

大型ふとんかご（鋼製組立網）の構造計算レポート①

共和ハーモテック株式会社

1. はじめに

大型ふとんかご（鋼製組立網）は、古くから河川護岸に用いられている蛇籠工法が基本になっている。蛇籠の歴史については、本誌1983年8月号に業界の先輩である日本蛇籠協会事務局（当時）の田中政治氏が「蛇籠の商品知識と流通」という題で寄稿されている。そこでは、蛇籠の歴史、種類、用途、構造、製造方法まで詳しく述べられておられ、これらを読むと、「かご工法」は可撓性、透水性、施工等の機能を有した“日本固有・伝統の”主流工法であることが分かる。

2. 近年のかご工法

近年のかご工法は、従来の蛇籠・ふとんかご工法では難しかった整形や、籠同士の連結、耐久性等の問題点を改良し、より高強度で適応性が高く、且つ多用途な構造物を構築出来る工法、

- ・ひし形金網系：鋼製組立網、かごマット、根固めマット、高耐久性築堤マット等
- ・溶接（メッシュ）金網系：かご枠、大型かご枠等

へと発展成長して来た。

3. 鋼製組立網の構造と用途

通常、鋼製組立網は、蛇籠で10年程度だった耐久性を大幅に向上させるため（山間部で50年以上）、亜鉛めっきを施した丸棒（φ13、16mm、HDZ55）で作られた鋼製枠に亜鉛めっき鉄線を用いた金網（φ8mm、SWMGS-5）を張りパネル状にした部材を箱状に組立て、その中に主に石材（中詰材）を充填し使用される。



写真1 鋼製組立網写真（H=8.4m）
（新潟県旧山古志村、中越地震後に撮影）

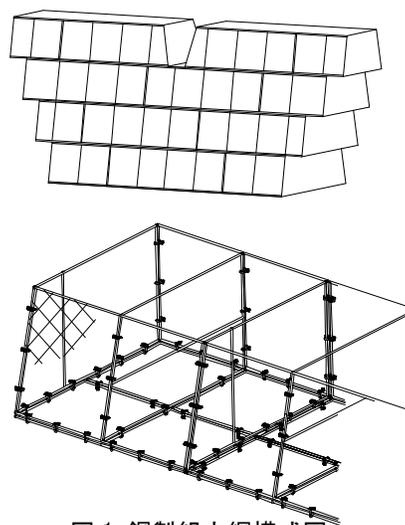


図1 鋼製組立網模式図
（ユニットロック方式）

構造方式は大別して、

- ・長方形パネル単体を組み合わせて六面体を構成し、大型かごの集合体で重力式構造物を構成するパネル方式と
- ・かご同士の接続面を共有させることで連続した一体性のある重力式構造物を構成するユニットロック方式（写真1、図1）がある。

前者は定型の規格品のため主に不連続な構造物や、小規模で納期が短い構造物に有効である。また後者はパネル方式と異なり自由設計のため、施工場所に合わせた経済的断面や必要強度の設定が可能であり、複雑で大規模の構造物に有効である。

両方式共、組立てに関しては、施工現場でボルト締めによる組立て、石詰め等簡単な作業で済み、少人数での迅速な施工が可能である。そのため、緊急性を要するものを初め、設置箇所によっては他の工法より優れている場合が多くあり、近年、河川護岸や擁壁、地滑り防止工、緑化、水質浄化等として使用されるようになって来ている。

4. 鋼製組立網の力学的特性

長年、鋼製組立網は様々な土木分野で経験・実績ある製品として使用されてきたが、その構成部材の力学的特性には未解明な点が多かった。

しかし、設置環境に合致した構造を提案できるようにするため、最近の新潟大学と弊社との共同研究（数値計算・実験）によって、その主要構成部材（金網、中詰材、枠材）の力学的特性が解明されてきている（図2）。これにより解明された項目は、

- 金網パネルの枠応力評価
- 連結金具の強度評価
- 躯体の耐圧縮性評価

という形で部材設計に反映されるようになった。

5. 研究結果からみる鋼製組立網の特長

5.1 ひし形金網単体の特長

ひし形金網の強度は、線径、網目（ピッチ、幅）によって支配される面内強度で示される（図3）。つまり、線径が同一ならば網目が小さい方が、網目が同一ならば線径が太い方が、面内

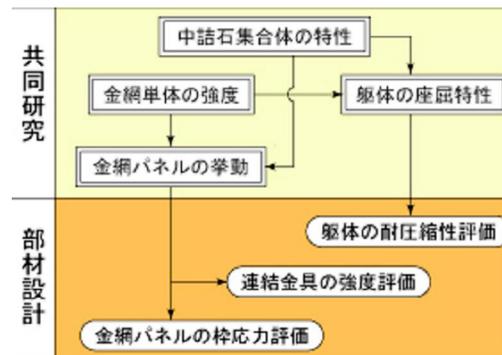


図2 大学との研究と部材設計の関連

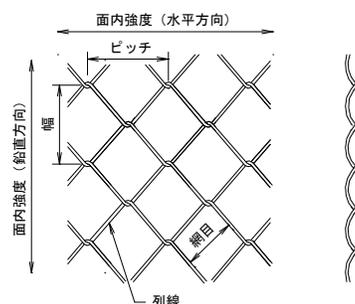


図3 ひし形金網

強度は向上する。鋼製組立網の金網は、鉛直方向の面内強度の方が水平方向の面内強度に比べ高くなる傾向を示す。

また、ひし形金網の塑性域は極めて広く、変形が相当進行しても列線の破断は生じ難い。

5.2 金網パネルの特長

金網パネルは、鋼製組立網の単位部材であり、金網の周囲に枠材を通したものを言う（図4）。

金網の面外変形量と周囲枠材への反力で示される金網パネルの強度は、金網単体の面内剛性（面内に生じる力とひずみの割合）に依存する。

面内剛性が高ければ、金網パネルの面外変形量は小さくなるが、周囲の枠材に対する作用力が大きくなり、逆に面内剛性が低ければ面外変形量は大きくなるが周囲の枠材に対する作用力は小さくなる。

5.3 中詰石集合体の特長

鋼製組立網は、箱状に組み立てた金網パネル内に中詰材（主に石材）を充填する構造となっているため、中詰石集合体の特性を把握する必要がある。

中詰石集合体は、概ね、砂・土等と同じような傾向（内部摩擦角、ダイレイタンスー等）を示す。また、実際に充填する径（玉石）で想定した場合の内部摩擦角は40°程度である。

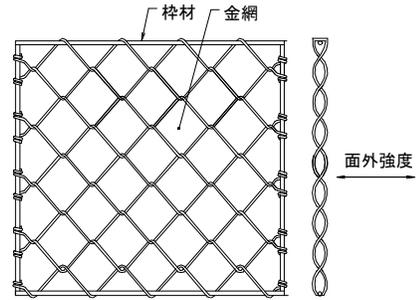


図4 金網パネル

5.4 鉛直方向荷重に対する特長

鋼製組立網の鉛直方向荷重に対する強度の特筆すべき点は、他の重力式構造物とは異なり、ある範囲までは枠材の座屈後も全体強度が低下せずむしろ向上するという挙動を示す点である。また、各部材の強度役割は、金網+枠材が鋼製組立網の座屈強度を決定する主部材であり、金網+中詰材が座屈後の強度低下を防止する部材であると言える。

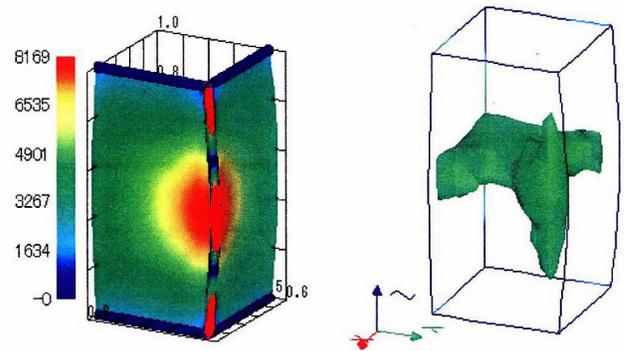


図5 鉛直解析による各部材の応力状態
(左：金網・枠材、右：中詰材)

5.5 水平方向荷重に対する特長

鋼製組立網の水平方向荷重に対する特性は、初期段階で金網+枠材、ある程度変形が進行した段階で中詰材が支配的になる。これは、中詰材の広い範囲に渡って水平方向荷重に対する抵抗力が生じること（図6）から言える。

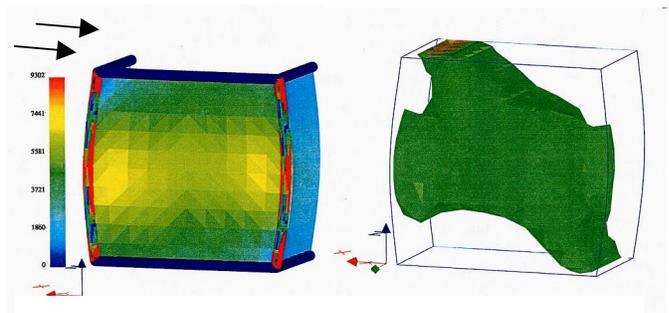


図6 水平解析による各部材の応力状態
(左：金網・枠材、右：中詰材)

5.6 鋼製組立網全体の力学的特長

以上のように、鋼製組立網は外力に対して金網・枠材・中詰材の各要素が相互作用し高い躯体強度を発揮する。また、経験的にメリットと考えられている可撓性 — 変形が生じても強度低下を起こさない特性 — 等の躯体特性も定性・定量的に解明され、また、これらを活かしこれまで計算が複雑で力学的に満足され難かった部材強度計算法（部材強度計算）が確立されつつある。

6. 鋼製組立網の設計 内的安定：部材設計

強度計算は、安定計算により外的安定を確保した断面形状を基に行う。具体的には、金網パネル枠材の応力値を評価する要素評価、該当段の耐圧縮性を評価する圧縮評価、金網パネル同士を連結する金具強度を評価する一体性評価を行う（図7）。これらの評価によって、鋼製組立網を構成する必要部材強度が設計でき最適・安全な仕様を提案できる。

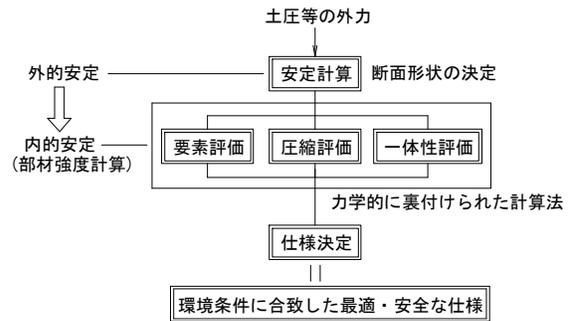


図7 鋼製組立網の設計

6.1 要素評価 ～ 金網パネルの枠応力評価 ～

金網パネルには、土圧等の外力が中詰材を介して作用する。金網に作用力が生じると、金網の面外変形に伴って周囲の枠材に反力を生じさせる為（図8）、枠材にとっては、この反力が作用力になり曲げモーメントが発生する。この曲げモーメント M は、式（1）で示される。

$$M = \frac{3}{28} wl^2 \quad \dots\dots (1)$$

6.2 圧縮評価 ～ 躯体の耐圧縮性評価 ～

各段には、上段からの自重および上載荷重・土圧等の外力により圧縮力が作用する為、該当段において座屈強度を求める必要がある。段の座屈強度 P_1 、 P_2 は式（2a）、（2b）を用いて求める（図9）。

$$P_1 = EI \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \quad \dots\dots (2a)$$

$$P_2 = EI \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 + k \left(\frac{l}{n\pi} \right)^2 \quad \dots\dots (2b)$$

ここで、 EI ：枠材の曲げ剛性、 l ：1段高さ、 k ：金網のバネ定数、 n ：座屈モードを決定する係数

6.3 一体性評価 ～ 連結金具の強度評価 ～

連結金具に生じる作用力は、主に金網パネル枠材に金網からの作用力が生じる時に発生する反力と枠材の応力との関係から求める。ここで、反力は、図8のモデルの支点反力 R （式（3））で示される。

$$R = \frac{32}{28} wl \quad \dots\dots (3)$$

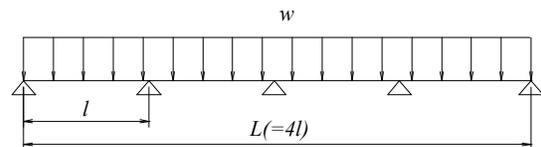


図8 要素評価における金網パネル枠材モデル

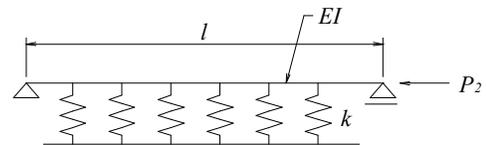


図9 圧縮評価における金網パネル座屈モデル

大型ふとんかご（鋼製組立網）の構造計算レポート②

共和ハーモテック株式会社

1. 力学的に裏付けられた鋼製組立網

経験・実績によって使用されてきた鋼製組立網は、最近新潟大学との共同研究によってその力学的特性が把握され、部材設計に活かされるようになってきている。

前号は、鋼製組立網の構造・用途、力学的特性（共同研究）、部材設計法について述べた。本号では、鋼製組立網の力学的特性について共同研究結果図を中心に述べる。

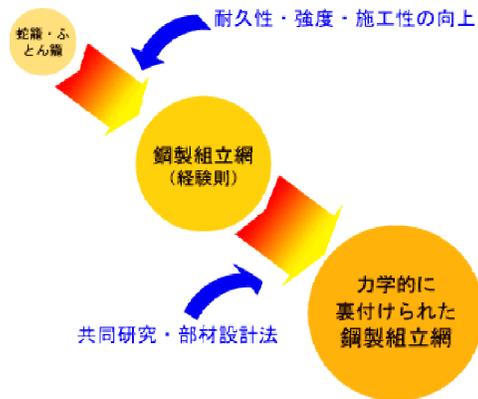


図1 鋼製組立網の変遷



写真1 鋼製組立網 (H=9m)

(埼玉県秩父郡、部材設計で仕様決定した例)

2. 鋼製組立網の力学的特性の実験・解析

鋼製組立網の力学的特性は、大学との共同研究によって、構成部材（金網、枠材、中詰材）、躯体の力学的挙動が解明されつつある。共同研究は、有限要素法による数値計算と各種実験によって行われる。

計算方法は、金網と力学的に等価な二次元の連続体モデルを誘導し、それに基づき解析を行う方法を採用。解析は、ニューラルネットワークにより評価し効率化を図る。

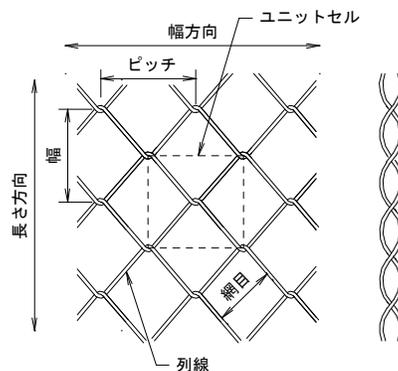


図2 ひし形金網

2.1 金網パネル実験・解析

金網は三次元的に編まれた多数の波形の列線により成形されている（図2）。解析にあたっては、列線で形成される最小単位（ユニットセル）

を適切にモデル化し、金網単体の面内強度特性、金網パネルの面外強度特性を計算した。

図 3、4 に解析・実験結果例を示す。図より、解析結果と実験結果との一致により解析手法の妥当性が確認され、金網パネルの力学的挙動（応力、ひずみ等）が明らかにされた。また、金網の面外変形に伴い、金網パネル周囲枠材に反力が生じること（図 5）、この反力は金網の面内剛性が高い程大きくなることが確認された。

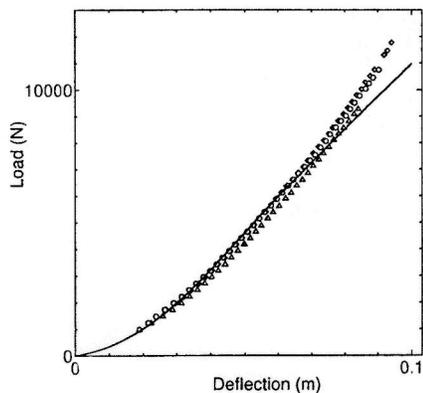


図 4 金網パネルの面外強度結果例
(ライン：解析結果、プロット：実験結果)

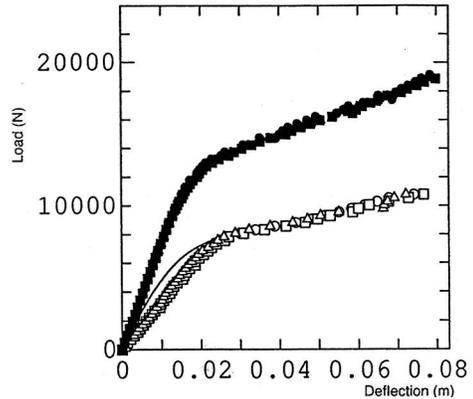


図 3 金網の面内強度結果例
(ライン：解析結果、プロット：実験結果)

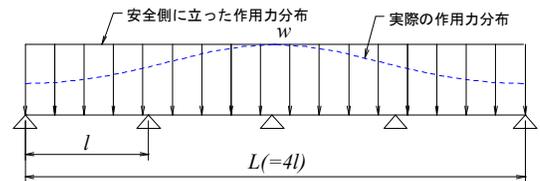


図 5 金網から枠材への簡易作用力モデル

2.2 中詰石集合体の実験

中詰石集合体の特性を把握するため、一般的に要素試験として広く用いられている三軸試験を行った。

実製品の中詰石は粒径が 150~200mm 程度の玉石・割石等を用いるが実験では、粒径 4.75~31.7mm の石を用い、実験結果に外挿近似を行って実製品の中詰石の径に拡大した場合の結果を求めた（図 6）。

図 6 より、中詰石集合体の内部摩擦角は概ね 40° と考えられる。また、他の実験データより基本的に砂と同じような傾向（内部摩擦角、ダイレイタンスー等）を示す。

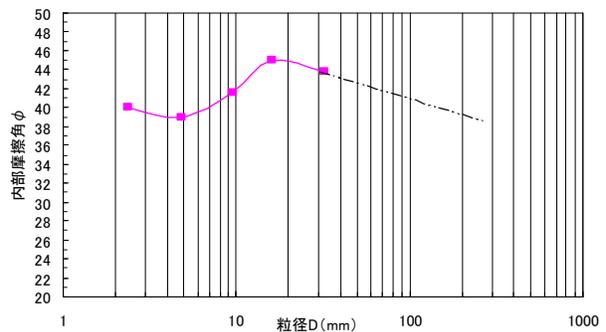


図 6 三軸試験結果と外挿法による内部摩擦角

2.3 金網パネルー中詰石連成下での力学的挙動

実製品の使用状態を考え、鉛直荷重に対する挙動、鉛直荷重+水平荷重に対する挙動を求めため載荷実験を行った(図7)。また、金網、枠材、中詰材のそれぞれをモデル化し、想定される状態に合致する構成理論式の下、有限要素解析を行う。

2.4 鉛直荷重に対する挙動

図8に実験・解析結果を示す。実験条件によって多少ばらつきがあるものの、解析結果は、中詰材を十分に詰めた実験結果と概ね一致した挙動を示すことより、鉛直荷重に対する鋼製組立網の挙動を再現できると考える。実験・解析結果の特筆すべき点は、一般的な構造物とは異なり、ある範囲までは座屈後も全体強度が低下せず、むしろ向上するという挙動を示す点である。

また、本解析法を用いて鋼製組立網各部材の強度役割を把握することができる。つまり、鉛直荷重に対して鋼製組立網の座屈強度を決定する主部材は枠材+金網であり、座屈後の強度低下を防止する部材は金網+中詰材であると言える。

2.5 鉛直+水平荷重に対する挙動

図9に実験結果を示す。実験は供試体毎に異なる一定な鉛直荷重を作用させた状態で水平荷重を増分していく。図より、水平変位が進行しても全体強度の低下が全く見られず、強度は単調に増加することが分かる。また、最終的な強度は鉛直荷重によらず、全供試体ともほぼ同一な強度を示すと言える。

このような大学との実験・解析によって鋼製組立網の力学的挙動が解明され、設置環境に合致した構造を提案出来るようになってきた。

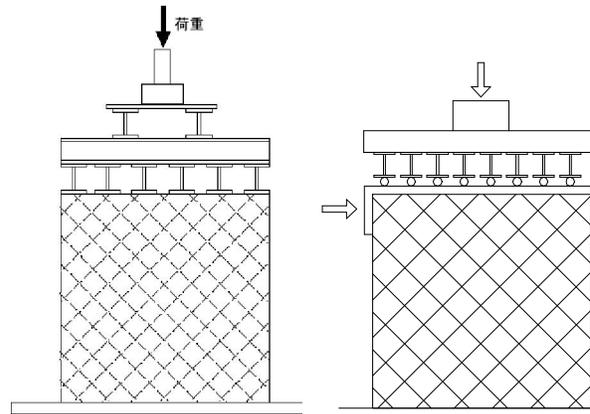


図7 載荷実験状態

(左：鉛直載荷実験、右：鉛直+水平載荷実験)

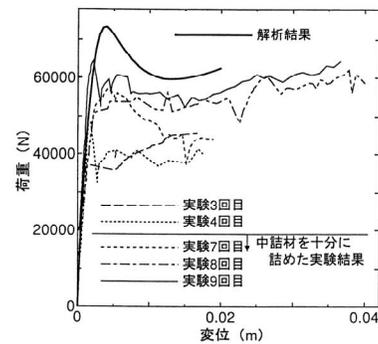


図8 鉛直載荷実験結果と解析結果

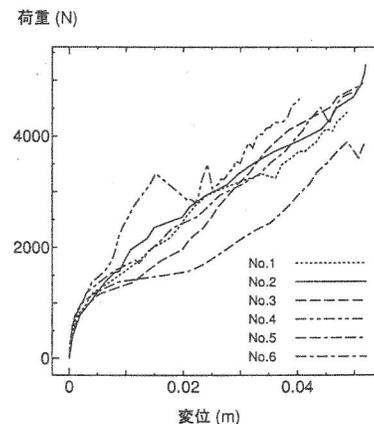


図9 水平載荷実験結果例

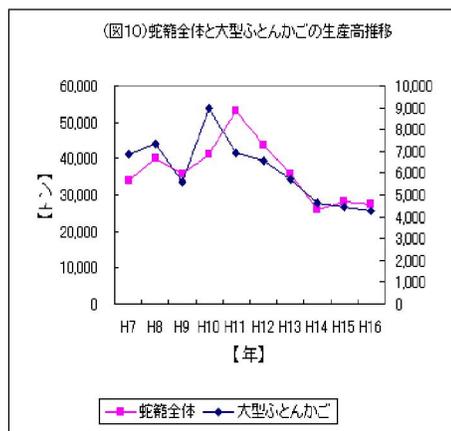
3. 生産と流通

経済産業省統計によると、蛇籠全体の生産高は平成11年に53,273トンでピークを迎え、その後は減少傾向にある(図10)。

その中で、大型ふとんかご(鋼製組立網)の生産高(当社推計)は平成10年に9,000トン程度(枠材の棒鋼も含む)でピークを迎え、これも、その後は減少傾向にある(図10)。

下図で明らかのように、その軌跡はほぼ蛇籠全体の傾向と同一であり、シェア(重量ベース)は15%前後であると思われる。

※枠材を除く金網(線材)限定では9%前後。



この平成10-11年にピークを迎えた主因は、平成9年の河川法の改正、これに続く平成10年の「美しい山河を守る災害復旧基本方針」の策定によって、「すべての河川で多自然型川づくりを実施すること」「河川内で行われる全ての災害復旧事業において、河川環境の保全に配慮した復旧を実施すること」といった指針に対して、構造の殆どが自然材料で構成され、透水性に優れる蛇籠工法が高次元で適合したことによると思われる。しかし、その後は、土木予算の縮小、他工法の多自然性への対応・改良もあって需要は減少傾向にある。

次に読者に生産・流通のボリュームを感じていただくために分母(比較対象)を金網全体に

採ると、①金網全体に占める一般金網(溶接金網以外)の割合は約35%弱で、②一般金網全体に占める蛇籠の割合は30%強である。

すなわち、蛇籠は金網全体に対して10%程度の割合(重量ベース)であると思われる。

大型ふとんかごの流通経路は、メーカーが各地域の販売代理店を通じて工事施工会社に製品を引き渡す間接販売方式が基本である。

地域的な特徴としては、新潟県を中心に、北陸から東北の日本海側にかけてエリアの需要が特に多い。これは、地すべりなどの地学的特性や豪雪(融雪)などの気候的特性と、新潟県が大型ふとんかご工の開発・育成を主導された経緯が組み合わさったことであると考えられる。

4. 最後に

籠工法は、古事記にも記述が見られる、二千年の歴史をもつ日本固有・伝統の土木工法である。これを引き継ぐ我々は、これを科学的、工業的に進化させていく責務を持っている。

大型ふとんかご工法(鋼製組立網)が、近年において、多自然工法推進のオルガナイザー役の一翼を担ったことに喜びと誇りを感じると共に、今後も他工法と切磋琢磨して我が国の土木工法の品質向上に微力ながら貢献し続けたい、という決意を新たにす所存である。

5. 参考文献

- ・有限要素法による鋼製組立網の力学挙動解析、計算工学講演会論文集 Vol.9、2004、阿部、他
- ・鋼製組立網の三次元弾塑性解析、構造工学論文集、Vol.49A、2003、阿部、他
- ・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、2001、阿部、他
- ・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、1999、阿部、他