

構造物の形態美と力学的挙動に関する基礎的研究

広島工業大学大学院	学生会員○	高田 健二
荒谷建設コンサルタント	正会員	小松原 健
日本振興	正会員	石丸 健
広島工業大学	正会員	浅野 照雄

1. はじめに

近年、構造物は耐久性・安全性などの他に、意匠景観面も重視して造られるものが多くなってきている。本研究では、構造形態に注目し、幾何学的形態と構造物の力学的挙動との間にどのような関係があるのかを検討することを目的としたものである。古来、絵画や構造物の幾何学的造形作品には、矩形や円周の等分割をもとにした比例法による美学的研究がされており、その中でも黄金比が形態美を規定するのに理想的であると指摘している。まず、大坂城を例にして、耐震的ともいわれている城の石垣の形態が力学的挙動にどのように関係するかを検討するため地震応答解析を行った。さらにワーレントラスを例にして、部材構成と力学的挙動としてのひずみエネルギーとの関係を調べた。

2. 解析方法

それぞれの解析方法を以下のように示す。

2. 1 トラス構造の解析方法

トラスの部材の強度（座屈も含む）と経済性は考慮せず、形態だけに注目する。すなわち、図1に示す2種のトラスを例にして、それぞれひずみエネルギーが最小となる上弦材の節点の高さ h_1, h_2, h_3 を求める。なお、解析に必要な部材弾性係数と断面積との積を 1 kg とし、荷重は下弦材に 1 kg 作用させ、下弦材の部材長は全て 2 m とした。

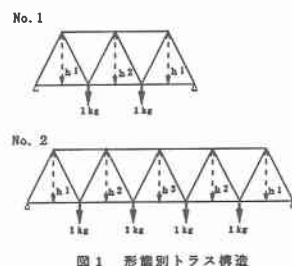


図1 形態別トラス構造

2. 2 石垣の地震応答解析

城の石垣の勾配は大きく分けて八割(67.5°)、十割(72°)、十二割(75°)であり、石積工法によって選択されていた。本文では、大坂城を例にして、図2のようにメッシュ分割し、境界条件は底部が水平上下方向固定とし、2次元平面ひずみ場として、有限要素法により地震応答解析を行った。また諸条件は表1に示す。また、他の石垣形態との比較のため、図3に示すように、大坂城の石垣を均一勾配にしたモデル2の他、6つのモデルで解析を行う。以上のモデルから均一勾配の大きさの違いや、曲面と均一勾配との違いによる地震応答値（要素の最大せん断応力と最大引張応力）への影響を検討する。なお、水平方向入力地震波は阪神淡路大震災神戸海洋気象台記録を用いた。

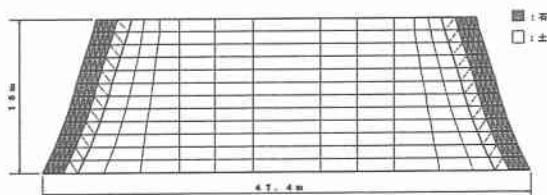


図2 大坂城石垣の要素分割図

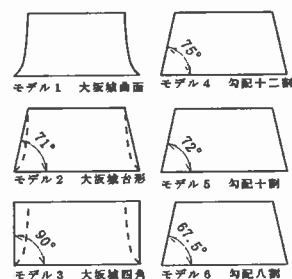


図3 石垣の形状別モデル

次に地震波の周期特性の違いによる影響を調べるため、第Ⅰ～Ⅲ種地盤記録を用いて解析を行った。

3. 解析結果

それぞれの解析結果を以下に示す。

3. 1 トラス構造の解析結果

モデル No.1 のひずみエネルギーと h_2/h_1 の関係を図4に示す。

表1 諸条件		
	石	土
弾性係数 (g/cm^2)	2.0×10^5	1.0×10^5
密度 (g/cm^3)	2.500	1.600
ポアソン比	0.20	0.45

図には、 $h1=0.5 \sim 5.0$ に対して示している。これより、各 $h1$ に対してひずみエネルギーが最小となる $h2/h1$ の値があることがわかる。モデル No.2 も同様の傾向がみられる。結局、最小ひずみエネルギーとなる $h1, h2, h3$ の値は表 3 に示す通りである。

3. 2 石垣の地震応答解析結果

石垣における各モデルの応力分布図を示すと、どのモデルも一様に図 5 のように、斜面の最下部の要素が最大せん断応力、最大引張応力共に最大となる。各モデルの最大応答値を表 3 に示す。

4. 考 察

それぞれの考察を以下のように示す。

4. 1 トラス構造の考察

表 2 より、2つのトラスとも図 6 に示すような形態となり、ひずみエネルギーが最小になる形態はスパン中央へ行くほど、放物線状に上弦材の節点が高くなっていることがわかる。なお半スパンとトラスの高さとの比は 1:1.2 程度となっており、黄金比 1:1.63 より小さい。

4. 2 石垣の地震応答解析の考察

表 3 の結果より、大坂城を例にして、石垣の勾配を均一勾配としたものと比較すると、曲面を有しているときに最大せん断応力、最大引張応力共に小さくなることがわかった。つまり、城の石垣の美しい曲線は、その美観だけではなく耐震的にも立派に働いていることがわかる。またこの傾向は他の地震波に対してもほぼ同様である。表 4 に各地震波の最大応答を示す。これより第Ⅲ種地盤の地震波に対して最も大きい応答を示しているが、盛り土の石垣が人工地盤であるためと思われる。

5. 結 語

美しい曲線を有するといわれる石垣の地震応答が均一勾配のものより小さくなることが示され、曲面をつける力学的な効果が認められた。また、トラスの形態については、部材強度・経済性を無視して全部材断面積、弾性係数を等しくかつ下弦材の部材長は全て等しいという条件の下で、ひずみエネルギーに注目して調べたが、上弦材の配置形態が放物線状になるのが最もひずみエネルギーが小さくなることがわかった。また、半スパン長とトラス高さとの比は 1:1.2 程度で、黄金比 1:1.63 より小さくなった。美的デザインと安全性・経済性との間には不整合性があるかもしれない。今後、形態美の評価法と、構造物の力学的挙動として何を考えるかなどについて検討していきたい。

6. 参考文献

柳 亮：黄金分割 美術出版社

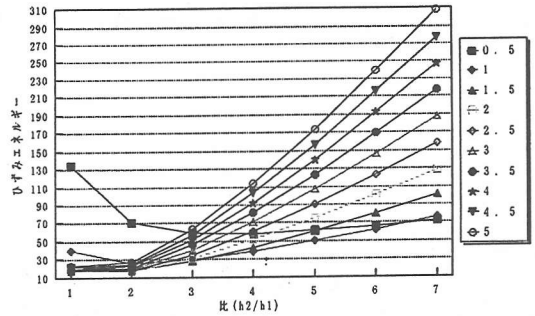


図 4 No. 1 のひずみエネルギー

表 2 トラス構造最小値(m)

	h 1	h 2	h 3
No1モデル	2.4	3.4	
No2モデル	3.0	5.3	6.1

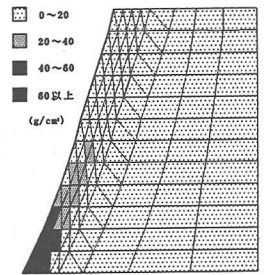


図 5 最大せん断応力分布図

表 3 各モデルの最大応力

石垣の形態	最大せん断応力 (g/cm²)	最大引張応力 (g/cm²)
モデル 1	64.68	71.05
モデル 2	74.4	83.60
モデル 3	115.78	135.94
モデル 4	108.16	123.35
モデル 5	102.62	118.09
モデル 6	75.62	78.40

表 4 阪神大震災の最大応答加速度を基準にした各地震の最大応答

地震波	石垣の形態	最大せん断応力 (g/cm²)	最大引張応力 (g/cm²)
阪神	モデル 2	74.47	83.60
第Ⅰ種	モデル 2	240.80	270.43
第Ⅱ種	モデル 2	282.35	375.03
第Ⅲ種	モデル 2	698.10	818.98

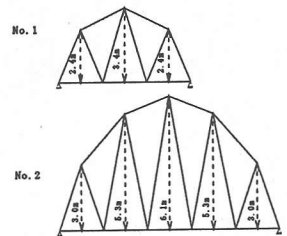


図 6 最小ひずみエネルギー時の形態