \cos \theta)\} \frac{B}{d} V^2 \quad \dots \dots (7)$$

と表せる。

c) 土圧に着目した考え方

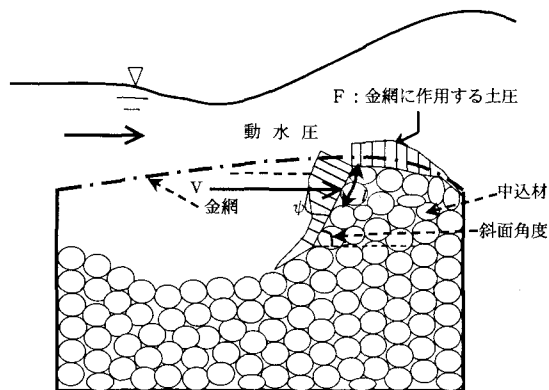


図-11 土圧に着目した考え方モデル

図-11は、中込材斜面に作用する動水圧と金網が押さえつける力の釣り合いを図化したものである。この時中込材の斜面に働く動水圧は、

$$\frac{P_d}{\omega_0} = \frac{(V \sin \psi)^2}{2g} \quad \dots \dots (8)$$

で表される。この時 P_d : 中込材に作用する動水圧 (kgf/m^2)、 $\omega_0 = \rho g$ (kgf/m^3)、 ψ : 流水が中込材に当たる角度である。この動水圧 P_d を受けた中込材が金網を押し上げる力=金網変形流体力は、ランキンの受動土圧が金網面に及ぼす垂直応力と考えると土圧係数及びモールの応力円による角度補正係数を用いて次式で表すことができる。

$$F = K_p \cdot K_\theta \frac{1}{2} \rho \sin^2 \psi l B V^2 \quad \dots \dots (9)$$

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad \dots \dots (10)$$

となる。ここで、 K_p : ランキンの受動土圧係数、 K_θ : モールの応力円による角度補正係数、 l : 有効斜面長 (m)、 ϕ : 中込材の内部摩擦角である。

以上の3つの考え方とも金網変形流体力 F は流速 V^2 との関係式で表すことができる。この F と流速 V^2 の比例係数を金網変形流体力係数と呼ぶことにする (以下、金網変形流体力係数)。

(3) 理論係数と実験係数の比較

金網変形流体力係数について、上記に示した3つの考え方に基づく理論値と水理実験結果から求めた実験値との比較を行った。

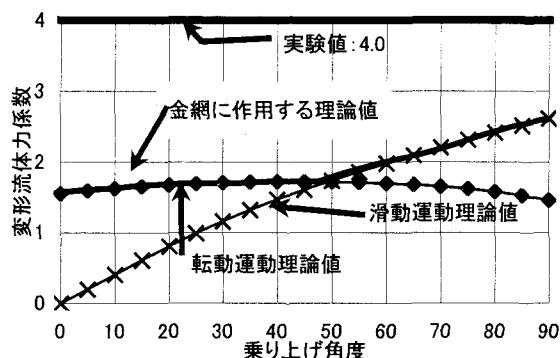


図-12 乗り上げ角度と係数の関係

a) 実験値と中込材の回転運動・滑動運動の理論値の比較

図-12は、(4)式、(7)式 of 金網変形流体力係数の理論値と中込材の乗り上げ角度の関係を示したものである。理論値の計算にあたっては、 ρ : 102, d : 0.04, B : 1.0, μ : 0.781, μ' : 0.55, C_D : 1.0, C_L : 1.5 を用いた。この図から、乗り上げ角度が 45° より小さい場合には、金網変形流体力係数は、滑動運動の理論値より回転運動の理論値が大きくなり、乗り上げ角度が 45° より大きい場合には、逆に滑動運動が回転運動より大きくなる。これは、金網を押し上げようとする運動する中込材とそれを支持する中込材の角度が小さい場合には、回転運動によって金網を押し上げる運動が起こり、角度が 45° より大きくなると金網と支持する中込材の間に突き刺さるような運動へ移行することを示す。この時の金網変形流体力係数は、1.5~2.6程度となり、実験結果から算定された金網変形流体力係数より小さく、その3.8割から6.5割程度であることがわかる。

b) 実験値と土圧に着目した考え方の理論値の比較

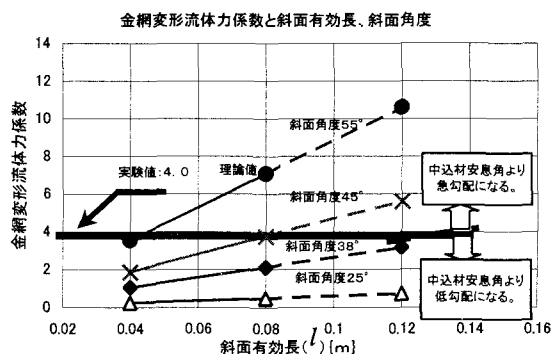
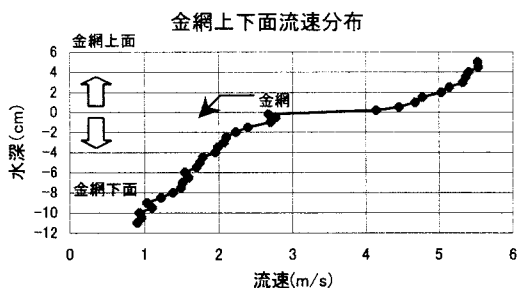


図-13 土圧に着目した考え方の理論値

図-13は、斜面角度 ψ をパラメータとし、(9)式から得られる金網変形流体力係数の理論値と動水圧が有効に働く斜面長 l の関係を示した図である。理論値の計算にあたっては、 ρ 、 B 、は中込材の回転運動・滑動運動と同じ値を使用し、 ϕ : 38°



図一 1 4 金網上下面の流速分布

を用いた。この図より、金網変形流体力係数は、斜面角度 ψ 、有効斜面長 l によって敏感に変化する。図一 1 4 は、中込材が洗掘を受けた状態の金網上下面の流速分布である。この図から金網の下面側は急激に流速が減少しており有効斜面長としては中込材一粒～二粒（4cm～8cm）程度が妥当であることがわかる。また、図一 1 3 からは、斜面角度が一定でなければ金網変形流体力係数が一定とはならないが、実験値から求めた金網変形流体力係数は流速と関係なく一定となっている。しかし、今回の実験では斜面角度が一定だったかどうかは確認できていない。

以上を総合的に考えると今回の実験のように、ふとんかごの上を流水が平行に流れる場合の金網変形流体力の評価は、土圧に着目した考え方ではなく、中込材の回転・滑動運動の方が有力な考え方と判断される。

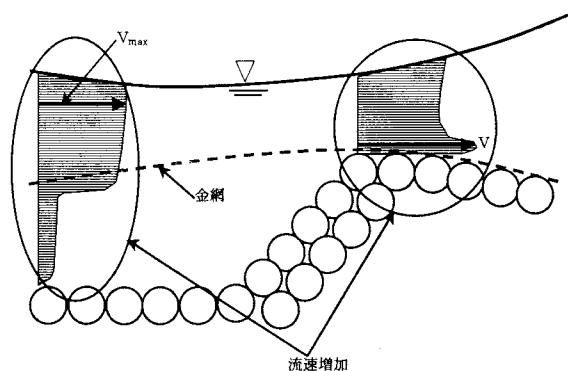
c) 中込材に作用する流速の評価

中込材の回転・滑動運動に基づく金網変形流体力係数の理論値と実験値の違いの主要な原因の一つは、中込材に作用する流速の評価方法である。今回の実験値は、図一 1 5 に示す位置の最大流速 V_{max} を流速として評価し、金網変形流体力係数を算定したものである。しかし、実際に金網の変形を起こす中込材に作用する流速は、この図の金網と中込材が接している部分の流速である。通常このような急縮部では流線が集中し、図に示すように、実験で測定した位置よりも流速が増加している可能性がある。このことから、今回の実験値算定に用いた流速は、実際に中込材に作用した流速より過小に評価しているため理論値と合わないと考えられる。

4. 結論

本研究により、次の 3 点の成果が得られた。

- ① 実物大水路実験によって中込材に働く流体力と金網剛性特性よりかごの変形を許容変形量以下に抑える新しい設計論の妥当性を示した。



図一 1 5 金網変形地点の流速分布モデル

- ② 今回の実験水路のようにふとんかご上面を平行に流れる状態であれば金網剛性を大きくすることにより、通常よりも小さい（4cm 程度）中込材を用いるふとんかごが流速 5m/s～7m/s まで使用可能であることを実証した。
- ③ 中込材に働く流体力が金網変形流体力に変換されるメカニズムを推定するとともに、中込材に働く流速からその値を理論的に評価できるようにした。

しかし、ふとんかごの設計法としてはまだ以下の課題が残る。

- ◆ ふとんかごの許容変形量をどこまでとするのか決定する必要がある。
- ◆ 金網と中込材の接している場所の局所流速を測定し、金網変形流体力係数の理論値が妥当であることを確認する必要がある。
- ◆ 河川流速から金網変形流体力を算出する設計流速への変換法を示す必要がある。
- ◆ 設置するふとんかごの上流端では、ふとんかご前面に直接流水が作用する。そのような場所での中込材の移動、金網の変形について検討する必要がある。この場合には、土圧に着目した考え方が使える可能性がある。
- ◆ 斜面に設置した場合の中込材の移動し易さ等を考慮した設計を行う必要がある。

参考文献

- 1) Office Maccaferri S.p.A.:Flexible linings in Reno mattress and gabions for canals and canalized water courses,1985
- 2) 平林桂、望月達也、藤田光一：河床上の球体に作用する流体力の時間変動及び球体の運動解析、水工学論文集、第 41 巻、pp723～pp728、1997.2
- 3) (財) 国土開発技術研究センター 編：護岸の力学設計法、1999

(2000. 4. 17 受付)