

河床変動理論に基づく屋根形状の基礎的力学特性

○前 稔文*1 朝山 秀一*2

キーワード：流砂 建築骨組 形状タイプ 解析 曲げモーメント 変位

1. 序論

近年の建築および都市空間のデザインや解析・シミュレーションにおける手法のひとつとして、アルゴリズムック・デザインが定着したといえ^{1) 2)}、国際シンポジウム³⁾や国際プログラムコンペティション⁴⁾が実施されるようになった。その建築作品として、都営地下鉄大江戸線飯田橋駅のWEB FRAME(2000年、渡辺誠)²⁾など、また、研究分野として、池田・木村によるシンプルな幾何形状を用いた形のジェネレータによる形態生成などが事例として挙げられる²⁾。

アルゴリズムック・デザインに関する研究事例のうち、自然界に存在するかたちや現象の仕組みを建築物へ応用した研究がある。筆者の一人は、杉の葉の生成過程を応用したフラクタルトラス構造を提案し、建築への基本適用例を示し⁵⁾、また、筆者らは、樹形図の生成システムを応用してフラクタル幾何学的形状をした積層アーチ⁶⁾を提案しており、このアーチは建築作品として実際に住宅の屋根に適用されている⁷⁾。他にも、池田らによる研究では、降雨によって浸食される台地と同じシステムを持つ複雑な不定形な建築骨組を提示している⁸⁾。

このような背景を基に、筆者らは、自然に近い新たな建築的形態の更なる提案を目的とし、河川における河床が水流によって変動する現象を用い、それによって生成される形状を建築に適用することに着手した⁹⁾。この一連の研究では、砂粒径や流速、水深、河床勾配といった条件を組み合わせ、河床における砂粒の移動量を計算し、河床高の変化を算出した。そうして得られた河床形状は3つのタイプに分類でき、その形状を建築フレームの形状として適用した新たな建築的形態を提案した。その際、上述の各諸条件と河床の変動量との関係を示し、さらに、生成された形状を建築の屋根架構に用いた場合の適用例を示した。

このように生成された複雑な形状を建築物に用いる場合、デザイン性や機能性を検討することはもちろんだが、構造的に成立しうるか否か検討することも非常に重要である。そこで、本報告では、この河床変動理論に基づいて生成された形状に、鉛直荷重が作用した場合における基礎的な力学特性の把握を目的とした。また、プログラムによる形状生成から骨組解析にいたるまでの一連の流れについても報告する。

2. 形状生成と骨組解析までの流れ

ここでは、河床における流砂量の算出について述べるが、詳細については文献⁹⁾を参照されたい。

まず、水流によって移動する河床の砂粒は、掃流砂、浮流砂、Wash loadの3つに大別されるが、Wash loadは、河床砂礫より細かい粒子からなる流砂をいい、また、浮流砂量は掃流砂量に比べて僅かなので、本報告では、掃流砂量についてのみ考慮した。次に、掃流砂量を求める式は数多くあるが、土研公式としても使用されている¹⁰⁾ことから、佐藤・吉川・芦田の式((1)式)を用いた。この式は、揚力が河床砂礫に及ぼす力積は、重力が掃流層内の砂礫に与える力積に等しいという考えに基づいて導き出されたものである^{11) 12)}。

$$q_B = \frac{u_*^3}{s \cdot g} \cdot \varphi(n) \cdot F(\tau_0/\tau_c) \quad (1)$$

ここで、 q_B は単位幅当たりの掃流砂量(m^3/s)、 s は砂粒の水中比重(≈ 1.65)、 g は重力加速度($=9.8m/s^2$)、 u_* は摩擦速度(m/s)で、次式のように表すことができる。

$$u_* = \sqrt{g \cdot R \cdot I} \quad (2)$$

なお、 R は径深(m)、 I は河床勾配である。(1)式の $\varphi(n)$ はManningの粗度係数 n の関数で、(1)式の $F(\tau_0/\tau_c)$ は掃流力 $\tau_0(kg/m^2)$ と限界掃流力 $\tau_c(kg/m^2)$ の関数である。この限界摩擦速度 u_{*c} は、砂粒径 $d(cm)$ を用いて得られる。

このようにして、(1)式により得られた掃流砂量から河床の変動量を表したものが、次に示す流砂の連続式である。

$$\Delta z = z_{t_0+\Delta t} - z_{t_0} = \frac{q_{B1} - q_{B2}}{B(1-\lambda)\Delta x} \Delta t \quad (3)$$

この式における Δz は Δt 時間内の河床変動量(m)、 q_{B1} 、 q_{B2} は上下流断面の通過流砂量(m^3/s)、 B は河床変動が生じる河川幅(m)、 λ は河床材料の空隙率(≈ 0.4)、 Δx は区間距離(m)である。

3. 形状生成と骨組解析までの流れ

河床変動量を算出し河床高を求めるプログラムを作成した。初期条件として砂粒径 $d(mm)$ 、初期流速 $v_0(m/s)$ 、初期水深 $h_0(m)$ 、初期勾配 I_0 、y座標点数 N_y 、繰り返し回数 m を設定し入力する。これらの値を用いて掃流砂量および河床の変動量を求める。また、初期勾配 I_0 を用いて初期形状を設定するが、初期勾配 I_0 に乱数と0.1を乗じた値を各座標点に加え、できるだけ自然界に見られそうな形状

に近い微量の凹凸があるものにした。

このようにして生成された初期形状に、初期流速 v_0 、初期水深 h_0 の条件を設定し、 m 回水を繰り返し流して河床の砂粒を変動させることにした。なお、水流により変動した砂粒については、堆積することなく全て流れるものとし、各点における流速 $v[m][j]$ 、粗度係数 $n[m][j]$ 、水深 $h[m][j]$ については、河川の平均流速を求める際に広く用いられる Manning の式と、水の質量は一定不変で保存する連続の式により算出することにした。

次に、河床高 $z[m][j]$ を算出する。まず、 y 座標が 0 における河床高 $z[m][0]$ を基準とし、この基準高さから河床高を算出することにした (図 1)。ここでは基準高さを 1000m とし、 y 軸方向について基準高さから河床変動量 $\Delta z[m][j]$ を引いていくことにより、流砂が生じた各点での河床高 $z[m][j]$ を算出する。

このようなアルゴリズムを用いて立体形状の生成をしたが、実際の河川において水は直線的な流れに限定されないことから、河床高を算出する座標点を千鳥状に配置した河床モデルとし、斜め方向の流れも考慮した。そうすることにより、自然に近い形状の生成が可能になると考えた。すると、座標点の配置および基準となる座標と周囲の点との関係は、水が流れる先の点に向かう勾配が 3 つずつ得られ、それぞれを $I_1[m][j]$ 、 $I_2[m][j]$ 、 $I_3[m][j]$ として得られる。同様にして、流速 $v_1[m][j]$ 、 $v_2[m][j]$ 、 $v_3[m][j]$ は Manning の式で求められ、さらに、連続の式より各方向の水深 $h_1[m][j]$ 、 $h_2[m][j]$ 、 $h_3[m][j]$ も求めることができる。

こうして生成された形状について、骨組解析を行えるようにした。骨組解析には汎用ソフトである Multiframe を用いるが、形状における各点の座標データなどを元に、部材断面やヤング係数等のフレームデータ、支持部の境界条件、荷重データなど骨組解析用データを作成する。骨組解析の結果については、各応力や変形量が数値データおよび応力図や変形図など画像で確認できる。

以上の形状生成から骨組解析までの流れを図 2 に示すが、水が流れる回数ごとに一連の処理を実行する。

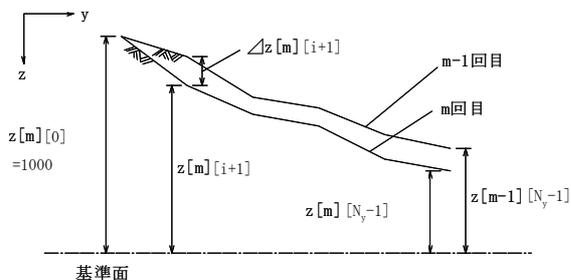


図 1 河床断面の変化

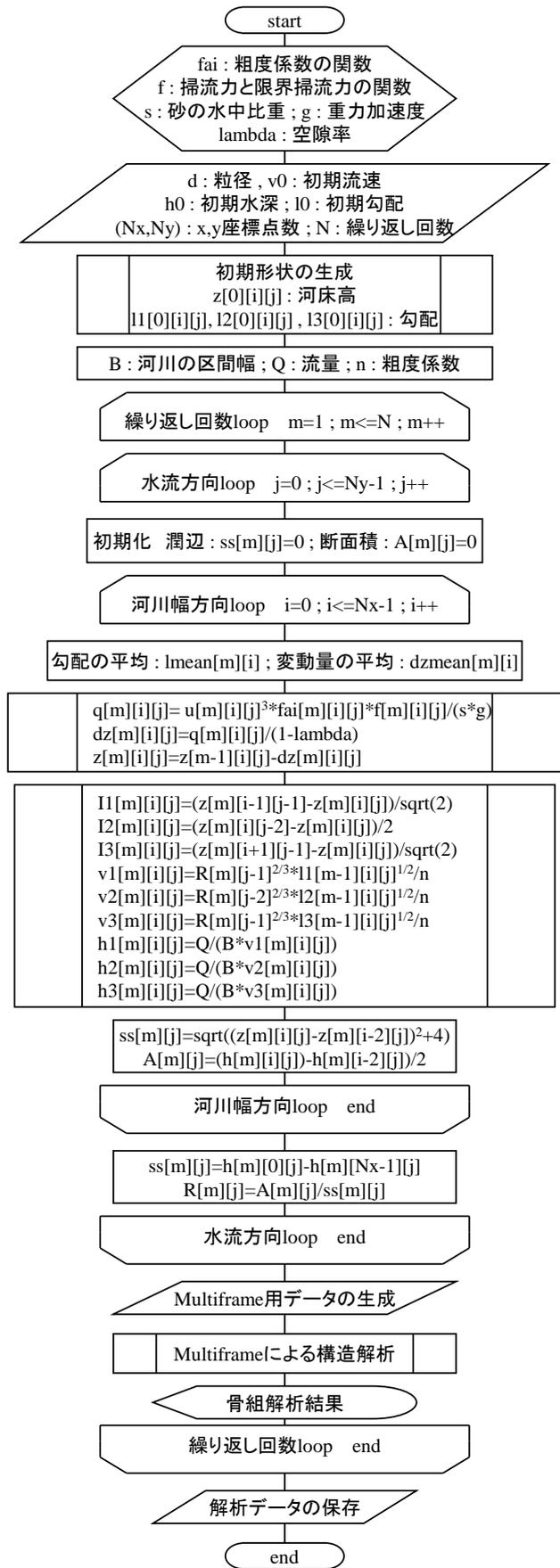


図 2 形状生成から骨組解析までの流れ

4. 骨組解析モデルと考察

前述のプログラムにより生成された形状を3タイプに分け、それぞれ代表的なものを図3に示す。繰り返し回数 m が5になると形状の差が顕著に表れることから、各タイプの繰り返し回数 $m=5$ のモデルについて、変形および曲げモーメントの分布に着目することにした。

各モデルとも $50\text{m} \times 50\text{m}$ の平面グリッドに節点が千鳥状に配置されるようなフレームとなっている。図中の左上から右下に向かって下る勾配となっており、その両側を支持している。その支持部を除く各節点に単位荷重として 1.0kN を作用させ、部材は $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ ボックスの鋼材で各節点は剛接合とした。こうして設定した形状に対して、支持部の境界条件を変えながら骨組解析を行った。

まず、変形について述べる。本報告では、支持部の境界条件をピンローラー、両端ピン、固定ローラー、両端固定の4つとしているが、いずれのモデルも下流端部の中央およびその付近で鉛直荷重の作用方向に最大変位量が得られることが分かった(図4中の赤い波線の○部分)。このことは、勾配により下流部が低い位置となるため、自重も含めた荷重が伝達したためと考えられる。また、当然のことながらピンローラーで支持されているモデルの変形が最も大きく、両端固定のモデルのそれが最も小さいことが確認できた。加えて、変形量もA、B、Cの順に小さくなることがここでも確認できた¹⁰⁾。

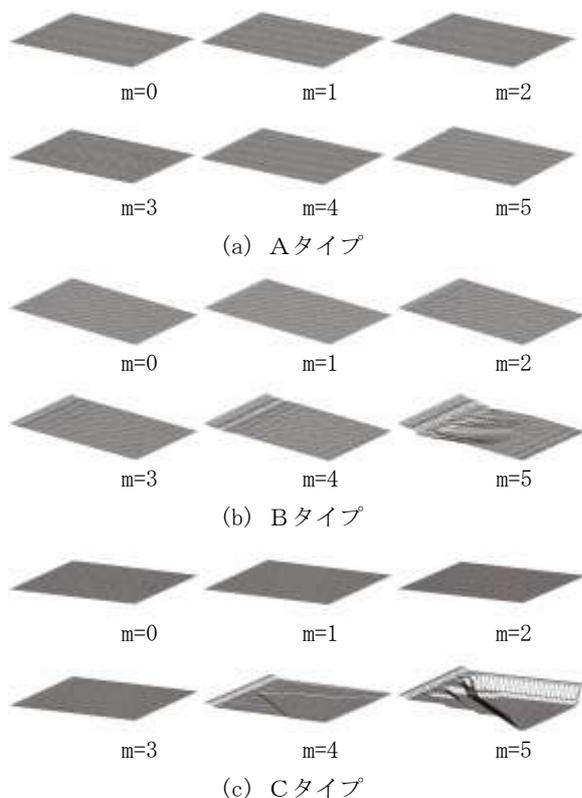


図3 生成された各タイプのモデル

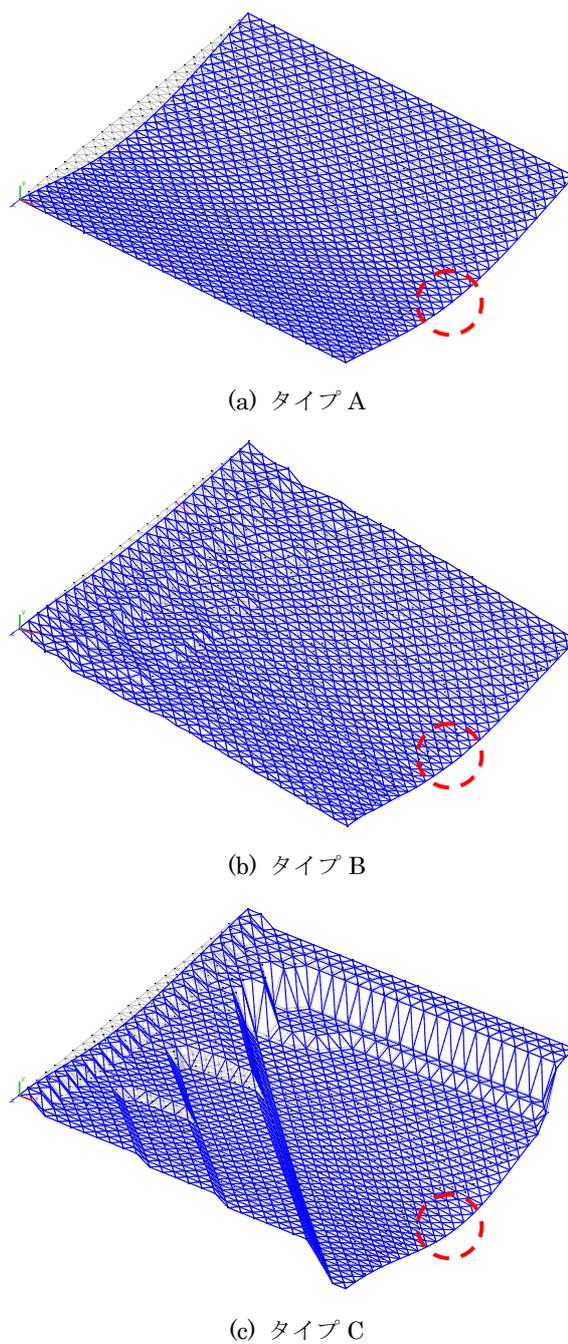


図4 各モデルタイプの変形図

次に、曲げモーメントの分布について述べる(図5)。AおよびBタイプについては、境界条件がピンとローラーで支持されているモデルだと、変形の場合と同様に下流端部の中央付近で最大曲げモーメントが得られた(図中の青い波線の○部分)。しかしながら、固定の支持部があるモデルの場合、同様に下流端部ながら支持部で最大曲げモーメントが得られた(図中の緑の波線の○部分)。A、Bタイプは、境界条件の組み合わせの違いにより曲げモーメントの生じ方に差が見られたが、変形と同様に荷重が下流部に伝達したものと考えられる。

一方で、Cタイプにおいては、下流端部中央付近に最大

曲げモーメントは生じることがなく、河床が水平となる部分と潤辺との境界付近に最大曲げモーメントが得られた。また、その箇所は下流付近と潤辺（支持部は両端ピンおよび両端固定）が比較的長く生じる箇所（支持部はピンローラーおよび固定ローラー）に分かれた（図中の橙の波線の○部分）。つまり、C タイプでは下流端部に最大曲げモーメントが生じるとは限らず、流砂量が多いことで垂直に近い部材が得られた形状となり、A、B タイプとは違った力の伝達機構であると考えられる。また、変形量と同様に C タイプの最大曲げモーメントの値が一番小さいことから、曲げモーメントを分散させるような形状を成している

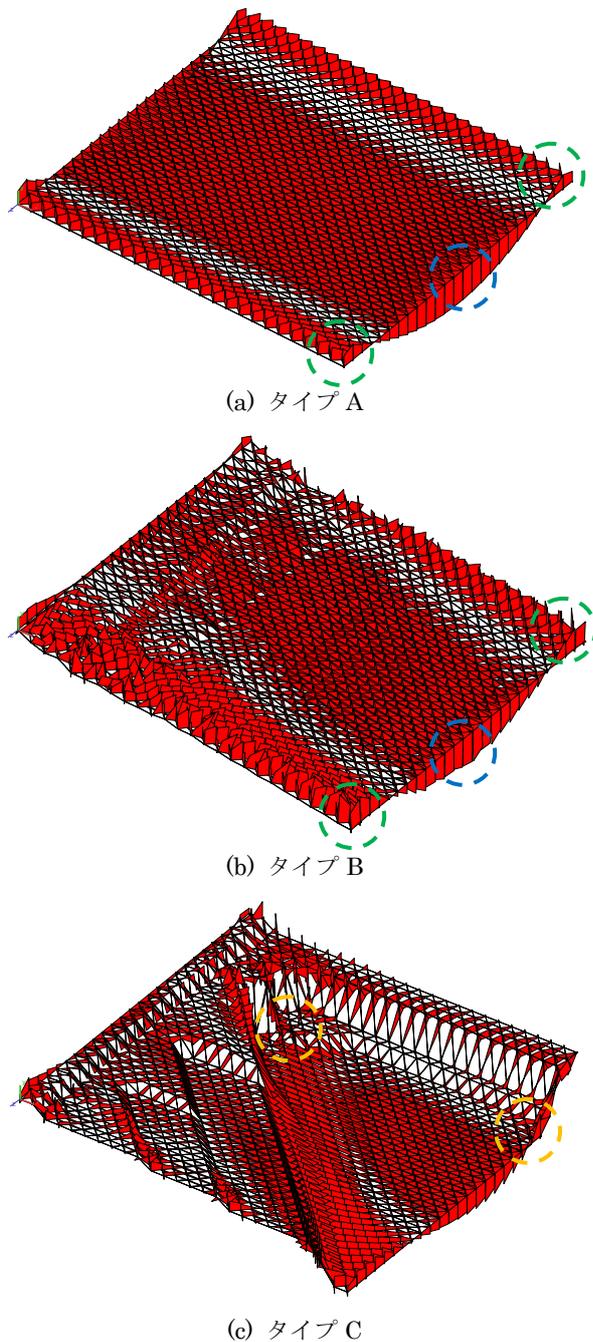


図5 各モデルタイプの曲げモーメント図

るのではないかと推測できる。

5. 結論

本報告では、設計段階での検討には至っていないが、形状の違いによる変形や応力分布の基礎的な差異について把握することができた。その中で、流砂量が多いために形状が大きく変化する形状には垂直に近い部材が得られることから、一様な勾配を持つ平面形状とは力の伝達機構が大きく違うことが分かった。また、現段階では、変化が大きい形状のほうが変形量や最大曲げモーメントも小さく、他に比べて有利な形状であると推測できた。

今後は、自然に学ぶ建築的複雑形状の提案および構造体としての検証の延長として、模型による実験を通して形状が持つ特性について検討したいと考えている。

【謝辞】本研究の一部は、平成24年度科学研究費補助金(挑戦的萌芽研究)24656328(代表:朝山)の助成を受けて実施した。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会編:複雑系と建築・都市・社会, 技報堂出版, 2005年
- 2) 日本建築学会編:アルゴリズム・デザイン, 鹿島出版会, 2009年
- 3) ALGODE -International Symposium on Algorithmic Design for Architecture and Urban Design-, 13-15th Nov. 2011, Architectural Institute of Japan.
<http://news-sv.aij.or.jp/algode/>
- 4) ALGODEQ: ALGOrithmic Design Quest - アルゴリズム・デザインクエスト 国際コンペティション 2013/14.
<http://algodeq.org/>
- 5) 朝山秀一:フラクタル幾何学に基づくトラスの形状生成と建築設計への応用, 日本建築学会構造系論文集第504号, pp.133-139, 1998年2月
- 6) 前稔文, 朝山秀一:フラクタル幾何学に基づく積層アーチの自動形状生成とその応用に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第557号, pp.181-188, 2002年7月
- 7) 朝山秀一, 前稔文, 村山実:積層アーチの家, 日本建築学会大会建築デザイン発表梗概集, pp.66~67, 2008年9月
- 8) 池田義文, 他:台地の形成過程と不定形骨組の概要~台地の侵食アルゴリズムを用いた屋根架構の構成~, 日本建築学会・情報システム技術委員会第28回情報システム利用技術シンポジウム論文集, pp.255-258, 2005年12月
- 9) 一丸結夢, 植山隆義, 小林竜一, 前稔文:河床変動理論に基づく形状生成, 日本建築学会・情報システム技術委員会第32回情報システム利用技術シンポジウム論文集, pp.85-90, 2009年12月
- 10) 岩佐義郎:最新河川工学, 森北出版, 2005年
- 11) 荒木正夫, 椿東一郎:水理学演習下巻, 森北出版, 1968年
- 12) 土木学会編:水理公式集, 土木学会出版, 1975年
- 13) 日本建築学会編:建築形態と力学的感性, pp.103-110. 丸善出版, 2014年

*1 大分工業高等専門学校 都市・環境工学科 准教授 博士(工学)

*2 東京電機大学 未来科学部 建築学科 教授 工博