

I-42

剛体ばねモデルによる新礼文華トンネルの解析

開発土木研究所 正 員 城野 忠幸
 開発土木研究所 正 員 島田 武
 開発土木研究所 正 員 山内 敏夫
 開発土木研究所 正 員 佐藤 昌志

1. はじめに

従来のトンネル工学では、経験工学的な要素の占める割合が非常に大きく、どちらかといえば施工法が中心となって発展してきた。現在、山岳および都市トンネルにおける標準工法であるNATMは、在来工法よりも理論的要素は多いようではあるが、実際に行われている計測結果が設計施工に的確に反映されているかといえば、そうでない部分が多いのが現状である。さらにNATMの基本原理が、地山自体の持っている保持力を最大限利用する、というものではあるが、複雑な性状を有する個々の地山挙動やロックボルト・吹付コンクリート・鋼製支保工の持つ支保効果や応力分担率といった設計施工に不可欠な要素を把握することも極めて困難である。

一方、設計段階で必要となるトンネル解析手法としては、理論解析手法と有限要素法(FEM)などの数値解析手法に大別されるが、地山の力学的特性を表現し、ロックボルト・覆工の適切なモデル化、段階掘削および経時解析を比較的満足する手法として、数値解析手法とくに有限要素法が広く用いられている¹⁾。しかし、有限要素法では、材料として等方等質完全弾性体を仮定しているため、不連続体と等価な力学的特性を持つ連続体としてのモデル化が可能ではあるが²⁾、岩盤節理に特有の、引張に弱く亀裂が入りやすいとか、外力により相対的にずれやすいなどの性質を取り扱うことは、一般的に困難を有する。

このような状況の中、不連続性を表現する解析手法として、個別要素法(DEM, P.A.Cundall, 1971)、剛体ばねモデル(RBSM, 川井忠彦, 1976)、不連続変形法(DDA, G.H.Shi&R.E.Goodman, 1984)などが提案され、実際にブロックシステムの分離やすべりの解析を可能としている³⁾。このうち、川井が1976年に発表した新しい離散化モデルであるRBSMは、塑性変形や破壊の本質はすべりにあるとして、要素自身を剛体と仮定し、要素分割を行うことによって生じる各要素境界面上に体積変化およびせん断変形に抵抗する2種類のばねを設け、要素境界面上に集中化された表面力の仕事を用いてエネルギーを評価する。このモデルを用いると、増分計算を行うことにより自動的にすべり面を決定することができ、変位パラメータとして重心に剛体変位を設定するため、要素間の切断を容易に行うことができる⁴⁾。

本文では、上記のような利点を有する川井モデルを使用し、実トンネルの解析への適用性について、現在施工中の新礼文華トンネルを例に考察を行うものである。

2. 新礼文華トンネル

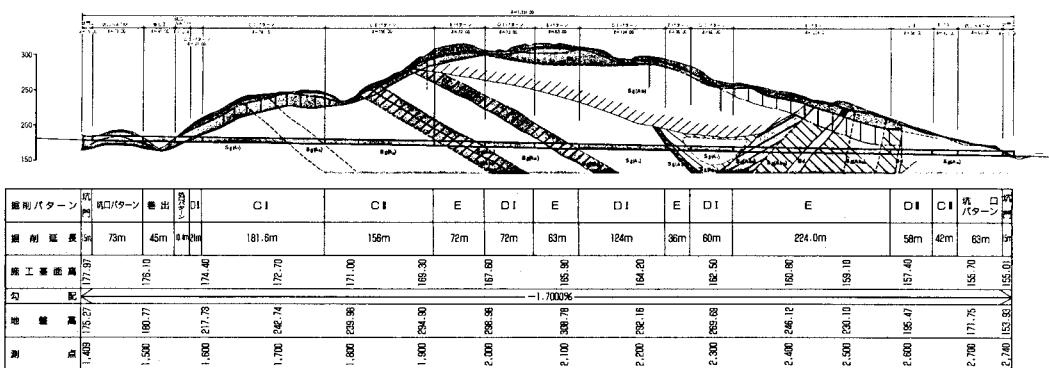
新礼文華トンネルは、一般国道37号のうち、豊浦町と長万部町の町界に位置する新設の山岳トンネルである。現在、既設トンネルが内浦湾側に約50m平行に供用されているが、変状の激しい区間が存在し、トンネルの老朽化および線形改良の面から、延長1,331mにわたって新たに施工されているものである。トンネルの地質は、主に安山岩質溶岩、角礫質凝灰岩、凝灰質角礫岩から構成され、長万部側坑口から400m間は比較的安定しているが、それ以降豊浦側は多量の地下水を含んでいる。また掘削工法としては、2ブームドリルジャンボによる上下半ショートベンチカットを行い、両坑口部には補助工法として通常のものに加えてルーフボルト、リングカットを採用している。新礼文華トンネルの一般図を次頁図-1に示す。

3. RBSMの概要

ここでは、本解析に使用したプログラムの概要を説明するために、FEMにおいて最も簡単な定ひずみ要素(3節点三角形要素)を取り上げRBSMとの比較を行う⁵⁾。

Application of Rigid Bodies-Spring Model to A Real Tunnel

by Tadayuki SHIRONO, Takeshi SHIMADA, Toshio YAMAUCHI and Masashi SATOH



図—1 新礼文華トンネルの一般図

3.1 要素形状

FEMでは、解析しようとする領域を有限な要素に分割するが、RBSMにおいても要素分割が必要である。ただし、RBSMでは要素内変形を無視し、各要素境界辺上の表面力の釣り合いを考えているため、要素分割形状を任意多角形に設定できる。しかし、実際には計算精度上、極端に偏平な三角形や多角形あるいは凹角形の使用は避けたほうがよい。なお本解析に使用したプログラムでは、三角形要素に限定して要素分割を行っている。

3.2 自由度設定位置

FEMにおける定ひずみ要素の場合、三角形の各頂点に自由度を設定する。また、ハイブリッド要素のように多角形の頂点に自由度が設定されない場合もあるが、その場合にも予め決められた位置に自由度を設定する必要がある。一方RBSMでは、各要素の変形を無視し剛体と考えているため、剛体内の任意の位置に自由度を設定することができる。なお本プログラムでは、プログラミングの都合上、三角形要素の重心に自由度を設けている。

3.3 自由度

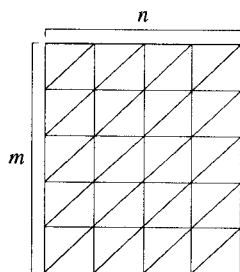
FEMの定ひずみ三角形要素では、各頂点に自由度を設定し、各々の節点に x, y 方向の平行変位(u, v)の2自由度を考える。一方、RBSMでは剛体運動を規定する x, y 方向の平行変位(u, v)と剛体回転角(χ)の3自由度を剛体要素内の任意点に設ける。ここで、総自由度数の比較をしてみると、図—2のように縦方向に m 、横方向に n 分割した場合、FEMの定ひずみ三角形要素の総自由度数は、

$2(m+1)(n+1)$ 自由度

RBSMの三角形要素では、

$2mn \times 3 = 6mn$ 自由度

となる。この式から、分割数が少ないときは自由度の差は小さいが、分割数を多くするとRBSMの方がFEMの約3倍の自由度となることがわかる。



図一2 総自由度数

3.4 剛性行列

FEMの定ひずみ三角形要素では、各々の節点に2自由度を設定しているため、各要素ごとに

$$2(\text{各節点の自由度数}) \times 3(\text{要素構成節点数}) = 6$$

の自由度が存在する。したがって、要素剛性行列のサイズは (6×6) となる。

一方RBSMでは、2つの剛板を垂直方向とせん断方向に抵抗する2種類のばねにより結合し、このばねに蓄えられるエネルギーから剛性行列を求める。いま、各要素の自由度が3で、ばねに関係する要素数が2であるため、各要素境界ごとに、

$$3(\text{各要素の自由度数}) \times 2(\text{ばね構成要素数}) = 6$$

の自由度が設定される。したがって、ばね剛性行列のサイズは (6×6) となり、FEMの定ひずみ三角形要素と同じ行列サイズとなる。

3.5 应力

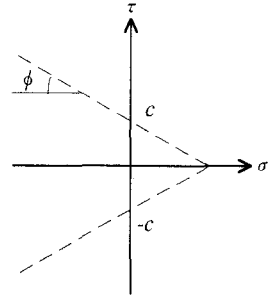
FEMでは、節点の変位から各要素ごとにその要素内の応力 ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$) を計算する。一方、RBSMでは隣合う要素それぞれの剛体変位から、要素境界辺上における単位面積当りの表面力 (σ_n, τ) を求める。前者の応力はテンソル量であり、後者の表面力はベクトル量である。この相違により、非線形解析法に多少の違いが生じる。

4. 非線形解析法

4.1 破壊基準

RBSMではFEMのように要素内応力ではなく、要素境界辺上における垂直方向およびせん断方向に関する2つの単位面積当りの表面力を取り扱うため、破壊条件としては合力で与えられる式を直接利用する。この代表的な破壊条件として、トレスカの条件、クーロンの条件、ミーゼスの条件があるが、本解析ではクーロンの条件を採用している。すなわち、図一3に示すように、せん断応力 τ が垂直応力 σ の1次関数となっている場合で、内部摩擦角を ϕ としたとき、降伏関数を f 、せん断強度(粘着力)を c として以下のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \pm(c - \tan \phi \sigma) \\ f &= \tau^2 - (c - \tan \phi \sigma)^2 \end{aligned} \right\}$$



図一3 クーロンの降伏条件

4.2 構成方程式

RBSMで取り扱う垂直およびせん断に関する表面力は、2種類のばねを通して各要素に伝わる。このばねの受け持つ力が降伏条件に達するとすべりなどの破壊が発生し、表面力が破壊条件を満足しながら増加減少する。なお塑性理論においては、降伏面を応力空間内の曲面として定義する降伏関数と、塑性ひずみ増分の成分を定義する塑性ポテンシャル関数の二つの関数が存在していると仮定している⁵⁾。

本解析で使用したクーロンの降伏条件における塑性化後の構成式は、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \{\Delta \sigma\} &= [D^p] \{\Delta \varepsilon\} \\ [D^p] &= [D^e] - [S] \\ [D^e] &= \begin{pmatrix} E_1 & 0 \\ 0 & E_2 \end{pmatrix} \\ [S] &= \begin{pmatrix} E_1^2 \{(c - \tan \phi \sigma_n) \tan \phi\}^2 & E_1 E_2 \tau (c - \tan \phi \sigma_n) \tan \phi \\ \text{sym.} & E_2^2 \tau^2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

ここで、 $\Delta \sigma$ 、 $\Delta \varepsilon$ は全せん断応力および全ひずみ増分を、 D^p 、 D^e は塑性時および弾性時におけるばねの成分を表している。また、 E_1 、 E_2 は平面ひずみおよび平面応力状態での弾性係数である。

4.3 非線形計算法

非線形性には材料的なものと幾何学的なものの2種類があり、前者の材料非線形性においても、クリープなどに代表される時間依存性を有するものとそうでないものに分けられる⁶⁾。ここでは、非線形性を時間に依存しない材料非線形性問題として取り扱う。一般的非線形計算法を大きく分けると、荷重増分法、反復法、混合法があるが、RBSMでは崩壊荷重や破壊パターンの解析を主な目的としているため、本解析では荷重増分法を採用している。荷重増分法における代表的なアルゴリズムとしては、Runge-Kuttaの中点法や、山田の方法、Marcalの方法などがあるが、本解析では山田の方法を用いている⁵⁷⁾。

山田の方法は、各荷重増分段階で要素をひとつずつ降伏させ、要素を降伏させるために必要な荷重増分を自動的に求める方法である。この方法を用いた場合の解析の流れを以下に示す。

- 1) 荷重増分段階のはじめにすべりの発生した(塑性化した)ばねとそうでないばねに分けて考え、すべりが発生したばねについては、塑性化後のばね行列 D^p を用いてばね剛性行列を作成し、全体剛性行列に組み込む。なお塑性化後のばね剛性行列は前荷重増分段階の応力から決定する。
- 2) 与えられた荷重増分に対して、1)で作成した全体剛性行列を解き、増分変位 Δu 、増分表面力 $\Delta \sigma$ を求める。
- 3) この結果得られた増分表面力を前回までの表面力に加え、その表面力のすべてが降伏強度と等しいか、あるいは小さくなるような荷重増分率 $r_{\min}$ を計算する。
- 4) 3)で求められた $r_{\min}$ を増分変位 Δu と増分表面力 $\Delta \sigma$ に掛け、前回までの変位と表面力に加え合わせる。この結果得られた変位と表面力を前回の全変位および全表面力とする。降伏したばねは以後、除荷が発生するまで塑性流れ則に従い、降伏曲面上を移動するものとする。
- 5) 1)~4)を所定の荷重に達するまで繰り返す。

塑性変形を伴う問題において、上記のような解析の流れでは、弾性状態のばねがいつ降伏し塑性状態になるかが問題となってくる。すなわち、荷重増分率 $r_{\min}$ をいかに求めるかという点が重要となってくる。ここで、本解析に使用したクーロンの降伏条件に対する荷重増分率 $r_{\min}$ の計算法⁵⁾を次頁に示す。

まず(n)ステップ目の表面力を (σ_n, τ) とし、新しい荷重増分に対する増分表面力を $(\Delta\sigma_n, \Delta\tau)$ としたとき(n+1)ステップ目の表面力が降伏曲面上にあるためには、以下の式を満足していなければならない。

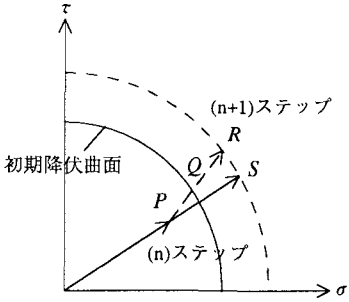
$$(\tau+r\cdot\Delta\tau)^2=\{c-(\sigma_n+r\cdot\Delta\sigma_n)\tan\phi\}^2$$

ここで、 r は荷重増分率であり、図—4において $r=PQ/PR$ を表している。

上記の式を r について整理すると、以下のようになる。

$$\left. \begin{aligned} &Ar^2+Br+C=0 \\ &A=\Delta\tau^2-(\Delta\sigma_n\tan\phi)^2 \\ &B=2\{\tau\cdot\Delta\tau+(c-\sigma_n\tan\phi)\Delta\sigma_n\tan\phi\} \\ &C=\tau^2-(c-\sigma_n\tan\phi)^2 \end{aligned} \right\}$$

このように荷重増分率を求める計算を、前回の計算で弾性状態もしくは除荷状態にあるすべてのばねについて行い、それらのうち最小の r を今回の荷重増分率 r_{min} とする。



図—4 荷重増分率

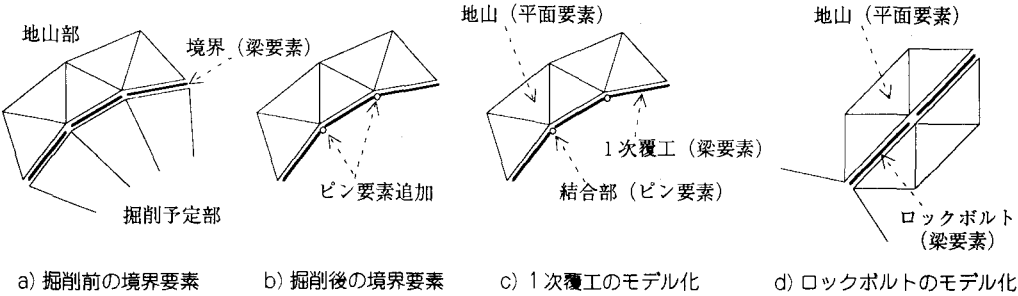
5. 解析の概要

5.1 解析上の仮定

本解析では、トンネルの解析を2次元問題として、平面ひずみ状態のもとで塑性解析を行っている。トンネル解析においては、一般的に2次応力状態を解析する2次応力解析が用いられている。この解析法は、掘削前の1次応力状態(初期ひずみ、初期応力、初期破壊状態)から2次応力状態(掘削後のひずみ、応力、破壊状態)を求めるものである。この2次応力状態を求める場合、有孔板理論による解析法、応力解放による解析法、直接載荷による解析法などがあるが、本解析では応力解放による解析法を用いている。

5.2 支保工のモデル化

トンネルの安全性を検討する場合、施工途中の素掘の状態と同時に、支保工や覆工を建て込んだ場合の解析も必要である。覆工などのようにある程度厚みのある場合には、平面要素を用いてモデル化することもあるが、支保工やロックボルトのように地山全体から見ると比較的薄い材料の場合、梁要素によるモデル化が行われる。本解析に使用した支保工は図—5に示すとおり、a)掘削前の境界については梁要素、b)掘削後素掘段階の境界については梁+ピン要素、c)1次覆工については梁+ピン要素、d)ロックボルトについては梁要素としてモデル化を行っている。

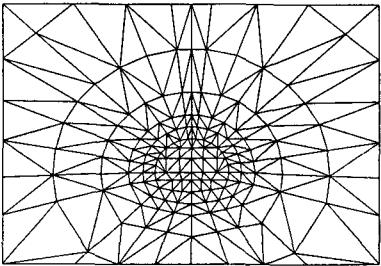


図—5 支保工のモデル化

5.3 入力データ

FEMと同様、RBSMにおいても解析領域を有限な要素に分割し、この要素を利用して離散化極限解析を行う。したがって、入力データに関しても、1)座標データ、2)要素データ、3)材料データ、4)境界条件データ、5)荷重データはFEMの場合と一致する。さらにRBSM独自のものとして、6)ばねデータ、7)重心データ、8)垂線データを入力しなければならない。

今回の解析の対象としては、土被り168m、支保パターンDⅠ(吹付コンクリート吹付厚 $t=15\text{cm}$ 、ロックボルト長 $l=4.0\text{m}$ 、 1.0m ピッチ、鋼製支保工H-125、 1.0m ピッチ、2次覆工厚 $D=30\text{cm}$)、掘削式



図—6 解析に使用した要素分割図

はショートベンチカット、地山分類としては未風化非変質安山岩質溶岩の、平成4～5年度工事起点から63m離れた測点p=2k117.90を選定している。この解析に用いた材料データを表―1に、要素分割図を前頁図―6に示す。なお地山の粘着力および内部摩擦角については、地山サンプルの三軸圧縮試験を実施していないことから、資料による参考値⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾としている。解析対象領域の大きさは、トンネル中心から解析対象領域内の最遠点までの距離がトンネル等価半径の5倍程度に定めている。また要素分割は、土被りが大きいため左右対象としており、計算時間の関係から半断面で解析することも可能ではあるが、計算結果の確認の意味から全断面で行っている。掘削前の要素数は316、節点数は173、さらに境界要素として54要素で解析している。また掘削後1次覆工施工段階では、トンネル孔縁部の境界要素20個を梁要素とし、さらにロックボルト施工段階では、梁要素を36個追加して解析を行っている。

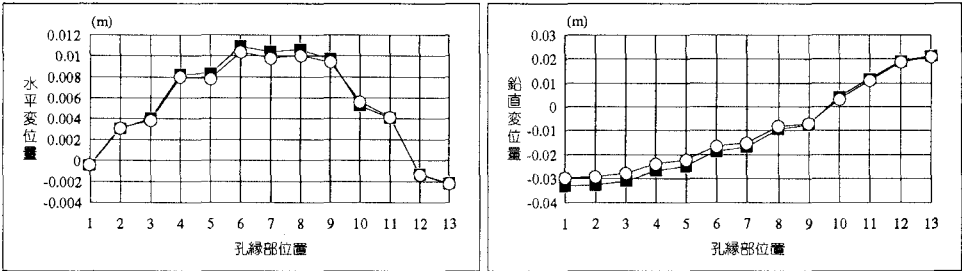
表―1 材料データ一覧

物性値 / 部 位	地 山	吹付コンクリート	ロックボルト
単位体積重量 (t/m ³)	2.572000	—	—
弾性係数 (tf/m ²)	1,267,000	2,500,000	21,000,000
ポアソン比	0.1800000	0.2000000	0.3000000
粘着力 (tf/m ²)	30.000000	—	—
内部摩擦角 (rad)	0.7330383	—	—
側圧係数	0.5000000	—	—
断面積 (m ²)	—	0.1500000	0.0004448809
断面2次モーメント (m ⁴)	—	0.0002812500	0.00000001574990
せん断弾性係数 (tf/m ²)	—	1,041,666	8,076,923

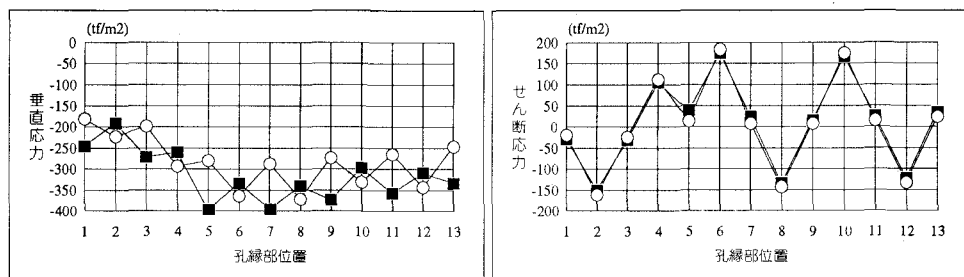
6. 解析結果

今回の解析ケースとしては、トンネル地山掘削前の1次応力状態、掘削後の吹付コンクリート施工状態およびロックボルト施工状態の3通りである。このプログラムでは計算結果として、荷重増分ステップ、荷重増分率、積算荷重増分率のほか、自由度設定位置の変位(x,y,χ)および荷重(X,Y,N)、さらに荷重状態フラグ、境界辺中点の表面力(σ_n,τ)および仮想ひずみ(ε_n,γ)などが出力される。出力データの図化は、本プログラムでの内部処理は行っており、市販の図化ソフトを利用している。

図―7に孔縁部の水平および鉛直変位量、図―8に孔縁部の垂直およびせん断応力を示す。なお両図では、■が吹付コンクリート施工時、○がロックボルト施工時の変位および応力を示している。また孔縁部位置の番号は、梁要素の上から順としてある。これらの図からは、ロックボルト施工による効果、すなわち変位および応力の減少はわずかなものである。また計算結果を見ても、荷重載荷率100%においてもばねは降伏しておらず、地山が塑性域に入っていないことを示している。したがって、ロックボルトは塑性域に入ってから初めて、その効果を顕著にするということが確認された。しかし図―8からは、垂直応力がロックボルトの位置によって、交互にその効果が現われたり現われていなかったりしており、群杭間隔による効果のような様相を呈しており興味深い。この解析結果と最近点での計測結果との比較は、厳密な意味では粘塑性などの時間の効果を導入する必要があるが、下半掘削到達後・支保工施工後の収束値である天端沈下量8mmに対して30mm、内空変位測線26mm,12mmに対して20mm,18mmとなっており、内空変位量の方は比較的近い値となっている。



図―7 孔縁部の変位量



図—8 孔縁部の応力

7. おわりに

一般に岩盤は、多数のクラックやジョイントなどの不連続部を有し、これら不連続性岩盤の強度、変形特性を規定する。こうした不連続性岩盤の解析法は、岩盤内に含まれる不連続性を考慮した不連続体解析および岩盤内に含まれる不連続性を考慮した構成則を用いた連続体としての有限要素解析とに分けられ、さらに前者はジョイント要素を用いた有限要素解析および要素を剛と仮定した不連続解析が考えられるが¹¹⁾、RBSMが亀裂性岩盤や節理系岩盤の解析に有効であることは明らかである。

今回の解析では、時間の制約上、全要素についての応力分布図、変位モード図などの出力はできず、トンネル孔縁部のみの図化で終わった。また上下半掘削段階における解析、無支保状態における解析、防水シートや2次覆工および鋼製支保工後の解析は行うことができなかった。しかし全体を通して、RBSMのトンネルへの適用が十分に可能であることが確認された。今回解析していない分については、RBSMの性格上からも、新たな要素を現在の要素にあとから組み込んで行けるので、容易に解析できることはいうまでもない。さらに今後は、調査断面を詳細な地質調査が行われた測点に変更し、FEMとの解析結果の比較および新札文華トンネルB計測結果との比較をすることで、地山および支保部材の詳細な解析を進めて行く予定である。

・謝 辞

本解析で用いたRBSMプログラムによる数値計算に際しては、北海道大学工学部助教授三上隆氏のご指導をいただいた。またデータの入出力に関しては、同工学部修士過程の水津周氏のご協力によるところが大きい。したがって、ここに記して感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 土屋 敬；NATMの理論と実際，5. 設計解析，土木工学社，昭和58年4月30日
- 2) 櫻井春輔；不連続性岩盤の調査・解析・基礎処理技術，第1回北海道岩盤システム工学セミナー，7. 不連続性岩盤解析における有限要素法の利用，(社)システム総合研究所，岩盤システム工学委員会，平成2年10月29日
- 3) 佐々木猛；有限要素法とDDAの関係，第1回DDA実用化研究会，(社)システム総合研究所，1991年6月19日
- 4) 竹内則雄；地盤力学における離散化極限解析，培風館，1991年7月5日
- 5) 川井忠彦・竹内則雄；離散化極限解析プログラミング，培風館，1990年6月30日
- 6) 松本嘉司・西岡 隆；トンネルの設計理論，構造計画研究所，共立出版，1992年1月30日
- 7) 宮本 博；有限要素法と破壊力学，日本鋼構造協会，培風館，昭和47年2月15日
- 8) 岩の工学的性質と設計・施工への応用，岩の力学委員会，土質工学会，昭和49年4月19日
- 9) 道路トンネル設計施工要領，北海道開発局道路建設課，(社)北海道開発技術センター，平成3年3月
- 10) 吉中龍之進・櫻井春輔・菊地宏吉；岩盤分類とその適用，土木工学社，平成元年7月20日
- 11) 川井忠彦；離散化極限解析概論，培風館，1991年7月10日