

スマートブリッジ概念に基づく折畳み型の緊急復旧対策用 モバイルブリッジ™の研究開発

近広 雄希* , 有尾 一郎** , 田中 義和*** , 中沢 正利****

Development of the Folding Bridge Mobilebridge™ for a Emergency & Recovering Bridge based on the Smart Bridge Concept

Yuki CHIKAHIRO, Ichiro ARIO, Yoshikazu TANAKA and Masatoshi NAKAZAWA

We have experienced many natural disasters such as earthquake, flood, Tsunami and so on. It is necessary to develop a new rescue structure to protect from them. We have to consider how to recover a damaged construction or rebuilt up a new type of the rescue system as soon as possible after a disaster because time is very important to save lives after emergency situation. Meanwhile, we have created the optimum truss structures by micro-truss approach with a large degree-of-freedom in computing method. This is good skill to form new design for the objection of a light structure or high stiffness under a condition in mechanics. To design a new emergency bridge which is called as “Mobile Bridge™”, we have originally created the formation of the optimization truss by computing mechanics. We realize it is necessary to develop this mobile bridge as soon as possible for next national disaster.

Key Words : Structural Optimization, Folding Bridge, Mobile Bridge™, Deployable Structure, Emergency Bridge,

1. はじめに

近年地震、津波、台風などによる自然災害が多発し、迅速な対応が求められている。例えば、東日本大震災における東北沿岸部の津波被害 ((2011.3.11) Photo 1 (a))、台風 12 号による紀伊半島集中豪雨に伴う土石流による土砂ダム発生後の流橋被害 ((2011.9.4-5) Photo 1 (b)) などは未曾有の被害をもたらし、落橋や土砂等によるライフラインの寸断から、多くの集落が孤立化した。しかしながら、その災害復旧の現状としては、現場ごとに異なる状況や二次災害などの発生も予測されることから、復旧活動に様々な課題が多く存在する。特に、災害直後の被災地への道路や橋の復旧方法など迅速なりカバリー対策に緊急の課題があり、新しい復旧手段や安全なシステム開発が必要であり、それら技術開発が望まれている。一方、既存の復旧システムの一つに、Photo 2 (a)、(b) のような国土交通省の各地方整備局および防衛省が保有する応急仮設橋を用いた復旧技術がある。これらは、予めブロック単位で構成しており、現場で組み合わせることで架設時間を短縮している。しかし、このブロック単位架設でも、運搬方法と組立条件に多くの課題を持つ。特に小型の仮設で



(a) A broken bridge by Tsunami at 3.11.2011



(b) A bridge broken by debris flow at 10.5.2011
(Photographer Dr. Kazuo Ishino in Taisei Kensetsu Ltd.)

Photo 1 Example damaged bridges by natural disaster

* 修士在学 広島大学大学院工学研究科社会環境工学専攻
 ** 博士 (工学) 広島大学大学院工学研究科社会環境空間部門
 *** 博士 (情報工学) 広島大学大学院工学研究科機械システム・応用力学部門
 **** 工学博士 東北学院大学工学部建設環境工学科



(a) Site of temporary construction



(b) Another completed reconstruction

Photo 2 Recurrent emergency bridges after Higashi-nihon earthquake disaster in 2011.

あっても既存の復旧方法に基づくため、2週間～1ヶ月の(現場によって架けられないところもある)基礎工事に時間がかかり、機動性と現場適用性などの問題を抱えている。そこで、パイロット的に緊急車両一台でも、迅速に通行が可能となる新しい緊急仮設橋¹を開発・構築しておくことは、地震が多発する我が国にとっては必要不可欠な復旧ツールと考える。

本研究は、Holnickiら¹⁾がハニカム状の骨組トラス部材からなるアクティブ制御可能なショックアブソーバシステムを持つ、マルチ・フォールディング概念(MFM)を具現化し、このMFMのスマート折畳構造の機構概念と構造最適化研究から迅速施工可能なモバイルブリッジの開発を研究対象とする。従来の構造物の形態は、その構造物の目的や用途などに応じて既設の標準的な構造物の形状をもとに、その設計条件を満足するように材料や寸法などが人為的に修正され、最終的な形状・断面等の構造形態が決められてきた。

近年、構造の形態を創生させる方法として、例えばグラウンドストラクチャー法^{2)~6)}、均質化法^{7)~10)}、遺伝的アルゴリズム^{11),12),13)}、セル・オートマトン^{14),15)}などの設計手法が開発され、これらは構造の位相最適化問題として知られている。均質化法は拡張された設計領域内のマイクロストラクチャーを最適化することでこの問題を回避しているが、チェッカーボードや剛性の強さに対しては、工学的課題が多いのも事実である。ここでは、形態アプローチの基礎概念を通して最近の計算力学における位相最適化原理の開発を主として試みる。反復法による形態形成に関しては、本間・登坂¹⁶⁾によって系の状態方程式を自律分散的に構築し、反復計算法を用いて構造物の形態解析が行われており、また、Xie & Steven¹⁷⁾によってFEMを繰返しながら「不要な部分を破棄する」という単純なプロセスを経て、形態制御を行っていく、ESOが開発されている¹⁸⁾。

本研究は、上述の手法と同様に数理最適化手法を用いず単純なローカルルールを定義した上で、その応答系を設計変数(剛性)にフィードバックさせる非線形反復システム(この研究報告では、剛性制御と呼ぶ)によって構造形態を創生する方法を提案する。これまで数理最適化手法や感度解析法などの数多くの形態最適化手法が行われてきたが、一般に全ての部材の応力がある値以下に保った上で重量を最小にするという方法だと、ローカルルールは要素数と同じだけ制約条件が課せられ、最適化を満たすには重荷となる。たとえ、それを満足したとしても、それが大局的に満足する非線形最適解が得られるとは限らない。そこで、本研究では拡張された設計領域内に仮想の格子トラスを満たし、オリジナルなESO法の欠点であった要素の復活を可能とすると共に、応力応答を設計変数にフィードバックするシステムによって、最終的に最適構造形態を計算的に生成する方法を開発した。その最適構造スキームを活用し、橋梁などの長細構造物の耐重量軽量最適構造設計ならびに現場に橋をコンパクトに運搬し速やかに展開できる、展開構造を融合させたスマートブリッジ概念を具現化させるためのモバイルブリッジの基礎設計研究の現状をレビューする。この解析法によって、構造物の形状レイアウト設計や材料配置問題に対して、構造工学的に有用で自由度の高いデザインが可能となると思われる。

2. 形態形成の理論

ここでは、古典的なMichellトラスの最適化構造(1904)の概念¹⁹⁾を通して、最近のローカルな部材応力に主眼を置いた構造形態の形成法について述べる。

2.1 Michellトラスの最適化構造概念

トラス構造の形態設計あるいは位相設計問題(layout design problem)におけるトラス構造の最小重量設計

¹ ここでは、その開発目標から「モバイルブリッジ™」と呼ぶこととする

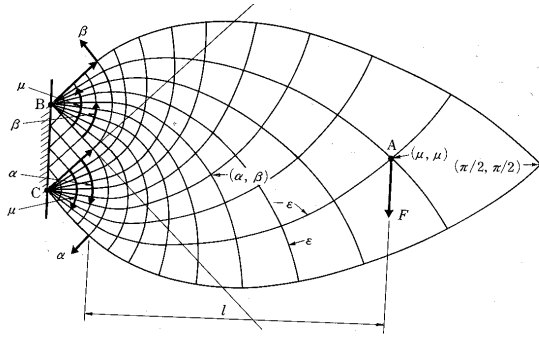


Fig.1 A coat hanging problem for optimum layout form

問題については、Hemp の方法および Michell の形態決定法がある。Hemp の方法は設計領域内に節点数を制限して実用的な形態を創造する方法であるが、これに対して制限を与えず無限に近い (計算上大規模な自由度) 方法で、骨組の組み合わせを想定することで、最適な構造が得られる。この考え方を拡張して、無限の広がりを持つ領域内に無数の節点が分布するモデルを考えると、Michell によって提案された連続骨組 (Continuous Framework) あるいは構造連続体 (Structural Continua) と呼ばれる構造概念に至る。これに基づく橋の最適形態をスマートブリッジの設計思想、あるいは概念とする。

Michell はこのような構造モデルの最小重量設計問題の双対問題の特性を拡張した概念から構造形態に対して最小重量構造の形態が直交曲線網で与えられることを導き出し、支持条件、荷重条件に対する解を求めている。コート掛け問題に対する Michell の最適連続骨組は Fig.1 に示す。この図では部材は離散的に描かれているが、この理論によって得られる解は直交する引張り、圧縮部材が連続的に無数分布し、理論的な極限構造を与える。このときの構造の最小体積 W は理論的極限いわゆる絶対最適 (absolute optima) 解を与え、構造形態創生のベンチモデルとして大変重要視されている。

2.2 形態形成の考え方

ある設計領域 Ω を M 部材からなる有限の設計変数

$$\mathbf{x} = (\dots, x^{(m)}, \dots)^T \in \mathbf{R}^M \text{ in } \Omega \quad (1)$$

で満たされるものとする。すなわち、設計領域は

$$\begin{aligned} \Omega &= \int d\Omega = \lim_{d\Omega \rightarrow 0} \sum_{m \in \mathbf{Z}}^{(1/d\Omega) \in \mathbf{Z}} d\Omega^{(m)} \\ &\approx \sum_{\substack{m \gg 1 \\ d\Omega \propto 1/m}} d\Omega^{(m)} \propto \sum_{\substack{m \gg 1 \\ x^{(m)} \propto 1/m}} x^{(m)} \end{aligned} \quad (2)$$

と有限の部材断面積で敷き詰められるものとする。離散数 m が大きくなれば、この均質な設計領域 Ω は格子トラスでマイクロストラクチャー的に敷き詰められることとし、均等な格子トラスを用いることで離散化

によるモデルの生成および形態創生が容易であり、複雑な設計領域や設計条件にも柔軟に対応できることも利点がある。

非線形釣合方程式を

$$F(\mathbf{u}, p, \mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (3)$$

とする。ここに、 $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^N$ は変位ベクトルを、 $p \in \mathbf{R}$ は荷重パラメータとする。最終的に、離散系の釣合式を満足する解 $(\mathbf{u}, p, \mathbf{x})$ を求める。方程式 (3) の釣合点の近傍で局所線形化を行うと、増分釣合式

$$J\tilde{\mathbf{u}} + \frac{\partial F}{\partial p}\tilde{p} + \frac{\partial F}{\partial \mathbf{x}}\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{0} \quad (4)$$

となる。ここに $\tilde{\bullet}$ は増分変数であり、

$$J(\mathbf{u}, p, \mathbf{x}) = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{u}}$$

は接線剛性行列である。

一方、構造最適化の目標として、例えば最小重量最大剛度では

$$\sum_{m=1}^M x^{(m)} \rightarrow \min \quad (5)$$

s.t.

$$\begin{aligned} x_{\min} &\leq x^{(m)} \leq x_{\max}, \\ \sigma_{\min} &\leq \sigma^{(m)} \leq \sigma_{\max}, \\ u_{\min} &\leq u^{(m)} \leq u_{\max}, \\ &\forall m = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (6)$$

と記述される⁵⁾。本研究は数理最適化を主眼とせず、むしろ単に各部材のローカルな応力制約条件に絞り、剛性の反復計算によって形態形成の位相を明確にしておくことを優先する。すなわち、構造最適化の主目的を直接最小重量に主眼を置くと、その重量に関するローカルな最適 (小) 解のみが探索されてしまう恐れがあり、構造全体のバランスを考える上でも問題がある。本研究では応力分担が設計変数 (形態) を支配するようにし、結果的に応力条件を満たした合理的な構造を形づくるという方法を考える。

2.3 反復法による形態形成の原理

通常、剛性変化が構造全体の一部に限られる場合には、直接構造解析を実施したほうが計算精度は高いが、構造全体の修正に対しては、反復法が比較的安定して力の流れをとらえることができる。本研究では、剛性行列の修正は各部材の応力応答のフィードバック系とし、これが釣合式を満たすように剛性を制御する。

いま、初期設計変数 $x_{(0)}$ を設定し、荷重制御や変位制御によって釣合点 $(\mathbf{u}, p, x_{(0)})$ が得られたとしよう。このときの、部材応力は

$$\sigma_{\min} \leq \sigma^{(m)} \leq \sigma_{\max}, \quad m = 1, \dots, M \quad (7)$$

$$\sigma_{(\nu)} = \mathcal{W}(\mathbf{u}_{(\nu)}), \quad \nu = 0, 1, \dots \quad (8)$$

と、各部材の変形状態の関数とする。ここに、 ν は反復回数を、 $\sigma_{(\nu)} = (\dots, \sigma_{(\nu)}^{(m)}, \dots)^T$, $\mathbf{u}_{(\nu)} = (\dots, u_{(\nu)}^{(m)}, \dots)^T$ をそれぞれ表すこととする。さらに、現在の設計変数(剛性) $x_{(\nu)}$ を次の $x_{(\nu+1)}$ に還元するために、還元率 γ を定義するとともに、新たな設計変数は

$$\begin{aligned} x_{(\nu+1)} &= \mathcal{F}(\gamma, \sigma_{(\nu)}), \\ &= \mathcal{F}(\gamma, \mathcal{W}(\mathbf{u}_{(\nu)})) \quad \nu = 0, 1, \dots \end{aligned} \quad (9)$$

と反復され、当然剛性行列も更新されることになり

$$J(\mathbf{u}, p, x_{(\nu+1)}) \tilde{\mathbf{u}}_{(\nu+1)} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial p} \tilde{p} \quad (10)$$

の釣合方程式の解を $(\mathbf{u}_{(\nu+1)}, p, x_{(\nu+1)})$ を求めることになる²。この解を式(8)に再び代入することで、一連の反復計算を行い、応力あるいは変位の収束条件を満たすようにすればよい。すなわち、節点変位と新しい設計変数は釣合式の反復計算より

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{(\nu)} &= \mathbf{F}(p, x_{(\nu)}), \\ x_{(\nu+1)} &= \mathcal{F}(\gamma, \mathcal{W}(\mathbf{u}_{(\nu)})), \quad \nu = 0, 1, \dots \end{aligned} \quad (11)$$

と表すことができる。 γ, p, \mathcal{W} が与えられれば、多元多重型の非線形反復式

$$\begin{aligned} x_{(\nu+1)} &= \mathcal{F}(x_{(\nu)}) = \mathcal{F}(\mathcal{F}(\dots \mathcal{F}(x_{(0)}))), \\ &= \mathcal{F}^\nu(x_{(0)}), \quad \nu = 0, 1, \dots, \end{aligned} \quad (12)$$

として書ける。この研究では、応力や変位の制約条件をできるだけ単純なローカルルールを採用し、反復計算によって構造形態の位相(レイアウト)を明確にしていく手段をとる。

3. 線形コート掛け問題

固定端からある位置に荷重 P を載荷するときの構造形態を設計する問題として、片持ち梁モデルの「コート掛け問題」が知られている。本節では、この形態問題を本解析法を用いてレイアウトすることにする。

3.1 離散化メッシュ依存性

本節で取扱う設計領域を $10 \times 16(\text{cm})$ に設定し、解析モデルをFig.2に示す、典型的なコート掛け問題を対象とし本手法の適用を図る。荷重 P は自由先端部の中央に載荷して解析を行った。また、材料構成則は完全弾性とし、設計領域を 10×16 分割とその2倍の 20×32 分割の2つのパターンを用意し、離散化トラス要素を用いた有限変位解析プログラムにより数値解析を行った。

設計変数である部材剛性の初期値はすべて単位剛性($EA_0 = 1.0$)とし、許容最大剛性を $EA_{\max} = 6EA_0$ 、荷重レベルは $\tilde{p} = P/EA_0 = 2.0 \times 10^{-3}$ とした。また、

² いま、この解は荷重制御にて変位ベクトル $\mathbf{u}_{(\nu+1)}$ を求めたこととして表記する

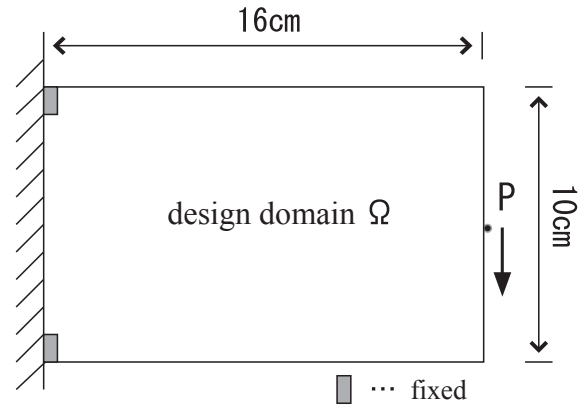


Fig.2 Design domain of topologically structural optimization

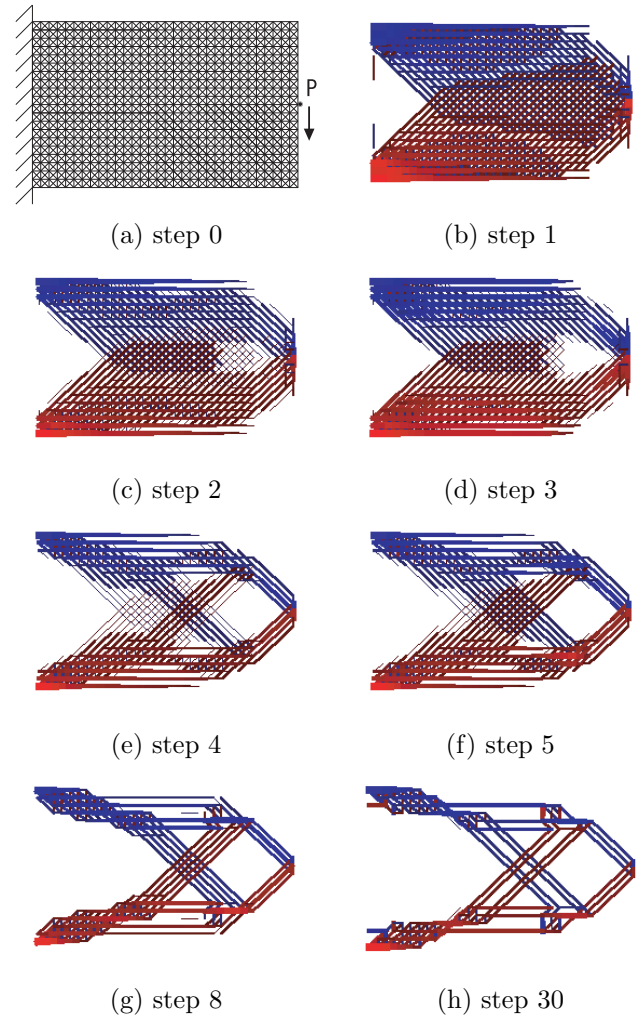
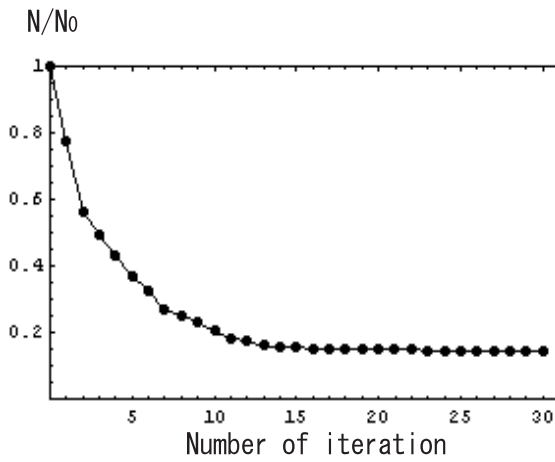


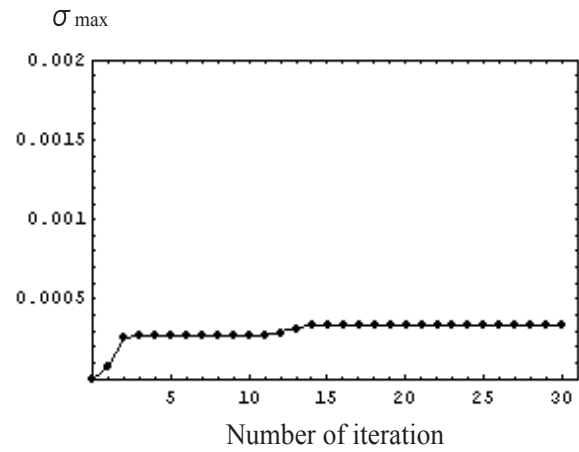
Fig.3 A process of forming (20×32 mesh)

フィードバックのための還元率は、メッシュ分割が大きくなるほど部材の収束率が悪くなることを考慮して、Fig.3(a)に示す。解析モデルにおいては、 $\gamma = 0.03$ とした。

そのときの解析結果をFig.3にそれぞれ示す。Fig.3(a)の解析モデルで得られた最終形態(h)の総部材数は初期部材数の $N_{30}/N_0 \approx 15\%$ までにそれぞれ



(a) Convergence properties of members



(b) Convergence properties of stress

Fig.4 Iteration of a number of members and the maximum stress (20 × 32 mesh)

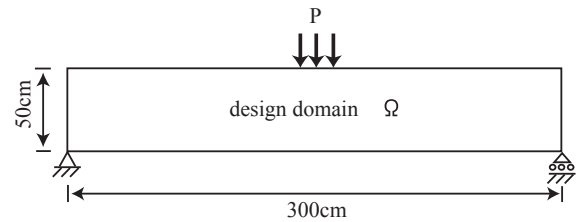
れ減少した。これは本解析プログラムが、より多くのメッシュ要素で解析を行うほど、最適な解が得られる傾向にあることを示している。また、Fig.3(g)の解析結果を支持点付近に着目すると、Fig.3(h)では鉛直方向に対して約63度の方向に部材が配置されている。以上のことから本解析手法は設計領域内に満たす格子トラスが十分な密度で離散化できれば、工学的に妥当な解析結果を得ることができることがわかる。

また、Fig.4に繰り返し計算の各ステップにおける初期部材数で無次元化した総部材数と最大応力の収束の様子を示す。Fig.4(a)では約10回程度の繰り返し計算を経て、徐々に総部材数が収束しているのがわかる。

4. スマートブリッジの構造形態

橋(梁)のモデルを用いた均質化法等による位相最適化は、スパンが長くなるにつれて、その中央部分にソリッド要素と空隙要素の密度分布がチェッカーボードのように交互に並ぶ数値不安定性が現れ、構造物としてどこに境界を定めるべきかを判断しにくいといった問題が存在する。

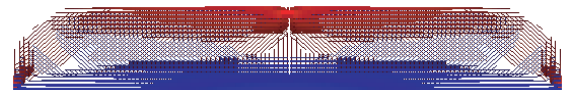
本研究で用いたマイクロトラスによる解析モデルをFig.5(a)に示す。設計領域はアスペクト比を1/6とした50×300(cm)とする。メッシュ分割は20×120分割とし、2.5×2.5(cm)のユニットセルで満たされている。なお、モデルの左右対称性を考慮して1/2領域で解析を行う。各パラメータは、 $EA_0 = 1.0$ 、 $EA_{max} = 10EA_0$ とし、荷重レベルは $\hat{p} = 1.0 \times 10^{-3}$ とした。図(b)以降は形態形成の収束計算の過程であり、図中の赤色の部材は圧縮部材を、青色は引張部材を示し、太さはその大きさを示す。30回目の収束ステップの図(e)の解析結果では、我々がよく知るワーレントラスの概形を得た。



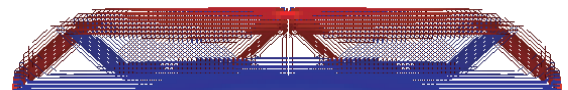
(a) Initiated domain for design



(b) step 1



(c) step 3



(d) step 5



(e) step 30

Fig.5 Analytical results for a simple beam model (20 × 120 divided)

4.1 両端固定梁モデル

Fig.5(a)は単純支持であったが、次に、両端が固定された両端固定モデルを考える。両端固定で中央に帯分布荷重Pが作用する領域を設計領域としたレイアウト最適化問題を考える。この問題に関しては、Ramm and Mauteによるアダプティブ位相最適化法による解がある^{21),22)}。この手法は、均質化設計法で位相を求め

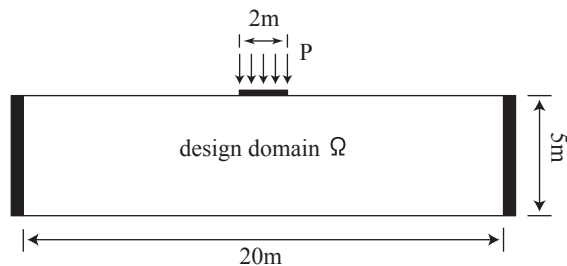


Fig.6 Initial structure

て(位相最適化 (topology optimization)), 次に有限要素メッシュを切り、さらにその形状における位相を求める(形状最適化 (Shape optimization))といった手順を数回繰り返すものである。この手法は、前節で述べた数値的不安定要素を解決しており、このようにして得られた位相は滑らかな境界を持ち非常に明解なものとなっているが、計算コストがかかりすぎるという問題があった。

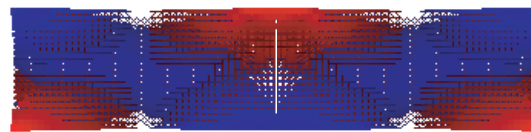
そこで、我々は例え得られた最適形態であっても、そのまま実際の構造物に適用するには、敏感な要素が実在するので、その修正とアダプティブな収束計算コストから、グランドストラクチャー法のマイクロトラスから形成される形態形成でも構造形態を決める上で、工学的に効率的で有用性がある。

E. Ramm *et al.*²³⁾が提案している両端完全固定梁モデルについて本解析手法を適用した結果について以下に述べる。設計領域は5m×20mで、荷重が上端中央部2mに載荷しているものとする。メッシュ分割は20×80分割とし、25cm×25cmのコユニットセルで満たされている。なお、モデルの左右対称性を考慮して1/2領域で解析を行う。各パラメータは、 $EA_0 = 1.0$ 、 $EA_{max} = 10EA_0$ とし、荷重レベルは $\tilde{p} = 2.0 \times 10^{-4}$ とした。

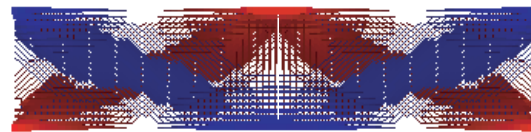
Fig.7に各ステップ数における形態変化の様子を示す。また図の右側半分は、各ステップ数に対する設計領域内の応力の状態を等応力線図によって表現したものである。左半分が形態解析によって得られた最適形状を表したものである。アダプティブ位相最適化によって得られた形態に酷似した位相が表れ、最終的には総部材数は初期部材数の約19%にまで削減された。アダプティブ位相最適化による解と比較してみると、支持点に伸びる部材がそれぞれ2本あり、より強固な形態が現れている。載荷点直下の大きな3角形のトラス形態をした太い部材で荷重を支える形態を示し、Rammの位相最適化結果でも発現している。

5. 折畳み・最適化構造概念からモバイルブリッジ機構への適用可能性

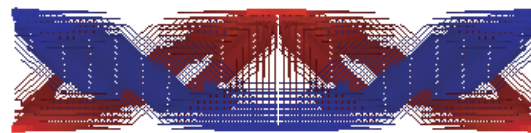
一般のトラス橋では、上弦材と下弦材が曲げモーメントに抵抗する主要部材であるが、この研究成果ではその一部が欠けた構造でも抵抗できるとともに、折畳



(a) step 1



(b) step 2



(c) step 3



(d) step 4



(e) step 30

Fig.7 Analytical results for a beam model with both clamped end (20×80divided)

みを持たせた構造物にするためには、積極的に取り入れることによって全く新しい構造物を創生できる可能性がある。

また、この構造最適化法と折畳み構造研究「MFMC概念とそれを応用したモバイルブリッジの研究開発」²⁴⁾から、今回具体的な災害復旧のための折畳み・展開可能なトラス構造の仮設橋の開発とその適用性を考え、迅速に展開が可能なモバイルブリッジ研究開発のコンセプトに活かす手段を考える。

その一例として、Fig.8は、Michellの構造問題における構造最適化の研究成果をヒントに、その構造を3連に連ねて、部材中央で交差するはり部材に置換することによって、仮設の伸縮できる骨組構造物に応用したものである。このように、この構造物は展開時に強度が十分であれば上弦材と下弦材に頼らず、展開後の活荷重が作用する状態時に、それらの部材を補強材として展開後に組立を考えればよい。

しかしながら、この場合は水平方向の変位は拘束されているので面内剛性は保持されるが、この構造物を仮設橋とする場合には、この課題と面外剛性の問題を解決しなければならない。

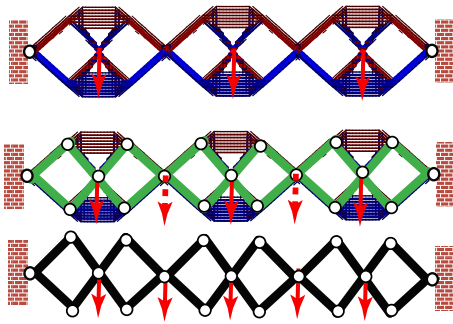


Fig.8 Temporary frame structure (Application of Michell problem)

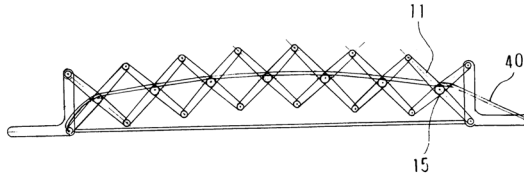


Fig.9 Creation of Mobilebridge™²⁵⁾

そこで、一つの考え方として、Fig.9に示すように、構造体の両端をタイドケーブルやタイドバーを設けて立体シザーズ構造にすることで不安定な構造を安定構造として活用できる。このことは、橋を伸縮できる利点が生まれるとともに、運搬等の移動が可能となり、迅速な橋の組み立てが可能となるメリットも生まれる²⁵⁾。あるいは、タイドケーブル等の代わりに、展開後に水平部材を一箇所固定することによっても構造体を安定させることが可能である。

それを確かめるために、この構造最適化手法と折畳み構造概念を組み合わせ、特許技術の内容を盛り込んで、人が載れる程度の設計荷重でプロトタイプを実際に製作を実施した。実際の試作機では、基本的には同じ主要構造概念からなる、Fig.10のシザーズタイプの橋プロトタイプをアルミニウム合金で製作し、構造不安定を起こすことなく、自立安定性を実現した。

6. モバイルブリッジのプロトタイプの解析モデル

6.1 プロトタイプ構造の仕様

新しい展開型の緊急橋のミニプロトタイプを製作するにあたり、様々な検討を実施した。最終的に入手可能な材料でコストが廉価な規格品、アルミニウム合金 A6063-T5 の角パイプ材を主要骨組材料として選定した。骨組構造の構成は、Fig.10(a) に示すように、長さ 120cm で、両端ピン間は 100cm、部材中央で X 型に交差するピン構造から構成される伸縮可能なパンタグラフトラス構造仕様とした。支点は構造的バランスを考えて、暫定的に図中のように A 点と B 点とした。

6.2 人荷重载荷による荷重ケース

プロトタイプ of の節点番号とひずみ位置を Fig.10 (a) に示す。例えば、No.8 のひずみゲージ位置は、Fig.10 (b) に示すように部材交差部の上縁側 (su) と下縁側 (sb) に対応する。プロトタイプ of の力学実験と照合させるために幾つかの荷重 p_i を、Fig.10 のように考える。プロトタイプ of の骨組だけの状態を P_0 のゼロリセットとし、荷重ケース P_k は各荷重 p_i の累加

$$P_k = \sum_{i=1}^k p_i, \quad k = 1, \dots, 4$$

として表すこととする。荷重ケース P_1 はアルミニウム合金製のエキスパンドメタルで製作された簡易床版 (4kgf/1 格間) を構造体の上路部にセットした ($P_1 = 20\text{kgf}$ (196N))。荷重ケース P_2 は節点 8c の部材交差部に位置する部分に一人 70kgf (686N) が載り、合計 $P_2 = 90\text{kgf}$ (882N) とする。荷重ケース P_3 は節点 8c をはさんで、二人と床版の荷重合計 153kgf (1499N) が載り、ケース P_4 は三人と床版の荷重合計 216kgf (2117N) が載った状態をそれぞれ示す。解析ではトラスの片面を対象とし、それぞれの荷重値を $p_i^* = p_i/2$ として扱うこととする。

6.3 梁近似解析による着目すべき応力設計値

ここでは、厳格な解析は行わず、あくまでも製作用の設計に活用できる近似解法を考える。モデルをできるだけ単純化するために、システムにとって構造的に不利な状態を想定し、着目した応力やひずみなどの力学諸量の挙動観察と近似解法の整合性から設計に役立つデータを把握することにする。

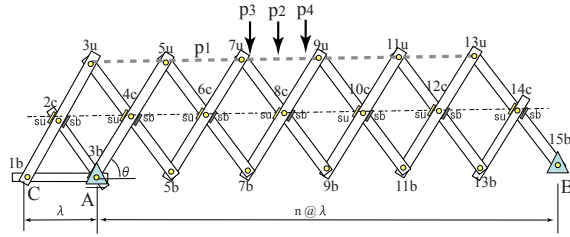
この論文では構造体の設計に必要な諸量を算定することを主眼にしているため、この構造体は水平方向に固定 (静止) されているものと仮定し、構造体内にピン結合構造があるが、静的に釣り合っているものとする。すなわち、この構造体は大局的に格子桁のように、梁構造物とみなし、構造物全体に作用する曲げモーメントに抵抗するものとして、設計を考える。このとき、この構造体の弱点になる、部材交差部に位置する断面力を考え、部材応力の照査と実験によるひずみ計測から分析することとする。

部材交差部の角パイプ断面は、部材が水平時と同等として、断面 2 次モーメント I を算定する。すなわち、1 本のアルミ角パイプ断面の図心軸に対する最小断面 2 次モーメントは

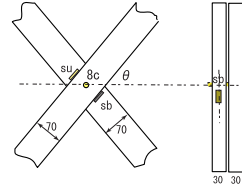
$$I_{\min} = \frac{BH^3 - bh^3}{12}, \quad \text{as } \theta = 0$$

である。ここに、 B は角パイプの外側の幅、 b は内側の幅、 H は外側の高さ、 h は内側の高さである。

いま、部材内の軸力は未知であるが、構造体は曲げモーメントに支配されるものとしてここでは軸力による垂直応力は 0 とすると、各格間中央の交差部の曲げ



(a) Whole of the lattice truss



(b) Position of strain gages(e.g. su and sb on No.8)

Fig.10 Case of loads $P_1 \sim P_4$ and position of strain gages

縁応力 σ_b は、片面あたり 2 本の骨組部材からトラスを形成しているの、

$$(\sigma_b)_{\text{交差部}} = \pm \frac{M_{\text{交差部}}}{I_{\text{min}} @ 2 \text{組 (片面)}} \frac{H}{2}$$

から算出できるものとする。また、最大せん断応力 τ_{max} は腹板 2 枚 1 組からなるので

$$\tau_{\text{max}} \simeq 1.0 * \frac{Q_{\text{max}}}{A_{\text{腹板}} @ 2 \text{組 (片面)}}$$

として算出し、各部材の応力値がこれを越えないことを実験などによって照査することができる。

特に、同じような部材で使用されている場合には、最大曲げモーメント付近の交差部と、最大せん断力が働いている箇所の、応力照査がシステム全体における弱点となりうるので、最重要チェックポイントと考えられる。

6.4 着目すべき断面力

Fig.10 の節点番号 j は上弦の節点ならび部材交差点に対応させ、 $j = 3$ 番目に対応する支点 A からの距離 x_j ($j = 1, \dots, 15$) を格間長 λ を用いて

$$x_j = \frac{j-3}{2} \lambda, \quad j = 1, \dots, 15 \quad (13)$$

と定義する。このとき、基点となる支点 A は $x_3 = 0$ であり、支点 B は x_{15} に対応する。

荷重は床版を除いて、集中荷重が作用するものと考え、ここに、一般的に利用できるように格間数を偶数として n と与え、その荷重作用点 x_j は上弦の節点に対応し、その作用位置は

$$\{x_j | j = 3, 5, \dots, 2n + 1\}$$

となる。

一方、着目すべき断面位置 x_j は、部材交差点の格間中点とし、すなわち、

$$x_j = \frac{j-3}{2} \lambda, \quad j = 2, 4, \dots, 2(n+1)$$

となる。集中荷重 p を作用点 x_j ($j = 3, 5, \dots$) に想定しているの、このときの反力 R_B は

$$\begin{aligned} -R_B \times (n\lambda) + p \times x_j &= 0 \\ R_B &= \frac{x_j}{n\lambda} p \\ &= \frac{j-3}{2n} p, \quad j = 3, 5, \dots, \end{aligned}$$

と表現できる。同様に、反力 R_A は

$$R_A = \left(1 - \frac{j-3}{2n}\right) p, \quad j = 3, 5, \dots,$$

と求められる。

ある 1 つの集中荷重 p の作用位置を x_j とし、部材交差点に位置する x_k のせん断力 $Q(x_k)$ は、

$$Q(x_k) = \begin{cases} R_A, & x_j \geq x_k \\ R_A - p, & x_j < x_k \end{cases} \quad (14)$$

$$= \begin{cases} \left(1 - \frac{j-3}{2n}\right) p, & x_j \geq x_k \\ -\frac{j-3}{2n} p, & x_j < x_k \end{cases} \quad (15)$$

と表され、 $p = 1$ のとき、せん断力の影響線を得る。

同様に、曲げモーメント $M(x_k)$ も

$$M(x_k) = \begin{cases} R_A * x_k, & x_j \geq x_k \\ R_A * x_k - p * (x_k - x_j), & x_j < x_k \end{cases} \quad (16)$$

$$= \begin{cases} -\frac{(k-3)(j-3-2n)}{4n} p\lambda, & x_j \geq x_k \\ -\frac{(j-3)(k-3-2n)}{4n} p\lambda, & x_j < x_k \end{cases} \quad (17)$$

と求められ、格点におけるモーメントの影響線を得る。

したがって、このときの最大せん断力は、 $j = 3$ の時、

$$Q_{\text{max}} = p, \quad x_j = 0$$

を得る。また、作用モーメントが最大付近のトラス交差点の着目点 ($x_k = ((n+2)-3)\lambda/2, k = n+2$) に作用し、荷重作用節点 $j = n+2$ のときに

$$M_{\text{max}}(p) \simeq \frac{n^2-1}{4n} p\lambda \quad (18)$$

を得る。

6.5 プロタイプに適用

プロトタイプ構造の試験検証用に人荷重の各荷重 p_i を適用すると、便宜的に、平均体重の半分(片面分)を

$$\begin{aligned} p_i^* &= 196/3/2(\text{片面}) = 32.7(\text{kgf}) \\ &= 320.5(\text{N}), \quad i = 2, \dots, 4 \end{aligned}$$

とする。このときの、3人を活荷重とすると、最大せん断力 Q_{\max} は

$$\begin{aligned} Q_{\max} &= \sum_{i=2}^4 p_i^* = 98(\text{kgf}) \\ &= 960(\text{N}) \end{aligned}$$

となり、最大せん断応力 τ_{\max} は

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{98}{7 * 0.2 * 2 @ 2} = 17.5(\text{kgf/cm}^2) \\ &= 1.72(\text{MPa}) \end{aligned}$$

を得る。

次に、最大荷重時のモーメントを算定する。床版は等分布荷重強度 $p_1^* = 0.023(\text{kgf/cm})$ ($0.2254(\text{N/cm})$) を想定し、 p_3^* の作用点は節点 7u の $j = 7$ に、 p_4^* は節点 9u の $j = 9$ に、 p_2^* は交差部 8c の $j = 8$ に、計3人がプロトタイプのそれぞれの位置で載荷した。反力は

$$\begin{aligned} R_A &= 5 + 32.7 * (6/12 + 7/12 + 8/12) = 62.2(\text{kgf}) \\ &= 609.6(\text{N}) \end{aligned}$$

となる。作用モーメントが最大付近の交差部の着目点 $k = 8$ であるから、最大曲げモーメントの値と式 (18) の $M_{\max}(p)$ の3人分の近似値(床版を含まない)は

$$\begin{aligned} M_{\max} &= R_A * x_k - p^*(x_k - x_j) - p_1^* x_k^2 / 2 \\ &= 11564(\text{kgfcm}) < M_{\max}(3p_2^*) = 12403(\text{kgfcm}) \\ &= 1133(\text{Nm}) < M_{\max}(3p_2^*) = 1215(\text{Nm}) \quad (19) \end{aligned}$$

となる。各荷重ケース P_i に対する曲げモーメント分布図を Fig.11 に示す。図中の太線は、最大荷重時の荷重ケース P_4 (三人) が構造体の中央付近に載ったとき³⁾ の曲げモーメント図に対応し、最大曲げモーメントの値は式 (19) の値にほぼ一致する。このように、基本的には構造体中央付近で最大曲げモーメントが発生する。

したがって、均一断面部材使用時は、 x_k の断面係数で割れば、この曲げモーメントに対する縁応力理論値がえられることになる。すなわち、

$$\sigma_b(x_k) = \frac{M_{\max}}{I_{\min @ 2}} * \left(\pm \frac{H}{2} \right) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} &= \pm 860(\text{kgf/cm}^2) \\ &= \pm 84.3(\text{MPa}) \quad (21) \end{aligned}$$

となった。このモーメント分布図を、式 (21) のように応力値に換算すると、Fig.13 の破線に対応する。図中の点はそれらの部材交差部の両縁端部に位置するひずみゲージ実験計測による応力値に対応する。

³⁾ 三人がプロトタイプに載った場合の荷重作用点は、上弦節点と部材交差部付近に対応する。

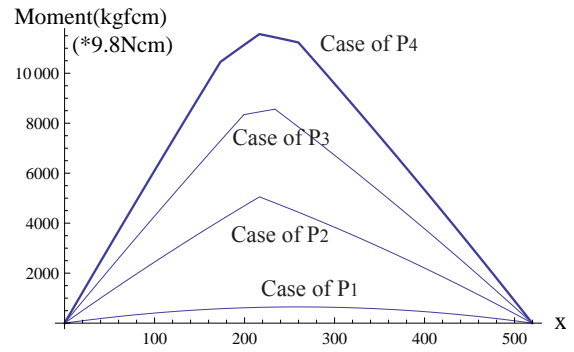


Fig.11 Case of loads P_i for the distribution of BMD

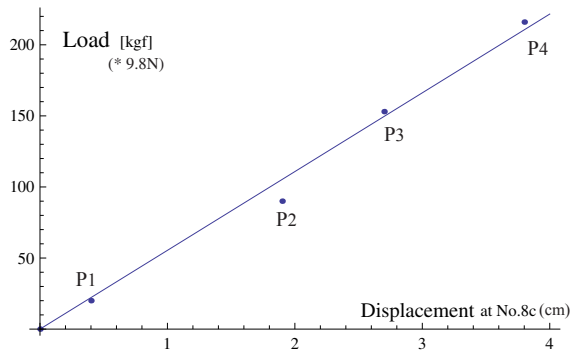


Fig.12 Relationship between the load parameter and the vertical displacement at central point

7. プロトタイプの力学挙動実験

モバイル仮設橋のプロトタイプを展開した状態での、力学挙動特性を理解するために、基本的な力学実験を以下の通り実施した。

7.1 実験条件と計測値

力学実験の条件は、使用範囲内の非破壊実験を前提に、人による上弦載荷としてプロトタイプに与えた。ここでは、各荷重条件下に対して、主として設計基礎データを得るために、基本的な変形量の計測を行った。

7.2 適用モデルの変位と荷重の関係

プロトタイプに上述の人荷重を載荷したときの変位の計測を実施した。近似的に曲げモーメント分布は、ほぼ中央に集中荷重が載荷したときの三角形分布とみなすことができるので、中央のたわみ量を予測し、実験値と比較する。最初に、自重状態をゼロリセットとして、それぞれの荷重状態に対する、構造体中央付近の節点 8c における鉛直変位を Fig.12 に示す。また、それらの計測値は、Table 1 に示す。この計測結果から、両者はほぼ線形関係にあることがわかった。

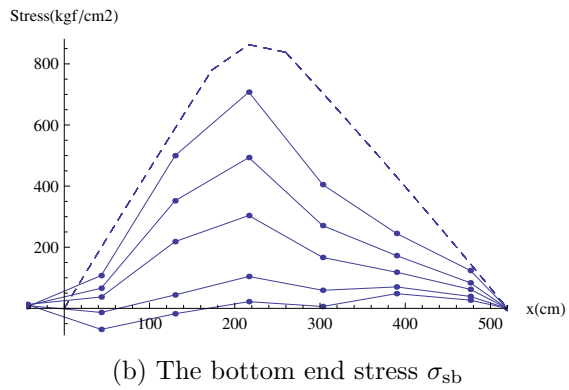
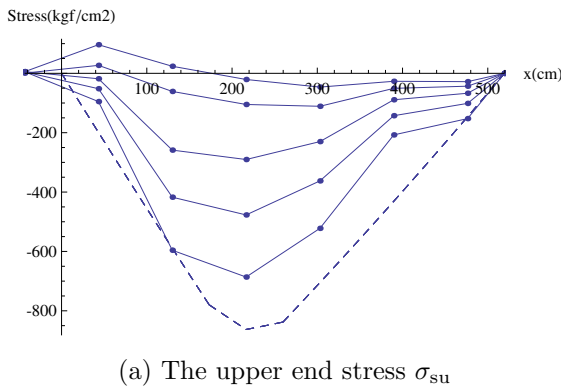


Fig.13 Distribution of experimental and theoretical stress at the pivot

Table 1 Measurement and theoretical values of strains at central point No.8

Load pattern P_i (N)	displacement (cm)	Theoretical strain value $ \varepsilon (\mu)$	Upper end $\varepsilon_{su}(\mu)$	Bottom end $\varepsilon_{sb}(\mu)$
$P_0 = 0$	0.0	0	-34	36
$P_1 = 196$	0.4	77	-172	171
$P_2 = 882$	1.9	556	-476	498
$P_3 = 1499$	2.7	987	-782	809
$P_4 = 2117$	3.8	1414	-1125	1160

7.3 各荷重ケースに対する部材交差部 No.8 の縁端部のひずみの結果

構造体中央付近の部材交差部 No.8c に着目し、その縁端部のひずみゲージを Fig.10(b) に示すように部材軸方向に貼り、その計測値を Table 1 に示す。表中の理論値は、フックの法則に基づく応力-ひずみ関係と、曲げモーメントから算定した値である。そのときの関係図を Fig.14 に示す。この結果、理論値は実験値に対してひずみが大きめに算定されており⁴、実験値は理論値よりもひずみが低く抑制される結果となった。両者のひずみは、各荷重に対してほぼ線形関係となり、その差も荷重の増加に従って大きくなった。

7.4 部材交差部に位置する縁端応力値

プロトタイプの一部材交差部全ての縁端ひずみを測定し、それを材料引張実験から得られたヤング係数を用いて、応力値に換算し、ひずみ測定位置と各荷重ケース P_i に対応する関係を Fig.13 に示す。図中の破線は、荷重ケース P_4 の場合の作用曲げモーメントから算出した理論的な縁端応力の曲線である。その結果、理論値が実験値より大きめに算出されており、傾向として相対的に類似な関係になっている。したがって、設計に用いる際には、理論値を参考にするとよいことがわかった。理論値の最大の縁端応力値は $860(\text{kgf}/\text{cm}^2)(84.3\text{MPa})$ であり、実験による応力算定値は、 $707(\text{kgf}/\text{cm}^2)(69.3\text{MPa})$ の降伏応力以下で使用限界範囲内の載荷状態であった。したがって、このプロトタイプ製作時には、設計荷重

⁴ p_1 の理論値は分布荷重として算出している。

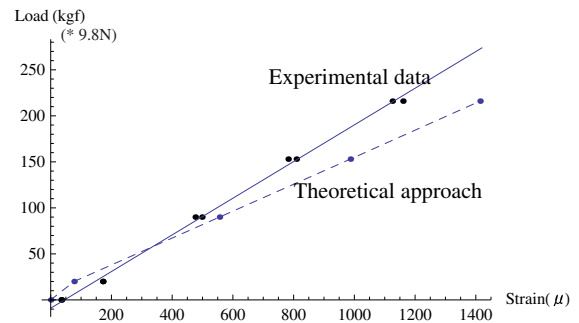


Fig.14 Relationship between the load parameter and experimental strains at both ends ($|\varepsilon|$)

を 1kN 程度の人一人荷重を想定していたが、実際には三人が載れるまでの耐力を有していることが、理論的にも実験的にも明らかとなり、このことからこのような水平方向に展開するトラス構造系はモーメントに抵抗できるような「はり」構造物としてみなして設計に適用できる可能性がある。このことは、迅速に橋を架橋する技術開発を飛躍的に進歩させる可能性も秘めており、今後の詳細な実験結果にて適用範囲の可能性を明確にしていきたいと考えている。

8. 実構造物を想定した 3 格間骨組構造モデルの FEM 解析

この章では、モバイル仮設橋の実設計目標として、 1tf 程度の軽車両通行を想定した骨組モデルを構築し、FEM 解析を通じてその解析結果について検討する。シザーズを構成する骨組部材は、 $\sigma_y=180\text{MPa}$ 、 $I=1146.33\text{cm}^2$ 、 $L=4.3\text{m}$ の実構造物を想定した構造部材を用いた。また、許容応力度は、降伏応力に安全率を考慮し $\sigma_a=120\text{MPa}$ 、 $\tau=69.3\text{MPa}$ とした。Fig. 6 に軽車両の通行を考えた、3 格間シザーズ骨組構造を持つ、スパン長 10.5m 、横幅 1.97m 、高さ 2m の解析モデルを示す。展開完了後、床板を取り付けることでシザーズ内部を軽車両が通行可能とする。

8.1 解析条件および荷重条件

解析は、展開時片持ち状態と展開後の両端支持状態の2パターンを行った。片持ち状態では自重のみを、両端支持状態では、自重に加え、軽車両を想定したT1荷重を考慮し解析を行った。

Fig.15にメッシュ切りした解析モデルをそれぞれ示す。ノード数269566と要素数138810からメッシュの立体要素を作成した。解析は自重のみの展開時片持ち状態と自重と、軽車両荷重が作用する展開後両端支持状態の2通り行った。荷重条件として、自重は1シザーズ単位ごとにピボット交差部に作用させた。軽車両荷重は、デッキボード上にある軽車両荷重が横構から骨組部材に伝わる考えるピン部に作用させた。境界条件として、シザーズ最端部横構をピン固定としモーメントフリーの状態にしてある。展開時は片端のみを、展開後は両端部をピン固定した。

8.2 FEM 解析結果

(a) 展開時の片持ち状態モデル

自重のみを考慮した展開時片持ちモデルの解析結果を以下に述べる。

Fig.16はモデルに発生するフォンミーゼスの状態を示し、同図(a)に全体図を、同図(b)に応力値が高い節点Hを拡大した詳細図をそれぞれ示す。モデル全体が許容応力内であることから、自重に対して十分に耐えることができる。応力値が高くなっているのは片持ち状態の第一格間目の中央交差部であるE点である。(b)の拡大図では、最大縁応力はE点で、40.1MPa、応力集中による円孔周り30.1MPaであった。最高応力97.6MPaを示し、図(b)のようにピン周りに応力が発生している。先端部にて最大変位57.67mmを示した。

8.3 展開後のT1荷重(1.0tf)作用時

軽車両を想定した荷重1.0tf(T1荷重)を作用させた両端支持モデルの解析結果を以下に述べる。

Fig.18はモデルに発生するフォンミーゼスの応力状態を示し、図(a)にモデル全体のフォンミーゼスの応力状態を、図(b)に最も応力の高いピボット拡大図をそれぞれ示す。図(a)より、最も応力値が高く出ているのは中央部ピボット周りである。図(b)より、ピボット周りにて応力集中が発生しており、最高値は111.9MPaである。最大縁応力も中央交差部にて発生しており、52.4MPaを得た。

Fig.19はモデルに生じる全体の変位を示す。中央ピボット部にて最大変位を10.98mmを示した。

9. 結論

前章の自重のみを考慮した片持ち状態FEMモデルにおいて、部材に発生する応力値は許容応力値を満たす。また、軽車両荷重を想定した両端支持状態FEMモデルにおいても、FEM解析により部材耐力を十分に満

たす結果が得られた。これにより、T1荷重に対して、想定するモデルが十分耐えられる解析値となった。しかし、片持ち状態FEMモデルでは縁応力が高かったが、両端支持FEMモデルでは縁応力よりもピボット交差部の応力集中により円孔周りが高応力状態となっていることが分かった。さらに最大縁応力はピボット中心線上ではなく、若干ではあるが、ずれを生じている。これは、軸力による圧縮力が作用して、中心線がシフトしたためと考えられる。

その他に、本研究により以下の点が明らかになった。

- 構造最適化計算手法により、軽量かつ丈夫な構造形態を創生し、その理想的な構造形態から、さら

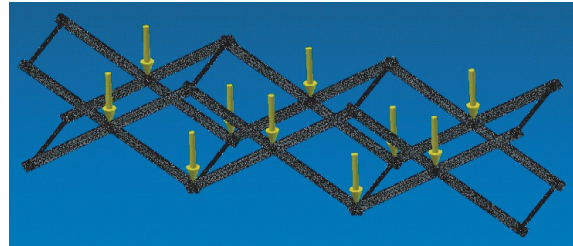


Fig.15 Divided mesh for FEM

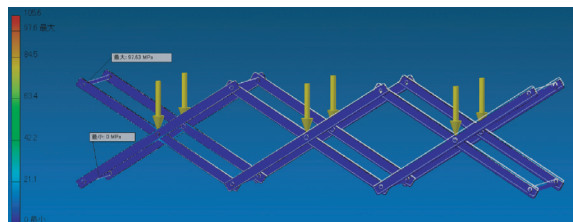


Fig.16 Entire Von Mises stress

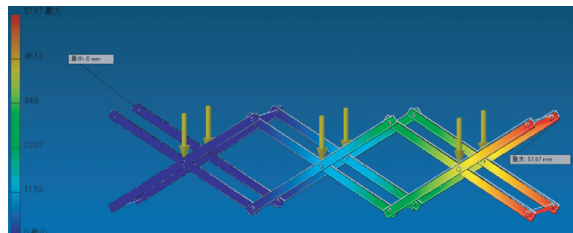


Fig.17 FEM result for distribution of disp.

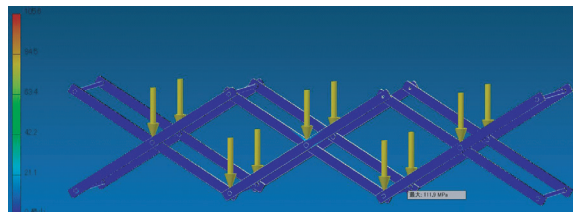


Fig.18 FEM result for distribution of von Mises stress

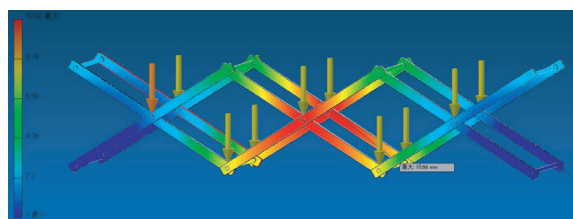


Fig.19 FEM result for distribution of disp.

に折畳める構造物の創造を考案することによって、折畳める仮設橋の「モバイルブリッジ」の設計の基礎材料を得た。

- 最適化構造の計算結果に基づく基本形態を、実際にプロトタイプとして製作し、その梁理論の検証と実験検証を行うことによって、そのプロトタイプの設計法と耐力性能の一部が明らかになった。
- 軽車両の通行を想定した3格間骨組モデルを作成し、FEM解析を通じて実構造物レベルを意識したモバイルブリッジの可能性を示唆した。
- 今後の詳細な検証を進めるとともに、仮設橋の展開方法を含め、様々な挙動特性を理解しながら、開発を進歩させていきたいと考えている。

謝辞：本プロトタイプの改良において、本学学校工場の技術員・スタッフの多大な協力に感謝するとともに、日本建設機械化協会施工技術総合研究所の共同研究ならびに4者共同研究が開始され、その支援に深謝する。また、2011年9月末台風12号による紀伊半島豪雨災害において、三重県宮川で土砂ダムの崩壊に伴って土石流による合成桁橋の崩壊現場があり、大成建設技術センター土木技術研究所石野和男氏からの写真提供に感謝する。本研究は、科学研究補助金(基盤研究(B))の研究課題「多重折畳みシザーズ機構を持つアルミ合金実験橋の研究開発」の研究成果の一部であり、2011年12月28日～30日にかけて、9月に発生した紀伊半島豪雨のインフラの被災調査も実施した。

参考文献

- 1) J. Holnicki-Szulc, P. Pawlowski, M. Wiklo (2003) : High-performance impact absorbing materials - the concept, design tools and applications, *Smart Materials and Structures*, No. 12 (2003), pp. 461-467.
- 2) Ringertz, U.T. : A branch and bound algorithm for topology optimization of truss structures, *Engng. & Optimization*, **10**, pp.111-124, 1986.
- 3) Kirsch, U. : Optimal topologies of truss structures, *Comput. & Struct.*, **72**, pp.15-28, 1989.
- 4) M. Zhou and G.I.N. Rozvany : The COC algorithm Part II : Topological, geometrical and generalized shape optimization, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.89, pp.309-336, 1991.
- 5) M. P. Bendsøe: Optimization of structural topology, shape and material, Berlin, Heidelberg, New York : Springer, pp.139-180, 1995.
- 6) 藤井大地, 松本慎也, 藤谷義信, 菊池昇 : グランドストラクチャー法による骨組構造物の位相最適化, *日本建築学会構造工学論文集*, No.46B, pp.1-8, 2000.
- 7) M. P. Bendsøe and N. Kikuchi : Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.71, pp.197-224, 1988.
- 8) M. P. Bendsøe : Optimal Shape Design as Material Distribution Problem, *Structural Optimization*, Vol.1, pp.193-202, 1989.
- 9) K. Suzuki and N. Kikuchi : A homogenization method for shape and topology optimization, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.93, pp.291-318, 1991.
- 10) R. J. Yang and C. H. Chuang : Optimal topology design using linear programming, *Computers & Structures*, Vol. 52, No.2, pp.265-275, 1994.
- 11) Jenkins, W.M. : Towards structural optimization via the genetic algorithm, *Comput. & Struct.*, **40**, pp.1312-1327, 1991.
- 12) Ohsaki, M. : Genetic algorithm for topology optimization of trusses, *Comput. & Struct.*, **57**, pp.219-225, 1995.
- 13) 大森博司, 鬼頭伸彰 : 遺伝的アルゴリズムを用いたトラス構造物の形態創出, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.520, pp.85-92, 2001.
- 14) 伊能教夫, 下平真子, 小林弘樹 : 力学構造物を自己組織化するセル, オートマトン (ローカルルールによって生じるシステム全体の挙動), *日本機械学会論文集 (A編)*, Vol.61, No.586, pp.1416-1422, 1995.
- 15) 伊能教夫, 上杉武文 : 力学構造物を自己組織化するセル, オートマトン (さまざまな位相構造の生成とその形態比較), *日本機械学会論文集 (A編)*, Vol.61, No.585, pp.241-278, 1995.
- 16) 本間俊雄, 登坂宣好 : 反復計算法による構造物の形態解析と最適化, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.502, 69-76, 1997.
- 17) Xie, Y.M. and Steven, G.P. : Evolutionary Structural Optimization, *Springer*, 1997.
- 18) 大森博司・崔昌禹・鈴木謙仁 : 等値線を導入した拡張ESO法による構造形態の創生, *日本建築学会構造工学論文集*, Vol.47B, p.7-14, 2001.
- 19) A.G.M. Michell : The limits of economy of material in framed structures, *Phil. Mag. (Series 6)*, **8**, 589-597, 1904.
- 20) K. Maute, S. Schwarz, E. Ramm : Adaptive topology optimization of elastoplastic structures, *Struct. Optim.* **15**(1998) 81-91.
- 21) K. Maute, E. Ramm : Adaptive topology optimization, *Struct. Optim.* **10** (1995) 100-112.
- 22) K. Maute, E. Ramm : General shape optimization - an integrated model for topology and shape optimization, N. Olhoff, G. I. N. Rozvany (Eds.), *Proceedings of the First World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*, 28 May-2 June 1995, Goslar, Germany, Elsevier, Oxford, 1995, pp. 299-306.
- 23) S. Schwarz, K. Maute, E. Ramm : Topology and shape optimization for elastoplastic structural response, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* **190**(2001) 2135-2155.
- 24) 中沢正利・有尾 一郎・谷倉 泉・小野秀一 (2009) : MFM概念とそれを応用したモバイルブリッジの研究開発, *土木学会全国大会 第一部門*.
- 25) 有尾一郎, 特許申請中 (2006) : 構造体及びその主フレームの伸張・縮収装置 (特願 2006-037668).
- 26) 有尾一郎・田中義和・中沢正利・古川祐輔・近広雄希, 高効率で折畳める橋構造物の開発研究 (解析編), 第25回 JAXA 宇宙構造・材料シンポジウム (2009) 104-107.
- 27) 田中義和・有尾 一郎・中沢正利・古川祐輔・近広雄希, 高効率で折畳める橋構造物の開発研究 (実験編), 第25回 JAXA 宇宙構造・材料シンポジウム (2009) 108-111.
- 28) 中沢正利・有尾 一郎・谷倉 泉・小野秀一, シザーズ構造を応用した展開型橋梁の基本的力学特性, *土木学会全国大会年次学術研究講演 第一部門* (2010) CD.
- 29) I. ARIO, Y. FURUKAWA, Y. TANAKA, Y. CHIKAHIRO, S. MATSUMOTO, M. NAKAZAWA, I. TANIKURA, and S. ONO, Dynamic Vibration of a Prototype Deployable Bridge based on MFM, *The proceedings of the 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM/APCOM 2010)* CD.

平成 23 年 10 月 24 日 受理