

(86) 大規模地下空洞建設のための岩盤不連続面調査と DDA モデルによる解析

飛島建設(株)	技術研究所	正会員	近久 博志
飛島建設(株)	技術研究所	正会員	○筒井 雅行
飛島建設(株)	技術研究所	正会員	小野 一博
京都大学	工学部	正会員	大西 有三

Survey and Discontinuous Deformation Analysis of Jointed Rock Masses Surrounding a Large Cavern

Hiroshi CHIKAHISA	Tobishima Corporation
Masayuki TSUTSUI	Tobishima Corporation
Kazuhiro ONO	Tobishima Corporation
Yuzo OHNISHI	Kyoto University

ABSTRACT

Takayama Festival Float Art Museum consists of dome shape exhibition hall of 40.5m in diameter and tunnel type art gallery of 70m length, which is the first plan of art museum using underground. In the design stage, it is important to examine the behavior of joints and cracks of rock masses on discussing the stability of a large cavern.

This paper describes survey and analysis executed to examine the behavior of joints and cracks of rock masses surrounding a large cavern after completion. The analysis method used is the discontinuous deformation analysis developed by Dr.G.H.Shi, which enables to estimate deformation and displacement of rock blocks simultaneously and to simulate effectively the discontinuous behavior of jointed rock masses. Geometric properties consisting of directions, pitches and length of discontinuity surface of rock masses were surveyed in geological survey tunnel and boreholes. Field shearing tests were executed to examine mechanical properties of rock masses, and laboratory shearing tests were executed to gain mechanical properties of joints and cracks.

From the results of DDA, the behavior of rock masses surrounding a large cavern during excavation is examined.

1. はじめに

本論文は、大規模岩盤空洞の設計に際して、不連続性岩盤の挙動を調べることを目的に実施した岩盤内の不連続面の調査と解析について述べるものである。対象となる地下空洞は、高山祭屋台美術館と呼ばれる、直径40.5mのドーム形状の大空洞であり、わが国初の岩盤空洞を利用した地下式美術館である。

土被りが約30mと比較的浅いところに大空洞が建設されることから、ここでは、ブロックの変位と変形を同時に評価し、岩盤の不連続的な挙動を効率よく解析することができるG. H. Shiによって開発された不連続変形法 (DDA : Discontinuous Deformation Analysis) を用いて岩盤の不連続挙動の予測解析を行う。

入力パラメータは、ボーリング孔を利用したボアホールカメラ撮影と地質調査坑内での調査結果から、不連続面の幾何学的特性 (方向性、間隔および長さ) について、統計的手法を用いて評価した。また、不連続

面の力学特性は、空洞周辺の岩盤のせん断強度について、原位置と室内で直接せん断試験を実施し、各種の不連続面のせん断強度を求めた。

そして、解析結果を基にして、空洞掘削時における空洞周辺の岩盤の変位挙動について考察する。

2. 不連続面の調査・試験

本地区の地質は、白亜紀後期から古第三紀の濃飛流紋岩と呼ばれる火成岩のうち火砕流起源の溶結凝灰岩より構成される。図-1に地山特性を調べるために施工した地質調査坑と地質調査ボーリングの位置と空洞計画位置を示す。

岩盤内の不連続面の分布特性と力学特性に関する調査・試験は、これらのボーリング孔や地質調査坑を用いて、表-1に示すような項目を実施した。以下、調査・試験結果の概要について述べる。

(1) 不連続面の幾何学的特性

調査坑内とNO.1,2及び切羽水平ボーリングの全不連続面のデータと、クラスター分割を行った

結果を図-2の下半球等角投影図に示す¹⁾。この図で第1群は低角度の、第2群は跡津川断層系の、第3群は阿寺断層系の不連続面群にそれぞれ該当する。各群の方向性の代表値をこのクラスター投影図で密度最大の点で表すと、表-2のようになる。なお、表中には参考として、Fisher分布を仮定した場合の方位分散係数Kと標準偏差σを示す²⁾。

不連続面の間隔については、各方向群に対して偏向が生じないような不連続面のデータ、即ち、第1群に関してはNO.1,2鉛直ボーリングのデータ、第2群に関しては調査坑側壁のデータ、第3群に関しては調査坑内の側壁から行った水平ボーリングのデータを用いた。また、不連続面の長さについては、各方向群とも図-3に示すような調査坑側壁のデータから、高さ0.5mのスキャンラインと交差する不連続面について、その交点から測定可能な1つの端点までの半トレース長の分布を調べた。なお、第2群及び第3群の不連続面で調査坑側壁に端点が現れないものはデータから除き、一様分布を仮定

表-2 不連続面の方向性

	データ数	傾斜(°)	傾斜方位(°)	方位分散係数(K)	標準偏差(σ)
第1群(低角度系)	197	15	230	11.94	0.289
第2群(跡津川断層系)	232	68	128	4.20	0.488
第3群(阿寺断層系)	62	77	45	1.46	0.828

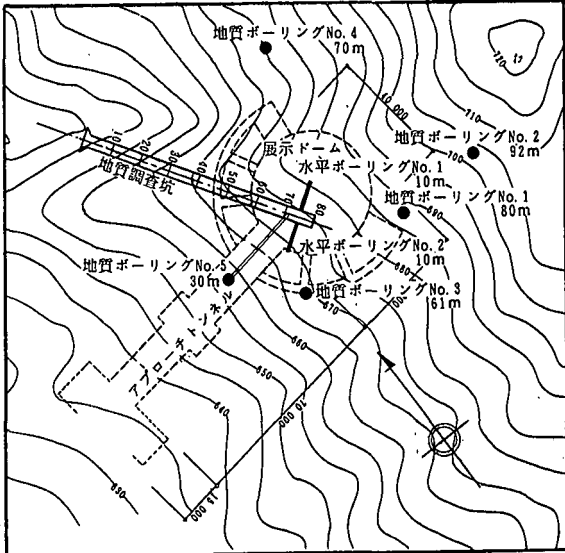


図-1 地質調査坑と地質ボーリング位置図

表-1 不連続面に関する調査・試験項目

項目	調査・試験位置	不連続面の評価
空中写真撮影	NO.1, NO.2ボーリング、切羽水平ボーリング	不連続面の方向、間隔
調査坑側壁調査	調査坑側壁	不連続面の方向、間隔、長さ
原位置でせん断試験	調査坑内	岩盤の残留強度
室内直接せん断試験	NO.5ボーリングコア、調査坑側壁コア	不連続面のせん断強度
X線分析	調査坑側壁の不連続面充填物	充填物の鉱物組成

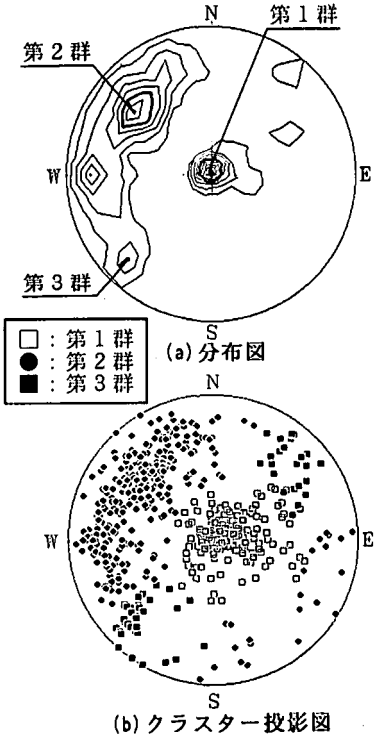


図-2 不連続面の下半球等角投影図

して、Priestらの方法³⁾により不連続面の長さを評価した。空洞位置に当たるCH級岩盤における各方向群の不連続面の間隔と長さを表-3に示す。

以上の不連続面の幾何学的特性の評価結果を調査坑軸方向断面に投影すると、図-4に示すようになる。

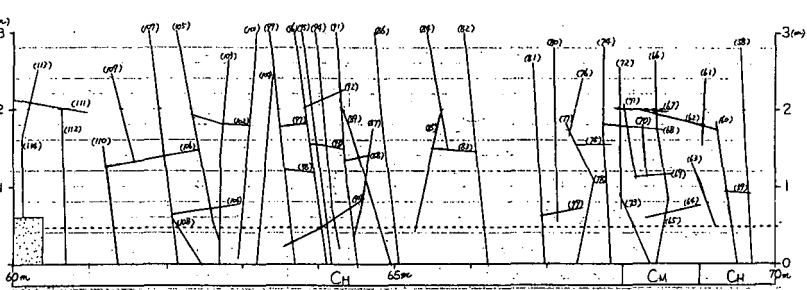


図-3 調査坑側壁の不連続面のスケッチ

表-3 CH級岩盤における不連続面の間隔と長さ
(単位：m)

	間隔()内は 標準偏差	長さ (推定値)
第1群(低角度系)	3.2(1.78)	2.1
第2群(跡津川断層系)	2.1(0.17)	13.7
第3群(阿寺断層系)	2.4(1.23)	7.4

(2) 不連続面の力学特性

次の3種の直接せん断試験から、各種の不連続面のせん断強度を求めた。

- 1)調査坑内原位置ロックせん断試験
- 2)N0.5ボーリングコアの不連続面の室内ロックせん断試験
- 3)調査坑側壁の粘土挟在不連続面を含むブロックの室内ロックせん断試験

1)については、その残留強度を空洞周辺の一般的な不連続面のせん断強度として評価する。2)については、掘削による緩みや水による風化を受けた不連続面の、3)については、調査坑側壁に3箇所確認された粘土を挟む不連続面、いわゆる弱面のせん断強度として評価する。表-4に空洞周辺の各種の不連続面のせん断試験の結果を示す。

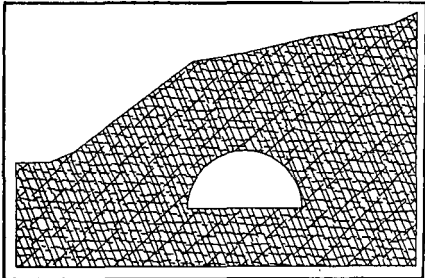


図-4 不連続面の分布図

3. DDA解析モデル

不連続変形法(DDA)の解析理論については、文献4),5)等に譲る。DDAの特徴は、ブロックの貫入による最小二乗ひずみエネルギーをペナルティ法により貫入量が一定量以下になるように繰り返し計算を行うことであり、ブロック相互の運動を動的、準静的に解析することができる。反面、解析に当たっては、解析領域全体に対して不連続面の分布形状をモデル化しなければならないという欠点もある。

ここでは、主として空洞近傍の岩盤の不連続体的な挙動を予測することを目的として、空洞周辺のCH級岩盤の調査結果を基に、図-5に示すような2次元解析モデルを用いた。なお、解析断面は第3群である阿寺断層系の不連続面と平行な断面であるため、低角度系と跡津川断層系の不連続面で構成されるブロックモデルとなっている。

解析は、表-5に示すように、常時の検討として、掘削による初期応力の解放(応力再配分)を荷重条件とした場合の不連続面のせ

表-4 不連続面のせん断強度(CH級岩盤)

	摩擦角 (°)	粘着力 (kgf/cm ²)	不連続面の状態
原位置せん断試験 (残留強度)	56	22.0	空洞周辺の不連続面
室内せん断試験 δ'-リンクコア	35	1.07	風化不連続面
γ'ロックコア(弱面)	20	0.15	弱面

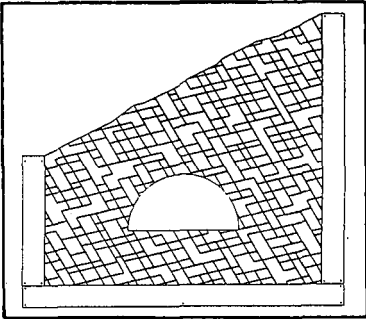


図-5 DDA解析モデル図

せん断強度の相違に対して行う3ケースと、地震時の検討としてレベル2に対応する地震慣性力⁶⁾を負荷し続けた場合（いわゆる震度法）の計4ケースを行った。ケース4における地震慣性力の方向は、水平方向は図-5の解析モデル図で左から右向きに、鉛直方向は下方に負荷した。解析時間ステップは、

表-5 解析ケースと解析条件

ケース	不連続面のせん断強度		荷重条件	時間 Δt (sec.)	Δt ステップ数
	摩擦角(°)	粘着力(kgf/cm ²)			
1	56°	22.0	初期応力	0.2	500
2	35°	1.07	"	0.2	500
3	20°	0.15	"	0.2	500
4	56°	22.0	初期応力+慣性力 (0.65(鉛直震度) 0.33(水平震度))	0.05	500

常時の検討では $\Delta t = 0.2\text{sec}$ 、地震時の検討では $\Delta t = 0.05\text{sec}$ 、ステップ数500回とした。ブロックの物性は、平板載荷試験等の試験結果より、単位体積重量 $\gamma = 2.6\text{tonf/m}^3$ 、弾性係数 $E = 54,700\text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.27$ とした。初期応力については、A E法とD R法による試験結果から、鉛直応力はほぼ土被り分の

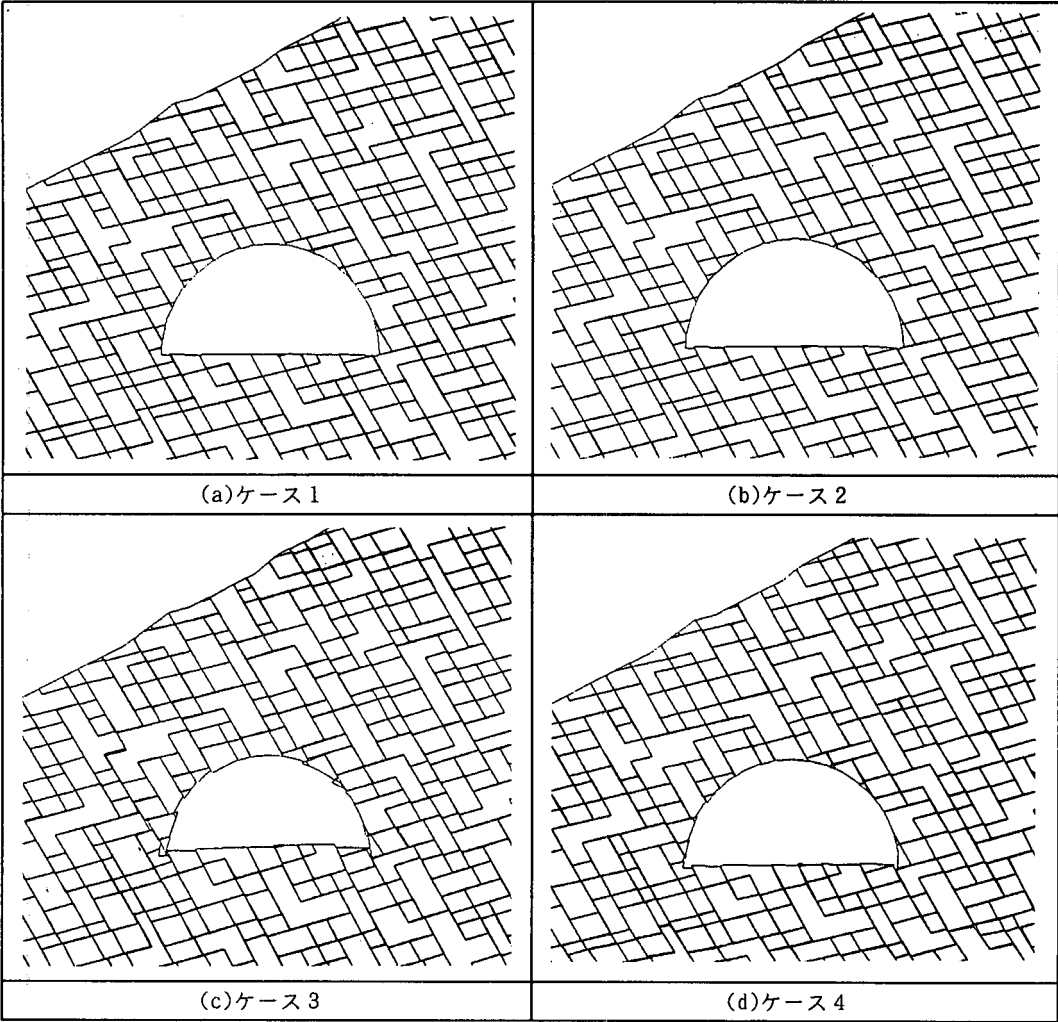


図-6 変位・変形図

岩石自重($\sigma_v = \gamma H$)、水平応力は鉛直応力の $1/2$ ($\sigma_H = 0.5 \sigma_v$)とした。また、各ケースとも、側法及び下方の13点を固定点とした。

4. 解析結果

図-6に各ケースの解析結果としてブロックの変位・変形図を示す。変位・変形は拡大して示している。

ケース1 ($\phi = 56^\circ$, $c = 22.0 \text{ kgf/cm}^2$) の場合は、最大変位量は掘削底盤の 0.35 cm であり、掘削によるブロックの抜け落ち等の影響は見受けられない。本ケースの解析結果は、FEM解析と同様の結果となっている。

ケース2 ($\phi = 35^\circ$, $c = 1.07 \text{ kgf/cm}^2$) は、掘削による緩みや水による風化を受けた不連続面で、そのせん断強度が基本摩擦角に近い値を示している場合である。最大変位量は 1.64 cm であり、右肩部の1ブロックの抜け落ちが認められる程度である。

ケース3 ($\phi = 20^\circ$, $c = 0.15 \text{ kgf/cm}^2$) は、全不連続面のせん断強度を粘土を挟在する弱面という仮定で解析したものであるが、両肩部のブロックの抜け落ちや左側壁部のブロックの押し出しの現象が顕著に認められる。また、不連続面の開口は、掘削面から約 5.7 m まで進展している。最大変位量は 54 cm であり大変形の挙動を示している。

ケース4 (地震時の解析) は、本地下空洞のように土被りの比較的小さい地下空洞の地震時における岩盤の引張破壊の内、岩盤に内在している不連続面の開口による破壊を調べるために実施したものである。原位位置せん断試験で得られた低角度系の不連続面のせん断強度を用いた解析結果では、引張応力の発生は左肩部の2ブロックだけであり、最大変位量も左肩部で 4.0 cm である。

5. おわりに

ここでは、大規模地下空洞建設のための岩盤不連続面の調査、入力パラメータの評価及び空洞周辺岩盤の不連続体的挙動をDDA解析によって調べた。解析の結果から、特に、

- 1) 比較的土被りが小さい大規模地下空洞においても、良好な岩盤で空洞の形状が接線方向の応力の流れを保持しやすいものであれば空洞掘削による変位挙動は小さい。
- 2) 不連続面の開口の進展には、弱面の存在が大きな影響を与える。

という考察がなされる。

今回の解析モデルでは、不連続面の分布等のばらつきを考慮しておらず代表値を用いているため、施工時の管理の中でこれを補っていくことが必要と考えられる。

3次元的に複雑に分布する岩盤不連続面を評価し大規模地下空洞への不連続体解析に適用している例は少ない。したがって今後は、地下空洞施工中の計測データを収集し、適用性に関する研究を進めて行く予定である。

【参考文献】

- 1) 吉中、吉田、藤田：「岩盤不連続面の方向性に関する分布特性の評価とそのブロック理論への適用」，第7回岩の力学国内シンポジウム講演概要集，pp.145-150，1987
- 2) Mantab, M.A., Bolstad, D.D., Alldredge, J.R. and Shanley, R.J.: "Analysis of fracture orientation for input to structural models of discontinuous rock", U.S. Bureau of Mines, Report of Investigation 7669, 1972
- 3) Priest, S.D. and Hudson, J.A.: "Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scan line", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.18, pp.183-197, 1981
- 4) Shi, G.H. and Goodman, R.E.: "Discontinuous Deformation Analysis", Proc. 25th U.S. Symp. on Rock Mech., pp.269-277, 1984
- 5) 佐々木、大西、吉中：「不連続変形法 (DDA) とその岩盤工学への適用に関する研究」，土木学会論文集，No.493/Ⅲ-27, pp.11-20, 1994
- 6) 松元、近久、小林、櫻井：「岩盤空洞を利用した地下式展示館の地震時安定性評価」，第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要集，1996