

## 技術情報

# 地下掘削に於ける定量的解析技術 SPDR - システムの理論と応用

Application of SPDR Technology –  
Quantification in Geomechanics  
Design & Construction

世良田 章正\*  
黒崎 幹郎\*\*

## まえがき

日韓トンネルの工事計画の基本条件の一つに、海底地盤の工学的特性がある。その重要性は青函トンネル工事に於いて痛切に体験されたことで、トンネルの掘削の進歩度は常にその地盤の工学的特性によって大きく支配される。青函トンネルの工事に於いても数々の困難な現実に直面し、その際日本で初めてセラタ・ジオメカニックス社が開発した岩盤計測と地山挙動解析システムを利用した。

この計測並びに解析システムは本来鉱山の定量化のために開発されたもので既に鉱山に於ける地下採鉱の設計施工の定量合理化の新しい工法を幾多開発してきている。現在の総合定量地山挙動計測並びに解析システム（SPDT - システム）は長年にわたる開発の結果によるもので原位置定量計測による地山挙動の新しい予測技術として広く世界的に応用されるに至っている。その概略を以下に述べる。

## 1. SPDR 技術の概略

複雑な構造を有する岩盤の挙動の解析には直接的な数値解法は存在しない。このような問題への唯一の可能な解法は FEM (有限要素法) を用いた数値モデルによる方法である。それには地山の原位置での応力状態及び物性を求めてこれを地山 FEM モデルの基礎データとして入力することが必要である。

在来の計測技術ではいずれもその入力データが十分に得られないため、たとえ実用的な FEM モデルが存在しても本当の地山挙動の解析予測を行うことができなかった。セラタ・ジオメカニックス社 (Serata Geomechanics, Inc : SGI) が開発した SPDR システムは新しい現場技術で、迅速、有效地に岩盤の総合的な計測を行って現場に於ける実験の入力データによるコンピュータ解析をも同時に出来る。計画から設計施工に至る全工事の工程を時間の関数として精密にコンピューターモデル化を出来る。

この SPDR システムは地山の応力と物性を原位置で即時に（リアルタイム）計測とデータ解析を行うことが出来る。そのため現場に於いて高度に定量的な地山挙動の解析が可能である。したがつ

\* Ph. D/(Civil Eng.) Serata Geomechanics, Inc.  
\*\* 勝利根ボーリング

て、地山挙動を時間の関数として予測することが出来るので応用範囲が極めて広く、新しい地下空間開発技術の高度定量化を達成する基礎になるものと考えられる。その適用性は複雑な地山に於ける実際の仕事を通じて20年余にわたり実証され既にその成果は米国、カナダ、南米、ヨーロッパ及びオーストラリア等広く海外に於いて非常な注目を浴びている。我が国に於いても数々の実績があり、CAESを始め岩盤トンネル掘削の合理化などに将来日本に於ける発展が期待される。

## 2. 理論的構成

SPDR－システムは地山の定量的挙動特性の測定と解析を可能にした画期的な総合技術である。すなわち、時間的変形を起こす軟岩や亀裂を含む硬岩などから成る複雑な地山の応力状態とその岩盤物性を的確有効に測定できる技術と数値解析技術の両者を統合して実用化したのがSPDR－システムである。

この新技術の最大の特長は、単純なテスト孔を用いて、地山挙動の3大要素である応力(S)、物性(P)、および変形(D)を現場のリアルタイムで総合的に測定する計測・解析ハードウエアシステムを完成し、更にその地山の総合挙動を的確に数値化するソフトウエアシステムREM : Rheological Element Method : 特殊岩盤有限要素法(R)を開発したことである。

これら4者の関係を次のように表現することが出来る。

$$\begin{array}{c} R \\ S * P \longrightarrow D \end{array}$$

この関係は地山の変形状態Dが、地山を構成する物質の物性P、地山の応力Sによる相互作用の結果として生ずることを表わす。このプロセスの総合的なメカニズムはREMプログラムRによって定量的にモデル化することが出来る。

その実用的意義は従来不可能に近いと考えられていた複雑地山に於ける現場計測と地山挙動モデ

ル化の両者の連動総合化を可能にしたことにより、トンネルなどの地下空間工事に於ける地山の挙動を予測して、工事の安全確保と経済的な地下空間の設計を可能とさせることにある。

SPDR－システムのソフトウェア(R)の基礎をなすものが特殊(REM)物性構成方程式である。これは複雑岩盤に於ける物性P即ち弾性、粘性、粘塑性、粘弹性、強度劣化、破壊および破壊後挙動等の特性を定量的に数値化するものである。地山の有限要素モデルは亀裂や断層を含む複雑地盤の連続体と非連続体との複合によって作られ、実際の挙動を時間と空間の関数として合致するよう作られる。現場計測はそのSPD三者の合致が時間と空間の関数として確立するために活用される。ここでSとDは確定的に測定されるが、Pの三次元的地盤への適用解釈は不確定であるため、Pを地山の変数としてその関数のキャリブレーション(Calibration)を確立させる方程式が実用化されている。

## 3. 設計施工の解析と工事の安全管理

実用(REM)地山モデルを用いて、掘削、設計、施工挙動、地山劣化ならびに時間効果などのS.P.D挙動解析を行う。その結果として、構造物の設計と施工の定量合理化を達成する。さらに、定量解析に基づき工事コストの的確な積算を行ない、工事の質と安全の定量管理を達成させる。地下利用空間の設計に当たり安全利用管理を目的として応力制御工法(SCM)を用いて地下応力の再配分を有効利用するはその好例である。これを次に説明する。

## 4. 応力制御工法(SCM)の開発

応力制御工法(Stress Control Method)はSPDR－システムの応用の結果として生まれた派生技術の好例として考えられる。このSCMは地下空間崩壊防止技術で1969年にカナダのカリ鉱床で地下採鉱の基本的な技術革命として今世界各



写真1 SCM導入前の炭鉱坑内の状況



写真2 SCM導入後の炭鉱坑内の状況

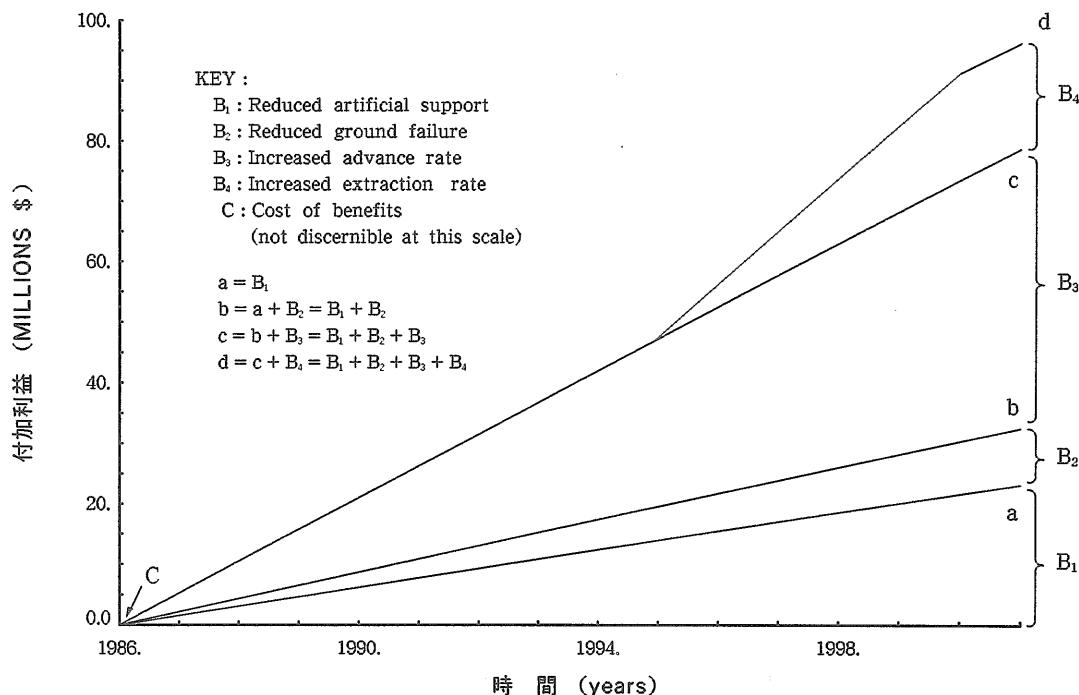


表1 ペンシルベニア電力会社に於ける SCM 導入の経済性比較

地で急速に普及してきた。カナダのサスカチュワーン (Saskatchewan) の世界最大のカリ鉱山群に於いて採鉱を開始してから間もなく激しい地山の崩壊にあい、あらゆる人工的な支保工を大量に使用したが殆ど効果が無く坑道の維持と人員の安全確保が難しくなり、経営不可能の状態に瀕した。この時人工支保工を全く用いず一挙にこれを解決したのがSCMである。サスカチュワーンのコリー鉱山ではSCMの適用によってルーフボルトが全く不要となりこのルーフボルトの経費だけでも、年間1,200万米ドル以上の経費節減が実証されている。鉱山全体としての経費節減の総額は、地山の安定、可採鉱量の増加、全体的な生産性の向上によって年間数千万ドルに及んだ。カナダのサスカチュワーン全体では8つのカリ鉱山がSCMを導入することによって救われている。さらに、このSCMは1982年に初めて米国アラバマ州ジムウォルタリソーシズ社の地下石炭鉱山に導入されて大きく成功した。この鉱山内のSCM導入の前と後の地山の反応は写真1および2に示す通りである。

1969年以来、SCMは米国、カナダ、ヨーロッ

パ、オーストラリア及び日本で石炭、岩塩、石灰岩及び硬岩など各種の鉱山への応用が進んでいる。なお、現在ではカナダ連邦政府の研究資金を得て石炭の露天掘りへの応用に成功した。

SCMによる掘削は労働者及び資材の合理的な活用、安全、労働意欲の向上、資源の回収量の改善に基本的な実績をあげた。表1はペンシルベニア電力会社 (PENELEC) の石炭鉱山に於いて在来の残柱式 (Room & Pillar) 掘削とSCMとの経済性を比較検討した結果である。

## 5. 応力制御工法 (SCM) の普遍化

SCMは空洞を自然に安定させることによって従来必要であった高価な支保工を無用とすることが出来る。特に、在来工法で掘削された坑道は断面の形状が普通正方形に近く、それぞれの空洞の境界の周囲に応力が集中して崩落を起こすのである。ここにもSCMの原理を普遍化することが出来る。SCM式ではトンネル断面の形状と掘削順序の合理化によって個々の空洞の境界に集中して

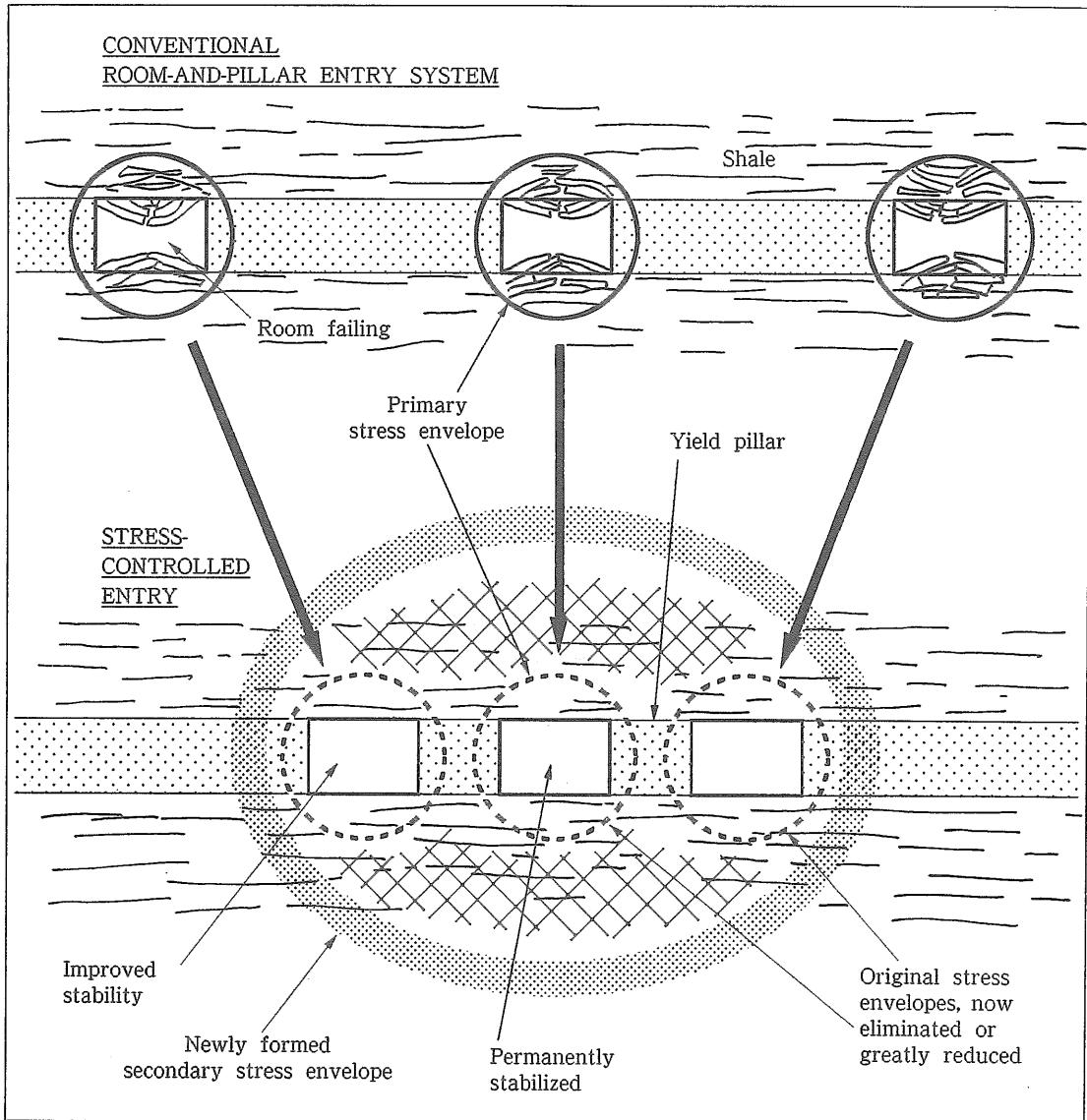


図1 第2次応力円筒の形成

くる破壊的な初期集中応力を取り除きこれを更に全体を包囲する「第2次応力円筒」(Secondary Stress Envelope)に転化させる。(図1) このようにして作られた応力円筒はトンネル断面全体を永久に安定させることが出来る。このように大断面トンネル全断面の永久安全を確保するためには普通多数(2~12)の前進掘削部を細いイールドピラーで隔てて平行掘削することにより「第2次応力円筒」を作ってSCMを利用する。「第2次応力円筒」は全断面図を掘削し終えた瞬間に形成され

安定した平衡が成立して地山は永久的に安定する。この「第2次応力円筒」は周囲の岩盤から来る外圧と対応して平行するため、いかなる地殻の応力状態に対しても安定した平衡を保つことが出来る。この方法をトンネルの設計に利用すれば非常に大きなコストダウンになる。

## 6. 応力制御工法の機械化工法

上記の応力制御工法(SCM)を更に発展させた

新工法が機械化工法（MSCM : Mechanized Stress Control Method）である。機械化工法は20余年にわたるSCMの経験に基づき考案された新技術で大規模の地下空間掘削にあたり大幅なコストの節減を実現させる事が可能になる。

MSCMはSCMに於けるイールドピラーの代わりに機動化された一連のスーパー・リフティングジ

ヤッキ（10万トン）を用いイールドピラーと同様の機能を持たせる。このシステムは「第2次応力円筒」によって作られた保護領域を直接形成させるに必要な超強力水圧ジャッキをブルドーザーに装備したもので、比較的軽量で移動性に優れた装置として設計されている。

MSCMの機構は図2に示すような原理に基づく

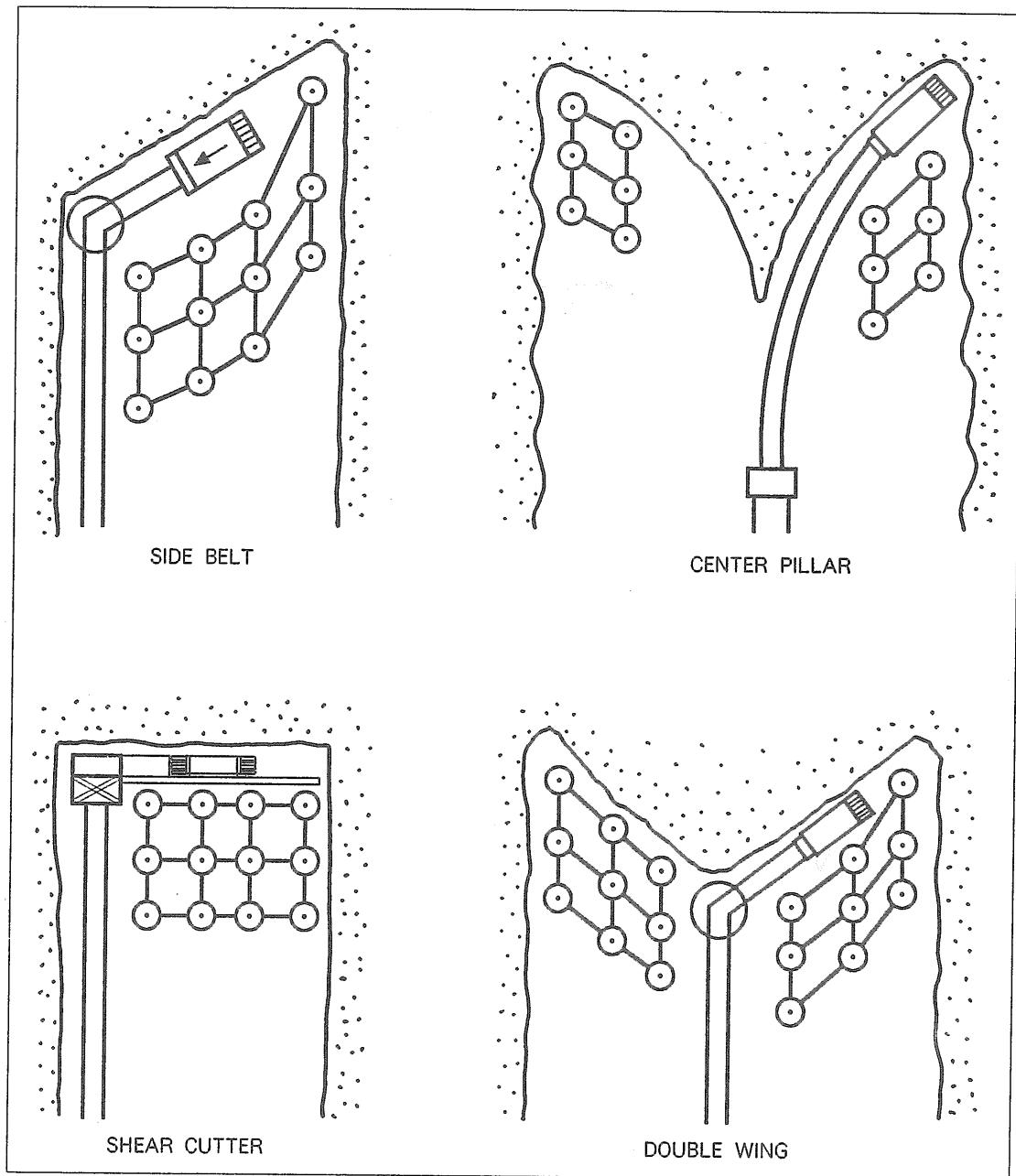


図2 MSCM機構の代表的な配置

が、SCMの場合のイールドピラーに相当する水圧ジャッキを適切に移動させて、掘削切羽の前面に安定した「第2次応力円筒」を形成する。これによって切羽が2次応力の円筒の内側に入るため常に切羽の安全が確保される。

MSCMによる大幅なコストダウンは次のようにして達成される。

- (1) 連続的で流れ作業的な生産が可能。

在来工法ではショートカットによる小刻みな掘進であったが連続的な掘削が可能とな

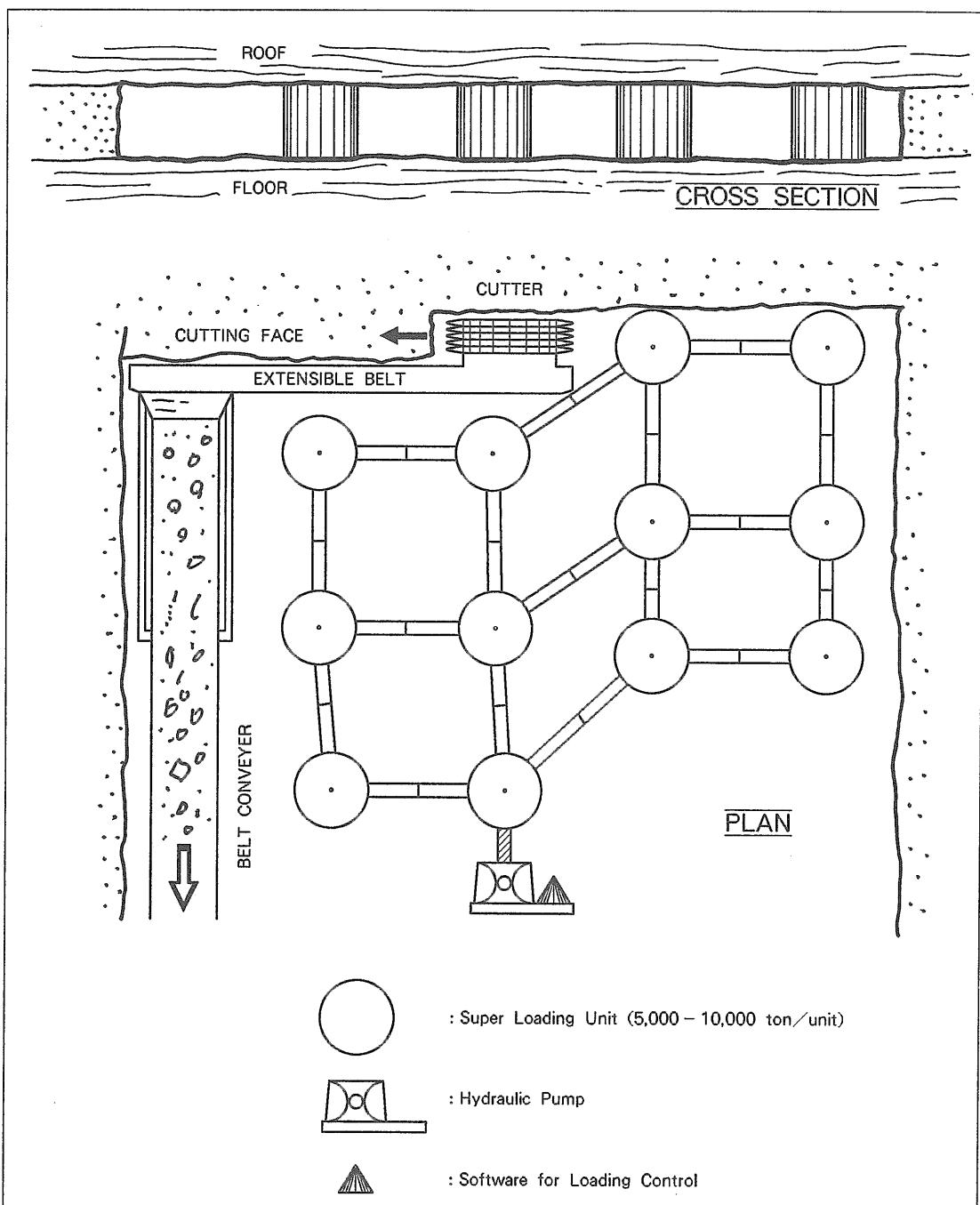


図3 MSCMーシステムの構成