

鋼製組立網の三次元弾塑性解析

新潟大学大学院
新潟大学
共和ハーモテック (株)

学生会員 田嶋 史人
正会員 阿部 和久
非会員 小関 徹

1. はじめに

古来から治水工事等に用いられてきた「かご工法」の強度や耐久性を改良したものが鋼製組立網である。棒鋼（丸棒）と金網により作られたパネルを箱状に組み立て、中に石材（中詰材）を充填した構造となっているため、透水性や可撓性に優れている。そのため、河川護岸や擁壁などで多用されており、今日の土木工事には欠かせないものとなっている。しかし、その力学特性は未知な点が多く、そのため設計法も確立していない。これまでの研究では、金網単体の有限要素解析手法を構成し、実験と解析とによりその力学特性を明らかにしてきた¹⁾²⁾。本研究ではさらに金網に加え、丸棒、中詰材を連成した三次元解析手法を構成し、実験と解析を通して、その力学特性を検討する。

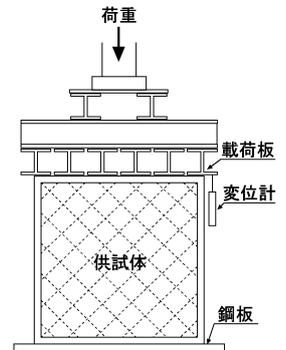


図-1 載荷方法

2. 実験概要

一辺 75cm の正方形に成形したパネルを組み立てた、立方体の鋼製組立網を対象に鉛直方向載荷実験を行った。パネルは各辺 4.5 箇所を U ボルトで締結した。そのため、接合されているパネル間や、載荷板とパネルとの間には若干の隙間が生じ、荷重が丸棒に均等に作用しない。そこで、鋼製棒の各角と載荷板および下部の鋼板との隙間に鋼材を詰めて遊びを無くし、できるだけ一様に荷重が作用するようにした。

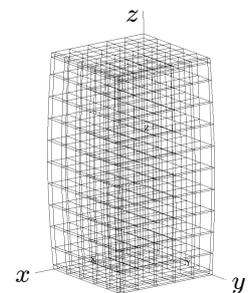


図-2 中詰材の要素分割状況

金網は線径 5mm、網目寸法 65mm のものを用い、丸棒には直径 9mm のものを用いた。また、中詰め材の粒径は 10~15cm であり、実験開始時から載荷重が上面金網を介し中詰材に加わるように、中詰材を多目に充填した。荷重は図-1 に示すように H 鋼を介し、上面全体に鉛直方向の圧縮荷重を加えている。実験ではその際の載荷重と鉛直変位を測定した。その際に変位は載荷板の対角線上に位置する 2 箇所角に取付けた変位計により測定した。

3. 鋼製組立網のモデル化

金網は、文献 1),2) に構成した手法に基づき、それと巨視的に等価な膜構造としてモデル化する。金網面内での構成式は微小ひずみの仮定の下で与える。一方、面外たわみを含む全体系での変形に対しては有限変位理論を適用し、剛性方程式を構成する。丸棒は三次元弾塑性はり要素でモデル化し、金網と同様に有限変位理論を適用する。

中詰材は三次元弾塑性連続体としてモデル化する。構成則には砂の変形解析に用いられているものを採用する。具体的には文献 3) を参考に、降伏関数に Mohr-Coulomb の破壊基準に外接するよう近似した降伏曲面を持つ関数、塑性ポテンシャルに Drucker-Prager 式を用いる。中詰材は大変形問題として扱い、接線剛性方程式の定式化に当り、updated Lagrange 法を用いる。その際に、ひずみ速度にはストレッチングテンソル、応力速度には Cauchy 応力の Jaumann 速度を用いた。

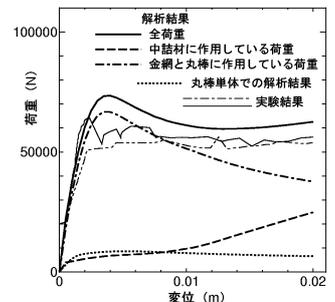


図-3 実験と解析の比較

4. 実験結果と解析結果

解析では、問題の対称性により供試体全体の 1/4 を要素分割した。中詰材は 1 辺約 7.5cm の 8 節点ソリッド要素で図-2 に示すように離散化した。図において、 $x-z$ 、 $y-z$ 平面が対称面である。なお、金網には 3 節点三角形要素を用いており、金網、丸棒とも中詰材の節点を共有するかたちで要素分割を与えている。また、鉛直の丸棒を含め鋼製組立網側面には振幅 2cm の Sine 半波形状の初期たわみを与えた。

実験結果と解析結果を図-3 に示す。解析結果では鋼製組立網に作用する全荷重と、そのうち中詰材に作用している荷重および、丸棒と金網に作用している荷重に分けたもの、および丸棒のみを対象に解析を行った際の結果も合わせて示す。実験では、50~65kN で鉛直の丸棒が座屈し、その後荷重はほぼ一定のまま変形が進行した。一方、解析では 70kN を超えた時点で丸棒が座屈し、その後荷重は一度約 60kN まで減少し、再度微増している。実験と解析とで、座屈時およびその後の

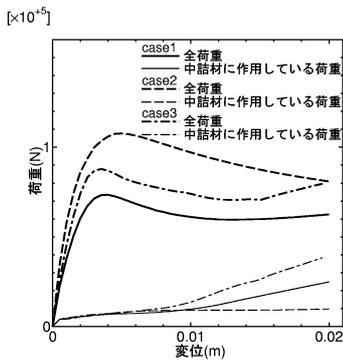


図-4 各ケースでの比較

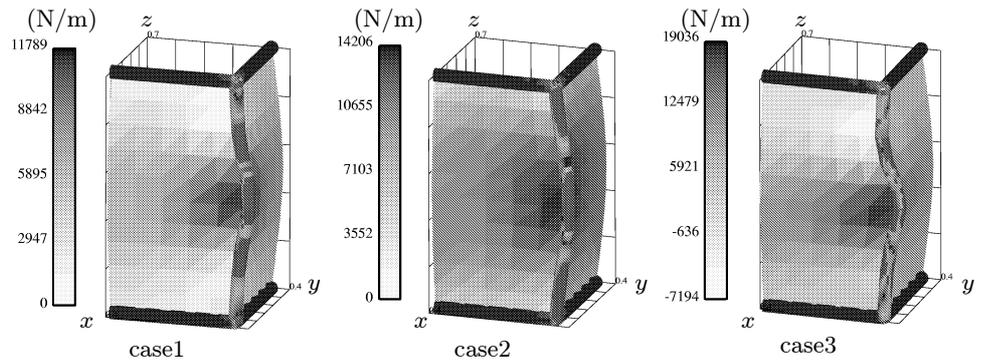


図-5 丸棒の変形状態と金網に作用する面内応力

荷重レベルに 10kN 程の差違が認められる。この理由としては、解析では鋼製組立網の力学状態が x, y 軸に関して対称条件をみたしているものとしているが、実験では必ずしも変形は一樣に進行しておらず、不均等に荷重が作用し、そのため丸棒が座屈するタイミングにバラツキを生じたことが考えられる。このような原因で、実験と解析で強度に差違が認められるが、全体としての力学挙動は概ね再現できており、解析により力学特性の把握が行えると判断できる。以下では解析により各部の役割について考察を行う。図-3 より、鋼製組立網の初期剛性は丸棒と金網によることがわかる。さらに丸棒単体で解析を行った場合、強度は 10kN 程であり、初期剛性も小さいことから、金網は丸棒の変形を拘束し、全体の剛性や強度発現に役立っているといえる。丸棒座屈後は、中詰材への作用力が増加するため、鋼製組立網全体の強度も次第に増加する。

次に、丸棒の径や金網の種類を変えた際の影響を解析に基づき検討する。解析は表-2 に示す、3 ケースについて行った。なお、表における剛性とは金網の列線長手方向の巨視的面内剛性である。図-4 に各ケースのもとの荷重 - 変位曲線を示す。case2 は丸棒の径が case1 より太く、case3 は金網の面内剛性が case1 より高いため鋼製組立網としての強度は、case1 より大きくなっていることがわかる。図-5 に変位が 2cm 時点での丸棒の変形状態および、金網に作用する水平方向巨視的面内応力の分布の様子を示す。図

表-1 金網と丸棒の種類

	case1	case2	case3
丸棒の径 (mm)	9	13	9
金網			
網目寸法 (mm)	65	65	65
線径 (mm)	5	5	6
剛性 (10^5N/m)	1.87	1.87	2.65

には丸棒の弾塑性状態を濃淡で表している。鉛直の丸棒において色の濃い箇所が塑性領域を示しており、3 ケースとも広い領域に渡って降伏している様子が窺える。丸棒の座屈状態は、case1, case3 では局所的に変形しているが、case2 では弓なり状で変形範囲が広がっている。これは、case2 では丸棒の曲げ剛性が大きく、金網の剛性が相対的に小さいため、丸棒の座屈モードが長波長になったことによる。逆に、case1, case3 では金網の剛性は丸棒の曲げ剛性と比較し、相対的に大きく、丸棒の座屈モードが短波長になっている。また、図-4 を見ると、case2 では中詰材の強度増加が、変位が 2cm の時点でも認められない。この理由は、上述したように丸棒の変形範囲が広く、それに伴い中詰材も広い範囲で大きく変形したためと思われる。case1, case3 では丸棒の変形は局所的となっているため、中詰材の変形も局所的にとどまり、その結果、強度発現も早く始まり、鋼製組立網全体としての強度も丸棒の座屈により一端低下するが、その後再度増加している。

一方、金網に作用する応力を見ると、3 ケースとも丸棒が座屈し変形している箇所近傍で大きな値を示していることがわかる。このことから、金網は丸棒の変形の拘束に寄与している様子が窺える。

5. おわりに

鋼製棒・金網・中詰材から構成される鋼製組立網全体の力学解析を目的に、三次元解析手法を作成した。鉛直載荷実験を対象に、ここに構成した手法による解析と実験との比較を行った。その結果、鋼製組立網全体の強度については、実験に比べ解析が大き目の値を与えたものの、初期剛性や鋼製棒座屈後の定性的挙動においては実験に対応する結果を得ることができた。これらの解析を通し、鋼製組立網の初期剛性と強度は主に鋼製棒の存在によるものであること、金網の役割は中詰材の側方拘束だけでなく、鋼製棒の補強にあることがわかった。さらに、金網や丸棒の種類を変え解析を行った結果、金網の面内剛性と丸棒の剛性の組み合わせにより、丸棒の座屈特性が変化し、中詰材の強度発現の様子も異なることがわかった。

参考文献

- 1) 阿部和久, 深谷克幸: 鋼製組立網に用いられる金網の弾塑性解析, 土木学会論文集, No.633, 205-215, 1999.
- 2) 阿部和久, 小嶋里志, 深谷克幸: 鋼製組立網に用いられる金網の面外変形解析: 構造工学論文集, Vol.47A, 147-154, 2001.
- 3) 若井明彦, 鵜飼恵三: 単杭の水平挙動解析に用いる砂の 3 次元構成則の検討, 土木学会論文集, No.589, 369-374, 1998.