

地下空間形状における感性的評価と力学的評価の関係について

A Relationship between Human Perception and Mechanics in Design of Underground space

今泉暁音*, 清水則一**, 櫻井春輔***

Akane IMAIZUMI, Norikazu SHIMIZU and Shunsuke SAKURAI

During this new century, public facilities should be designed so that people not only anticipate feeling great pleasure from the facilities, but also leave with a desire to revisit them. In order to address such anticipation during the design stage, it may be effective to employ the idea of human perception. This paper discusses a relationship between human perception and mechanics in design shapes of underground space.

Key words: underground space design, human perception, pleasantness, mechanical sensitivity, CG, 3D animation

1. はじめに

地下と聞くと、一般に「暗い、狭い、怖い」というマイナスのイメージがある。一方、「静かな、不思議な、神秘的」といったプラスのイメージもある。そのような人々の持つマイナスのイメージを取り除き、プラスのイメージを活用することができれば、より魅力ある地下空間の利用が可能となると考えられる。

筆者らは、地下空間を地下街といった限定した利用だけでなく、より多様でより魅力ある利用のかたちがある¹⁾と考えている。そして、地下の空間の新しいデザインのあり方として、力学的な安定性だけでなく、感性を取り入れた方法の可能性を検討している。本報告では、これまでの発表内容に新しい取り組みを加え、筆者らの研究内容を紹介するものである。

まず、最初に2章において、地下空間の形状について快適性の感性評価と安定性の力学評価を行い、それらを結合する評価方法の概要^{2)・6)}とその例を述べる。その際、評価対象として実際の写真を加工した画像を用いていたが、よりよい評価のためには3次元的な画像が効果的で、そのために、コンピュータグラフィックスによる画像やヴァーチャルリアリティの利用が必要と考えている。そこで、本文の3章ではその取り組みの一端を紹介する。さらに、感性と力学による評価法において、より深く感性と力学評価の関係を検討するための方法と検討例を4章で述べる。

2. 感性と力学による地下空間形状評価^{2)・6)}の概要

感性的にも力学的にもよい地下空間形状を評価するための方法を述べる。その方法は、3つのパートから構成される。すなわち、(1)形状の快適性を評価するアンケート調査と分析、(2)力学的安全性を評価する力学解析、(3)快適性と安全性の総合評価、である。以下にその概要を述べる。

キーワード：地下空間デザイン、感性、快適性、力学的感度、CG、3次元動画

* 学生会員 山口大学大学院理工学研究科 社会建設工学専攻

** 正会員 山口大学工学部 社会建設工学科 教授

*** 正会員 広島工業大学 学長

2. 1 感性評価

地下空間に対して感じる快適性の要因を調べることは重要である。そのような調査には、(1) 言語による評価、(2) 生理的反応の観測、(3) 行動の観察、などがある。ここでは言語による評価を行う。まず、評価の尺度として、地下空間の評価に適切な形容詞を選ぶ(ステップ1)。次に、選んだ形容詞を用いて快適性の要因を調べ(ステップ2)、最後に、地下空間形状の評価結果を分析する(ステップ3)。

ステップ1: 地下空間について、(1) 形状、(2) 色相、(3) 照明、に対してそれぞれ7種(計21枚)の写真を用意し(図-1参照)、表-1に示す形容詞対を用いて、SD法⁷⁾を適用する。技術者、教官、学生からなる被験者38名に対してアンケートを行った結果、表-2に示す形容詞($x_1 \sim x_8$)が、地下空間の評価に対して適切な形容詞と考えた。

ステップ2: ステップ1で得た尺度に「快適性」の評価尺度も加えて、図-2に示す地下空間形状について、表-2に示す尺度によってアンケートを行った。表-2はアンケート結果(被験者250名)で、良いイメージ側を7、悪いイメージ側を1とし、回答結果の平均値を取ったものである。ここでは、「快適性」に強く関係する形容詞尺度は何かについて、「快適性:y」を目的変数とし、形容詞尺度 $x_1 \sim x_8$ を説明変数として重回帰分析を行った。その結果を次の式に示す。

$$y = -0.040 + 0.383x_4 + 0.253x_8 + 0.214x_6 + 0.154x_1 \quad (1)$$

この結果から、快適性は「バランス: x_4 」、「広がり: x_8 」、「調和: x_6 」、「使いやすさ: x_1 」に関係し、それらをプラス側となるよう形状を決めれば、快適性の高い空間がデザインできると考えられる。

また、快適性について表-2に示した快適性の評価値にしたがって、空間形状を並べたものを図-3に示す。上半円形、矩形、たまご形の順に快適性の指標が高く、斜めの形状については快適性が低く評価されている。また、同じ形状でも、高さが低いほうが快適性も低いようである。

表-1 評価尺度の形容詞対群

	尺度
a	活動的 - 消極的
b	清潔な - 汚い
c	開放的 - 閉鎖的
d	居心地の良い - 居心地の悪い
e	好き - 嫌い
f	重い - 軽い
g	安らぎを与える - 安らぎを与えない
h	様になっている - 不格好な
i	使いやすい - 使いにくい
j	安全な - 危険な
k	楽しい - いらいらさせる
l	動的な - 静的な
m	親しみのある - 親しみのない
n	バランスの良い - バランスの悪い
o	高い - 低い
p	広がりがある - 広がりのない
q	大きい - 小さい
r	鮮やかな - くすんだ
s	にぎやかな - 落ち着いた
t	表情豊かな - 無表情な
u	調和した - 不調和な
v	明るい - 暗い
w	柔らかな照明 - どぎつい照明
x	まぶしい - まぶしくない
y	大げさな - 地味な

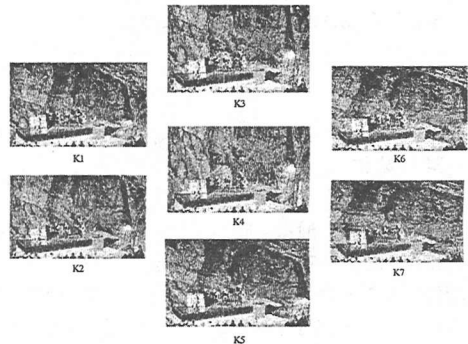


図-1 形状を変化させたスライド
(レトレッティ・コンサートホール⁸⁾,
フィンランド)

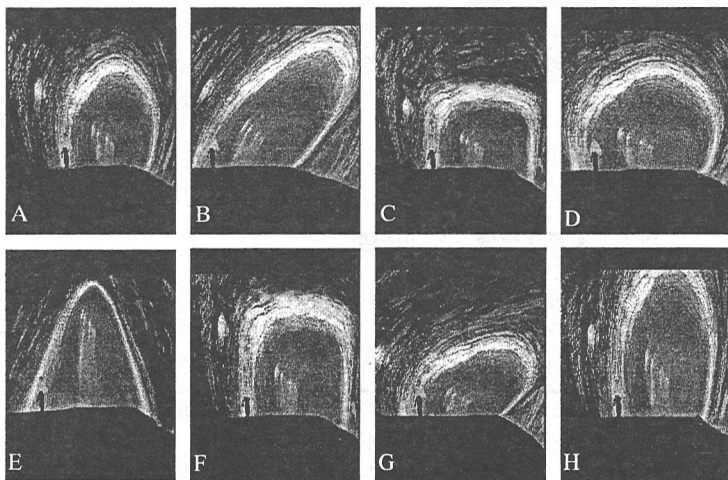


図-2 快適性評価アンケートのスライド

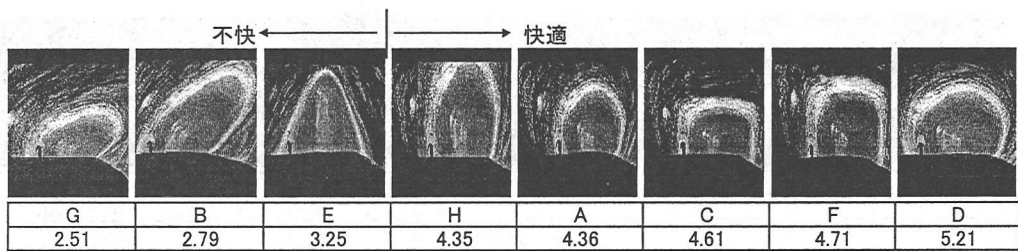


図-3 快適性評価結果

表-2 快適性評価アンケート結果

	1	7	A	B	C	D	E	F	G	H
x ₁	使いにくい - 使いやすい	3.91	2.30	4.88	5.14	2.51	4.85	2.13	3.91	4.07
x ₂	不恰好な - 様になった	4.57	2.37	4.63	5.20	3.54	4.45	2.39	4.07	4.07
x ₃	動的な - 静的な	4.83	3.06	4.81	3.91	3.58	4.54	2.70	3.68	3.68
x ₄	バランスの悪い - バランスの良い	4.37	2.17	5.08	5.21	3.72	4.96	2.18	4.30	4.30
x ₅	にぎやかな - 落ち着いた	5.32	3.40	5.25	4.55	3.49	5.00	2.91	3.81	3.81
x ₆	不調和な - 調和した	4.47	2.60	4.78	5.13	3.46	4.55	2.61	4.25	4.25
x ₇	大雑雑な - 地味な	4.83	3.30	4.98	3.85	3.23	4.68	2.78	3.32	3.32
x ₈	広がりがない - 広がりがある	4.66	4.17	3.60	5.42	2.91	4.57	3.43	4.84	4.84
y	不快な - 快適な	4.36	2.78	4.61	5.21	3.25	4.71	2.51	4.35	4.35

ステップ3: ステップ2の重回帰分析で選ばれた尺度, 「バランス: x_4 », 「広がり: x_8 », 「調和: x_6 », 「使いやすさ: x_1 」に対して, アンケート結果の因子分析を行い, 各形状の因子得点分布を求めた(図-4)。図-4から, 快適性の高い形状と低い形状は因子1と因子2の正負によって分離されていることがわかる。すなわち, 因子1および因子2が正の第I象限に快適性の評価値が高い形状が位置し, 負の第III象限に快適性の評価値の低い形状が位置する。因子1を形の性質, 因子2を形の広がりとすれば, バランス・調和がとれ, 広がりのある形状が快適性の高い形状と解釈できる。

2.2 力学評価

図-2に示す形状の地下空間に対し, 2次元平面ひずみ条件で弾性解析を行った。解析のための入力パラメーターを表-4に示す。ここで想定する安全性の評価は, せん断破壊と引張破壊に対して考え, それぞれ最大せん断ひずみ分布の広がり, 引張応力の生じる領域の大きさに基づき評価する。岩盤の限界せん断ひずみ γ_c を0.4%とし, 最大せん断ひずみがこの値を超える領域を不安定領域とみなす。解析結果から(図-5参照), 掘削面積 A_0 , 最大せん断ひずみが限界せん断ひずみを超える領域の面積 A_{ss} , さらに引張応力が生じた領域の面積 A_{st} とし, 空洞の掘削面積 A_0 との比から, それぞれの危険指標を次のように定める。

$$\text{せん断破壊に対する指標: } M_{ss0} = A_{ss}/A_0 \quad (2)$$

$$\text{引張破壊に対する指標: } M_{st0} = A_{st}/A_0 \quad (3)$$

上記の2つの指標から地下空間に対する力学的危険指標を次のように定める。地下空間の力学的危険指標: $M_{s0} = M_{ss0} + M_{st0} \quad (4)$

さらに, 上記の力学的危険指標から力学的安全性の評価値を求めるために, 式(4)で与える危険指標 M_{s0} の最大値に対して安全性の評価値を1, また, 危険指標の最小値に対して安全性の評価値を7とし, その間の値には比例的に値を与え, 安全性の評価値 M_s を定める。

表-4の条件において, 安全性の評価値が高い順に空間形状を並べて図-6に示す。

表-3 快適性評価のための因子分析結果

	尺度	因子負荷量		共通性
		因子1	因子2	
因子1	x_4 バランスの悪い - バランスの良い	0.98	0.25	1.02
	x_6 不調和な - 調和した	0.90	0.42	0.98
因子2	x_1 使いにくい - 使いやすい	0.84	0.49	0.95
	x_8 広がりがない - 広がりがある	0.28	0.79	0.70
因子寄与率 (percent of communality %)		2.55	1.10	3.65
		69.95	30.05	100.00

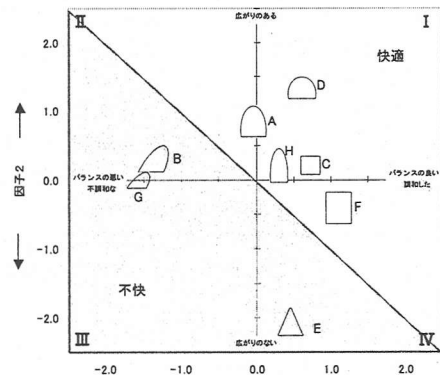


図-4 因子得点分布

表-4 解析条件

解析領域: $100 \times 100(\text{m}^2)$	
弾性係数 E (GPa)	1
ポアソン比 ν	0.25
単位体積重量 ρ (kN/m ³)	25
初期応力 鉛直方向成分 (MPa)	5
側圧係数 1.50	

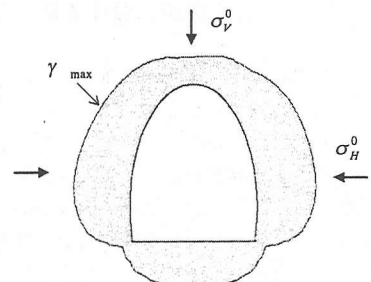


図-5 解析例
(形状A: 最大せん断ひずみ)

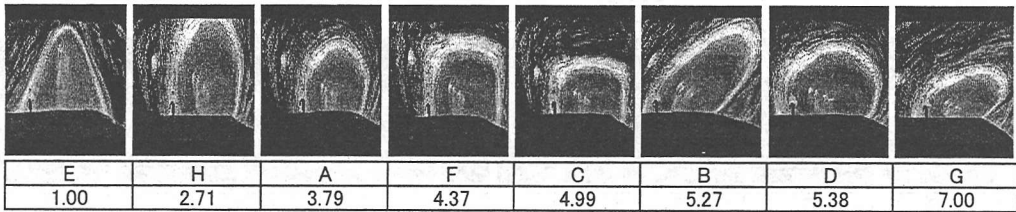


図-6 力学的評価結果

2.3 総合評価

快適性評価値 M_p と安全性評価値 M_s を用いて、総合的に地下空間形状の評価を行うために、次に示す評価式を与える。

$$M = \alpha_p M_p + \alpha_s M_s \quad (5)$$

ただし、 α_p および α_s はそれぞれ、感性評価および力学評価に対する重みであり、これらは対象構造物の用途や目的などによって決定するものである。例えば、人の楽しむ空間である地下街やコンサートホールなどでは快適性に、より重みがおかれる ($\alpha_p > \alpha_s$) こともあろう。

図-7 に 2.1 および 2.2 で求めた各形状に対する快適性評価値と安全性評価値をプロットする。同図には、感性与力学評価の重みを同じとした場合 ($\alpha_p = \alpha_s = 0.5$) について、 M の値の等値線を示している。等値線の傾きは、重みによって変わり、それによって形状の評価順位も変わることが分かる。

$\alpha_p = \alpha_s = 0.5$ の場合、感性および力学の両面から評価した空間形状は図-8 に示す順位（左から右に順位が高い）となる。

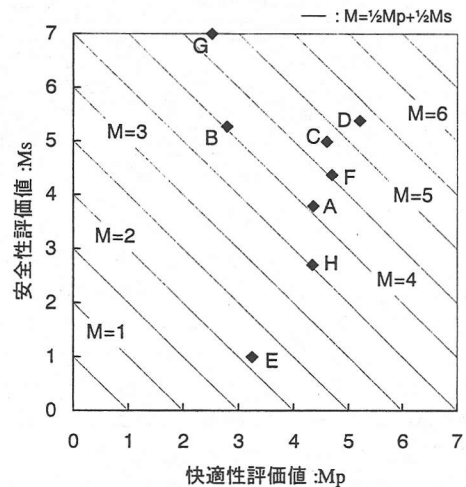


図-7 快適性 M_p と安全性 M_s の関係

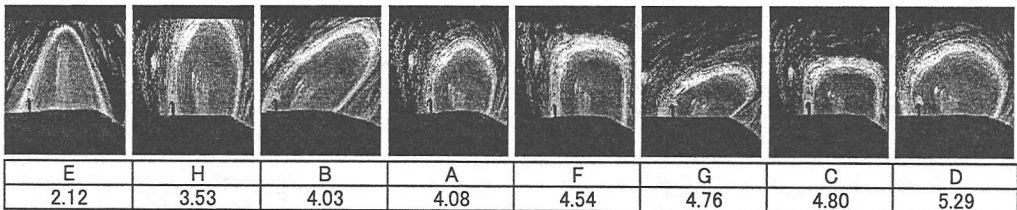


図-8 感性と力学解析による総合評価結果

3. 地下空間表現におけるコンピュータグラフィックスの応用

2章においては実際の地下空洞の写真を用いて検討したが、写真は2次元であり、写真のみから実際に地下空間に入った際の印象を被験者から引き出すことは難しい。

最近では、標準的なパソコンでもコンピュータグラフィックス (CG) 技術やヴァーチャルリアリティ (VR) 技術を利用する環境となり、これらを用いれば地下空間の3次元表示が取り扱える可能性がある。評価対象を3次元化することで、2次元表示では理解しにくい立体構造や形状を直感的に、また、具体的に把握することが可能となり、地下空間のよりよい評価が期待できる。特に、地下空間の空間認知において、天井形状やその高さ、広がりなどを被験者に実感してもらうために有効と考えられる。そこで、本研究では地下空間の表現にCGを用いることを検討している。

ここでは、まず、最初に、2章で用いた写真と同じ形状の地下空間をCGによって画像を作成し、写真とCG画

像に対してアンケートを行い、写真とCG画像で受ける印象の違いを調査した。このような写真とCG画像の比較の例は他にもある⁹⁾。次に、地下空間の3次元画アニメーションを作成した例を紹介する。

3.1 地下空間の実写真とCG画像の感じ方に対する比較調査

図-9に写真画像とCG画像を示す。CG画像は、Light Wave3D (NewTek製)を用いて作成した。アンケートは、表-2に示した項目に加えて「神秘的な-神秘的でない」を加えて行った(被験者55名)。

アンケート結果について、写真画像とCG画像のイメージプロフィールを図-10に示す。図-10において、写真およびCG画像に対するアンケート結果は、CG画像がやや全般に左にシフト(すなわちマイナスのイメージ側へシフト)しているが、いずれの形状もおおよそ同じ傾向のプロフィールを持っている。ただし、「動的-静的」については、写真とCGとで、他の項目に比べて値が逆の傾向にあり、CGが静的、写真が動的と感じているようである。

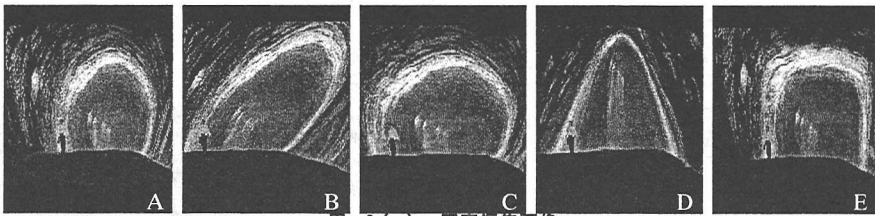


図-9(a) 写真編集画像

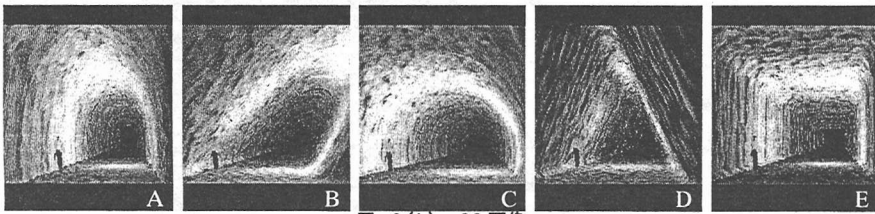


図-9(b) CG画像

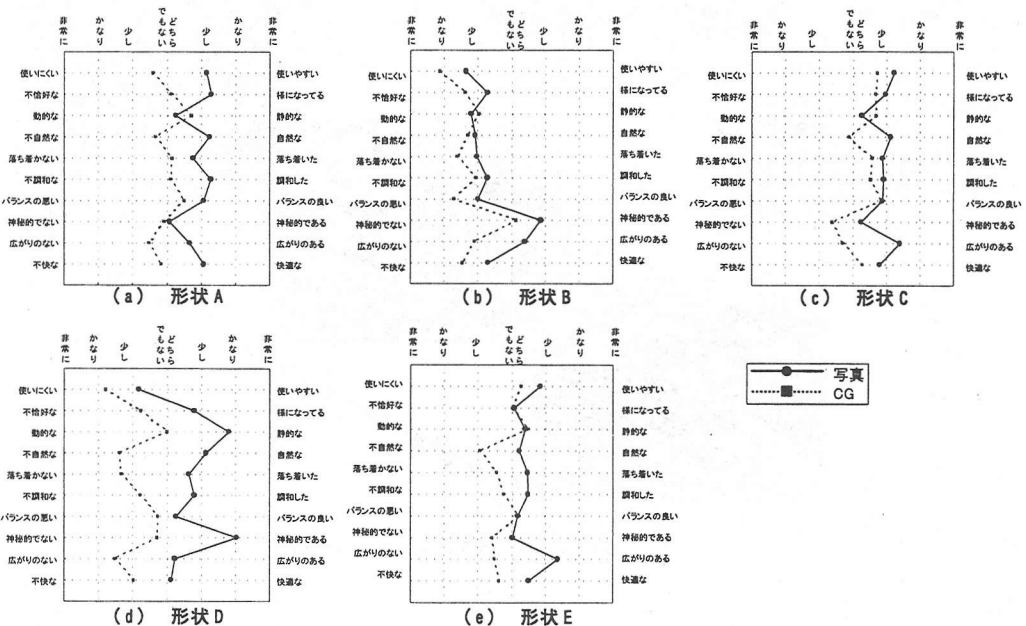


図-10 イメージプロフィール

以上の結果から、CG ではもう少しリアル感を演出する必要があるものの、CG 画像間での相対的な比較をする限りは、写真を用いる場合と同じ結果を得ることができそうである。

3.2 地下空間の3次元画像

実際に地下空間に入って、人々が空間と一体化したとき、また、地下空間を歩行しているときの感じ方を評価する必要がある。たとえば、狭い空間から移動して広がりのある空間に出たときの評価は、平面的な画像から評価することは難しいと思われる。また、空間の曲がり、空間から次の空間が見え隠れする状況、光と影の演出など、動的な要素を考慮することはデザイン上重要である。本研究では、図-11 に示すようなアニメーション、図-12 のような光の演出、曲がりのある空間などを作成している。

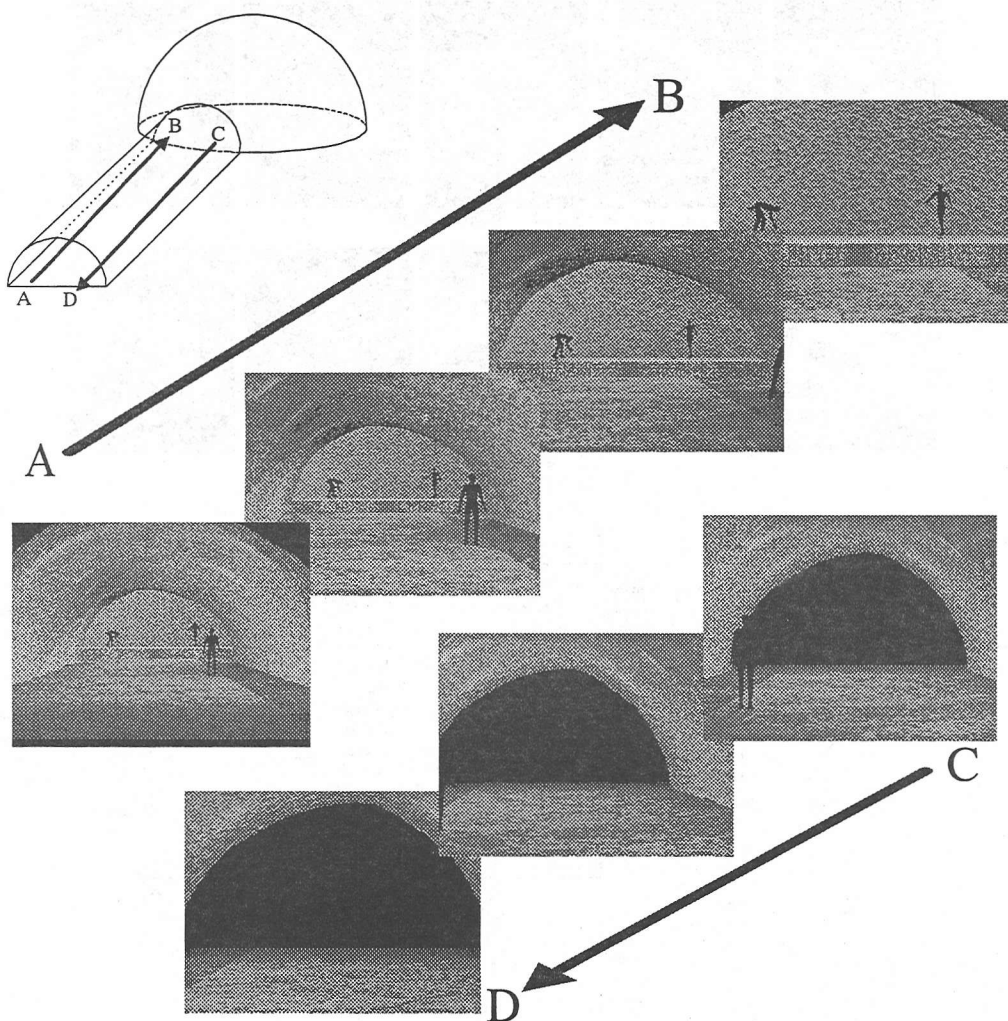


図-11 3次元アニメーションの例

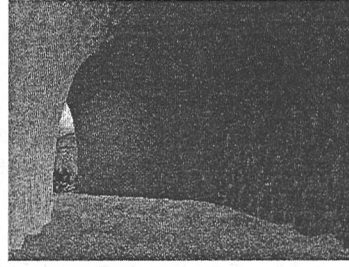
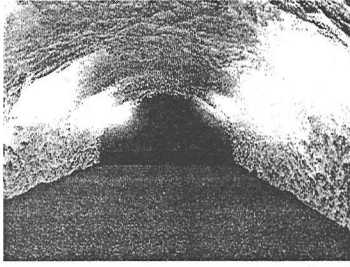


図-12 地下空間の連結部及び出口部

4. 地下空間形状の力学的感度と感性指標（快適性）の関係⁶⁾

2章では感性評価と力学評価を総合的に評価する方法を述べたが、感性評価結果と力学評価結果の関係について明確ではなかった。しかし、人々は、地下空間に入って、「危険だ」、「怖い」、あるいは、「ほっとする」、「落ち着く」といった感覚をもった経験はあり、それが力学的な空間の性質に関係している可能性があるように思える。たとえば、「怖い」と感じる空間は力学的に不安定であるかもしれない。

ここでは、感性と力学の関係をさらに検討するために、できるだけ空間形状にのみ影響を受ける力学的な指標を考える。そして、その指標と2章で得た快適性指標との関係を調べる。

4.1 力学的感度

岩盤を等方質の弾性体（平面ひずみ問題）とすると掘削による変位は次のように表せる。

$$u(x, y) = f_1 \cdot \left(\sigma_x^0 / E \right) + f_2 \cdot \left(\sigma_y^0 / E \right) + f_3 \cdot \left(\tau_{xy}^0 / E \right) \quad (6)$$

ただし、 $u(x, y)$ は座標における変位、 σ_x^0 、 σ_y^0 、 τ_{xy}^0 は初期応力、 E は弾性係数、 f_1 、 f_2 、 f_3 は空洞形状とポアソン比から得られる係数である。なお、 σ_x^0/E 、 σ_y^0/E 、 τ_{xy}^0/E を初期応力パラメーターと呼ぶ。

ここでは、空間内空の変形を表す指標として、掘削による断面の平均的なひずみを考える。壁面の3点*i*、*j*、*k*（図13）の変位を、 $\{u\} = \{u^i \ v^i \ u^j \ v^j \ u^k \ v^k\}^T$ として、次の式で断面の平均的なひずみを求める。

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\} \quad (7)$$

ただし、 $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy}\}^T$ 、 $[B]$ は三角形*i j k*を有限要素と考えたときのひずみ-変位マトリックスである。

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \quad (8)$$

ひずみは式(8)はで定義されるので、式(6)及び式(7)より次式を得る。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x1} \\ \varepsilon_{y1} \\ \gamma_{xy1} \end{Bmatrix} \cdot \left(\sigma_x^0 / E \right) + \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x2} \\ \varepsilon_{y2} \\ \gamma_{xy2} \end{Bmatrix} \cdot \left(\sigma_y^0 / E \right) + \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x3} \\ \varepsilon_{y3} \\ \gamma_{xy3} \end{Bmatrix} \cdot \left(\tau_{xy}^0 / E \right) \quad (9)$$

$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{xi} \ \varepsilon_{yi} \ \gamma_{xyi}\}^T$ は、ひずみ-変位マトリックス $[B]$ と f_1 、 f_2 、 f_3 で構成され初期応力パラメーターに対する感度となる。これは、初期応力と弾性係数によらない特性がある。

次に、形全体の総合的な評価値を考え、せん断ひずみの感度 γ 、および、体積ひずみの感度 e を次のように定義し、評価値とした。

$$\gamma_i = \sqrt{(\varepsilon_{xi} - \varepsilon_{yi})^2 + \gamma_{xyi}^2} \quad (10)$$

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2} \quad (11)$$

$$e_i = \varepsilon_{xi} + \varepsilon_{yi} \quad (12)$$

$$e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2} \quad (13)$$

これを用いると、初期応力と弾性係数に無関係、つまり形状の特徴によって変化する値として扱うことができる。

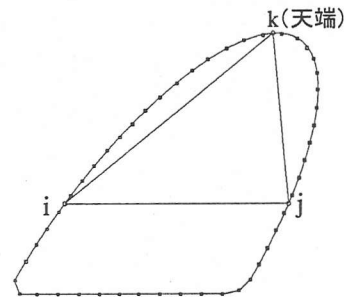


図-13 力学的感度について

4.2 感性指標と力学的感度の関係

2章で評価に用いた8種類の形状について、式(11)、式(13)で定義したせん断ひずみの感度 γ 、および、体積ひずみの感度 e を求め、快適性評価値 M_p との関係を、図-14および図-15に示す。これらの図から、快適性はせん断ひずみ感度 γ とは明確な関係は見られないが、体積ひずみ感度とは負の相関が見られる。すなわち、快適性指標が小さい（不快な）空間形状の体積ひずみ感度 e は大きい。このことは、体積ひずみの収縮が大きくなる（断面が大きくなり、あるいは、小さくなりやすい）可能性がある空洞形状に対して、人は不快感をもつことと示唆している。

5. むすび

本報告では、筆者らの取り組んでいる「感性と力学を融合した地下空間デザイン」に関して、これまでの発表内容に新しい取り組みを加えて研究の流れを紹介した。

謝辞：本報告において、3章のアンケートの分析、および、空洞の3次元表示については、それぞれ、山口大学工学部社会建設工学科の竹尾早代さん、および、岡田淳子さんに協力いただいた。ここに感謝の意を表する。

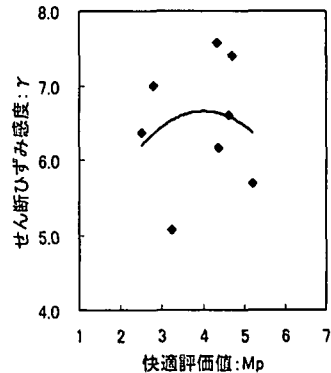


図-14 快適性と力学的感度: M_p - γ

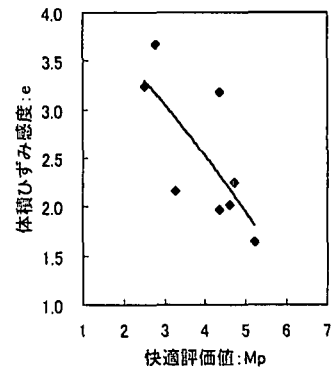


図-15 快適性と力学的感度: M_p - e

<参考文献>

- 1) 櫻井春輔：土木工学の新しい挑戦－地下空間におけるアート創造の可能性－，土木学会誌，vol. 87，No. 3，pp. 74～73，2002.3
- 2) 今泉暁音，沼水則一，櫻井春輔：SD法に基づく地下空間の快適性評価に対する研究，平成13年土木学会中国支部研究会発表要集，pp. 401～402，2001.6
- 3) 今泉暁音，沼水則一，櫻井春輔：地下空間設計における感性評価と力学解析の融合の試み，土木学会第56回年次学術講演会要集（CD-ROM），部門CS，CS8-001，pp. 476～477，2001.10
- 4) 今泉暁音，沼水則一，櫻井春輔：地下空間の形状評価における感性と力学解析の融合について，地下空間シンポジウム論文・報告集，第7巻，pp. 189～194，2002.1
- 5) N. Shimizu, A. Imaizumi, and S. Sakurai: An approach using human perception together with rock mechanics to design the shape of underground space, Proc. Of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada Conference, NARMS-TAC, pp. 1333-1338, 2002.7
- 6) 今泉暁音，沼水則一，櫻井春輔：地下空間形状の感性評価結果と力学的感度の関係について，土木学会第57回年次学術講演会要集（CD-ROM），部門CS，CS1-010，pp. 19～20，2002.9
- 7) 岩下登彦：SD法によるイメージの測定，川島書店，1983.
- 8) 川本暁夫（監修）：ロックエンジニアリングと地下空間，鹿島出版会，1990.
- 9) 櫻井昭夫，新美政光，西淳二，田中正：視覚シミュレーションによる地下街形状の評価に関する研究，地下空間シンポジウム論文・報告集，第7巻，pp. 109～118，2002.1