

## 蛇籠構造物の水平荷重作用時の挙動に関する解析的評価

○西剛整<sup>1</sup>・末次大輔<sup>2</sup>・中澤博<sup>3</sup>・原忠<sup>4</sup>・栗原裕之<sup>5</sup>

<sup>1</sup> CPC・<sup>2</sup> 宮崎大学工学部・<sup>3</sup> 静岡理工科大学・<sup>4</sup> 高知大学理工学部・<sup>5</sup> 栗原建材産業

### 1. はじめに

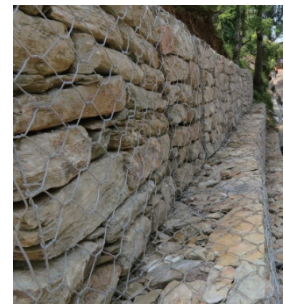
筆者らは、2015年のネパール・ゴルカ地震に対する土木・建築構造物の被災状況調査を行い、現地で蛇籠構造物が多用されていることを確認した<sup>1)</sup>。その用途は、土留めの擁壁や河川護岸、あるいはガードレールなど多岐にわたっており、蛇籠構造物の適用性が確認された。また、地震被災の調査より、柔構造である蛇籠擁壁は、通常のコンクリート擁壁に比較しても、その可撓性により耐震性に優れる可能性が高いとの認識を得た。この観点より、蛇籠擁壁に対して大規模振動台実験を実施し、さらにその解析的評価を行ってきている<sup>2)</sup>。実験及び解析の結果より、蛇籠擁壁に対して変形しやすい構造であるものの倒壊などの破壊現象は生じにくい構造であることや、変形性を軽減できる構造に対する提案を行っている。

蛇籠は、中詰め材としての岩塊材料とこれを拘束する金網材の複合材である。このような複合構造の変形特性を知る上で、複合材を構成する部材の作用力への分担や、形状による特性を知ることが重要である。特に蛇籠の場合、解析的評価を行う上でその変形特性を適切に表現する必要があるが、文献<sup>3)</sup>ではこれを枠部の梁部材とこれを拘束するばねにより表現している。

蛇籠の変形特性は金網の形状に依存すると考えられる。ネパール国で見られた蛇籠の金網の多くは亀甲型である。その向きは縦横の明確な基準はなく、施工者によって異なるように見受けられる。亀甲型金網の施工例を図-1に示す。一方、我が国においても蛇籠を用いた土留めの擁壁は種々見られるが、多くは菱形の金網が用いられており、一部格子状のものも見られる。筆者らは、これらの金網の形状の違いによる引張特性に関する実験も行っており、形状や向きによって引張特性に差があることを確認した<sup>4)</sup>。また、蛇籠擁壁の水平抵抗力を確認するために、水平載荷実験を行っている<sup>5)</sup>。本論文は、主にこの水平載荷実験に着目してこれを解析的に表現し、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ものである。



縦方向配置



横方向配置

図-1 ネパール国での蛇籠擁壁の例（亀甲金網）

### 2. 金網の引張特性について

#### (1) 金網の引張試験<sup>4)</sup>

水平載荷試験の解析的評価のために、まず蛇籠を構成する金網の引張特性についての検討を行った。先に示したように、筆者らは金網自体の形状による引張特性を確認するために、金網の引張試験を行っている。ここでは金網の引張試験の概要とその解析的評価について示す。

試験の状況写真を図-2に示す。試験は、菱形金網、亀甲型金網を対象とし、その向きもパラメータとした。表-1に試験ケースと形状、寸法を示す。なお、表中の○で囲んだ箇所は、亀甲金網の交差部であり、後述するように解析的評価に当たっては部材剛性を2倍に設定している。この箇所は、表-1でわかるように2本の線材をねじり込んで製作されている。実際には1本の線材の2倍の剛性のものではないが、金網全体の引張剛性に対しては斜材である網部の変形性に大きく依存するものと考えられる。ねじり込みの状態によっても交差部の剛性は変化するため、その設定はかなり難しいことや、上記の通りそれほど結果に影響を及ぼすとは考えにくいことから、ここでは単純に2倍の剛性としたものである。

引張試験による引張力と変位の関係を示したものが図-3である。また、試験前後の金網の状況を図-4に示す。ここでは金網に用いる線材の向きが横方向になるものを横方向(a)とし、それに直交する方向を縦方向(b)とした。横方向では交差部が直接的に引張による作用力を受けることになる。金網形状が菱形である Case1 を見ると、金網交差部に直接的に作用力を受ける(a)の方が



図-2 引張試験の例（菱形金網、横）

Analytical evaluation on the behavior of the structure of gabions under the acting horizontal load.

Tsuyoshi Nishi<sup>1</sup>, Daisuke Suetsugu<sup>2</sup>, Hiroshi Nakazawa<sup>3</sup>, Tadashi Hara<sup>4</sup>, Hiroyuki Kurihara<sup>5</sup> (<sup>1</sup> Construction Project Consultants Inc., <sup>2</sup> University of Miyazaki, <sup>3</sup> Shizuoka Institute of Science and Technology, <sup>4</sup> Kochi University, Kurihara Kenzai Sangyou Co., Ltd.)

(b)に比べてピークの立上りは早く、比較的小さい変位で端部の著しい破断が生じて強度は低下する。(b)ではピーク強度の発現は(a)に比べてやや遅いが、かつピーク強度自体は(a)に比較して大きい。両者は、ピーク後に引張力を著しく減じるが、その後、破断箇所以外の交差部での引張力の負担による一時的な増加と次の破断による緩みの繰り返しにより、作用力は次第に漸減していく。このことは、局部的な金網材の破断により変形が一時的に進行しても、次のステップでは別な箇所での緊張力が作用し、変形の進行が食い止められる可能性を示しており、中詰め材と金網の複合体である蛇籠構造物のじん性の高さを示している。

なお、図-4でわかるように、破断は治具で固定された箇所で生じる。治具で固定して引張力を作用させるため、引張ひずみがこの固定境界箇所で大きくなり、破断に至っている。このため、ここでの結果は強度を過小評価している可能性があるが、実際の蛇籠端面はコイルや番線などで固定されており、疑似的な変位固定条件でもあることから、形状による比較試験としての適用性はあると考える。

亀甲金網である Case2 に着目すると、引張方向の違いにより、変位-荷重関係の傾向は全く異なっていることがわかる。交差部が引張方向に平行である(b)では、ピークの発現が最も早く、ピーク後の強度低下もやや緩やかである。このケースでは、Case1 のような交差部で引張力を受け持つ機構ではないこと、および図-4 より交差部が解けるような変形が見られないことから、交差部の摩擦による影響が支配的であるものと推察される。(a)については強度低下は生じるもののその後に回復しており、明確なピークは見られない。図-4を確認すると、試験後には、網目形状が交差部を短辺とする長方形に変形している様子があり、他のケースに比較して変形しやすい形状であるといえる。

## (2) 解析的評価

以上の試験に対して、金網の形状をモデル化し、解析を行った。解析の境界条件は、図-5～図-7に示すように載荷位置の逆側の金網端部を水平、鉛直方向に固定した。このモデルに、所定の引張荷重を段階的に載荷し、金網の荷重-変形挙動や金網に作用する軸引張力の変化を確認した。解析では金網を線形弾性体として取り扱った。用いた金網材の直径は1.2mmであり、基本特性は後述する表-2中の枠材と同様である。また、目合いなどの寸法は、図-5～図-7に示す通りである。

解析結果として、菱形金網と亀甲金網の変形図、軸力図を図-5～図-7に示した。菱形金網は縦横の解析結果で大差ないため横方向を省いた。作用荷重(引張力)はいずれもトータルで約3kNである。軸力について見ると、菱形では4つ角の付近のものが大きく、亀甲横では外側、亀甲縦では内側のものが大きい。作用力に対する分担で考えると、亀甲縦のケースが多く部材で同程度の軸力を分担しているのに対して、菱形金網は限られた金網がほとんどの軸力を分担している。変形は亀甲金網の縦方向が小さく、横方向が大きい。菱形金網はその中間である。この順序は、図-3とも一致する。

図-8は、図-3で示した引張試験結果に対して、解析による荷重-変形関係を合わせて示したものである。引張試験では、載荷前には金網に用いる線材間の隙間があり、載荷の初期段階でこの隙間を潰しながらかみ合わせが進行していくものと考えられ、このために載荷の初期段階での勾配は小さい。解析は線形解析であり、載荷の初期段階から隙間は考慮され

表-1 引張試験ケースと供試体寸法

| Case1(a) | Case1(b) | Case2(a) | Case2(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) |
|          |          |          |          |
|          |          |          |          |
|          |          |          |          |

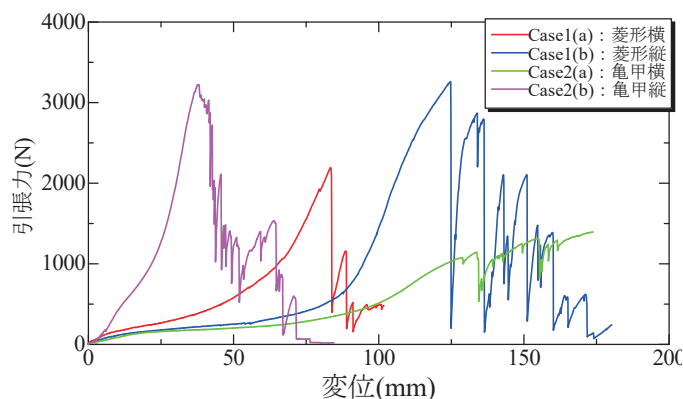


図-3 引張試験結果

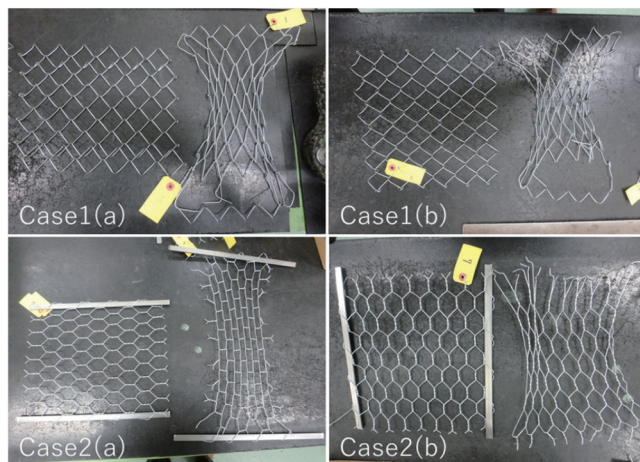


図-4 試験後の変形性状(左:試験前, 右:試験後)



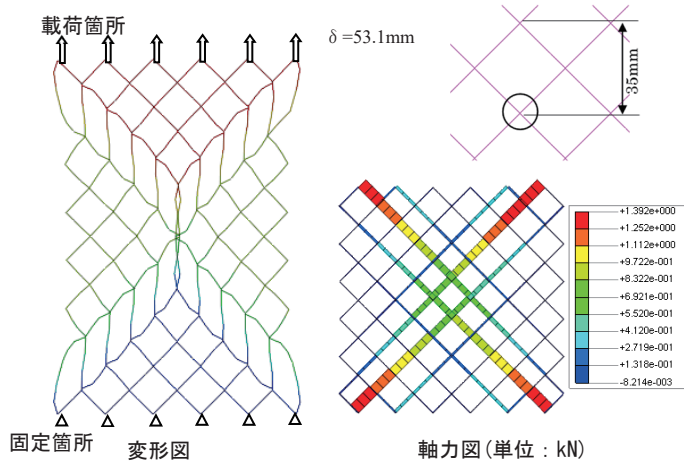


図-5 菱形金網（縦）での解析結果（作用力=3.0kN）

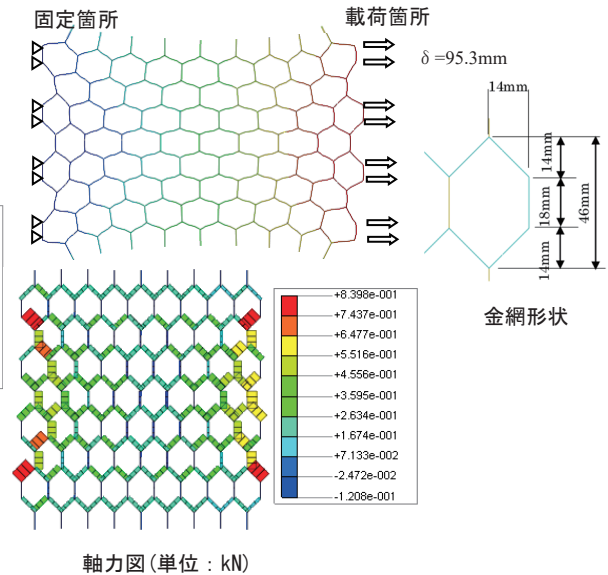


図-6 亀甲金網（横）のケースでの解析結果  
（作用力=2.96kN）

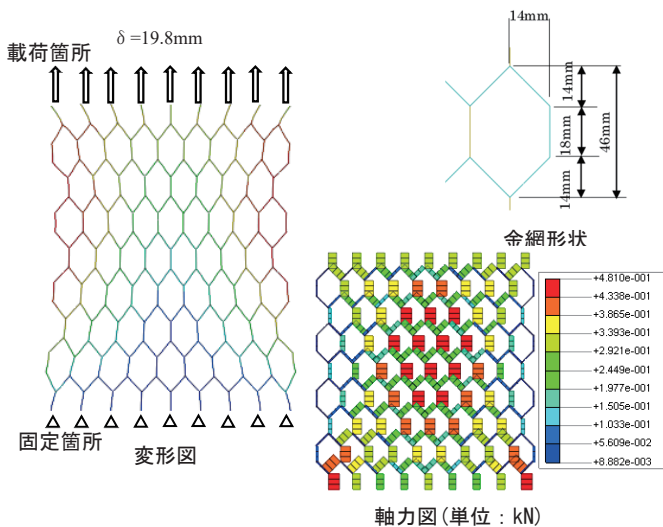


図-7 亀甲金網（縦）のケースでの解析結果（作用力=2.97kN）

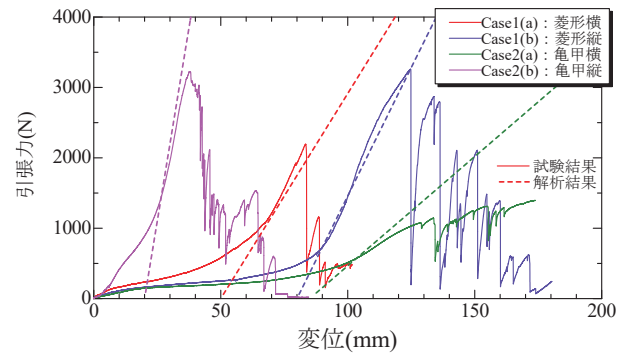


図-8 引張試験結果と解析結果の比較

ない。このため、引張試験の荷重－変形関係の勾配の変化が小さくなった時点での結果に合わせるかたちで、変形の初期値を移動させた。この図より解析による変形勾配は実験結果と大差ないようである。また、実際の蛇籠構造物では、上載荷重や背面土圧等による中詰め材からの作用力が生じ、線材間の隙間はほぼ潰された条件であると考えられる。したがって、解析に当たってここで示したようなモデルの実構造への適用は妥当であると判断する。

### 3. 水平載荷実験<sup>5)</sup>とシミュレーション解析

#### (1) 水平載荷実験の概要<sup>5)</sup>

ここでは、蛇籠擁壁の水平抵抗力を確認するために実施した水平載荷試験の結果と、そのシミュレーション解析について示す。水平載荷実験に用いた実験装置は図-9に示すようなものであり、用いた模型蛇籠の寸法は、20 cm×20 cm×20 cmの立方体である。ネパール国での事例は多くが高さ1 m×奥行き1 m×幅1～2 mであったから、このモデルは実構造の1/5スケールに相当する。なお、ここでは土圧等の水平外力による蛇籠構造物の全体挙動に対して、中詰め材や金網の特性が及ぼす要因を把握することを目的としているため、特に使用材料の強度や質量、変形剛性等に対して相似則に対する特別な配慮は行っていない。

実験では作成した模型蛇籠を図-9に示すように3段積みとし、最上段蛇籠上面に剛板を介して鉛直方向に一定圧力を載荷させた状態で、中段の蛇籠背面に剛板（18 cm×18 cm）を介して水平方向に一定速度で水平に載荷した。鉛直方向の

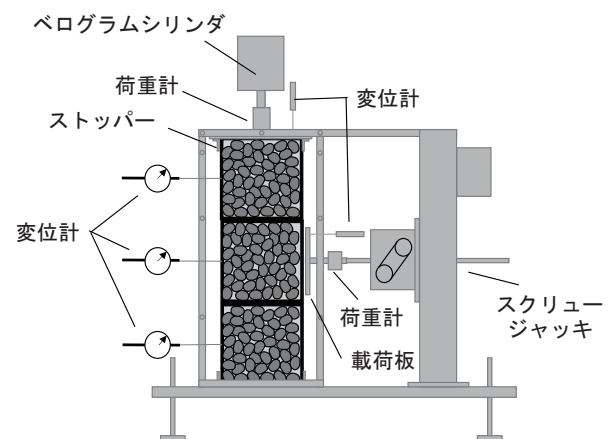


図-9 水平載荷実験装置

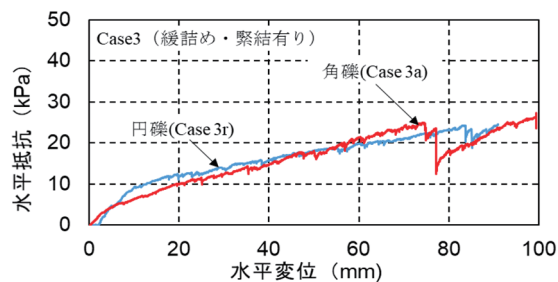


図-10 水平載荷実験結果の例

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 <sup>2</sup>   |                    |
|           | 断面二次モーメント |         | 0.0030680 | mm <sup>4</sup>   |                    |
|           | ねじりモーメント  |         | 0.0061359 | mm <sup>4</sup>   |                    |
|           | ヤング率      | 引張側     | 2.00E+05  | N/mm <sup>2</sup> |                    |
|           |           | 圧縮側     | 2.00E+01  | N/mm <sup>2</sup> |                    |
|           | ポアソン比     |         | 0.30      |                   |                    |
|           | 単位体積重量    |         | 77.00     | kN/m <sup>3</sup> |                    |
|           | 降伏応力      |         | 235.00    | N/mm <sup>2</sup> |                    |
|           | 断面係数      |         | 0.0204531 | mm <sup>3</sup>   |                    |
| 降伏曲げモーメント |           | 4.80647 | N・mm      |                   |                    |
| 降伏軸力      |           | 46.14   | N         |                   |                    |
| 枠材        | 径         |         | 1.2       | mm                |                    |
|           | 断面積       |         | 1.13097   | mm <sup>2</sup>   |                    |
|           | 断面二次モーメント |         | 0.10179   | mm <sup>4</sup>   |                    |
|           | ねじりモーメント  |         | 0.20358   | mm <sup>4</sup>   |                    |
|           | ヤング率      | 引張側     | 2.00E+05  | N/mm <sup>2</sup> |                    |
|           |           | 圧縮側     | 2.00E+01  | N/mm <sup>2</sup> |                    |
|           | ポアソン比     |         | 0.30      |                   |                    |
|           | 単位体積重量    |         | 77.00     | kN/m <sup>3</sup> |                    |
|           | 降伏応力      |         | 235.00    | N/mm <sup>2</sup> |                    |
|           | 断面係数      |         | 0.67858   | mm <sup>3</sup>   |                    |
|           | 降伏曲げモーメント |         | 159.4672  | N・mm              |                    |
| 降伏軸力      |           | 265.78  | N         |                   |                    |

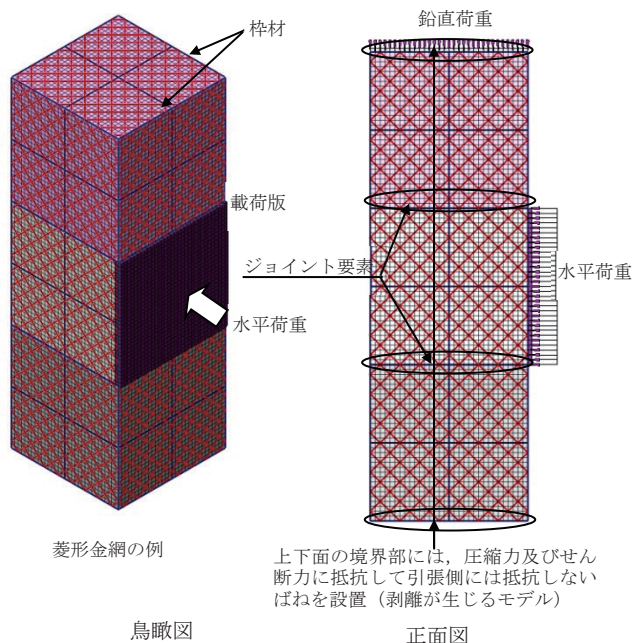


図-11 水平載荷実験の解析モデル化

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    | $c(kN/m^2)$           | 0.0    |
|            | $\varphi\ (^{\circ})$ | 35.0   |
|            | $n$                   | 0.624  |
|            | $K$                   | 22262  |
|            | $Rf$                  | 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     | $\gamma\ (kN/m^3)$    | 16.0   |

載荷圧力は 6 kPa であり、上部に蛇籠 2 段程度を積み上げたモデル（全体で 5 段積み程度）の荷重を想定した。水平載荷時の変位速度は 1.5 mm/min であり、せん断ひずみ速度に換算すると 0.5~0.75%/min に相当する。この載荷速度は中詰め材が岩石であるため、砂のせん断試験と同程度のもので設定している。金網は菱形金網であり、網材の径は 0.5 mm である。また、枠材として 1.2 mm の径の針金が用いられている。実験は、中詰め材の形状（円礫、角礫）、中詰め材の密度、上下の蛇籠間の緊結及び金網の向きをパラメータとして実施した。実験の結果の例として、作用荷重（水平抵抗力）と水平変位の関係を図-10 に示す。この図は中詰め材を緩詰めとし、上下の蛇籠同士を針金で前面、後面を 2 箇所ずつ結びつけた条件のものである。ここでは円礫、角礫で示しているが、結果として両者に大差はない。また、80 mm 前後で急激に水平抵抗力が低下しているが、これは緊結材が破断したことによっている。

## (2) シミュレーション解析

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、解析的検討を実施した。解析は、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-11 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。

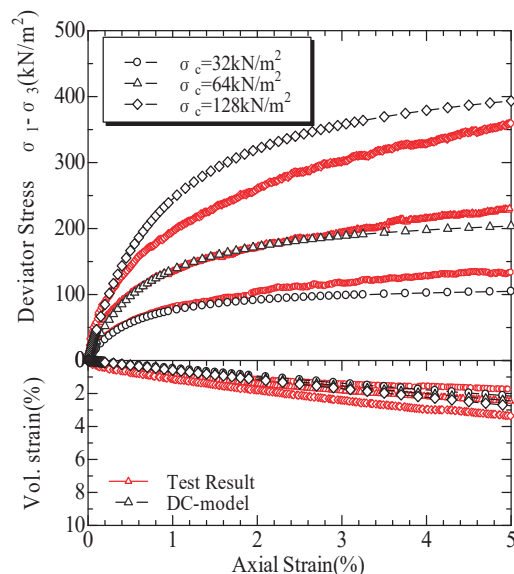


図-12 中詰め材の応力-ひずみ関係



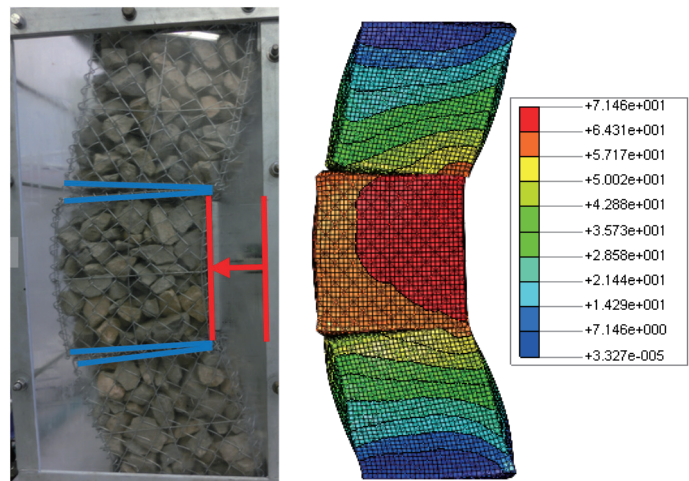
前節の金網の引張試験に対する解析結果に基づき、金網の線材は梁部材としてモデル化した。金網は主部材となる金網線材と枠材を設置した。金網線材は直径を 0.5 mm とし、枠材は 1.2 mm とした。これらの金網材はいずれも圧縮側には座屈の影響で弱いものと考えた。このため、金網材の圧縮剛性は、引張剛性に対して 1/10000 となるモデル化を行った。また、引張力及び曲げ力に対しては降伏強度上限値 ( $\sigma_y=235$  N/mm<sup>2</sup> を仮定) とし、それ以上の荷重下では剛性が 1/10000 になるようなモデルとした。上下の蛇籠間は、すべり、剥離が生じるようにジョイント要素を設置した。ジョイント要素のせん断強度は、蛇籠間の摩擦力は比較的大きいものと判断して内部摩擦角換算で  $\phi=40^\circ$  とし、最低限の粘着力として  $c=1.0$  kN/m<sup>2</sup> を見込んだ。

表-2 に金網材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 本の金網材が交差して編み込まれた部分があり、この位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<sup>9)</sup>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-12 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めの角礫材に対して行われたものであり、以下の水平載荷試験結果との比較も緩詰めめの条件を対象とする。

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/m<sup>2</sup> とし、これを 500 分割で作用させた。解析の結果として、載荷変位が約 70 mm の時の変形モードを実験結果と比較したものが図-13 である。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-14 は荷重の作用位置の変位と抵抗力の関係を実験結果と比較したものである。実験は、極低拘束圧下であり、金網の引張試験と同様に金網の線材間の隙間が十分に埋まっていない可能性がある。このため、先の図-8 と同様に解析における変位の初期値をずらした条件で解析結果を示した。その結果、載荷の初期段階では円礫の実験結果と大差ないことが窺える。しかしながら、全体的に見ると解析結果による抵抗力は実験結果よりも大きい。この差は以下の要因が考えられる。

- ① 水平載荷試験は極低拘束圧下で行われており、金網の隙間の充填に加えて水平力に対する礫材の移動が生じやすいと思われる。このため、特に載荷の初期段階での水平抵抗力は礫材が隙間を埋めるかたちで生じる体積収縮の段階であり、解析的に表現しにくい。
- ② 図-13 では載荷が進むと蛇籠間が開く現象が見られる。これは特に上下の蛇籠の回転変位を伴うものである。回転力が生じると、蛇籠間の水平のせん断力は弱まり、作用力は低下するものと考えられる。解析的にこれを表現するためには、幾何学的な非線形性を考慮すべきであるが、解析モデルの大きさ（要素数は 12 万以上）もあり、ここでは考慮していない。

以上のように、作用力で見ると解析結果は実験結果よりも大きくなるが、変形モードがほぼ同じである。本研究の目的は金網形状毎の蛇籠金網への作用の評価と比較である。このため、多少の強度や変形性に対する差が生じたとしても、変形モードが一致すれば金網形状毎の特性は比較できるものと考えられる。以上より、ここではこの解析モデルを基本として検討を進める。



実験結果

解析結果（変位の単位：mm）

図-13 変形モードの比較（緩詰、角礫）

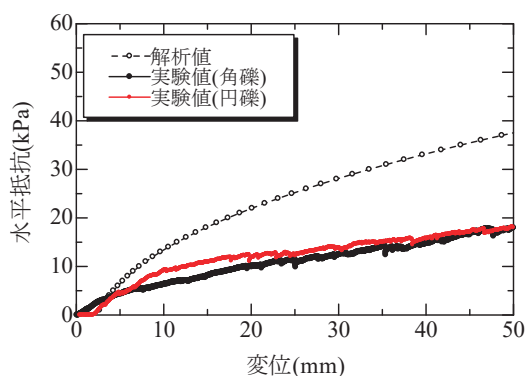


図-14 作用位置の変位と抵抗力の比較（緩詰め）

表-4 解析に用いた金網の形状

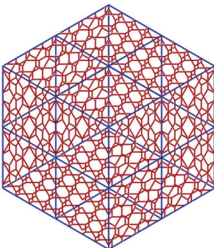
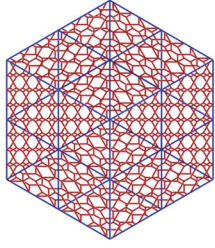
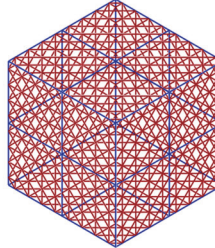
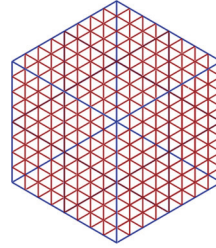
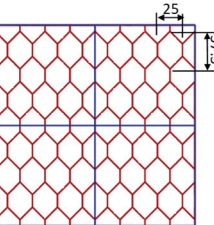
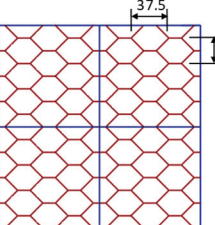
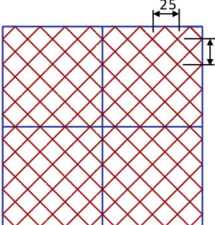
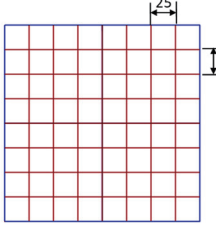
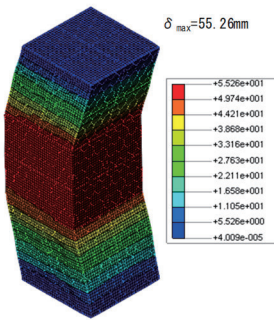
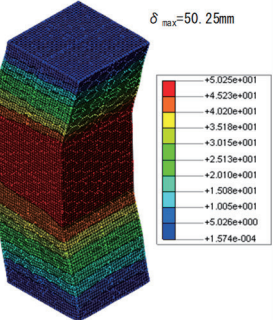
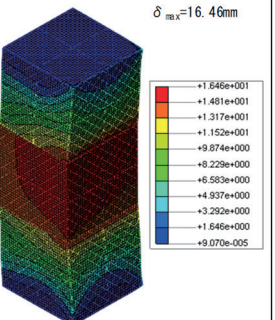
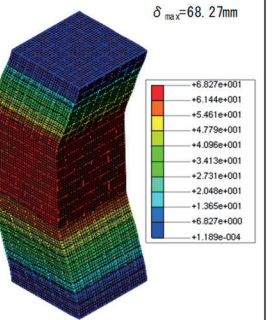
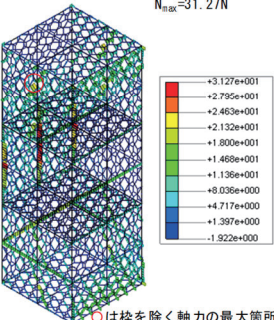
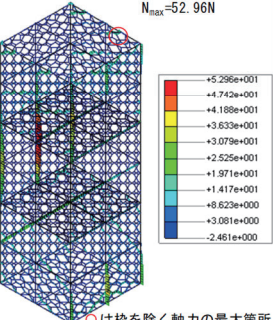
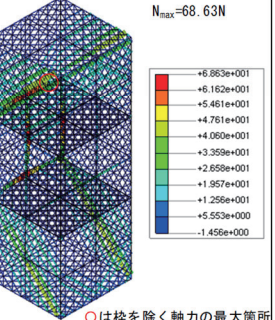
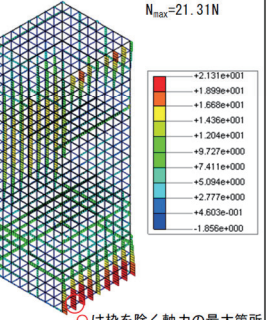
|     | Case-1: 亀甲金網縦配置                                                                   | Case-2: 亀甲金網横配置                                                                   | Case-3: 菱形金網                                                                       | Case-4: 格子状配置                                                                       |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 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 20kPa）

| 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) | <br>$\delta_{max}=55.26\text{mm}$ | <br>$\delta_{max}=50.25\text{mm}$ | <br>$\delta_{max}=16.46\text{mm}$ | <br>$\delta_{max}=68.27\text{mm}$ |
| 軸力 (N)  | <br>$N_{max}=31.27\text{N}$      | <br>$N_{max}=52.96\text{N}$      | <br>$N_{max}=68.63\text{N}$      | <br>$N_{max}=21.31\text{N}$      |

#### 4. 金網の形状による蛇籠擁壁の変形特性

##### (1) 水平載荷試験モデルによる金網形状毎の比較

2章で示した水平載荷試験のモデルに対して、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25mmの目合いを基準とした。金網材及び中詰め材の条件は先の表-2及び表-3に示した通りである。また、作用荷重の条件等も2章に示した通りである。

表-5は解析の結果として、作用水平荷重20kN/m<sup>2</sup>の時の変位及び金網材軸力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が最も変位が小さく、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材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材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。

##### (2) 金網材への作用を考慮した1段モデルの解析

図-13及び表-5の変形図を見ると、上段及び下段の蛇籠は単純せん断の挙動を示し、蛇籠金網材への作用力は上下段の



もので大きい。中段の蛇籠は圧縮力を受けるものと考えられるが、金網材の作用力は大きなものではない。したがって、蛇籠構造物全体の変形挙動に対する金網材の抵抗力は、蛇籠の単純せん断変形挙動に対して強く働くものと考えられる。また、蛇籠構造物全体の変形量は上下段の蛇籠の単純せん断変形挙動に支配されるようである。

このような点を考慮して、蛇籠1段のみをモデル化し、これに単純せん断変形を与えるように、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。金網材などの基本条件はすべて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、載荷版を介さずに与えるものとした。

図-15は、水平抵抗力（作用荷重）と変位の関係を示したものである。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実施しており、この図ではその結果も示した。結果としては、先の表-5と同様であり、菱形金網のCase-3が変形剛性が大きく、Case-4が小さい。また、Case-1、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いことがわかる。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は金網に作用する軸力を示したものである。作用荷重は  $20 \text{ kN/m}^2$  である。この図では、桝材を含む全体のものと、わかりやすさのために桝材を除き、さらに作用軸力の大きい側面と載荷前面について示したものである。全体の軸力で見ると、剛性の高い桝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材に作用荷重が集中しているが、桝材とその他の金網材で作用軸力は大差ない。桝材を除いて見ると、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の斜め方向の金網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-16に最大軸力箇所の金網材に対する作用荷重と発生軸力の関係を示す。桝材と亀甲金網材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-17では桝材について同様に作用荷重と軸力の関係を示した。Case-3とCase-1では桝材に降伏が生じてい

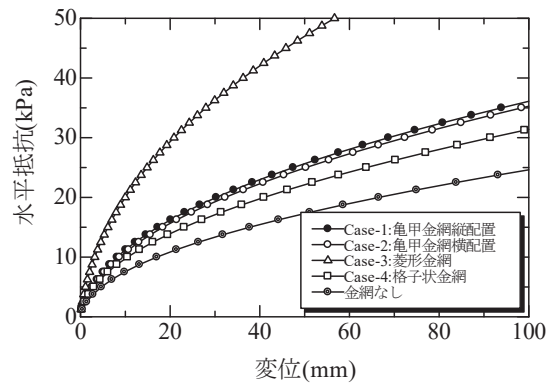


図-15 モデル頂部の変位と水平抵抗力の関係

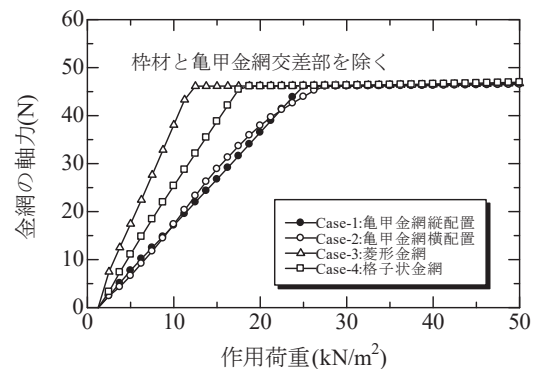


図-16 最大軸力発生箇所の金網の軸力と作用荷重の関係

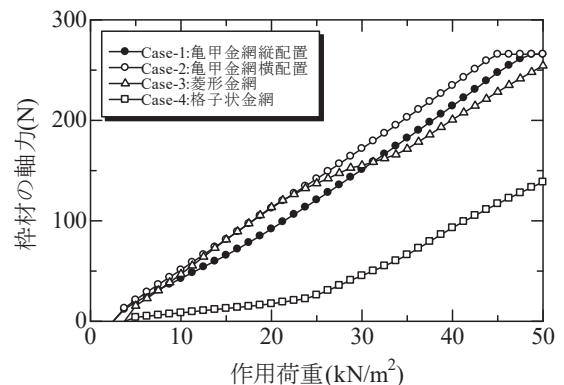


図-17 最大軸力発生箇所の桝材の軸力と作用荷重の関係

表-6 金網に作用する軸力（作用荷重 20kPa）

|                     | 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)              |                 |                 |              |               |
| 桝金網除く軸力 (側面, 前面: N) |                 |                 |              |               |

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-16 を見ると Case-4 の降伏は早く、比較的金網材に大きな張力が生じやすい形状であるように思われる。しかしながら柵材への負担は小さく、金網全体としてみると蛇籠構造物の変形に対する抵抗は小さいものと考えられる。Case-4 の柵材への軸力増加は金網材の降伏後に生じており、変形が大きくなることで柵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、Case-1 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。

なお、2 章にて亀甲金網（縦方向）が大きな強度および変形性能を与えることを示したが、ここでの結果から、単体の引張特性よりも作用力と金網材の向きによって蛇籠全体の変形性能は決定するものと考えられる。

## 5. 結論

蛇籠構造物の変形性に対して、これまで実施した水平載荷試験結果を基に解析的評価を行った。その結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 金網の引張試験の結果、亀甲金網の縦方向が最も大きな変形剛性を示す。また、解析による荷重－変形関係の勾配は引張試験の結果と大差なく、引張試験の挙動に対する全体的な傾向は解析で表現できた。
- (2) 水平載荷実験の結果を三次元 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－変形性を示す。
- (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、これが変形に抵抗することで蛇籠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。

## 【参考文献】

- 1) 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と耐震性向上に向けた具体策の検討，土木学会論文集 A1, Vol.74, No.4, pp.I\_586- pp.I\_597, 2018.
- 2) Nakazawa, H., Hara, T., Suetsugu, D., Nishi, T., Kuribayashi, K., Miyoshi, K. and Shimomura, S. : Experimental Evaluation on Earthquake-Resistance of Road Retaining Wall Using Gabion , Journal of Disaster Research , Vol.13, No.5, 2018.
- 3) 西剛整，原忠，中澤博志，末次大輔，柴原隆：蛇籠擁壁の耐震性に関する解析的評価，第 15 回日本地震工学シンポジウム発表論文集，GO01-02-06 ， 2018.
- 4) 中澤博志，栗原裕之，中村有志，末次大輔，原 忠：蛇籠金網の引張強度特性に関する基礎的検討，土木学会第 74 回年次学術講演集，pp.1-2, 2019.
- 5) 末次大輔，原忠，中澤博志，田所佑理佳，栗林健太郎，西剛整：室内試験による蛇籠擁壁の耐震性評価（その 2）－模型蛇籠擁壁の水平載荷実験－第 53 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1797-1798, 2018.
- 6) 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