

蛇籠を用いた構造物の合理的な設計手法のための金網の変形評価手法に関する研究

中澤博志*・西剛整**・末次大輔***・原忠****・栗原裕之*****

Study on deformation evaluation of steel wire mesh for rational design method of gabion structure

Hiroshi NAKAZAWA*, Tsuyoshi NISHI**, Daisuke SUETSYGU***, Tadashi HARA**** and Hiroyuki KURIHARA*****

*研究代表者 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 nakazawa@bosai.go.jp

**CPC t_nishi@cpcinc.co.jp

***宮崎大学 suetsugu@cc.miyazaki-u.ac.jp

****高知大学 haratd@kochi-u.ac.jp

***** 日本じゃかご協会 h-kurihara@kurihara-kenzai.co.jp

Abstract

蛇籠を用いた構造物の利点は、簡易な構造かつ工費・工期ともに優れている点であり、国内外で多種多様に用いられている。過去の地震被害調査においても、変形は許容しているものの、崩壊に至らないケースが多く確認され、中詰め材である石に対する金網の拘束効果が高いことが実証されている。蛇籠構造物は、金網の中に割り栗石などを中詰め材として設置した複合構造物であることを考慮し、蛇籠をモデル化した水平載荷実験を行い、金網の種類の違いによる変形性能の把握を行い考察した。また、蛇籠の水平載荷試験を基準として、金網の形状や配置の向きなどが蛇籠構造物の変形特性に対してどのようなかたちで寄与するのか、また、変形特性に優れる金網形状について解析的に示した。

Key words: 蛇籠, 金網, 変形特性, 模型実験, 数値解析

1. はじめに

本研究は、前年度に公益財団法人大畑財団により採択された「蛇籠を用いた構造物の合理的な設計手法のための変形メカニズムに関する実験研究」からの一連の研究で、蛇籠金網の特徴を活かした合理的な設計手法の構築を目的とした模型実験と数値解析結果を報告するものである。

1.1 研究の背景と意義

蛇籠構造物は変形するが鉄線の拘束効果により、崩壊には至らないといった粘り強い屈撓性に富む構造が実証されている¹⁻²⁾。したがって、粘り強さを考

慮し、蛇籠に特化した設計を睨んだ研究と技術整備を通じ、その需要を伸ばしていくことが可能と考えている。そのためには、理論的なバックグラウンドに裏付けされた技術体系が必要であると考えられる。本研究では、金網節点の強度・変形特性を考慮した金網の数値解析モデル化および模型実験の再現解析を通じた設計手法の確立を目的とした。

1.2 研究の流れ

そもそもの研究の全体像としては、申請者らは地震被災事例に基づいた蛇籠擁壁の研究の一環として、実大蛇籠擁壁の実験を行っている³⁻⁵⁾。一方、蛇籠そ

のもののメカニズムに関する研究や、蛇籠の日本工業規格 (JIS A 5513) 化以来、蛇籠を理論体系づける研究自体がなされていないため、実大レベルの模型実験を行ったが数値解析の実施や被災後の対策手法の検討を通じ設計手法の構築に結び付けるためには、科学的根拠に基づいた蛇籠の理論が必要であった。そこで、蛇籠の利活用調査においてその防災力に着目し、中詰め石のみと蛇籠積層体の力学特性をミニチュアで把握した上で、実大擁壁の耐震実験を 2017 年度までに実施し、実大実験を対象とした再現解析による評価を試みた。ここで、課題となったのは、蛇籠の合理的な数値解析モデルの構築であり、突き詰めると、金網の力学特性に基づくモデル化ができないため、解析精度の向上が図れない課題が浮き彫りになった。

そこで、2018 年度に公益財団法人大畑財団からの「蛇籠を用いた構造物の合理的な設計手法のための変形メカニズムに関する実験研究」の研究助成を得て、金網の基本的な力学特性の把握に努めた。

1.3 昨年度までの成果

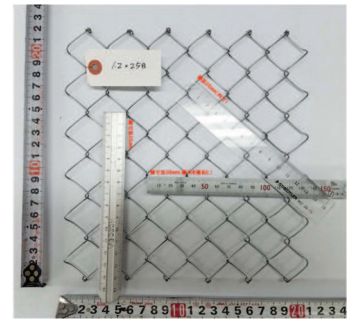
昨年度に得られた知見は、蛇籠金網における網目形状の違いによる引張特性および金網の数値解析モデル作成と引張特性に関するシミュレーションである。各項目を以下にまとめる。

1.3.1 蛇籠金網の網目形状の違いによる引張特性

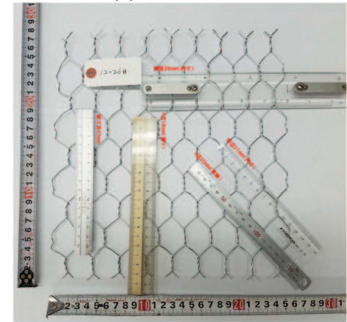
蛇籠単体が変形する際、どのような網目形状が効果的な拘束効果を発揮するのか、また、網目形状の違いによる蛇籠金網の基本的な力学特性を把握することを目的とした面的な金網の引張試験を実施した。

本試験では、写真 1 に示す、金網網目形状が菱形および亀甲タイプについて、また溶接金網を対象とした引張特性の把握が行われた⁶⁾。なお、実際の考察には、表 1 に示すケースが用いられている。引張試験に用いた試験体の線材は、線径 $\phi 1.2$ mm の亜鉛メッキ鉄線とし、200mm \times 200mm のパネルを製作した。なお、線材の引張り強さは、350~380 N/mm²であった。引張り試験は、写真 2 に示す試験装置を用い、金網端部の網目にボルトを通し固定した後に実施された。

図 1 に試験条件と結果を示すが、試験結果を見ると菱形金網は列線直行方向に非常に強い挙動、一方、亀甲金網は列線方向に強い引張力学挙動を示し、節点強度や摩擦特性が支配的であることが分かった⁷⁾。



(a) 菱形金網



(b) 亀甲金網.

写真 1 一連の引張試験に供した金網

表 1 金網の引張試験条件

Case1 (a)	Case1 (b)	Case2 (a)	Case3 (b)
ひし形金網 (横)	ひし形金網 (縦)	きつ甲金網 (横)	きつ甲金網 (縦)



写真 2 引張試験装置

ここでの課題は、引張強さの評価方法(金網の厚み、節点強さ、節点数、鉄線量等)、および中詰め材の変形特性に対する最適な網目方向の配置が存在し、それを考慮した解析手法が必要であることを確認した。

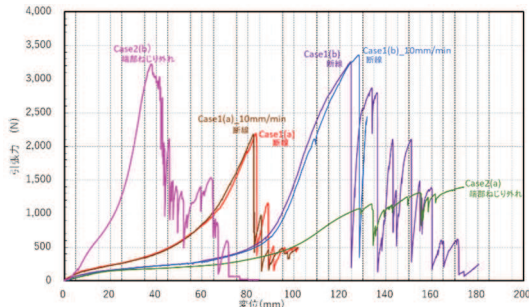


図1 金網の試験結果

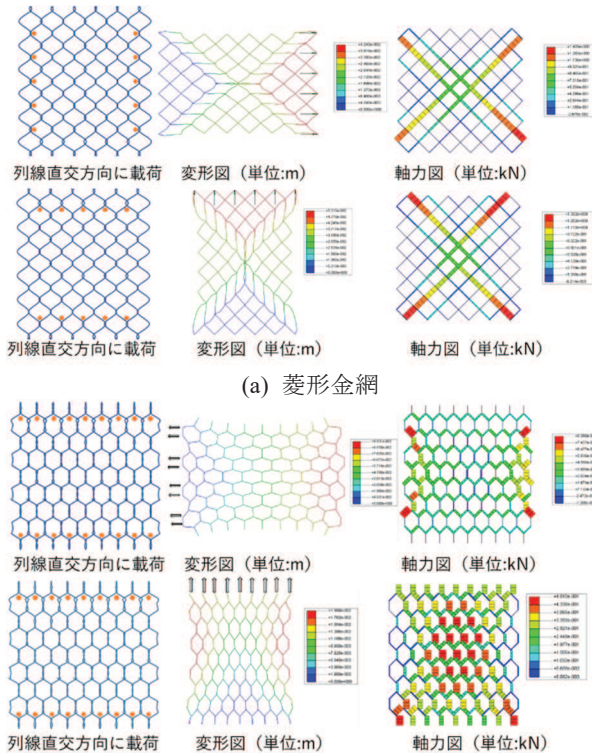


図2 金網引張試験の再現解析

1.3.2 金網の引張特性に関するシミュレーション
 菱形・亀甲両金網の引張試験再現解析結果を図2に示す。菱形金網の節点は接合ばねを設置し、列線直交方向への引張りには節点は固定され、列線方向には滑りが発生するモデルとした。一方、亀甲金網は、ねじり部では線径断面積が2倍と考え、モデル化した。モデル化は現段階における過程に過ぎないが、写真3に示す金網引張試験後の変形性状と比較すると、試験後の網目の変形形状が類似している。
 引張り試験結果と数値解析結果の比較を図3に示す。(a)に示す引張量が2mmまでの変位と引張り力の関係を見ると、各ケースの引張り抵抗の発現傾向や変形性能は解析と実験結果で同様であり、両者ともにCase1では(b)より(a)、Case2でも(b)より(a)の変

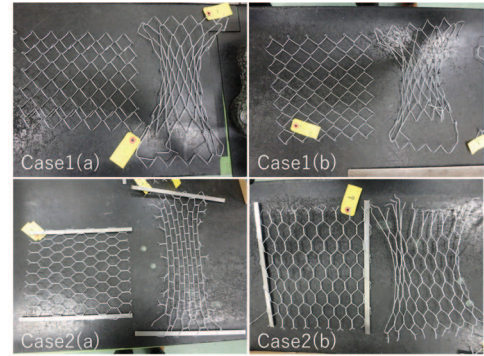


写真3 試験後の変形性状
 (左：試験前，右：試験後)

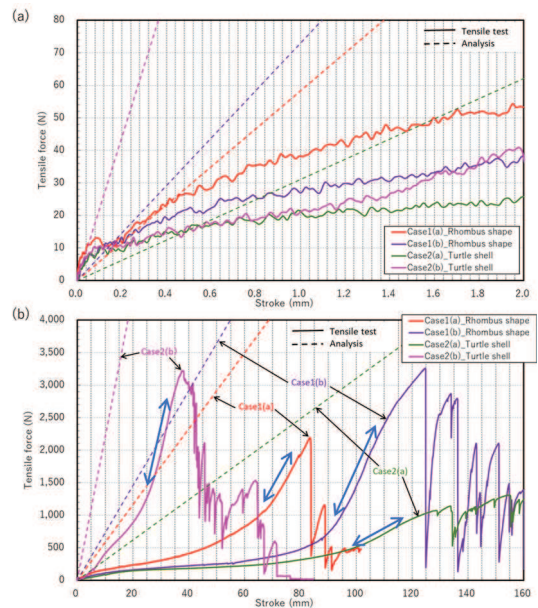


図3 FEM解析と引張試験結果の比較

形が大きい結果が得られている。一方、载荷後の立ち上がりについては、実験結果に比較して、全体的に解析結果の方が大きい。数値解析が弾性解析であること、実験では金網の交差部に遊びがあり、载荷の初期段階では、この遊びの部分が閉じて、引張抵抗を発揮するまで大きな作用力が生じないためであることが報告されている。

(b)を見ると、引張試験結果における引張抵抗の発現から損傷や部分的な破断が始まる間(↔で表されている部分)の変形性能は、解析結果と大差が認められない。実際の蛇籠は、中詰め材が粒状体であり自立しない材料であることから、蛇籠側面の金網は常に引張力が生じていることを考えると、引張試験における剛性が回復した↔部分について、解析結果と変形性能の整合が取れることは、非常に重要な知

見である。金網の剛性が回復するまでは、中詰め材の応力-変形特性に依存し、回復後は金網の変形特性が支配的であるとの結論が得られている。

- a) 菱形金網は列線直行方向に非常に強い挙動，一方、亀甲金網は列線方向に強い引張力学挙動を示し、節点強度や摩擦特性が支配的である。
- b) 金網の引張挙動については、定性的な評価の範疇を脱していないが、予測手法として確立が可能である。

なお、列線については、次項で説明する。

1.3.3 目的および実施内容

上記で得られた菱形金網と亀甲金網の力学特性を念頭に、蛇籠構造物全体の变形挙動の予測手法を確立するため、蛇籠積層体模型を用いた水平载荷実験を行い中詰め材を含めた変形挙動を確認した。この実験結果に対する数値解析を行い、モデル化の妥当性や実験結果の再現性の確認を試みた。数値解析では、節点の強度発現特性を考慮したモデル化によって、より精度の高い数値解析を通じた設計手法の構築を目指して実施した。

2. 模型蛇籠擁壁の水平载荷実験

2.1 実験の目的

本研究で使用する金網の網目形状は図4に示す菱形と六角形の金網である。金網を構成する金属線を列線と呼ぶが、表1に併せ説明すると、列線を配置し撚り合わせた部分が水平方向となる場合を横列線 (Case1(a)と Case2(a))、一方、鉛直方向となる場合を縦列線 (Case1(b)と case2(b)) と呼ぶが、それぞれの向きで組み立てた模型蛇籠を作製した。本研究では、列線の向きが異なる上記合計4種類の蛇籠を用い、列線の向きによる引張剛性の違いが蛇籠擁壁の水平抵抗に及ぼす影響を調べた。

2.2 実験方法

本実験で使用した模型蛇籠の寸法は、20cm×20cm×20cmである。中詰め材は、写真4に示す市販の40mふるいを通じた碎石（宮崎県産砂岩）である。模型蛇籠に充填する碎石の粒径範囲は金網の大きさを考慮して37mm～19mmとした。碎石の最大・最小密度はそれぞれ $\rho_{\text{dmax}}=1.383\text{g/cm}^3$ および $\rho_{\text{dmin}}=1.178\text{g/cm}^3$ であり、相対密度 D_r に換算すると、95～97%の条件で実験を実施した。模型蛇籠擁壁の水平载荷実験装置の概略を図5に示す。本装置は平

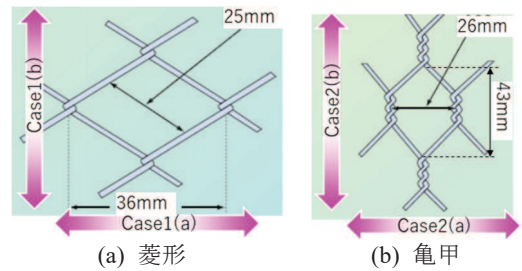


図4 試験条件（金網の向き）

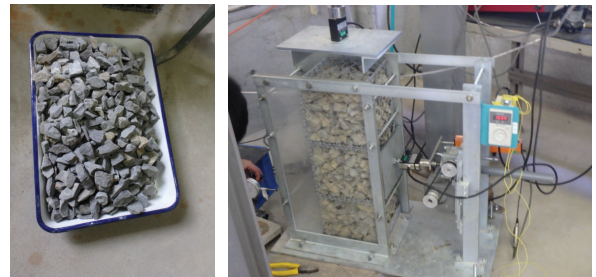


写真4 中詰め材および試験の様子

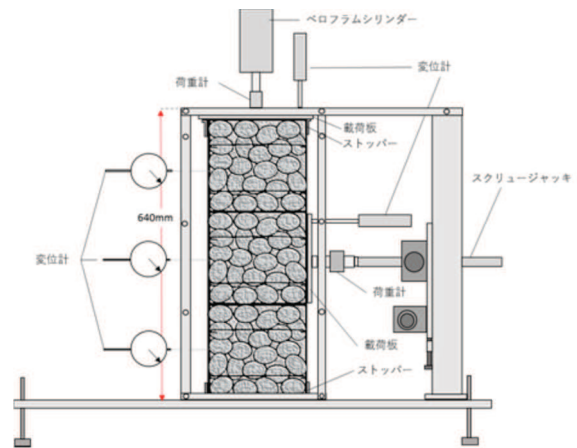
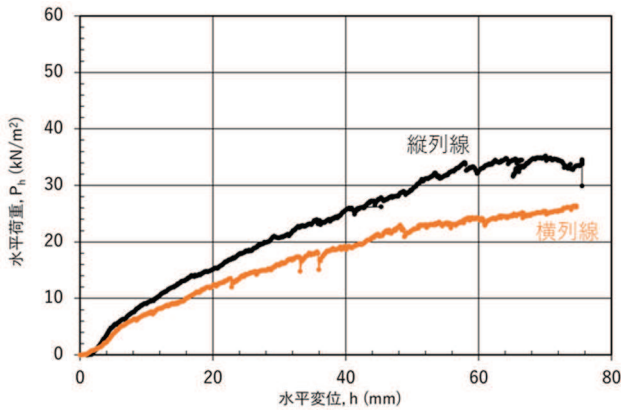
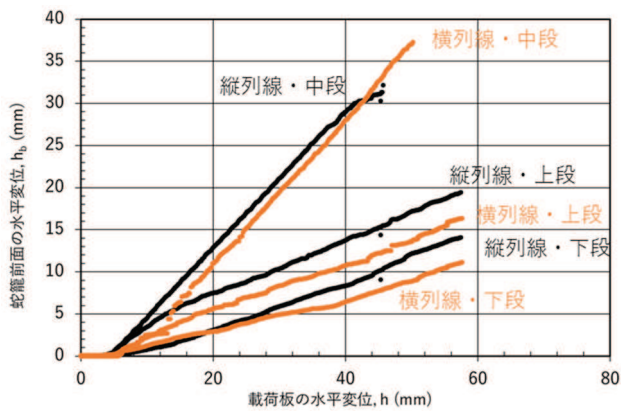
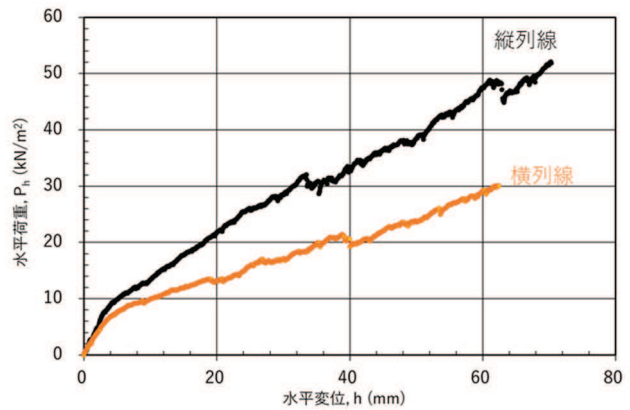


図5 模型蛇籠擁壁の水平载荷装置

面ひずみ状態で1列3段直立積み模型蛇籠擁壁に、水平・鉛直方向の2方向から荷重载荷する。模型蛇籠擁壁前面には図に示すように3つの変位計を設置し、ガラス製側壁からはデジタル画像撮影により载荷時の蛇籠の挙動を測定する。载荷方法は、最上段蛇籠上面に剛板を介して鉛直方向に一定圧力を载荷させた状態で、中段の蛇籠背面に剛板（18cm×18cm）を介して水平方向に一定速度で水平に载荷する。今回は上载荷重5 kPaを作用させた状態で、変位速度1.5 mm/minで载荷した。なお、下段蛇籠下面および上段蛇籠上面ですべり変位が生じないように、図に示すストッパーで固定した。なお、側壁内面にはシリコングリースを薄く塗布して摩擦軽減を図っている。



(a) 水平荷重と水平変位の関係



(b) 蛇籠前面の水平変位

図6 実験結果（菱形金網）

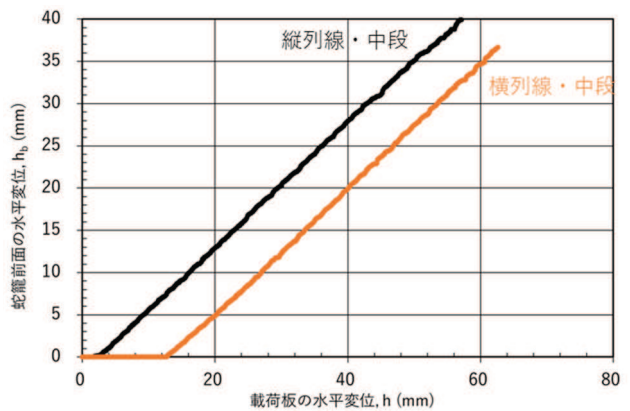


図7 実験結果（亀甲金網）

2.3 実験結果

金網の種類と列線の配置方向が異なる合計4種類の実験結果について以下に述べる。なお、水平荷重は、ロードセルで計測される水平力を蛇籠上面の面積（20×20cm）で除した値である。

2.3.1 菱形金網

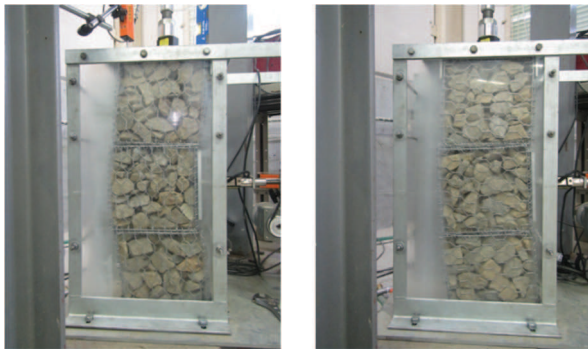
蛇籠擁壁の水平荷重 P_h と水平変位 h の関係を図6(a)に示す。縦配置条件の水平抵抗は横配置のそれよりも大きいことがわかる。両ケースの相対密度は等しいので、この水平抵抗の違いは金網形状の影響であると考えられる。水平変位が4 mmから6 mmまでの範囲では、縦配置条件の場合が水平荷重の増加割合が大きいことから、構造体としての曲げ剛性が大きい。このときの両条件における蛇籠擁壁前面の水平変位は生じていない。したがって、この変位レベルでは個々の蛇籠の前面に変位が生じていないことから、擁壁としての変形は生じていない。したがっ

て、蛇籠単体の中詰め材の再配列による水平抵抗力が生じていると考えられる。

水平変位6 mmから50 mmまでの範囲でも同様に、剛性は縦配置条件の方が大きい。この変位レベルでは蛇籠擁壁の変形が観察される。図6(b)を見ると、中段蛇籠前面の水平変位は直線的に増加する。載荷板の水平変位量に比べ蛇籠前面の水平変位量は小さい。したがって、中段の蛇籠においては蛇籠単体の変形を伴いながら蛇籠擁壁が変形している。同様に、上下段蛇籠の水平変位も直線的に増加する。上下段蛇籠はそれぞれ上端あるいは下端の変位を固定されているので、これらの蛇籠も変形を伴って変位している（写真5）。縦配置と横配置条件において蛇籠前面の水平変位量を比較すると、縦配置条件の場合が大きい。しかし、載荷板の水平変位量に対するそれらの増加割合はほぼ等しいことがわかる。一方、上段蛇籠と下段蛇籠では前面の水平変位量が異なる。こ



写真5 試験終了時の模型蛇籠擁壁の変形状態



縦列線：水平変位30mm

横列線：水平変位30mm

写真6 水平変位 30mm の時の蛇籠擁壁の様子

れはそれぞれの蛇籠に作用する上載荷重の大きさの影響が考えられる。すなわち、下段の蛇籠には上段蛇籠よりも大きな鉛直荷重が作用しており、下段の蛇籠の方がより大きな剛性を有すると推察される。

2.3.2 亀甲金網

蛇籠擁壁の水平荷重と水平変位の関係を図7(a)に示す。縦配置の場合では、水平抵抗は小刻みな変化を示しながら単調に増加した。水平変位60 mmでは蛇籠同士を結び付けている緊結針金の破断は生じず、58 kN/m²の抵抗を示した。横配置の場合では、縦配置と同様に、水平抵抗は単調に増加する。水平変位量が2 mmより大きい範囲では、水平抵抗は縦配置より小さい。水平変位が60 mmのときの水平抵抗は29 kN/m²となり縦配置のそれのおよそ1/2となった。

水平抵抗と水平変位の関係は、縦配置および横配置ともに、載荷開始から水平変位4 mmを境界に、水平変位に対する水平抵抗の増加割合が変化した。その点でのそれぞれの水平抵抗の値は9 kN/m²および7 kN/m²であった。また、水平荷重載荷開始から水平変位が2 mmまでにおける荷重の増加量は、縦配置および横配置はともに同程度であった。

次に、縦配置と横配置の中段蛇籠前面の水平変位 h_g と水平変位 h の関係を図7(b)に示す。図中には、蛇籠前面と載荷板の水平変位量が等しくなる線を破線で示している。縦配置の場合では、載荷開始から水平変位2 mmまで、蛇籠前面の水平変位は生じなかった。それ以降は、破線よりも小さい傾きで直線的に変位した。横配置の場合では、載荷開始から水平変位が13 mmまで蛇籠前面の変位が生じなかった。それ以降は、縦配置の場合とほぼ同様な傾きをもって直線的に変位した。

水平変位2mmまでの変位レベルでは、縦列線、横配置ともに水平変位に対する水平抵抗の増加割合が変わらない。金網による中詰材の変位拘束は、蛇籠がある程度変形することによって発揮される。したがって、この変位レベルで発揮される水平抵抗は、中詰め材によるせん断抵抗が支配的であると推察される。これより水平変位が大きくなり蛇籠の変形が進行すると、金網による中詰め材の拘束効果が発揮される状態となり、金網の引張剛性が大きくなる縦配置の方が水平抵抗は大きくなると考えられる。

中段の蛇籠のみ水平荷重を載荷すると、写真6に示すように、擁壁全体が載荷方向（蛇籠前面）にたわむように変形する。中段蛇籠の前面部の変位は、図7(b)に示したように、載荷面（蛇籠背面）の背面の変位よりも小さくなっていることから、蛇籠単体も圧縮や変形をとめないながら、擁壁全体でたわんで水平荷重に抵抗していることがわかる。縦配置と横配置の蛇籠前面の変位量を比較すると、蛇籠背面の水平変位が同じ場合には横配置の方が蛇籠前面の変位量は小さい。金網の引張剛性が小さい横配置では、蛇籠擁壁のたわみ量は同じであっても、金網の引張剛性が小さいために蛇籠単体および擁壁自体の変形量が大きくなっているといえる。

2.3.3 実験結果のまとめ

金網の引張剛性は列線方向と引張方向の向きが同じ場合が大きい。したがって、縦配置の金網で積み上げた蛇籠擁壁の方が水平荷重による抵抗が大きくなることが確認できた。

本実験はミニチュアを用いているため、蛇籠単体の剛性や拘束圧依存性については検討する必要があるものの、金網の引張剛性は蛇籠擁壁の水平荷重に

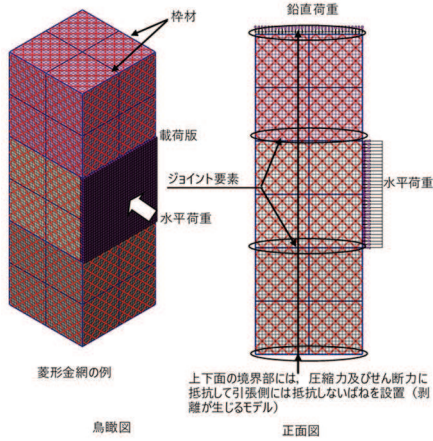


図8 水平載荷実験の解析モデル化

に対する抵抗および擁壁自身の変形に影響を与えることがわかる。

3. 蛇籠積層体模型による水平載荷実験の再現解析

蛇籠擁壁の水平抵抗力を確認するため、水平載荷実験を行い、この結果に着目し解析的に変形等を表現した。実験と同様に、解析モデル中の金網の形状を変えることで、形状毎の変形性能の差を評価した一連の結果を以下に示す。

3.1 解析モデル

前章で示した実験に対し、中詰め材を拘束する金網材にどのような力が作用しているのかを確認するため、本解析では、実験モデルの形状を忠実にモデル化できるよう、三次元の FEM 解析による。解析メッシュ図を図8に示す。この図で示すように、解析モデルは実験と同様の形状の立体モデルである（ここでは、後述の格子状配置とした）。

解析上、金網は梁部材とした。金網は主部材となる菱形金網と桝材を設置した。金網は直径を 0.5 mm とし、桝金網は 1.2 mm とした。金網はいずれも圧縮側には座屈の影響で弱いものと考えた。このため、金網の圧縮剛性は、引張剛性に対して 1/10000 となるモデル化を行った。また、引張力及び曲げ力に対しては降伏強度上限値 ($\sigma_y=235 \text{ N/mm}^2$ を仮定) とし、それ以上の荷重下では剛性が 1/10000 になるようなモデルとした。表2に梁部材の特性を示す。表2では備考欄に亀甲型金網の交差部を示したが、後述するようにここでの解析を基準に亀甲金網等の金網の形状を変えた検討を行っている。亀甲金網では2本の金網が交差して編み込まれた部分があり、この位

表2 金網材の特性

部材	項目	値	単位	備考	
金網	径	0.5	mm	亀甲金網の交差部は2倍の剛性とする。	
	断面積	0.1963495	mm ²		
	断面二次モーメント	0.0030680	mm ⁴		
	ねじりモーメント	0.0061359	mm ⁴		
	ヤング率	引張側	2.00E+05		N/mm ²
		圧縮側	2.00E+01		N/mm ²
	ポアソン比	0.30			
	単位体積重量	77.00	kN/m ³		
	降伏応力	235.00	N/mm ²		
	断面係数	0.0204531	mm ³		
降伏曲げモーメント	4.80647	N・mm			
降伏軸力	46.14	N			
桝材	径	1.2	mm		
	断面積	1.13097	mm ²		
	断面二次モーメント	0.10179	mm ⁴		
	ねじりモーメント	0.20358	mm ⁴		
	ヤング率	引張側	2.00E+05	N/mm ²	
		圧縮側	2.00E+01	N/mm ²	
	ポアソン比	0.30			
	単位体積重量	77.00	kN/m ³		
	降伏応力	235.00	N/mm ²		
	断面係数	0.67858	mm ³		
降伏曲げモーメント	159.4672	N・mm			
降伏軸力	265.78	N			

表3 中詰め材の DC モデルパラメータ

項目	値	
強度パラメータ	$c \text{ (kN/m}^2\text{)}$	0.0
	$\phi \text{ (}^\circ\text{)}$	35.0
	n	0.624
	K	22262
	R_f	0.742
ポアソン比パラメータ	G	0.210
	F	0.0866
	d	2.200
単位体積重量	$\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)}$	16.0

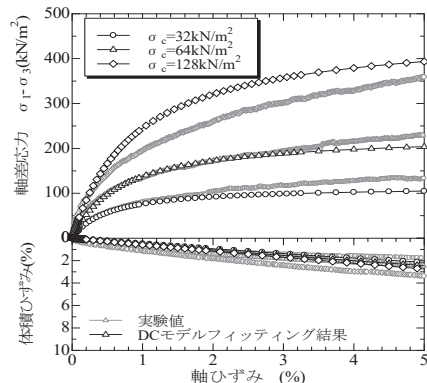


図9 中詰め材の応力-ひずみ関係

置は断面積及び断面二次モーメントを2倍としてモデル化した。

中詰め材は立体ソリッドとし、その強度-変形特性は、Duncan -Chang による双曲線モデルに基づいて設定した。設定したパラメータは田所ら⁸⁾による礫材の三軸圧縮試験結果に基づいて設定した。表3に解析パラメータを、図9に室内三軸圧縮試験の結果と、フィッティング結果を示した。なお、この三軸圧縮試験は緩詰め角礫材に対して行われたものであることをここでお断りしておく。

解析では、まずステップ-1として底面の境界ばねを設置した条件で自重及び上面の鉛直荷重を作用させ、次のステップで上面側の境界ばねを設置した後、最後に載荷版の設置と水平荷重の載荷を行った。載荷荷重は最大 50 kN/m² とし、これを 500 分割で作用

させた。解析の結果として、載荷変位が 70 mm の時の変形モードを実験結果との比較を図 10 に示す。いずれも蛇籠間の開きが生じていること、上下端の境界部の載荷側が浮き上がっていることなど、変形モードはほぼ一致する。

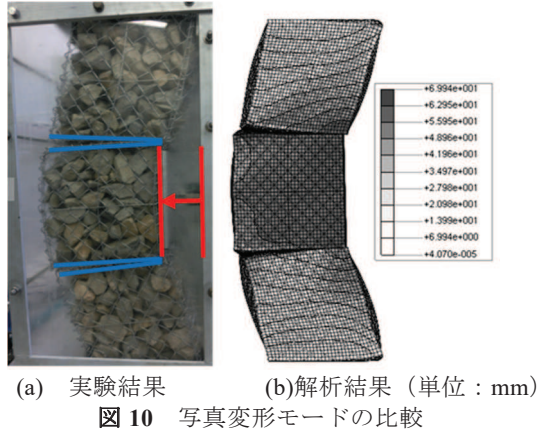


図 10 写真変形モードの比較

3.1 解析結果

前節までに示した水平載荷実験モデルに対し、金網の形状を亀甲金網、菱形金網、格子金網とした条件で解析を行った。それぞれの形状を表 4 に示す。ここでは、わかりやすさのために 3 段の内、1 段を取り出して示した。金網はそれぞれ 25 mm の目合いを基準とし、Case-1~4 は、それぞれ亀甲金網縦配置、亀甲金網横配置、菱形金網および格子状金網とした。

表 5 は解析の結果として、作用水平荷重 20 kN/m² の時の変位及び金網軸力の結果を示したものである。この結果より、菱形金網を用いた Case-3 が最も変位

表 4 解析に用いた金網の形状

	Case-1: 亀甲金網縦配置	Case-2: 亀甲金網横配置	Case-3: 菱形金網	Case-4: 格子状配置
鳥瞰図				
正面図				

表 5 解析による全体変形図と軸力図 (作用荷重 20 kPa)

項目	Case-1: 亀甲金網縦配置	Case-2: 亀甲金網横配置	Case-3: 菱形金網	Case-4: 格子状配置
変位 (mm)				
軸力 (N)				

○は棒を除く軸力の最大箇所

が大きく、Case-4の格子状が最も大きい変位になっている。一方、発生軸力はCase-3が大きく、Case-4が小さい。このことは、金網の形状によって作用荷重に対する抵抗分担が異なることを示している。すなわち、格子状の金網では全体として中詰め材の剛性が抵抗力として作用する分が大きく、菱形金網ではこれに比較して抵抗分として金網の引張力の影響が大きいことになる。軸力について見ると、Case-3では側面の端部から対角をなす金網に大きな力が作用し、Case-4では載荷面側の鉛直方向の金網に大きな作用力が生じることが特徴的である。

表5の傾向をわかりやすくするため、蛇籠1段のみをモデル化し、水平方向に分布荷重を作用させた条件での解析を実施した。基本条件はすべて3段積みと同様であるが、作用荷重は最大 $P=50\text{ kN/m}^2$ を、載荷版を介さずに作用させた。図11(a)に水平抵抗力（作用荷重）と変位の関係を示す。変位は最大変位が発生する箇所（頂部）のものを示している。解析は金網のない条件についても図示した。結果としては、先の表5と同様であり、菱形金網のCase-3のが変形剛性が大きく、Case-4が小さい。また、縦列線、Case-2の亀甲金網では方向によらず同程度である。よって、変形性能で考えると菱形金網が最も大

きく、また、菱形金網以外の変形剛性は中詰め材単体に対して50%程度以下の増加でしかない。

表6に金網に作用する軸力を示す。作用荷重は 20 kN/m^2 である。同表では、枠材を含む全体のもの、わかりやすさのために枠材を除き、さらに作用軸力の大きい側面と載荷前面について示す。全体の軸力で見ると、剛性の高い枠材への集中が大きいのはCase-2、Case-3である。Case-4は前面側の縦方向金網に作用荷重が集中しているが、枠材とその他の金網で作用軸力は大差はない。

枠金網を除くと、Case-3を除く各ケースでは載荷前面側の下側に大きな軸力が作用しているのに対して、Case-3では側面にも大きな軸力が生じていることがわかる。先の表5で見ると、蛇籠に生じるせん断変形は、載荷面下端と対角側の上端が開くようにして生じる。これによりCase-3の斜材に大きな引張力が生じ、蛇籠全体のせん断変形への抵抗として作用するものであると考える。

図11(b)に最大軸力箇所の金網に対する作用荷重と発生軸力の関係を示す。枠材と亀甲金網の交差部は除いている。いずれも作用荷重に対して降伏していることが確認されるが、Case-3が最も早い段階で降伏が生じている。図11(c)では枠材について同様に

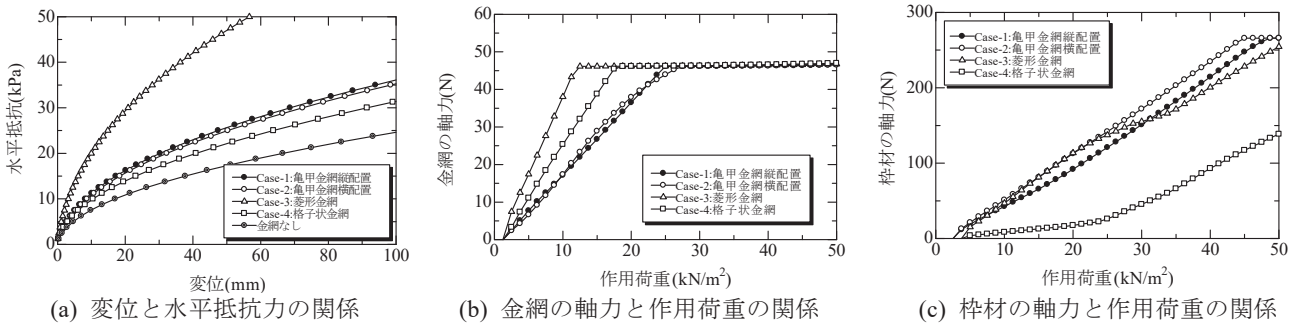


図11 最大軸力発生箇所における解析結果

表6 金網に作用する軸力（作用荷重 20 kPa ）

	Case-1: 亀甲金網縦配置	Case-2: 亀甲金網横配置	Case-3: 菱形金網	Case-4: 格子状配置
軸力 (N)				
枠金網除く軸力 (側面、前面) (N)	$N_{max}=51.03\text{N}$ 交差部以外の $N_{max}=38.43\text{N}$	$N_{max}=47.56\text{N}$ 交差部以外の $N_{max}=42.81\text{N}$	$N_{max}=46.19\text{N}$	$N_{max}=46.15\text{N}$

作用荷重と軸力の関係を示した。Case-3 と縦列線では杵材に降伏が生じているが、Case-2 では降伏に至らず、Case-4 は他のケースに比較して極端に小さい。

図 11(b)を見ると Case-4 の降伏は早く、比較的金網に大きな張力が生じやすい形状であるように思われる。しかしながら杵材への負担は小さく、金網全体として金網による変形への抵抗は小さいものと考えられる。Case-4 の杵材への軸力増加は、金網材の降伏後に生じており、変形の進行とともに杵材に作用力が分担していく傾向が窺える。Case-1, Case-2 では大差ないが、Case-2 は部材の降伏順序などの影響で非線形化しており、縦列線の方が安定している。

いずれにしても、蛇籠のせん断変形に対しては、金網の形状の影響が大きく、せん断による斜め方向の作用力に抵抗する菱形金網が、最も蛇籠全体の変形性に対して寄与しているといえる。

5. まとめ

蛇籠は、高い屈撓性、追従性、透水性などの利点を有し、変形はしても倒壊しないといった防災性の高い構造物を建設することができる。課題として、変形メカニズムの把握と評価が挙げられるため、本研究では、蛇籠の水平載荷実験の再現解析を行い、設計手法の確立へ向けての解析的評価を行った。その結果を以下にまとめる。

(1) 水平載荷試験の結果を三次元FEM解析によりシミュレーションした。その結果、変形モードはうまく表現できたが、中詰め材や金網のなじみ、あるいは幾何学的非線形性の影響により、解析の方が実験結果よりも大きめの強度特性を示した。

(2) 金網の引張特性としては、亀甲金網の縦列線方向が最も大きな変形剛性を示し、解析でもこの傾向は確認できた。正確なシミュレーションには、適切な幾何学的非線形性、材料非線形性を考慮する必要があるが、幾何学的非線形の影響はかなり大きな変形が生じた場合に大きくなる、中詰め材の材料・力学特性が支配的である響範囲では、蛇籠構造物としては大きな影響は生じないと考えられる。

(3) 蛇籠構造物のせん断変形に対する変形性に対しては金網の形状の影響が大きく、変形剛性が最も大きいのは菱形金網である。一方、最も小さいのは格子型金網である。菱形金網は、蛇籠のせん断変形により、斜めに配置された金網に大きな力が作用し、その結果、蛇籠全体の変形性に寄与する。

(4) 蛇籠全体の変形性能は、金網材単体の引張特性よりも作用力と金網材の向きによって決定するものと考えられる。

謝辞

本研究は、公益社団法人大畑財団の 2019 年度研究助成を得て実施された。このような機会を与えてくださった貴財団と関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 中澤博志, 原忠, 末次大輔, 西剛整, 栗林健太郎, 張浩, ハザリカ・ヘマンタ, 三好克明, 下村昭司, 木村瞬, 白倉和也, 柴原隆, 田端憲太郎: 蛇籠を用いた耐震性道路擁壁の実大振動台実験および評価手法の開発—被災調査から現地への適用に至るまで—, 防災科学技術研究所研究資料第 426 号, 全 114p, 2019.
- 2) 原忠, 中澤博志, 末次大輔, 栗林健太郎, 西剛整, 田所佑理佳, 三好克明, 張浩: 2015 年ネパール・ゴルカ地震における蛇籠被害の実態調査と耐震性向上に向けた具体策の検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.4, pp. I_586-597, 2018.
- 3) 中澤博志, 原忠, 末次大輔, 栗林健太郎, 西剛整, 三好克明, 田所佑理佳, 白倉和也: 蛇籠を用いた道路擁壁の耐震性評価に関する実大規模振動台実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.4, pp. I_441-451, 2018.
- 4) Hiroshi Nakazawa, Tadashi Hara, Daisuke Suetsugu, Tsuyoshi Nishi, Kentaro Kuribayashi, Katsuaki Miyoshi and Shoji Shimomura: Experimental Evaluation on Earthquake-Resistance of Road Retaining Wall Using Gabion, Journal of Disaster Research, Vol.13, No.5, pp.897-916, 2018.
- 5) Hiroshi Nakazawa, Kazuya Usukura, Tadashi Hara, Daisuke Suetsugu, Kentaro Kuribayashi, Tsuyoshi Nishi, Shun Kimura and Shoji Shimomura: Problems in Earthquake Resistance Evaluation of Gabion Retaining Wall Based on Shake Table Test with Full-Scale Model, Journal of Disaster Research, Vol.14, No.9, pp.1154-1169, 2019.
- 6) 中澤博志, 末次大輔, 原忠, 栗原裕之, 中村裕志, 有門和弘, 西剛整: 蛇籠を用いた構造物の合理的な設計手法のための変形メカニズムに関する実験研究—蛇籠の理論体系構築に向けた基礎的研究—, 防災科学技術研究所研究資料第 440 号, 27p, 2019.
- 7) Hiroshi Nakazawa, Tsuyoshi Nishi, Hiroyuki Kurihara, Daisuke Suetsugu, Tadashi Hara: Basic Study on Deformation Evaluation of Steel Wire Mesh for Rational Gabion Structure Design, EPI International Journal of Engineering, Vol.2, Vol.2, pp.109-115, 2019.
- 8) 原忠, 田所佑理佳, 柴原隆, 末次大輔, 中澤博志, 西剛整, 栗林健太郎: 室内試験による蛇籠擁壁の耐震性評価(その 1)—中詰め材のせん断特性—, 第 53 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1795-1796, 2018.