

空洞壁面展開図を用いた確率ブロック理論の検証

VARIFICATION OF STOCHASTIC BLOCK THEORY USING JOINT TRACE MAP OF LARGE UNDERGROUND OPENING

水戸義忠*・吉田次男**・菊地宏吉***

Yoshitada MITO, Tsugio YOSHIDA and Kohkichi KIKUCHI

Stochastic Block Theory has been developed for the effective observational construction of large underground opening. Using Stochastic Block Theory, the stochastic approach for the judgment of key block can be carried out before every joint trace of the block appears on the cavern wall, in other word, in the moment some of the joint traces of the block appear. In order to examine the applicability of Stochastic Block Theory, the simulation using the actual trace map which has been obtained from the observation of the wall of the large underground opening for the underground power plant is carried out.

1. 緒言

大規模地下発電所空洞の情報化施工を目的として、空洞壁面に出現する不安定な移動可能ブロック（キーブロック）をそのブロックが壁面上に一部露出した段階、すなわち移動可能となる前にその存在を予測する手法である「確率ブロック理論」が水戸ら¹⁾によって提案されている。この手法は切り羽後方における不連続面分布の決定論的データによって特定された危険箇所について、予め求められている不連続面分布の確率論的データを用いて切り羽前方を予測することにより、次段階の掘削に伴って移動可能ブロックが形成される確率を算出するものである。本研究においては、この確率ブロック理論の妥当性と適用性を検証することを目的として、既設の大規模地下発電所において建設時に作成された空洞壁面展開図を用いてシミュレーションを行った。

2. 確率ブロック理論の概要

2.1 解析対象ブロックとブロックを構成する不連続面

不連続面で囲まれた移動可能ブロックは、掘削面（「掘削面[E]」とする）上において、不連続面のトレースによって囲まれた閉領域（多角形）として現れる。このため、一部露出した状態のブロックについては、一般にブロックを形成する不連続面のうち2つ（水平掘削の場合は壁面に向かって上方を「不連続面[A]」、下方を「不連続面[B]」、盤下げ掘削の場合は壁面に向かって右側を「不連続面[A]」、左側を「不連続面[B]」とする）が切り羽またはベンチと交差し、さらにこれらの2つが、既掘削面上で直接あるいは他の不連続面（「連絡不連続面[C]」（ $C = C_1, C_2, \dots$ ）とする）を介して連結する。確率ブロック理論では、このようにいくつかの不連続面トレースおよび切り羽またはベンチ面と掘削面[E]の交線によって囲まれた閉領域（解析対象多角形）が存在する場合にこれを対象として解析を実施する。解析対象多角形は、不連続面[A]と不連続面[B]のトレース（それぞれ「トレース[A]」、「トレース[B]」とする）が、未掘削の岩盤内において、①次第に近づきながら進展する「収束型」および②次第に遠ざかりながら進

* 正会員 工博 京都大学大学院助手 工学研究科資源工学専攻

** 正会員 関西電力（株）総合技術研究所構築研究室

*** 正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科資源工学専攻

展する「発散型」に区分することができる(図-1 参照)。掘削により新たなブロックが形成される条件としては、①未掘削の領域において不連続面[A]と不連続面[B]が直接交差する「直接交差型」の場合および②未掘削の領域において潜在する不連続面(「潜在不連続面」とする)が不連続面[A]、不連続面[B]と同時に交差する「間接交差型」の場合の2つが考えられる。

2.2 ブロックの移動可能性の判定

(a) 直接交差型

図-2は、水平掘削および盤下げ掘削において確率ブロック理論を用いる際の座標系を示したものである。さて、キ一ブロックの認定²⁾においてはブロックコードを決定する必要がある。x'y'-局所座標におけるトレース[A]と[B]の傾きを α_A' 、 α_B' 、掘削面[E]の傾斜角を θ_E 、掘削面[E]のブロックコードを a_E とし、以下の条件式を定義する。

$$B_A' = B_A'(\alpha_A' | \alpha_A' > \tan \theta_E) \quad (1)$$

$$B_B' = B_B'(\alpha_B' | \alpha_B' > \tan \theta_E) \quad (2)$$

$$B_E = B_E(a_E | a_E = 1) \quad (3)$$

これらの条件式を用いると、水平掘削の場合におけるトレース[A]および[B]のブロックコードが得られる。

$$a_A = \begin{cases} 0 \cdots (B_A' \cap \overline{B_E}) \text{ or } (\overline{B_A'} \cap B_E) \\ 1 \cdots (B_A' \cap B_E) \text{ or } (\overline{B_A'} \cap \overline{B_E}) \end{cases} \quad (4)$$

$$a_B = \begin{cases} 1 \cdots (B_B' \cap \overline{B_E}) \text{ or } (\overline{B_B'} \cap B_E) \\ 0 \cdots (B_B' \cap B_E) \text{ or } (\overline{B_B'} \cap \overline{B_E}) \end{cases} \quad (5)$$

一方、盤下げ掘削の場合においては、さらに次の条件式を定義する。

$$B_A = B_A(\alpha_A | \alpha_A > 0) \quad (6) \quad B_B = B_B(\alpha_B | \alpha_B > 0) \quad (7)$$

これらの条件式より不連続面[A]および不連続面[B]のブロックコードが次式によって得られる。

$$a_A = \begin{cases} 0 \cdots (\overline{B_A} \cap B_A' \cap B_E) \text{ or } (\overline{B_A} \cap \overline{B_A'} \cap B_E) \text{ or } (\overline{B_A} \cap B_A' \cap \overline{B_E}) \text{ or } (\overline{B_A} \cap \overline{B_A'} \cap \overline{B_E}) \\ 1 \cdots (B_A \cap B_A' \cap B_E) \text{ or } (B_A \cap \overline{B_A'} \cap B_E) \text{ or } (B_A \cap B_A' \cap \overline{B_E}) \text{ or } (B_A \cap \overline{B_A'} \cap \overline{B_E}) \end{cases} \quad (8)$$

$$a_B = \begin{cases} 1 \cdots (\overline{B_B} \cap B_B' \cap B_E) \text{ or } (\overline{B_B} \cap \overline{B_B'} \cap B_E) \text{ or } (\overline{B_B} \cap B_B' \cap \overline{B_E}) \text{ or } (\overline{B_B} \cap \overline{B_B'} \cap \overline{B_E}) \\ 0 \cdots (B_B \cap B_B' \cap B_E) \text{ or } (B_B \cap \overline{B_B'} \cap B_E) \text{ or } (B_B \cap B_B' \cap \overline{B_E}) \text{ or } (B_B \cap \overline{B_B'} \cap \overline{B_E}) \end{cases} \quad (9)$$

以上の情報からブロックの移動可能性を判定²⁾することができ、その結果より以下のような値を定義する。

$$P[R_C] = 0(\text{not removable}), 1(\text{removable}) \quad (10)$$

(b) 間接交差型

未掘削の領域に存在し、不連続面[A]および不連続面[B]を連結させて閉領域を形成させる潜在不連続面[i]のトレース(トレース[i]とする)のx'y'-局所座標における傾きを α_i' とし、以下のような条件式を定義する。

$$\text{盤下げ掘削: } B_i = B_i(\alpha_i | \min(0, \alpha_A, \alpha_B) \leq \alpha_i \leq \max(0, \alpha_A, \alpha_B)) \quad (11) \quad \text{水平掘削: } B_i = B_i(\alpha_i | \alpha_i \leq \min(\alpha_A, \alpha_B)) \quad (12)$$

$$B_i' = B_i'(\alpha_i' | \alpha_i' > \tan \theta_E) \quad (13)$$

これらの条件式を用いると、不連続面[i]のブロックコードは以下のように得られる。

$$a_i = \begin{cases} 0 \cdots (\overline{B_i} \cap B_i' \cap B_E) \text{ or } (\overline{B_i} \cap \overline{B_i'} \cap B_E) \text{ or } (\overline{B_i} \cap B_i' \cap \overline{B_E}) \text{ or } (\overline{B_i} \cap \overline{B_i'} \cap \overline{B_E}) \\ 1 \cdots (B_i \cap B_i' \cap B_E) \text{ or } (B_i \cap \overline{B_i'} \cap B_E) \text{ or } (B_i \cap B_i' \cap \overline{B_E}) \text{ or } (B_i \cap \overline{B_i'} \cap \overline{B_E}) \end{cases} \quad (14)$$

以上の情報からブロックの移動可能性を判定²⁾することができ、その結果より以下のような値を定義する。

$$P[R_i] = 0(\text{not removable}), 1(\text{removable}) \quad (15)$$

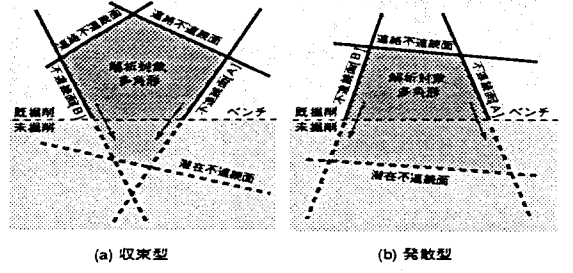
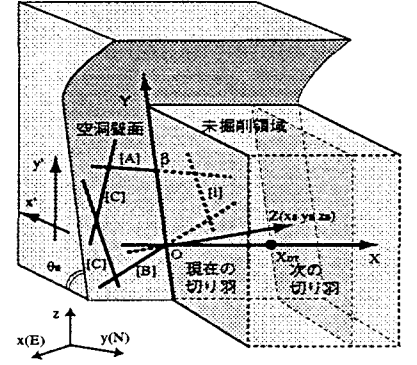
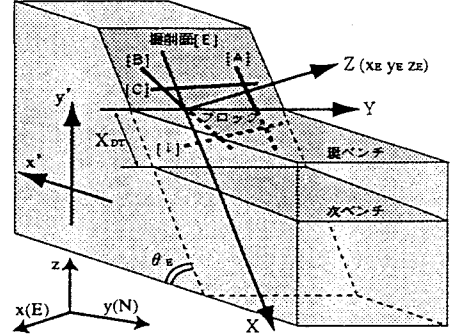


図-1 確率ブロック理論における収束型と発散型



(a) 水平掘削



(b) 盤下げ掘削

図-2 確率ブロック理論における座標軸

2.3 潜在不連続面の存在性

まず、XY-座標系において、X 軸方向の解析範囲を示す値を以下のようにして設定する。

収束型: $X_C = \min(X_{DT}, X_{AB})$ (16) 発散型: $X_C = X_{DT}$ (17)

但し、 X_{DT} は掘削面[E]における現段階と次段階の切り羽またはベンチ間の距離であり、 X_{AB} は収束型におけるトレース[A]とトレース[B]の交点座標である。次に、 $0 \leq X \leq X_C$ の範囲において、図-3に示すように長さ dL の n 個の微小区間を設定し、ベンチから k 番目の微小区間を $dL[k]$ と表す。トレース[A]上（「[A]基軸型」とする）とトレース[B]上（「[B]基軸型」とする）のいずれかに微小区間を設定するかについては以下のような基準に従うものとする。

[A]基軸型: $\alpha_i < \alpha_A \cap \alpha_i < \alpha_B$ (18)

[B]基軸型: $\alpha_B < \alpha_i \cap \alpha_A < \alpha_i$ (19)

なお、微小区間の長さ および基軸となるトレースの単位ベクトルは次式によって与えられる。

[A]基軸型: $dL = \sqrt{1 + \alpha_A^2} dX$ (20) $n_T = n_E \otimes n_A$ (21) [B]基軸型: $dL = \sqrt{1 + \alpha_B^2} dX$ (22) $n_T = n_E \otimes n_B$ (23)

但し、 dX は X 軸方向に解析範囲を n 等分した $dL[k]$ の X 成分であり、 n_A 、 n_B 、 n_E はそれぞれ不連続面[A]、[B]、掘削面[E]の単位法線ベクトルである。微小区間 $dL[k]$ において不連続面[i]が存在するという事象の生起確率は不連続面[i]の平均間隔 $d(i)$ および単位法線ベクトル n_i を用いて次式により得られる。

$$P[D_i(k)] = |n_i \cdot n_T| d(i) dL \quad (24)$$

2.4 未掘削領域における不連続面の連続性

(a) 間接交差型

微小区間 $dL[k]$ におけるトレース[A]およびトレース[B]とトレース[i]の交点座標（近似）は次式のようになる。

[A]基軸型: $X_{Ai}(k) = kdX$ (25) $X_{Bi}(k) = \frac{(\alpha_A - \alpha_i)kdX + \beta}{\alpha_B - \alpha_i}$ (26) [B]基軸型: $X_{Ai}(k) = \frac{(\alpha_B - \alpha_i)kdX + \beta}{\alpha_A - \alpha_i}$ (27) $X_{Bi}(k) = kdX$ (28)

$$Y_{Ai}(k) = \alpha_A X_{Ai}(k) + \beta \quad (29) \quad Y_{Bi}(k) = \alpha_B X_{Bi}(k) \quad (30)$$

各不連続面が互いに連結するためには、それぞれの半トレース長が次式に示す値以上でなければならない。なお、ここでは、トレース[A]と[B]の場合はベンチとの交点から未掘削領域内の端点までの長さを、トレース[i]の場合は基軸との交点から他方のトレース側の端点までの長さをもって半トレース長として定義する。

$$\ell_{SA}^i(k) = \sqrt{1 + \alpha_A^2} X_{Ai}(k) \quad (31) \quad \ell_{SB}^i(k) = \sqrt{1 + \alpha_B^2} X_{Bi}(k) \quad (32) \quad \ell_{Si}^i(k) = \sqrt{(X_{Ai}(k) - X_{Bi}(k))^2 + (Y_{Ai}(k) - Y_{Bi}(k))^2} \quad (33)$$

半トレース長がそれぞれ以上となる事象の生起確率は、半トレース長の分布関数を用いて以下のように求められる。

$$P[S_A^i(k)] = 1 - F(\ell_{SA}^i(k) | n_A \in n_\Psi) \quad (34) \quad P[S_B^i(k)] = 1 - F(\ell_{SB}^i(k) | n_B \in n_\Psi) \quad (35) \quad P[S_i^i(k)] = 1 - F(\ell_{Si}^i(k) | n_i \in n_\Psi) \quad (36)$$

但し、 n_Ψ は、不連続面[i]が属する Ψ 不連続面群の単位法線ベクトルの集合の族である。

(b) 直接交差型

未掘削領域においてトレース[A]と[B]が連結するには、それぞれの半トレース長が次の値以上でなければならない。

$$\ell_{SA}^C = \sqrt{1 + \alpha_A^2} X_{AB} \quad (37) \quad \ell_{SB}^C = \sqrt{1 + \alpha_B^2} X_{AB} \quad (38)$$

半トレース長が、それぞれ以上となる事象の生起確率は、前項と同様に次式で求められる。

$$P[S_A^C] = 1 - F(\ell_{SA}^C | n_A \in n_\Psi) \quad (39) \quad P[S_B^C] = 1 - F(\ell_{SB}^C | n_B \in n_\Psi) \quad (40)$$

2.5 危険ブロックの形成確率

(a) 間接交差型

微小区間 $dL[k]$ において潜在不連続面[i]が存在し、間接交差型の危険ブロックが形成される事象 $U_i(k)$ が生起するためには、①ブロックが移動可能な形状(R_i)、②微小区間 $dL[k]$ に不連続面[i]が出現する($D_i(k)$)、③不連続面[A]の

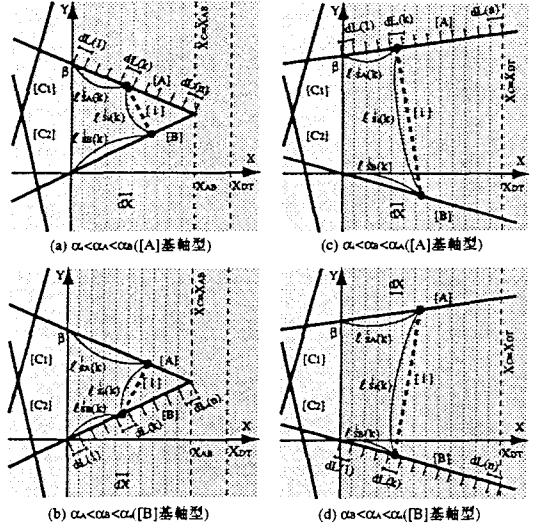


図-3 微小区間の設定

半トレース長が規定値以上($S_A^i[k]$)、④不連続面[B]の半トレース長が規定値以上($S_B^i[k]$)、⑤不連続面[i]の半トレース長が規定値以上($S_i^i[k]$)、⑥微小区間 $dL[1] \sim dL[k-1]$ において不連続面[i]によって危険ブロックが形成されない($H_i[k]$)の各条件を全て具備することが必要である。ここで条件⑥の生起確率は次のようになる。

$$P[H_i(k)] = P\left[\overline{D_i(k-1)} \cup \left(\overline{S_i^i(k-1)} \cap D_i(k-1)\right) \cap H_i(k-1)\right] = (1 - P[D_i(k-1)]P[S_i^i(k-1)])P[H_i(k-1)] \quad (41)$$

また、最初の区間 $dL[1]$ では確率が1であるため、条件⑥の生起確率は第1項が1の等比数列となり次式が得られる。

$$P[H_i(k)] = \prod_{m=1}^{k-1} (1 - P[D_i(m)]P[S_i^i(m)]) \quad (42)$$

以上より、事象 $U_i(k)$ の生起確率は条件①～⑥の生起確率によって次のように示される。

$$P[U_i(k)] = P[R_i \cap D_i(k) \cap S_A^i(k) \cap S_B^i(k) \cap S_i^i(k) \cap H_i(k)] = P[R_i]P[D_i(k)]P[S_A^i(k)]P[S_B^i(k)]P[S_i^i(k)]P[H_i(k)] \quad (43)$$

ここで、事象 $U_i(1), U_i(2), \dots, U_i(n)$ は互いに排反する事象となっており、 $dL[1] \sim dL[n]$ において潜在不連続面[i]が存在し、間接交差型の危険ブロックが形成される事象 U_i の生起確率は次式のようにになる。

$$P[U_i] = P[U_i(1) \cup U_i(2) \cup U_i(3) \cup \dots \cup U_i(k) \cup \dots \cup U_i(n)] = \sum_{k=1}^n P[U_i(k)] \quad (44)$$

(b) 直接交差型

収束型でかつ $XC > XDT$ の場合で直接交差型の危険ブロックが形成される事象 U_C が生起するためには、①ブロックが移動可能な形状(RC)、②不連続面[A]の半トレース長が規定値以上($S_A^c[k]$)、③不連続面[B]の半トレース長が規定値以上($S_B^c[k]$)の各条件を全て具備することが必要である。したがって、事象 U_C の生起確率は次式のようにになる。

$$P[U_C] = P[R_C \cap S_A^c \cap S_B^c] = P[R_C]P[S_A^c]P[S_B^c] \quad (45)$$

(c) 危険ブロックの形成確率の算出

確率ブロック理論による解析において最終的に求める確率は危険ブロックが形成される確率である。ここで、危険ブロックが形成される事象は、①未掘削領域内に存在する任意方向の潜在不連続面によって間接交差型の危険ブロックが形成される事象 (1 方向の潜在不連続面[i]が関与するとき: U_i)、②未掘削領域内において、直接交差型の危険ブロックが形成される事象 (U_C) のうち1つでも生起するときに生起することとなる。したがって、 Ω を微小方向領域の総数とすると事象 U は事象 U_i と事象 U_C を用いて次のように表現できる。

$$U = U_C \cup U_1 \cup U_2 \cup U_3 \cup \dots \cup U_\Omega \quad (46)$$

また、ド・モルガンの法則より事象 U の余事象である危険ブロックが形成されない事象 $\bar{U}$ は次のようになる。

$$\bar{U} = \overline{U_C \cup U_1 \cup U_2 \cup U_3 \cup \dots \cup U_\Omega} = \overline{U_C} \cap \overline{U_1} \cap \overline{U_2} \cap \overline{U_3} \cap \dots \cap \overline{U_\Omega} \quad (47)$$

これより、掘削に伴って危険ブロックが形成される事象が生起する確率は次式によって与えられる。

$$P[U] = 1 - P[\bar{U}] = 1 - P[\overline{U_C}] \prod_{i=1}^{\Omega} P[\overline{U_i}] = 1 - (1 - P[U_C]) \prod_{i=1}^{\Omega} (1 - P[U_i]) \quad (48)$$

2.6 確率ブロック理論の入力項目

確率ブロック理論における入力項目は、①解析対象多角形に関する幾何学的データ、②解析対象多角形周辺における不連続面の分布データの2つに大別される。まず、①のデータは、既掘削部の状況を与える決定論的情報であり、その内容は、(1)不連続面[A]の方向、(2)不連続面[B]の方向、(3)連絡不連続面[C]の方向とブロックコード、(4)掘削面[E]の方向とオーバーハングの有無、(5)不連続面[A]と不連続面[B]のベンチ面における距離の5項目である。一方、②のデータは、未掘削部の不連続面分布を予測する確率統計学的情報であり、その内容は、(1)各不連続面群の平均方向と分布範囲、(2)各不連続面群の平均トレース長、(3)方向別の不連続面の平均間隔の3項目である。これらについては、事前の不連続面分布の調査によって決定されるものであるが、掘削の進行に伴って新たな不連続面情報を得ることができるので、各掘削段階で再評価を行うことによって適宜新たな値を設定すべきと考えられる。

3. 確率ブロック理論の検証

確率ブロック理論の妥当性と適用性を検証することを目的として既設の大規模地下発電所において建設時に作成さ

れた空洞壁面展開図を用いてシミュレーションを行った。検証は、①空洞壁面展開図のうち側壁部を対象として、垂直方向および水平方向の基線を5 m間隔に設ける、②基線を仮想切り羽または仮想ベンチとし、該当する解析対象多角形について確率ブロック理論によって危険ブロックの形成確率を求める、③確率を計算した解析対象多角形について追跡調査を行い、それが実際に危険ブロックの一部となっているか否かをブロック理論によって判定する、という手順によって行った。なお、2.6 項で述べた解析対象多角形周辺における不連続面の分布データについては、空洞壁面展開図における側壁部に分布する不連続面の机上調査によって得られたデータ (Case-1) および天端部に分布する不連続面の机上調査によって得られたデータ (Case-2) の2種類を用いて検討を行った。Case-1 は不連続面の分布性状が高い精度で推定された場合の確率ブロック理論の「妥当性」を検証することを目的としたものであり、Case-2 は、側壁部の掘削の際には既に明らかとなっている天端のデータを用いることによって確率ブロック理論の「適用性」を検証することを目的としたものである。図-4にCase-1の結果、図-5にCase-2の結果を示す。Case-1の結果は理論直線と良く一致しており、確率ブロック理論の妥当性が検証されたものと考えられる。一方、Case-2の結果についても理論直線と概ね良く対応しており、確率ブロック理論が実際の現場においても適用性が高いことが伺える。なお、先にも述べたように解析対象多角形周辺における不連続面の分布データは掘削の進行に伴って各掘削段階で再評価を行うことによって適宜新たな値が設定されるため、実際の情報化施工にこの理論を用いた場合には、Case-1とCase-2の中間的な値が得られるものと推察される。また、全解析において危険ブロックの形成確率が0%と算出されたものが約300ケースあり、そのうち実際の危険ブロックは0であった。このことから本理論は、安定ブロックの検出においても高い適用性があるものと推察される。

4. 結語

空洞壁面の安定化対策を効率的に実施するにあたっては、局所的な危険箇所を適切に評価することが重要となる。既掘削部において得られる「決定論的」な不連続面情報は、局所的な危険箇所の特定の際に最も適した情報であるが、原則的に掘削後の情報であるため、掘削前の検討には用いることができない。一方、「確率統計学的」な不連続面情報は、未掘削部における不連続面分布の全体的傾向を評価するには適しているが、局所的な危険箇所の特定には不向きである。確率ブロック理論は、既掘削部の不連続面分布を記載した決定論的情報と未掘削部の不連続面分布を予測する確率統計学的情報とを同時に解析に組み入れることによって、両情報を持ち合わせた特長を最大限活かし、情報化施工という枠組みの中で

「局所的な危険箇所を事前予測する」ことを意図したものである。本研究では、確率ブロック理論の妥当性ならびに適用性の検証を行うことを目的として、既設の大規模地下発電所において建設時に作成された空洞壁面展開図を用いたシミュレーションを行ったが、概ね良好な結果が得られており、その適用性が一部検証されたものと考ええる。

5. 参考文献

- 1)水戸義忠,喜藤剛,菊地宏吉(1995):電力土木, No.255, pp.130-136.
- 2)Goodman, R.E. and Shi, G.H. (1992): ブロック理論と岩盤工学への応用, 土木工学社, 359p.

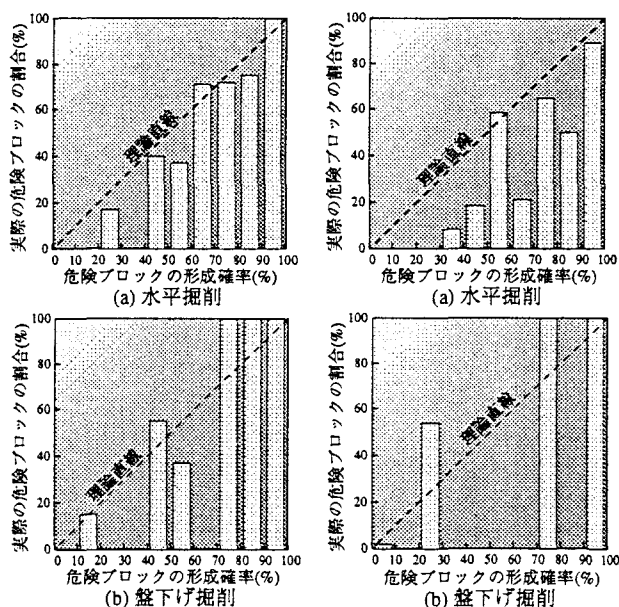


図-4 Case-1の解析結果 図-5 Case-2の解析結果