

# 鋼構造アーケード骨組の形態創生

漆 崎 西 仁\*・永 野 康 行\*\*

## Structural design of steel arcade

Nishihito Urushisaki and Yasuyuki Nagano

In modern times, the remarkable development of information technology has led to the ability to design virtual architectural spaces. This has been accompanied by similar advances in simulation technology, and construction technology which have made possible the integration of various free forms and complex geometrical forms into structural design. These kinds of designs are increasingly requested in the modern age. The purpose of this paper is to propose how to make a steel structural arcade that expresses irregularity by using random numbers. An appropriate structural material is selected in order to withstand possible earthquake stress exerted on the structure.

### 1. 序

現代では、情報技術の目覚ましい発達を背景にして、コンピュータを利用した仮想的な建築空間をデザインすることが可能になってきている。さらには、構造解析、シミュレーション技術、施工技術なども高度に進歩し、現代の構造デザインにおける構造物の複雑かつ多様で、幾何学的な形態にとらわれない自由な形態が求められるようになってきている<sup>[1], [2]</sup>。建築家の複雑な要求に対して、基本計画の段階で何らかの新しい構造デザイン手法が必要であると考ええる。

浜田と大森は、建築物に最適な形態を数理的に求める構造形態の分野において、設計者の提案曲面との相違の程度を表す幾何学的な距離と力学量である歪みエネルギーの双方を目的関数とする自由曲面シェル構造の構造形態創生法<sup>[2]</sup>を提案している。実在建築物として、拡張 ESO 法の適用によるものも報告されている<sup>[3]</sup>。その他にも、研究事例<sup>例えば[4], [5]</sup>があるが、乱数を用いた形態創生の事例は筆者らが知る限り見られない。アーケードとは、柱で支えられる連続したアーチやヴォールト（アーチを平行に押し出した形状）を用いた通路や歩道、または一続きのアーチが覆う歩道等の道路である。

本論文の目的は、乱数を利用して、ランダム性を表現する鋼構造アーケード骨組の形態創生法を提案することである。創生された構造物の地震時応力に対し、合理的な構造部材を選択する。

---

\* 株式会社木原建設    \*\* 建設工学科建築学専攻

様々なアーケードがある中でも、サンチャゴ・カラトラバによる BCE PLACE(図 1 参照)<sup>[6]</sup>、安藤忠雄による「国際芸術センター青森」の敷地内に配された四季アーケード(図 2 参照)<sup>[7]</sup>などは、複雑で自由な形態のアーケードであると思われる。乱数を用いた研究そのものは目新しくなく、他の建築分野の事例<sup>[8]</sup>もある。形態創生に関する事例では、遺伝的アルゴリズムを用いて建築形態を最適化し、その形態における各配置箇所按要求される最適部材の選定を行う設計支援システムの研究がある<sup>[9]</sup>。



図 1 BCE PLACE

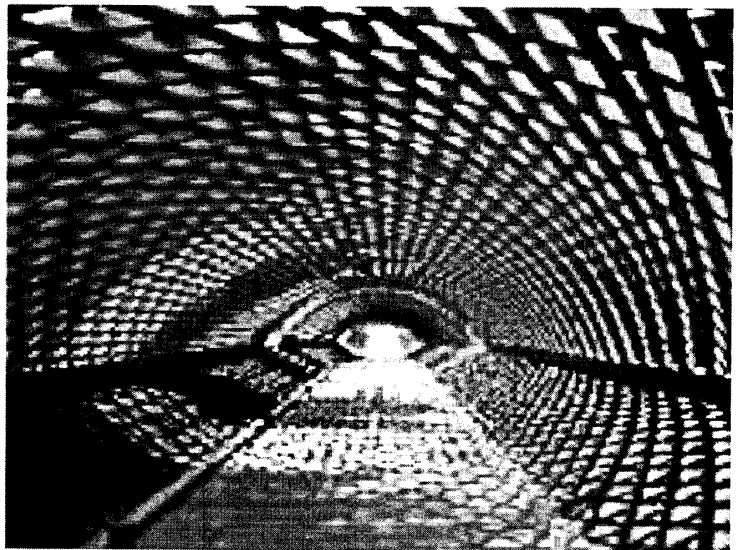


図 2 四季アーケード

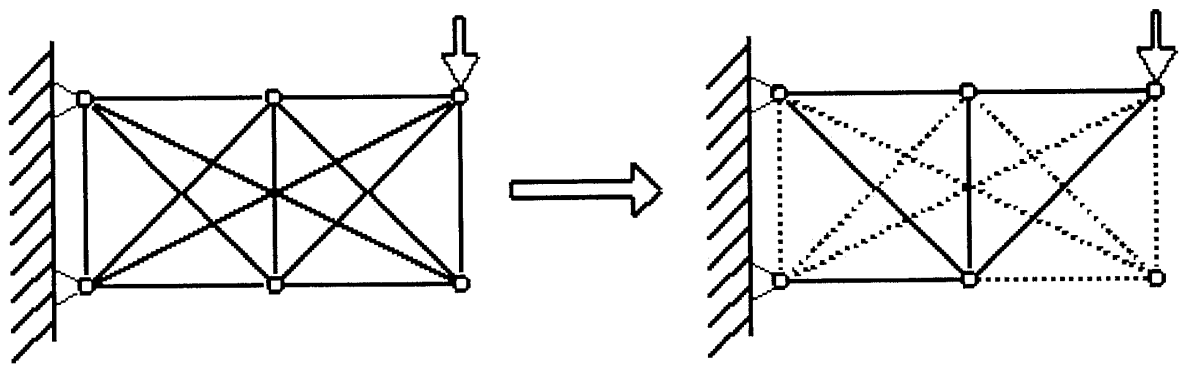
2 章では、屋根梁形態創生アルゴリズムを用いたアーケードの形態創生を行ない、一事例を示す。3 章では、屋根梁形態創生アルゴリズムを用いて形態創生したアーケードを汎用構造解析プログラム MIDAS により静的弾性解析を行い、その結果から合理的な部材選定したものをまとめる。4 章では、結論を述べる。

## 2. 乱数を用いたアーケードの形態創生事例

### 2.1 序

構造形態とは、構造としてある指定された目的にかなうシステムを包含する形状を意味する<sup>[3]</sup>。望ましい構造形態(価値ある構造)を創り上げる、すなわち創生することは、力学法則に基づき、数学的手続きにより、形状と状態を考慮した目的達成のための合理的で作業的な作業である。この作業を成し遂げることを構造最適化という<sup>[3]</sup>。

例えば、離散系構造のトラスや骨組の最適位相を求める具体的な方法は、グランドストラクチャ法がある。グランドストラクチャ法とは、図 3a に示すように設計領域内に固定節点(全 6 節点)と固定節点間に配置できる部材をすべて(全 13 部材)配置させる(これをグランドストラクチャという)。外力作用後、力が伝播されない不要な部材は取り除いていく。あるいは構造全体として寄与度が低い部材は取り外し、制約条件を満足する範囲で望ましい構造形態を図 3b のように得る方法である<sup>[9]</sup>。



a グランドストラクチャ

b 位相最適解

図3 グランドストラクチャ法による位相最適化の概念図<sup>[3]</sup>

本論文での屋根梁形態創生アルゴリズムは、最適化の解探索方法を求めるものではなく、ある構造形態を創生することが目的である。合理的な部材選択は、形態創生後の応力・変形から行なうこととしている。

本章では、屋根梁形態創生アルゴリズムを用いたアーケードの形態創生を行なう。

## 2.2 形態創生のアルゴリズム

### 2.2.1 屋根梁形態創生アルゴリズム

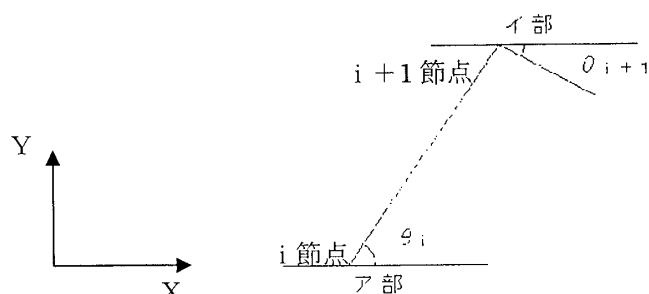
屋根梁の形態創生は、(1)式で決定される  $\theta_i$  に基づき図4に示す順序で創り出す。ランダムな形態実現のため、表1の乱数を使用し形状作成を実行した。乱数表の数字(28, 89, 65, 87, ...)を次式に当てはめて、角度  $\theta_i$  を設定した。

$$\theta_i = (\text{乱数} / 100) \times 90 + \alpha_i \quad \dots (1)$$

$\alpha_i$ : 調整定数(適切な形状作成のため設定)

表1 使用した乱数

28	89	65	87	08
30	29	43	65	42
95	74	62	60	53
01	85	54	96	72
10	91	46	96	86



決定した節点と節点を梁で  
接合し、その繰返しである。

( $i=1, \dots, n$ ;  $n$  は節点数)

図4 屋根梁形態アルゴリズム(図5 参照)

## 2.2.2 形態創生したアーケード

従来のアーケードとは異なり、(1)式に示す屋根梁形態創生アルゴリズムを用いることによって、2つとないアーケードを創生することができる。1例として、創生した形態の屋根伏図、立面図、断面図をそれぞれ図5、6、7に示す。ここでは、柱は10mピッチにし、屋根梁の歩道空間に本論文で提案する屋根梁形態創生アルゴリズムを用いた。車道空間と歩道空間との接合部分は、作成者の意思で調整した。

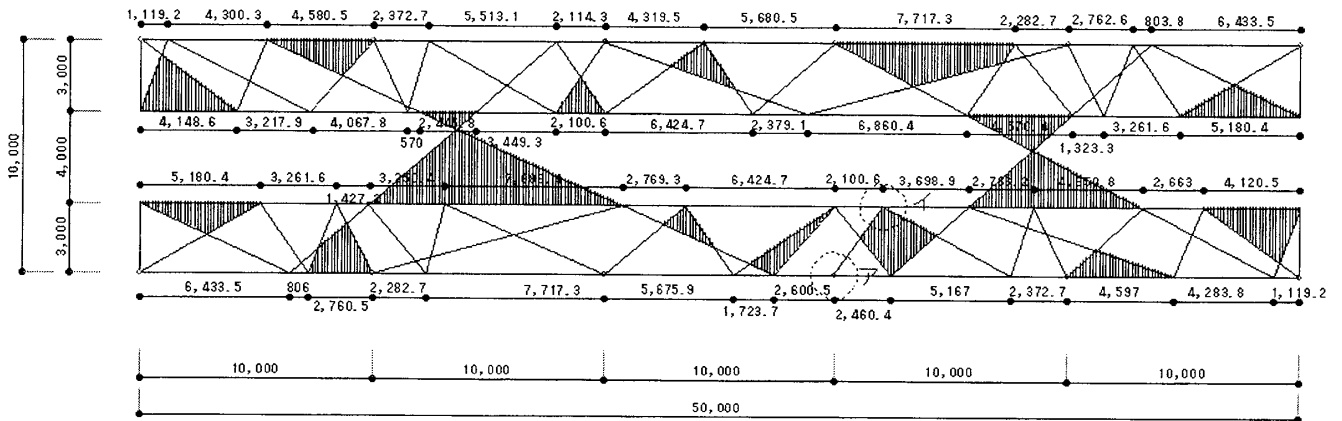


図5 創生された屋根構造形態

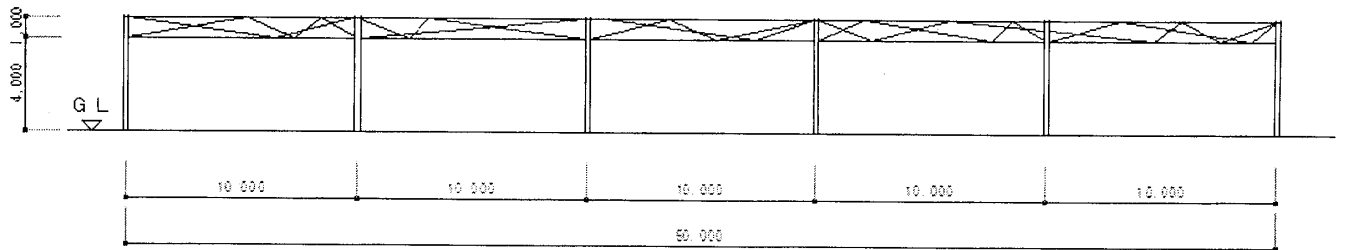


図6 立面図

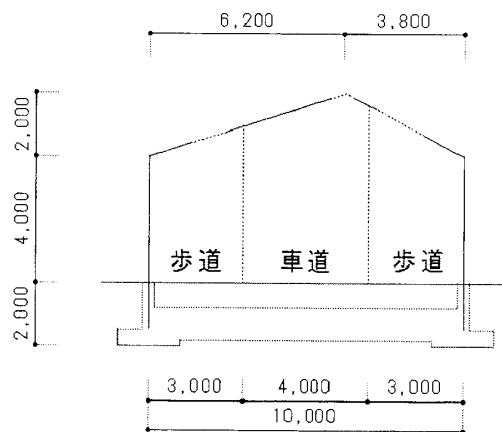


図7 断面図

〈参考〉創生されたアーケードの事例

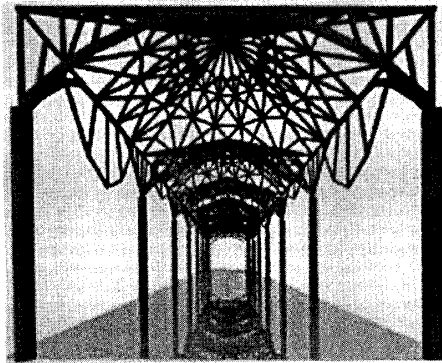


図 8 多様性のある解探索ができるアルゴリズムにより：坂中玲子ら<sup>[10]</sup>

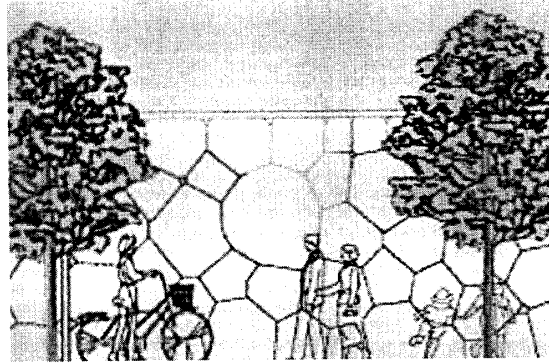


図 9 ハニカムエアクッション壁の形態創生：平嵩雄ら<sup>[10]</sup>



図 10 ボロノイ分割を用いた形態創生：中村吉秀ら<sup>[10]</sup>

### 3. 静的弾性解析によるアーケードの耐震技術調査

#### 3.1 序

本章では，屋根梁形態創生アルゴリズムを用いて形態創生したアーケードを汎用構造解析プログラム MIDAS により静的弾性解析を行い，合理的な部材設定をし，図 11 のモデル図に示した R 部分の接合部分についても考察する。

#### 3.2 MIDAS による解析

##### 3.2.1 モデル化

2 章において形態創生したアーケード(図 5 参照)を基に，作成したモデル図を図 11 に示す。これは，図 5 で示す左側 2 スパン(A 領域の歩道部 1, 2)を部分的に取り出し，車道部のつなげ方を検討するためのモデルである。スパンと高さは，それぞれ 10m と 4m とし，R 部分を図 11 に示す。

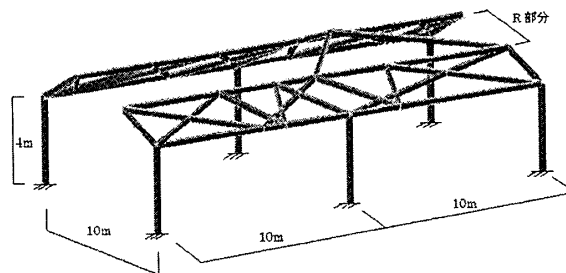


図 11 モデル図

##### 3.2.2 地震荷重

$$\begin{aligned} W_{A1} &= A_1 \times 0.1 \times 0.2 \\ &= 14.90 \text{ kN } (=1.52 \text{ tf}) \end{aligned} \quad \dots (2)$$

$$\begin{aligned} W_{A2} &= A_2 \times 0.1 \times 0.2 \\ &= 11.96 \text{ kN } (=1.22 \text{ tf}) \end{aligned} \quad \dots (3)$$

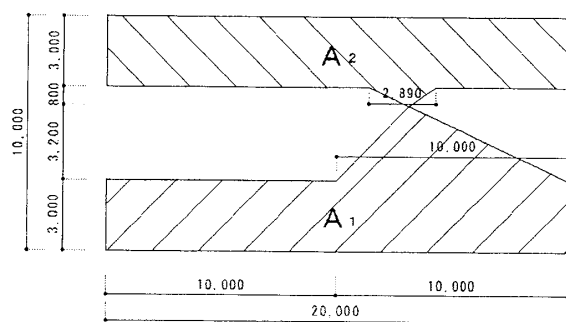
ここで， $W_{A1}$  とは， $A_1$  部分の地震荷重である。 $W_{A2}$  とは， $A_2$  部分の地震荷重である。 $A_1$  と  $A_2$  とは，屋根断面積で図 12 に示す。 $W$  は， $W_{A1}$  と  $W_{A2}$  の和である

(2), (3)より

$$\begin{aligned} W &= W_{A1} + W_{A2} \\ &= 26.86 \text{ kN} \quad (= 2.74 \text{ tf}) \end{aligned} \quad \cdot \cdot \cdot (4)$$

柱 1 本あたり,

$$W/6=4.47 \quad (=0.46\text{tf}) \quad \cdot \cdot \cdot (5)$$



$$A_1 = 20 \times 3 + 10 \times 3.2 \times 1/2 = 76 \text{m}^2$$

$$A_2 = 20 \times 3 + 2.89 \times 0.8 \times 1/2 = 61.16 \text{m}^2$$

図 12 屋根断面積

柱： $\phi$ -318.5 $\times$ 8 (STK400)と梁：H-244 $\times$ 175 $\times$ 7 $\times$ 11 (SS400)を仮定断面とし、(5)式で求めた荷重を、図 13 中に示した節点に作用させ解析した。その変形図を図 14 に示す。

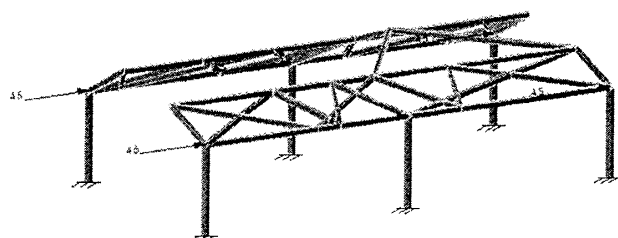


図 13 地震荷重 (単位: kN)

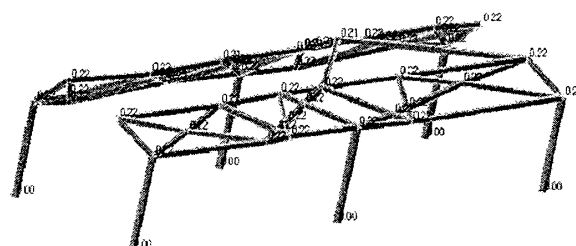


図 14 変形図 (単位: cm)

### 3.2.3 柱の断面算定

(5)式で求めた荷重を、図 15 中に示した X 軸方向のみに、(5)式で求めた荷重を作用させた時の柱の断面算定したものを i), ii) に示す。

i)  $\phi-318.5 \times 8$  の時

$$ML=2.06\text{kN}\cdot\text{m} \quad (=0.21\text{tf}\cdot\text{m}) \quad (\text{長期})$$

$$ME = 12.05 \text{ kN} (= 1.23 \text{ tf} \cdot \text{m}) \text{ (短期)}$$

$$M=7.15\text{kN}\cdot\text{m} \quad (=0.73\text{tf}\cdot\text{m}=73\text{tf}\cdot\text{cm})$$

$$N = 22.44 \text{ kN} \quad (= 2.29 \text{ tf})$$

細長比  $\lambda = l_b/i = 400/11 = 36.4 \rightarrow f_c = 14.50 \text{ kN/cm}^2 (= 1.48 \text{ tf/cm}^2)$  (長期)

壓縮応力度  $\sigma_c = N/A = 0.29 \text{ kN} \cdot \text{cm}^2$  ( $= 0.03 \text{ tf/cm}^2$ )

$$\text{曲げ応力度 } \sigma_b = N/Z = (0.21 + 1.23) \times 100/584 = 2.45 \text{ kN/cm}^2 \quad (=0.25 \text{ tf/cm}^2)$$

$$\sigma_c/f_c + \sigma_b/f_b = 0.01 + 0.1 = 0.11 \leq 1.0$$

→ OK であるが，余力がありすぎるため部材変更することとする。

ii)  $\phi - 139.8 \times 4.5$  の時

$$ML = 0.59 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (=0.06 \text{ tf} \cdot \text{m}) \quad (\text{長期}), \quad ME = 9.41 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (=0.96 \text{ tf} \cdot \text{m}) \quad (\text{短期})$$

$$M = 5.10 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (=0.52 \text{ tf} \cdot \text{m} = 52 \text{ tf} \cdot \text{cm})$$

$$N = 21.85 \text{ kN} \quad (=2.23 \text{ tf})$$

$$\text{細長比 } \lambda = lb/i = 400/4.79 = 83.5 \rightarrow f_c = 10.39 \text{ kN/cm}^2 \quad (=1.06 \text{ tf/cm}^2) \quad (\text{長期})$$

$$\text{圧縮応力度 } \sigma_c = N/A = 1.18 \text{ kN/cm}^2 \quad (=0.12 \text{ tf/cm}^2)$$

$$\text{曲げ応力度 } \sigma_b = N/Z = (0.06 + 0.96) \times 100/62.7 = 15.97 \text{ kN/cm}^2 \quad (=1.63 \text{ tf/cm}^2)$$

$$\sigma_c/f_c + \sigma_b/f_b = 0.075 + 0.679 = 0.754 \leq 1.0 \quad \text{OK}$$

柱の断面算定より  $\phi - 139.8 \times 4.5$  に部材変更し，(5)式で求めた荷重を，図 15 中に示した節点に作用させ解析した。その変形図を図 16 に示す。

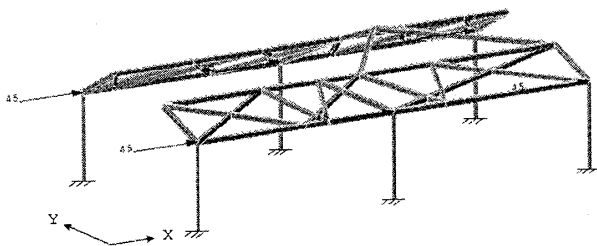


図 15 地震荷重 (X 方向, 単位 : kN)

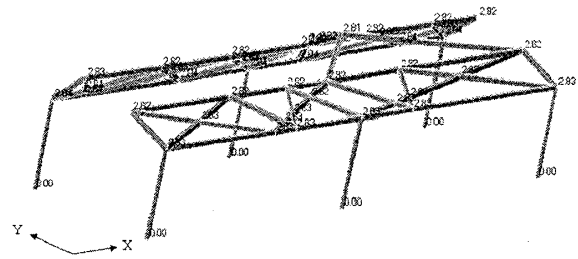


図 16 変形図 (X 方向単位 : cm)

ここでは，R 部分による力の伝わり方を考察するため，図 17 中に示した節点だけに作用させた。基本は図 11 に示す屋根梁 R 部分とし，(5)式で求めた荷重を，図 17 中に示した節点に作用させ解析した。その変形を図 18 に示す。屋根梁の R 部分の変更ケース 1 を，図 19 に示す。その変形図を，図 20 に示す。

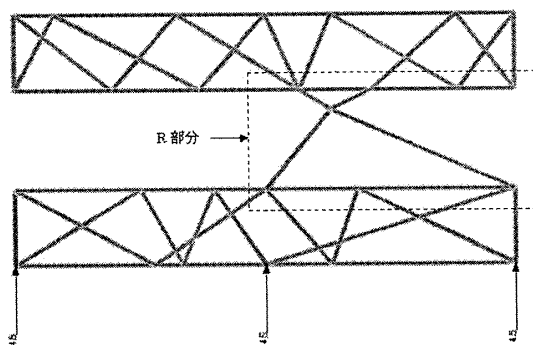


図 17 基本屋根梁の R 部分 (Y 軸方向, 単位 : kN)

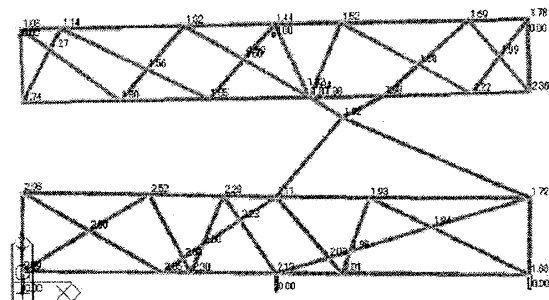


図 18 変形図 (Y 軸方向, 単位 : cm)

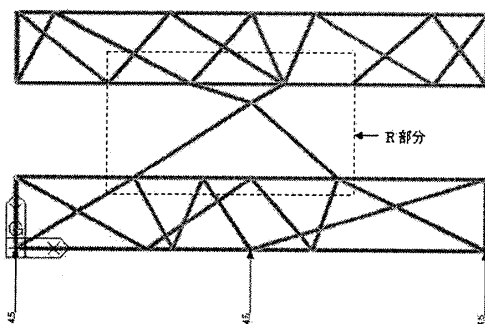


図 19 R 部分の変更ケース 1 (Y 軸方向, 単位: kN)

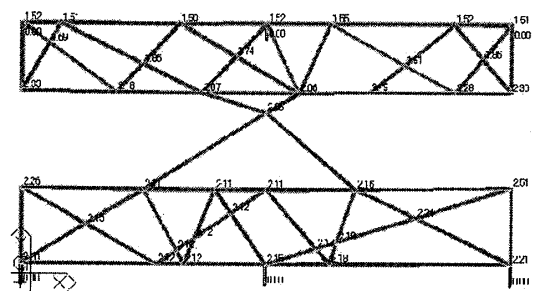


図 20 変形図 (Y 軸方向, 単位: cm)

R 部分の変更ケース 1 に地震荷重を作用させ解析した結果, ケース 1 は屋根形状のランダム性を表現しつつ, 歩道 1 と歩道 2 をうまく接合できている。

## 4. 結論

屋根梁形態創生アルゴリズムを用い形態創生された構造物は、乱数を用いて創生した形態を合理的にするために微調整しなければならないことや、施工しにくいという欠点がある。しかし、2つとない不規則な構造物を数多く形態創生することができる。本論文では、この利点を活かした屋根梁形態創生アルゴリズムを用いた形態創生を提案した。本アルゴリズムは、他の建築物にも応用し形態創生できる可能性がある。

## 謝辭

本研究は一部、平成 19 年度 福井工業大学 学内特別研究費（個人研究）研究費 A により実施した。

## 参考文献

- [1] 佐々木睦朗, 建築と構造合理性. 建築技術, No.671, pp.84-89, 2005
- [2] 浜田英明, 大森博司: 設計者の選好と力学的合理性を勘案した自由曲面シェル構造の構造形態創生法の提案 (その 1 多目的遺伝的アルゴリズムによる発見的方法), 日本建築学会構造系論文報告集, No.609, pp.105-111, 2006
- [3] 日本建築学会: 建築最適化への招待, pp.67-93, 2005
- [4] 半谷裕彦, 原田和明: 変位モード指定の構造形態解析法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.453, pp.87-94, 2001
- [5] 三井和男, 登坂宣好: 遺伝的アルゴリズムの空間構造形態解析への応用, 日本建築学会構造系論文報告集, No.484, pp.95-100, 1993
- [6] BCE Place : <http://www.galinsky.com/buildings/bce/>
- [7] 国際芸術センター青森: [http://www.geocities.jp/sei\\_zan364/acac.html](http://www.geocities.jp/sei_zan364/acac.html)
- [8] 田中宏明, 松本衛, 銚井修一: モンテカルロ法による室内温湿度の確率性状解析: 乱数個数と統計的誤差の関係, 日本建築学会学術講演梗概集 D, pp.517-518, 1994
- [9] 北村大輔, 谷明勲, 山邊友一郎, 河村廣: 遺伝的アルゴリズムを用いたリカレント建築の設計支援システム—Gas の初期乱数による形態創生への影響—, 日本建築学会学術講演梗概集 A-2, pp.455-456, 2006
- [10] コロキウム 構造形態の解析と創生, pp.190-197, 2006

(平成 20 年 3 月 31 日受理)