

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関する考察

A RELATIONSHIP BETWEEN HUMAN SENSITIVITY AND MECHANICAL SENSITIVITY FOR UNDERGROUND SHAPE

今泉暁音*, 清水則一**, 櫻井春輔***

Akane IMAIZUMI, Norikazu SHIMIZU and Shunsuke SAKURAI

Civil engineers usually design a variety of facilities in underground space from conventional engineering points of view, i.e., mechanics. During this new century, public facilities should be designed so that people anticipate feeling great pleasure from the facilities and desire to revisit them. In order to address such anticipation during the design stage, it may be effective to employ the idea of human sensitivity (Kansei).

This paper discusses an approach for using human sensitivity, together with rock mechanics, to design shapes for underground space. Forthmore, a relationship between human sensitivity and mechanical sensitivity for shapes of underground space are discussed with macanical simmluations and questionnaire.

Key words : underground space design, human sensitivity, pleasantness, mechanical sensitivity

1. はじめに

地下空間は、トンネル、発電所、貯蔵、採鉱などの社会基盤施設や産業用途目的だけでなく、ショッピング・モール、レストラン、コンサートホール、屋内プールといった人々が集う公共空間としても利用されている^{1), 2)}。このような地下空間利用の多様な利用は海外に多く見られるが、わが国においても地下空間利用に関する多くの検討や研究があり、法的整備も行われ、新たな展開が模索されている³⁾⁻⁷⁾。一般に、地下空間に対して、人々は、「暗い、狭い、怖い」というネガティブなイメージを抱いている。一方では、「静寂さ、崇高さ、幻想性、神秘的」など、ポジティブなイメージもまた抱いているようである。そこで、ネガティブなイメージを克服し、ポジティブな側面を生かすことができれば、地下空間は、より人々をより魅きつけ、より多様に、より快適に利用されることが期待できる。

これまで、土木技術者は、地下空間を主に力学的な立場から設計してきた。しかし、上に述べたように、人々がより快適と感じる空間として地下空間を利用する場合、力学的な立場からだけでなく、感性的な観点も取り入れる新しいデザイン手法を考える必要があるだろう^{8), 9)}。また、地下空間は建築物やオブジェなど外側からの感性評価（芸術活動）の対象とは異なり、内側からの創造となり、従来の建築や芸術で取り扱われることのなかった対象であり、創造の空間として地下を取り扱うことによる新しい空間作りが期待できる。

本研究では、感性的な評価と力学的評価を個々に論じるのではなく、両者を総合した新しい地下空間の形状デザイン手法の検討している。これまで、地下空間形状に対し、感性的な側面として快適性を取り上げ評価し、力学解析による安全性の評価を行い、それらの結果を用いて地下空間形状を総合的な評価を試みてきた¹⁰⁾⁻¹³⁾。さらに、力学評価と感性評価の関係について調べることも、両者の総合評価のための手がかりとなるはずである。そこで、力学的感度を定義し、快適性評価との関係を検討している^{14), 15)}。

本報告では、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、それらを総合する評価方法の概要および力学的感度と感性評価結果との関係の検討例を述べる。

* 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. 感性と力学による地下空間形状評価の概要^{10)・13)}

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.

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SD法 (Semantic Differential method) に基づき, 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¹⁶⁾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, 図-2の快適性評価アンケート用紙及び表-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-3に示す地下空間形状について, 図-2のアンケート用紙を用い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, 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-4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..

表-1 評価尺度形容詞対群

	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 - ぐすんだ
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	大袈裟な - 地味な

[A]

使いやすい 2 3 4 5 6 7 使いにくい

不格好な 2 3 4 5 6 7 様になっている

動的な 2 3 4 5 6 7 静的な

バランスの良い 2 3 4 5 6 7 バランスの悪い

落ち着いた 2 3 4 5 6 7 にぎやかな

不調和な 2 3 4 5 6 7 調和した

地味な 2 3 4 5 6 7 大袈裟な

広がりのない 2 3 4 5 6 7 広がりのある

総合的に

快適な 2 3 4 5 6 7 不快な

図-2 快適性評価アンケート用紙

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 」,

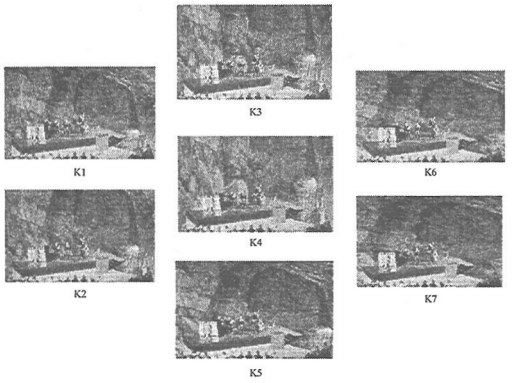


図-1 形状を変化させたスライド (レトレッティ・コンサートホール⁸⁾, フィンランド)

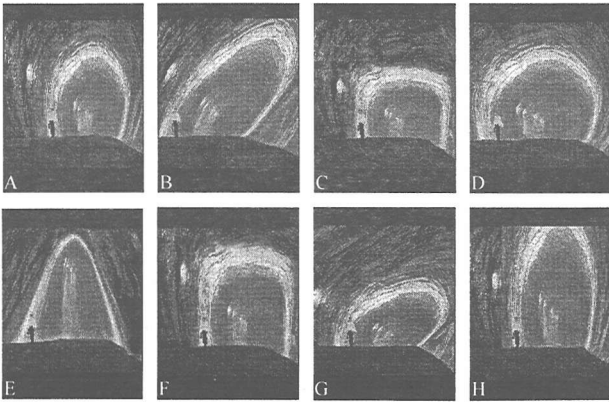


図-3 快適性評価アンケートのスライド

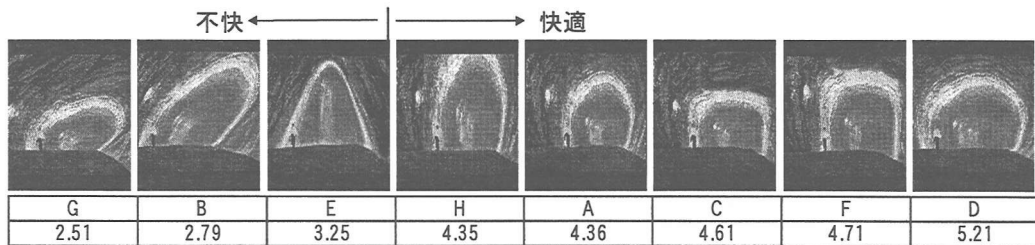


図-4 快適性評価結果

表-2 快適性評価アンケート結果

	(min.rate) 1	←	→ 7(max.rate)	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
x_2	不恰好な - 様になってる			4.57	2.37	4.63	5.20	3.54	4.45	2.39	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
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
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
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
x_7	大変味な - 地味な			4.83	3.30	4.98	3.85	3.23	4.68	2.78	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
y	不快な - 快適な			4.36	2.79	4.61	5.21	3.25	4.71	2.51	4.35

「広がり: x_8 」, 「調和: x_6 」, 「使いやすい: 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図-5に示す. 図-5から, 快適性の高い形状と低い形状は因子1と因子2の組み合わせによってグループ分けできることがわかる. つまり, 形状特性の尺度, バランス, 調和, 使いやすさに優れ, 空間に広がりを感じる形状が快適性が高い空間と言える.

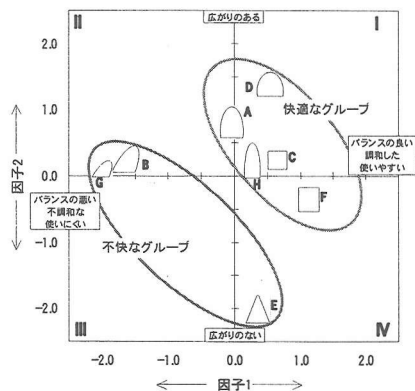


図-5 因子得点分布

2. 2 力学評価

図-3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. 一例として, 岩盤の弾性係数1GPa, ポアソン比0.25, 鉛直方向初期応力5MPa, 側圧係数1.5とした. 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, と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-6参照), 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な危険指標を次のように定める.

$$\text{地下空間の力学的危険指標: } M_{s0} = M_{ss0} + M_{st0} \quad (4)$$

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, 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. 安全性の評価値が高い順に空間形状を並べて図-7に示す.

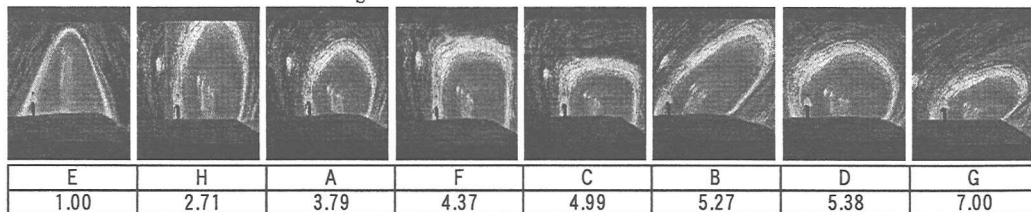


図-7 力学的評価結果

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	
I (形状特性)	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
	x_1	使いにくい - 使いやすい	0.84	0.49	0.95
II (空間性)	x_8	広がりがない - 広がりがある	0.28	0.79	0.70
		因子寄与	2.55	1.10	3.65
因子寄与率 (percent of communality) (%)			69.95	30.05	100.00

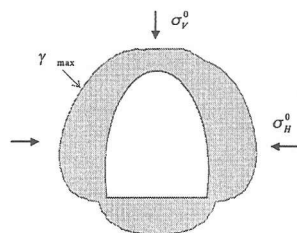


図-6 解析例

(形状A: 最大せん断ひずみ)

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-8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、感性と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-9に示す順位(左から右に順位が高い)となる。

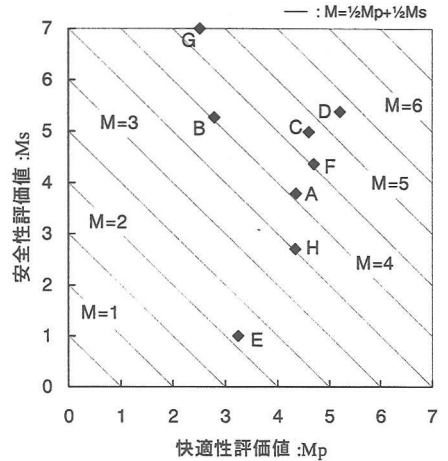


図-8 快適性 M_p と安全性 M_s の関係

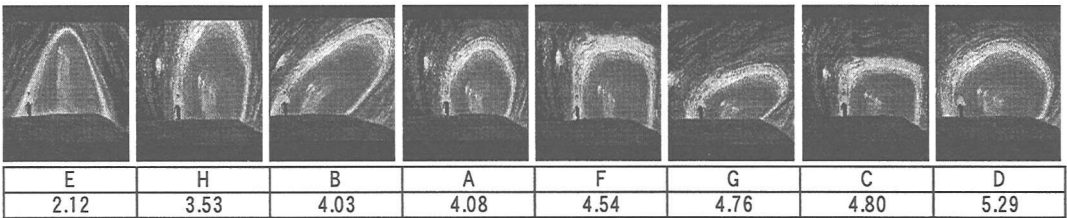


図-9 感性と力学解析による総合評価結果

3. 地下空間形状の力学的感度と感性指標(快適性)の関係^{14), 15)}

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、両者の融合し、この方法を深化させるためには、感性評価結果と力学評価結果の関係についてさらに検討する必要がある。

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があり、それが空間形状の力学的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定義する。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。

3.1 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¹⁷⁾。

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

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-10)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*ijk*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。

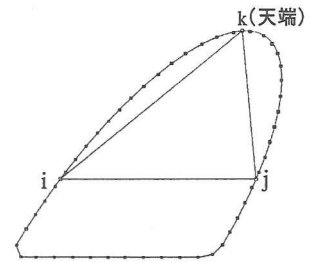


図-10 力学的感度について

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

ひずみは式(8)では定義されるので、式(6)及び式(7)より次式を得る。

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

$\{\varepsilon_i\} = \{\varepsilon_{xi} \quad \varepsilon_{yi} \quad \gamma_{xyi}\}^T$ 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。

$$\gamma_i = \sqrt{(\varepsilon_{xi} - \varepsilon_{yi})^2 + \gamma_{xyi}^2} \quad (10) \quad \gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2} \quad (11)$$

$$e_i = \varepsilon_{xi} + \varepsilon_{yi} \quad (12) \quad e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2} \quad (13)$$

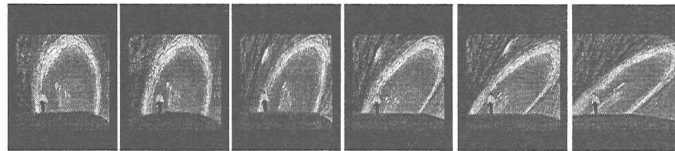
これを用いると、初期応力と弾性係数に無関係、つまり形状の特徴によって変化する値として扱うことができる。

3. 2 快適性と力学感度の関係

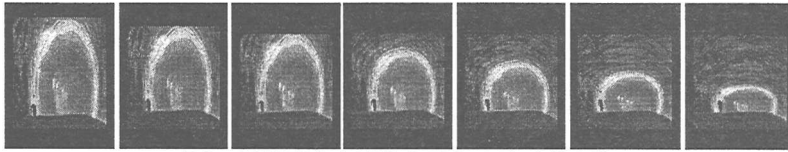
ここでは、地下空間のある形状に対して、感性的に評価した快適性と数値計算によって求めた力学的感度の関係を調べる。

まず、図-3に加えて、図-11に示す地下空間形状に対して、図-2に示すアンケート用紙を用いてアンケートを行った。図-11(a)は空間の高さと底盤幅を一定にして、5段階で空間を斜めに傾けた形状、図-11(b)は幅を一定にして高さを変化させた形状、図-11(c)は高さを一定として幅を変化させた形状である。アンケートでは、図-3、図-11(a)、図-11(b)、図-11(c)に対してそれぞれ別々に実施した。アンケート結果の整理において、まず、「快適な-不快な」という尺度を用いて快適性の度合いを、2章と同様にして評価値 M_p (1~7)で表す。

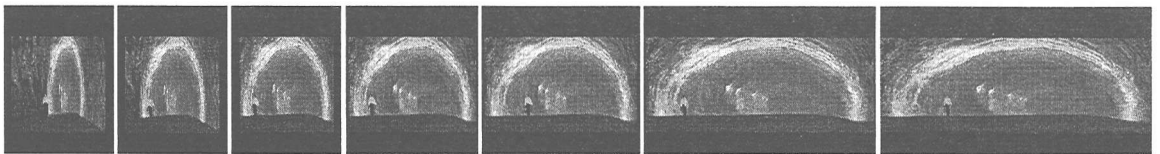
一方、図-3および図-11のすべての形状に対して、式(11)および式(13)で定義した、「せん断ひずみ感度 γ 」



(a) 傾きを変化させたスライド6枚



(b) 天端高さを変化させたスライド7枚



(c) 幅を変化させたスライド7枚

図-11 快適性評価と力学的感度を求めた形状のスライド

および「体積ひずみ感度 e 」を数値解析（2次元境界要素法）によって求め、快適性の評価値 M_p との関係を図-12に示す。

この結果から、快適性と力学感度の「せん断ひずみ感度 γ 」および「体積ひずみ感度 e 」には負の相関があることがわかる。また、体積ひずみ感度の方がより相関関係が強いようである。すなわち、変形しやすい空間形状よりも、変形しにくい空間形状に対して人々は快適性を感じるという結果となった。逆に、変形しやすい空間形状に対して不快感が生まれるともいえる。

感性的な評価と力学的な評価は、本来、独立していると思われるが、本研究における調査および解析によって、両者に何らかの関係があるかもしれないことがうかがわれる。

4. むすび

本報告では、地下空間形状を対象に、アンケートによる感性評価と力学評価を総合した評価方法の概要とその評価結果を述べた。さらに、快適性の評価結果と力学的な感度との関係を、アンケートと数値解析によって調べ、快適性と力学的感度に負の相関関係があることが示された。すなわち、人は、変形しやすい空間形状に比較して、変形しにくい空間形状に対してより快適性を感じるのではないと思われる。その結果が真であるかどうかについては、今後、さらに調査と議論が必要であるが、地下空間に対して感じる、「快-不快」が力学と関係あるかもしれないということは、興味深いものである。

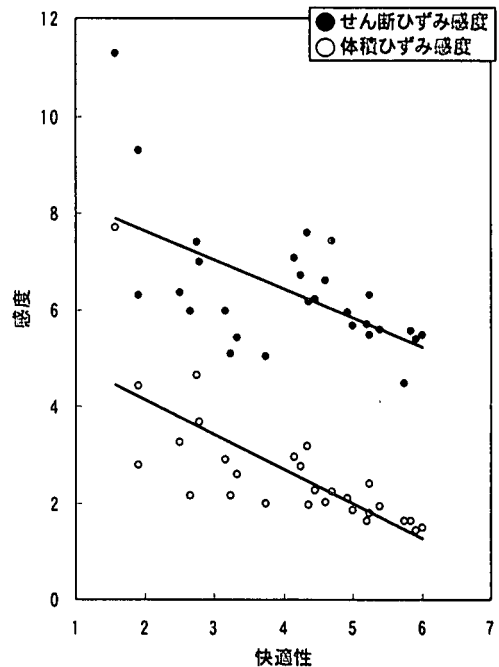


図-12 快適性と感度の関係

参考文献

- 1) 三井康司, 藤川富夫, 亀井紀幸 (共著), 川本眺万 (監修): ロックエンジニアリングと地下空間, 鹿島出版会, 1990.
- 2) Carmondy, J. and R. Sterling: Underground space design, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- 3) 羽根義, 広田正之, 三橋秀明, 谷本祐一, 北澤節: 地下・光・空間そして人間, テクネット, 1998.
- 4) 土木学会地下空間研究会: 地下空間と人間シリーズ1~4, 土木学会, 1994.
- 5) 地下開発利用センター: 地下空間の利用における空間デザインに関する調査・研究報告書, (財) エンジニアリング振興協会, 1995.3
- 6) 土木学会誌, Vol. 72, No. 3, 1987; Vol. 74, No. 2, 1989; Vol. 87, No. 8, 2002; 地下空間利用に関するシンポジウムテキスト, 1988; 地下空間シンポジウム論文・報告集, 1989年~2002年. いずれも土木学会.
- 7) 国土庁大深度地下利用研究会 (編著): 大深度地下利用課題と展望, ぎょうせい, 1998.
- 8) 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.
- 9) 山本伸二: 地下空間の力学的挙動を考慮した意匠設計に関する基礎的研究, 神戸大学工学部建設学科卒業論文, 1997
- 10) 今泉暁音, 清水則一, 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概要集, pp. 401~402, 2001.6.
- 11) 今泉暁音, 清水則一, 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回年次学術講演会概要集 (CD-ROM), 部門CS, CS8-001, pp. 476~477, 2001.10.
- 12) 今泉暁音, 清水則一, 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.
- 13) Shimizu, N., Imaizumi, A. and Sakurai, S.: 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.
- 14) 今泉暁音, 清水則一, 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回年次学術講演会概要集 (CD-ROM), 部門CS, CS1-010, pp. 19~20, 2002.9.
- 15) 今泉暁音, 清水則一, 櫻井春輔: 地下空間形状における感性評価と力学的評価の関係について, 第8回地下空間シンポジウム, 2003. (投稿中)
- 16) 岩下豊彦: SD法によるイメージの測定, 川島書店, 1983.
- 17) 桜井春輔, 清水則一: 現場実験結果の逆解析による岩盤の力学定数の推定, 土と基礎, 35-3 (350), pp. 17~21, 1987.