

## 광산 지반침하와 대책

### Mining Subsidence and Ground Reinforcement

박남서<sup>1)</sup>, Nam-Seo Park, 이치문<sup>2)</sup>, Chi-Moon Lee, 하은룡<sup>3)</sup>, Eun-Ryong Ha

<sup>1)</sup> 대덕공영주식회사 대표이사, President, Daeduk Consulting & Construction Co.

<sup>2), 3)</sup> 대덕공영주식회사 상무이사, Managing Director, Daeduk Consulting & Construction Co.

**SYNOPSIS** : There have been many coal mines abandoned since late 1980s in Korea. Due to the abandoned mines, there have been ground subsidences in some area where are under ground reinforcement works now. So, this study shows the general phenomena of mining subsidence and the procedure of ground reinforcement. In general the procedure for ground reinforcement is as below,

1) obtaining information from inquiries and observations, 2) satellite image analysis and surface geological mapping, 3) analysis of maps of coal mines, 4) geophysical survey and boring test and 5) selection of reinforcement method.

The case of reinforcement design at Chul-am area, Kangwon Province is introduced in this article.

key words : ground subsidence, ground reinforcement, analysis of maps of coal mine, geophysical survey, boring test, reinforcement design

## 1. 서론

우리나라의 석탄산업은 80년대 중반까지 국민연료로서 중추적 역할을 담당해왔다.

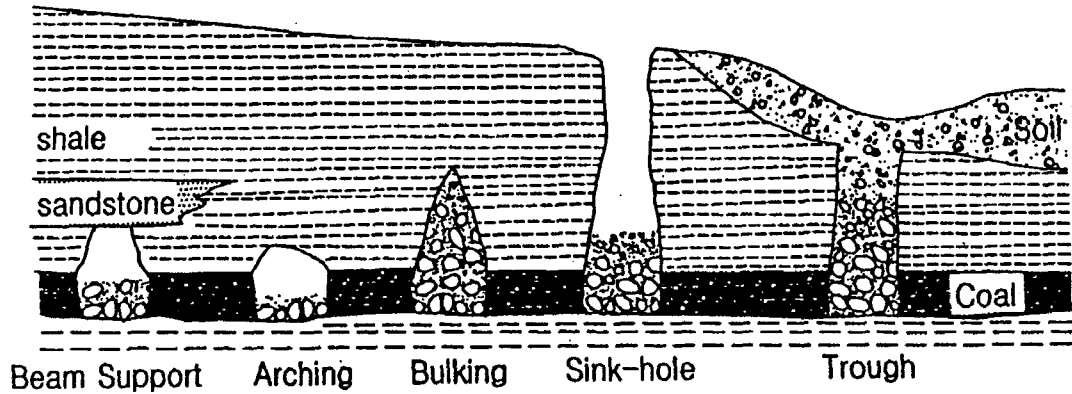
그러나, 80년대 후반부터 사양화되기 시작하여 현재는 많은 탄광들이 폐광되었다. 우리나라의 석탄산업정책은 생산위주였기 때문에 광산보안조치가 미흡하였고, 채탄방식 역시 충전식이 아닌 붕락식 채탄법을 주로 사용하였기 때문에 지반침하 가능성이 크다. 일부 지역에서는 침하로 인한 피해가 나타나고 있어 보강공사가 수행되고 있다.

본 고에서는 석탄채굴로 인한 지반침하현상과 보강대책에 대하여 언급하고 강원도 철암지역의 지반보강사례를 소개한다.

## 2. 광산지반침하 유형

채굴적은 시간의 경과에 따라 지반강도 감소, 지반의 Creep변형, 침투수압에 의한 Migration, 지하수에 의한 지반열화축진, 지하수 유동 등의 요인에 의해 채굴적 주변부터 파괴되기 시작한다. 채굴적 주변의 파괴는 점점 상부로 진행되다가 자립이 가능한 견고한 지반을 만나거나 지반의 Arching효과 또는 파쇄된 암석들의

점점 상부로 진행되다가 자립이 가능한 견고한 지반을 만나거나 지반의 Arching 효과 또는 파쇄된 암석들의 Bulking에 의해 중단되기도 하며, 지표까지 발달하여 Sink-hole형이나 Trough형 침하를 유발한다.



<그림 2.1> 채굴적 파괴 발달상태

## 2.1 Sink-hole형 침하

### 2.1.1 Flexural Failure

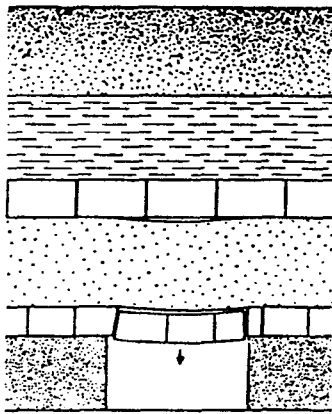
채굴에 의하여 공동이 형성되면 채굴적 상단의 암층은 변형되어 상위 지층과 분리가 일어난다. 수직 응력에 대한 수평 응력의 비가 낮고, 천단의 암층이 박층이거나 강도가 약하며, 상위 지층과 분리가 용이하다면, 휨에 의한 인장응력이 암석의 강도를 초과할 때 Flexural failure가 일어난다.

### 2.1.2 Shear Failure

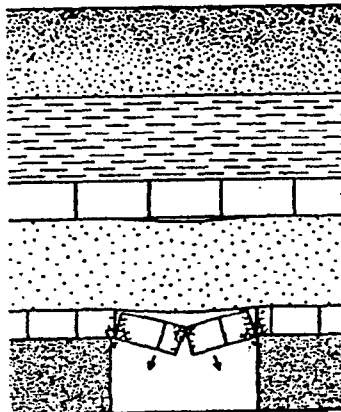
수직 응력에 대한 수평 응력의 비가 크고 잔주가 천단 암층보다 상대적으로 강할 때, 잔주 측면에 형성된 전단 응력이 천단의 전단 강도보다 크면 Shear failure가 일어난다.

### 2.1.3 Plug 침하

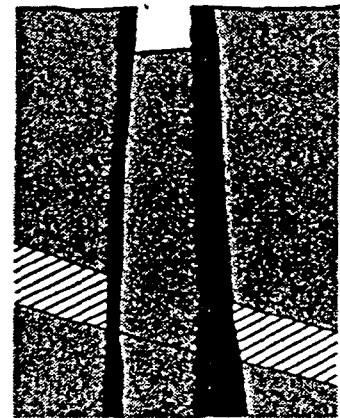
만약 Sink-hole형 침하가 점진적으로 발생하지 않고 갑작스럽게 발생하면 Plug 침하라고도 하며 Plug 침하는 일반적으로 전단 강도가 약한 취약면을 가지는 맥암이나 단층과 같은 구조적인 특성에 의해 좌우된다.



<그림 2.2> Flexural failure



<그림 2.3> Shear failure



<그림 2.4> Plug 침하

## 2.2 Trough형 침하

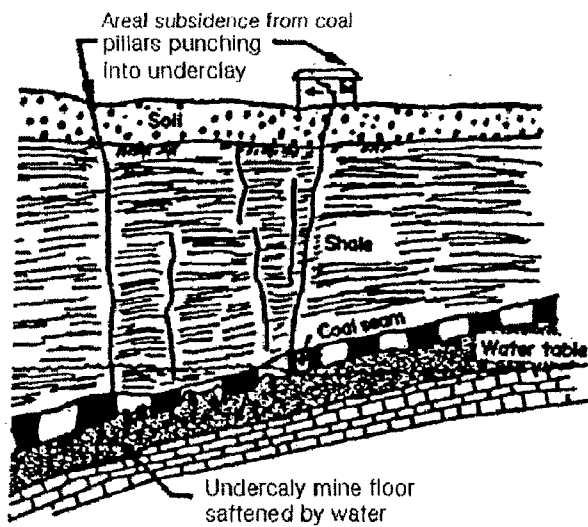
### 2.2.1 Pillar failure에 의한 Trough형 침하

주방식 채탄법과 같은 부분 채탄법으로 채굴이 이루어진 경우, 남겨진 Pillar는 풍화나 Creep변형에 의해 표면부가 탈락하면서 폭이 좁아져 응력집중으로 파괴된다.

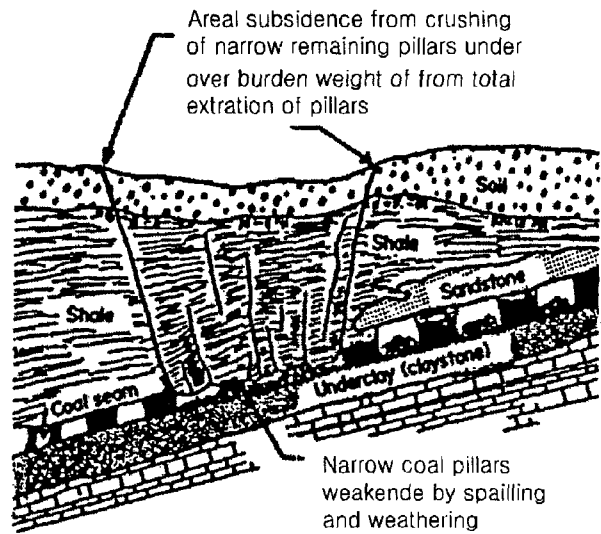
위와 같은 요인에 의해 잔주가 파괴되기 시작하면 이 잔주가 지탱하던 하중은 인접잔주로 전가되어 점진적으로 파괴가 확대된다.

### 2.2.2 Pillar punching에 의한 Trough형 침하

Pillar punching은 하반의 지내력을 초과하는 하중이 가해질 때 연약한 탄층이나 점토암으로 구성된 하반이 소성변형을 일으켜 Pillar가 하반으로 관입하면서 파괴가 발생한다.



<그림 2.5> Pillar failure에 의한 Trough형 침하



<그림 2.6> Pillar punching에 의한 Trough형 침하

## 2.3 침하유형별 특징

다음 <표 2.1>은 Bruhn, Magnuson 및 Gray(1978)에 의한 미국 Pittsburg 탄광지역의 침하사례 조사 결과를 중심으로 하여 침하 유형별 특징을 정리하였다.

## 3. 지반침하이론

지반침하 예측을 위한 주요 관심사로서 1)언제(발생시기) 2)어디서(발생장소) 3)어느정도(발생규모 혹은 발생형태)에 대하여 많은 사람들의 의문이 있어 왔다. 이러한 침하예측의 의문을 풀기 위한 연구들은 주로 영국, 미국 등에서 많이 다루어져 왔고 발전되어져 왔다.

그러나 그들은 거의 a)수평에 가까운 탄층의 부존상태를 갖고 있는, b)지질구조가 매우 단순한 탄전지대에서, c)대체로 지표 가까운 곳에서, d)채굴방식으로는 완전채굴에 가까운 장벽식 채굴법에 의한 Trough형 침하에 대한 연구가 대부분이고 주방식 채굴법이나 우리나라의 주된 채굴법의 하나인 위경사승 봉락식 채굴법과 같은 불규칙한 형태의 채굴방식에서의 침하현상에 대한 연구의 수준은 상대적으로 낮은 편이다.

<표 2.1> 침하 유형별 침하 특성

구 분	Trough형	Sink-hole형
경 사	대체로 완만	급경사
범위(규모)	대체로 넓은구역(최소 10m 이상)	대체로 작은규모(3m 내외)
침 하 량	최대침하량 1m정도	수 m ~ 수 10m
발생속도	서서히 발생	갑자기 발생
형 태	타원형, Tilting 접시형태	원통형 혹은 원추형
발생시기	얕은심도, 완전채굴 ⇒ 침하초기에 발생 깊은심도, 불규칙 채굴 ⇒ 장기간에 걸쳐 발생	예측 곤란(대체로 채굴후 10년 이내 ~ 100년 경과후에도 발생)
발생원인	Pillar파괴와 하반에서의 Punching 등에 의해서	천반의 파괴(채굴폭, 채굴심도와 Migration 작용에 의해)
채굴심도	천부 및 심부	대체로 50m 미만에서 발생 (채굴고와 관련)
발생기록	적다(위험성이 적기 때문에 일반적으로 잘 인식되지 않는 경우가 많다)	많다(Trough형태에 비해 30배 정도)
피해(위험성)	지상구조물에 피해는 있지만 인명피해는 없다.	인명 및 시설물에 심각한 타격을 줄 수 있다.

### 3.1 도식법

영국 NCB (National Coal Board)가 제안한 이론으로 지하 채굴적에 의한 지표의 영향범위 예측이나 지상 구조물에 영향을 미치는 채굴적의 범위를 예측하는 데 적용한다.

경사진 판상의 탄층을 비교적 넓은 범위에 걸쳐 높은 채수율로 채굴한 경우, 채굴적 상부지층에 발생하는 지반거동의 영향범위는 채굴면적 보다 더 넓은 범위에 걸쳐 나타나며, 이 범위는 탄층경사와 한계각(채굴적 선단과 침하지역 선단을 연결하는 선이 수직면과 이루는 각) 사이의 관계를 도식적으로 표현하여 예측할 수 있다.

또한 지상에 구조물이 있을 때, 이 구조물에 대한 영향범위도 한계각에 의해 도식적으로 표현될 수 있으며 이 범위내에 채굴적이 분포한다면 이 채굴적은 구조물에 영향을 미친다.

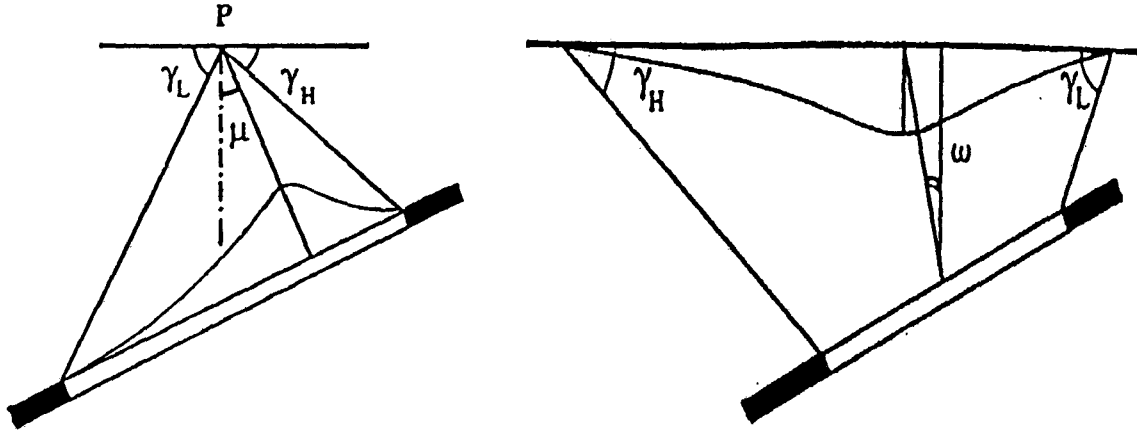
Rom(1964)와 SEH(Subsidence Engineers' Handbook, 1975)는 주로 유럽지역의 20 °미만의 저경사 탄층에서 수집된 사례를 분석하여 탄층경사와 한계각 사이의 관계를 제시하였으며, Ren, Reddish & Whittaker(1988)은 미국, 유럽, 중국 및 호주등 광범위한 지역에서 60 °정도의 고경사 탄층까지 자료를 수집하여 탄층경사에 따른 한계각의 변화를 제시하였다.

### 3.2 응력 아치-체적 팽창이론

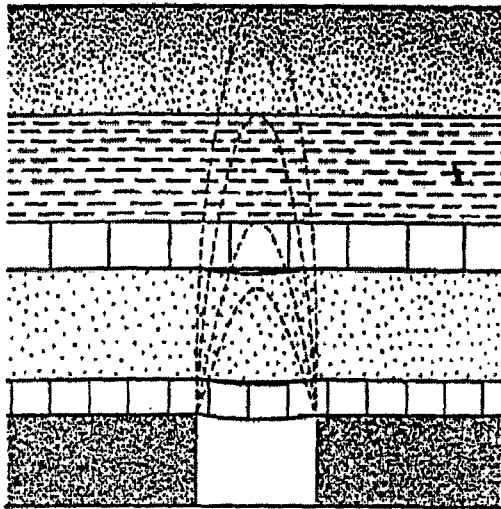
Piggott & Eynon (1978)이 Karfakis의 응력아치 이론을 지반침하에 적용하여 발전시킨 이론으로 채굴적 상부지층이 암반으로 구성되어 있을 때 봉락대의 형상과 암층의 체적 팽창률로부터 봉락고를 예측하는 데 적용한다.

지하에 채굴공동이 생기면 채굴적의 직상반은 응력해방 상태에 놓이게 되며 지층이 아래로 처지면서 붕괴된다. 이러한 붕괴는 자립가능한 응력아치가 형성되면서 중지되거나, 붕괴된 지층이 암반으로 파쇄되면서 체적팽창을 일으켜 공동을 채울 때까지 상부로 진행된다. 이 과정에서 응력아치의 높이가 상반의 두께를 초과하거나, 봉락고가 안정한 응력아치의 높이를 능가한다면 붕괴는 지표로 까지 전이되어

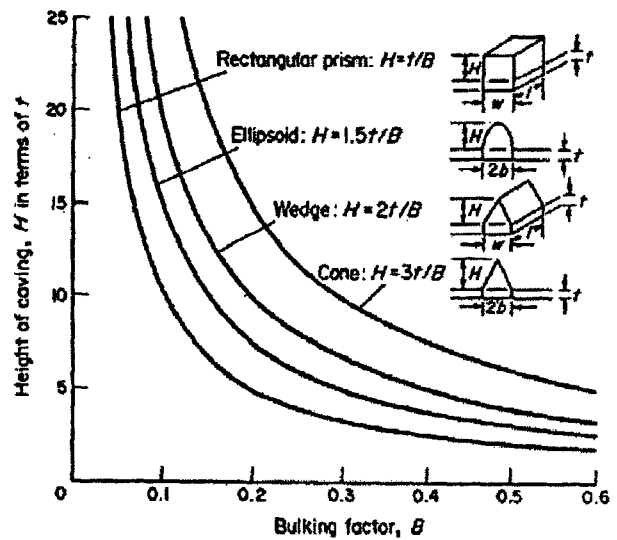
침하가 발생하게 된다. 이때 붕락고는 붕락대의 기하학적 형상(직각기둥, 타원형, 쐐기형, 원뿔형 등)에 따라 달라지며 상부 암반의 채적 팽창율, 채굴적의 높이 및 붕락대의 형상과의 관계를 통해 붕락고를 예측할 수 있다.



<그림 3.1> 단층경사와 한계각에 의한 영향범위 예측



<그림 3.2> 응력아치의 형성



<그림 3.3> 채굴적의 형상과 붕락고의 관계

### 3.3 빔-기둥이론

채굴적의 상반이 다층의 층상암반으로 구성되어 있을 때 각 지층사이의 층분리현상에 의해 발생하는 침하의 예측에 적용한다.

채굴적 상반이 다층의 평행하게 연속된 층상암반으로 구성되어있을 때 각 층의 두께가 채굴공동의 폭 보다 매우 작은 경우 채굴공동의 폭이 커짐에 따라 상부의 층상암반이 밀므로 처지면서 지층분리현상을 일으키게 된다. Tang과 Peng은 수평한 다층암반에 수평응력이 작용하는 경우에 휨변형량을 계산하는 수식을 제안하였다. 이 수식을 이용하여 휨변형량을 계산하면 채굴적이 상부 지반에 미치는 영향심도를 예측할 수 있다.

### 3.4 한계평형이론

Atkinson의 한계평형이론을 Brady & Brown (1985)광산지역의 침하해석에 적용하여 발전시킨 이론으로 지반을 강제거동하는 블록모델로 가정하여 침하에 대한 안전율을 구하는 데 적용된다.

채굴공동 상반블럭의 거동에 있어서 블럭의 자중에 의한 연직전단응력이 블럭과 인접지반 사이의 경계면에 작용하는 전단강도를 초과하면 블럭의 강제운동이 발생하며, 미끄러진 블럭은 채굴공동으로 함몰된다. 이 때 지반의 자중과 주변 지반과의 접촉면에서 발생하는 마찰저항의 관계를 통해 안전율을 구하므로써 지반의 함몰 여부를 예측할 수 있다.

### 3.5 경험적 방법에 의한 침하예측(확률이론)

침하 발생 지역의 현장 자료들을 이용하여 유사한 지역에서의 침하 발생 가능성을 평가하는 역해석 방법으로 Geol과 Page(1982)에 의해 제안되었다.

이 방법은 채굴적의 높이, 봉락고, 채굴적의 평면적과 같은 기하학적인 변수들을 이용하여 변수들의 관계를 선형 관계식으로 정의하고 이 식을 이용하여 유사한 지역에서의 침하발생 가능성을 분석하는 것이다.

## 4. 대책 수립 과정

### 4.1 지반 조사 단계

지반보강설계를 하기 이전에 실시되는 지반 조사는 일반적으로 다음과 같은 순서를 따라 진행되며 각 항목에서의 고려사항은 다음과 같다.

#### 1) 현황 분석

- 자료 조사
  - 국내외 유사 사례 문헌 조사
  - 과업 지역 기존 조사 자료 검토
- 채굴적도 분석
  - 지하의 채굴 현황 파악
  - 조사 범위 및 심도 결정
  - 물리탐사 및 시추 조사 위치 선정
- 항공사진 분석
  - 과업 지역의 특징적인 지형 및 수계 형태 파악
  - 광역적인 지질구조선 파악으로 지질 구조 파악
- 지표 지질 조사
  - 채굴적과 관련된 주요 지질 구조 파악
  - 불연속면 발달 상태 및 방향성 파악
- 광해실태조사
  - 과거의 침하 이력을 조사하여 현재의 지반 상태 비교 분석
  - 지반 안정도 구분의 기본 자료로 활용

#### 2) 설계를 위한 지반 상태 파악

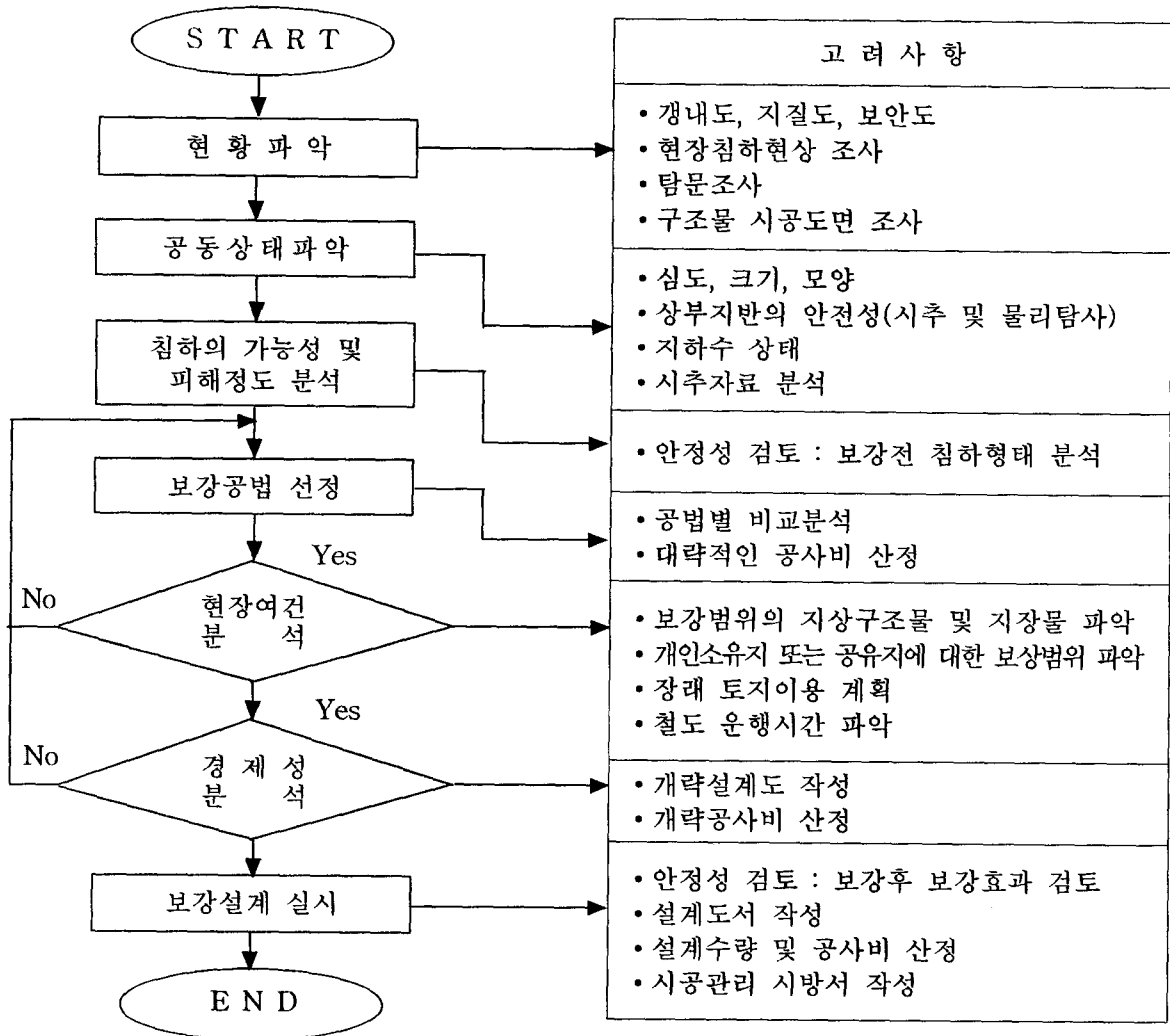
- 물리탐사
  - 채굴적 위치 확인 및 연속적인 지반 상태 파악
  - 채굴적 함몰에 의한 지반의 이완 영역 파악

- 시추조사
  - 채굴적 및 운반경도의 확인
  - 지하 지질 구조 파악
  - 보강 설계를 위한 기초 자료 제공
- 현장 시험
  - 수압 시험 : 주입재 및 그라우팅 방법 선정에 활용
  - 공내재하시험 : 수치해석시 입력 물성치로 활용
- 실내암석 시험 : 전산 해석 및 침하이론 방정식의 입력 물성치로 사용

## 4.2 보강공법의 선정

### 4.2.1 공법선정시 고려사항

보강공법 선정을 위한 흐름도 및 고려사항은 다음과 같다.



<그림 4.1> 공법선정 흐름도 및 고려사항

## 4.2.2 보강공법 소개

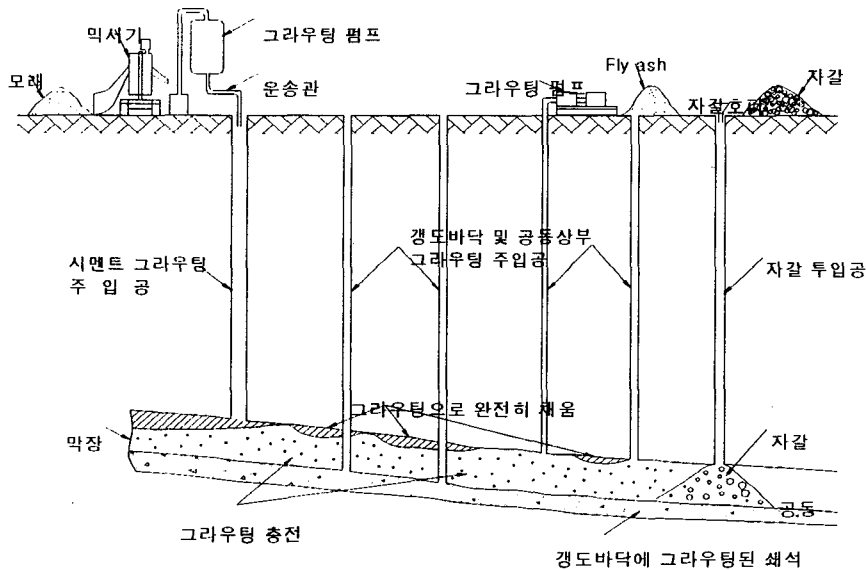
### 1) 충전법

침하가 일어날 수 있는 지하공동이 존재하게 되면 지하공동을 충전재로 채움으로써 향후 침하를 방지하거나 줄일 수 있다. 채굴적내에 충전된 재료는 횡방향변위를 구속하여 현재 존재하는 광주를 강화하며 풍화와 붕락의 효과를 줄임으로서 광주의 지지력 약화를 예방할 수 있다.

충전법에 사용되는 재료는 획득의 용이성, 이송비용, 기술적인 특성에 의해 결정된다. 가장 일반적인 재료는 채탄작업에서 생기는 폐기물, 재, 모래, 자갈이나 파쇄암 등이다. 충전재는 환경적으로 안정하고 쉽게 광산안에 주입되어 효과적인 지지를 할 수 있는 재료가 사용되어야 한다. 충전물질의 공학적 특성은 충전 후 장기침하 특성에 매우 중요한 역할을 하기 때문에 내구성이 있어야 하고 시공중에 파쇄되어서는 안된다.

충전법의 장점으로서는 채굴적의 경사가 45도 이상인 지역에서 적용이 용이하며, 다른 보강법에 비해 응력아치가 작아질 수 있고 채굴적에 의한 응력상태를 쉽게 안정화시킬 수 있다는 점이다. 또한 충전법을 적용하면 상반의 붕락을 막고, 이로 인한 사고를 최소화할 수 있으며, 현재 야적된 광산폐기물을 사용함으로써 환경적인 잇점이 있다.

충전법의 단점은 다른 보강법에 비해 비용의 편차가 크게 발생할 수 있어 각 대상지역마다 적절히 판단하여 적용해야 한다.



<그림 4.2> 그라우팅 충전법

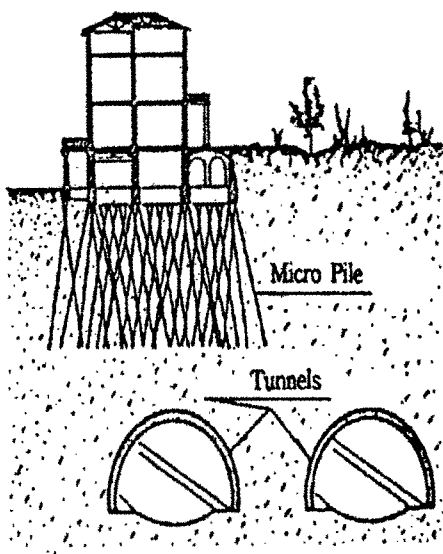
### 2) 공동상부 보강법

이 공법은 공동상부 지반에 그라우팅하거나 기타 보조공법(Micro Pile 등)을 적용하여 침하와 과도한 부등침하를 감소시키고 붕괴의 전파에 의한 함몰을 차단시키는 방법이다. 이 공법은 공동의 상부구조물 하부를 하나의 강성체처럼 거동하도록 그라우팅이나 Micro Pile 등으로 시공하여 지반이 일체화된 합성부재로서 작용하도록 한다.

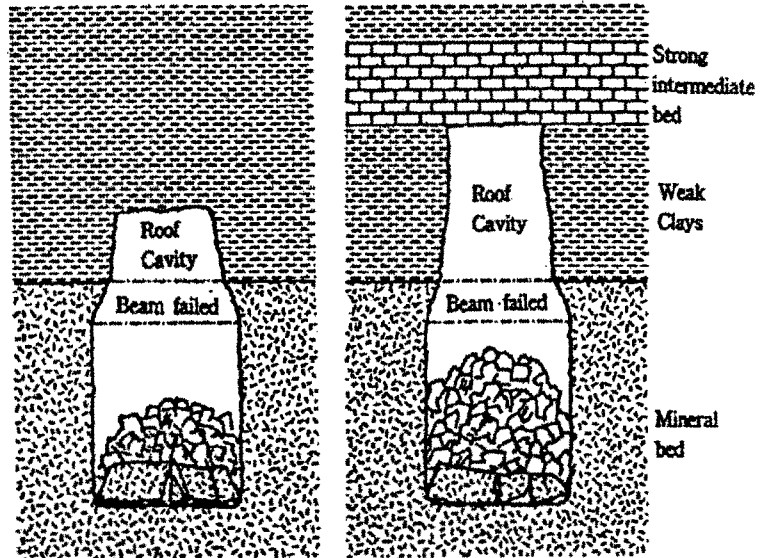
이 공법은 지상에서 시공하며 시공이 간편한 장점과 함께 국부적인 지역의 과도한 부등침하를 막을 수 있는 장점이 있으나, 침하를 완전히 억제하기는 힘들며 공사비가 비싼 단점이 있다.

원래 이 공법은 기초나 옹벽에서 지반의 강성을 크게 하고 지반을 하나의 강성체화하기 위해 사용하는 공법으로 지하굴착에 의한 침하억제 공법의 보조공법으로 쓰이는 기술이다.





Micro Pile 적용예



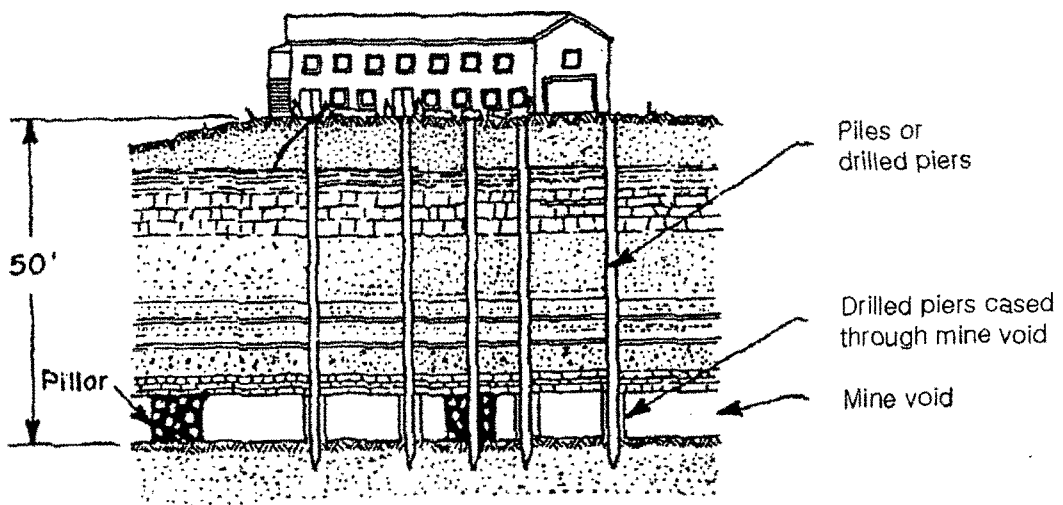
Migration에 의한 함몰발생 강성층에 의한 함몰발생 차단

<그림 4.3> 공동상부보강 설명도

### 3) 깊은기초

이 보강법은 토목기초 중 깊은기초를 채굴적 하반의 안정층까지 건설하여 개별적인 구조물을 직접적으로 지보하게 된다.

이 방법은 폐광의 깊이가 상대적으로 얇을 때, 즉 일반적인 깊은기초의 시공범위인 지표로부터 약 30m내의 깊이에서 적용할 때 경제적이다. 상반의 깊이가 커지게 되면 침하에 의한 유동응력이 기초에 전단력을 가할 가능성이 증가하게 되고, 또 다른 채굴된 공동이 보강대상 채굴적 하부에도 존재할 때는 깊은기초의 적용이 불가능하다.

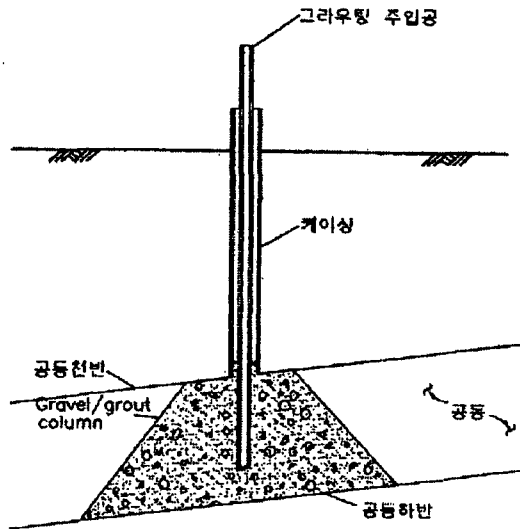


<그림 4.4> 깊은기초에 의한 상부구조물의 보강

#### 4) 그라우트 기둥

채굴공동내에 그라우트 기둥을 형성시켜 상반층을 안정화시키는 방법이다.

일반적으로 그라우트 기둥의 건설에는 대부분 포틀랜드 시멘트와 비산회의 혼합물이 이용되며 시멘트 1에 모래나 비산회가 3에서 9의 배합비로 혼합되어 채굴적내에 투입된다. 채굴적내로 투입된 그라우트 혼합재는 이전에 투입된 자갈과 상반의 파쇄암을 하나의 구조물로서 만들어 주게 된다. 그라우트 기둥은 탄주이상의 압축강도를 갖도록 설계된다. 그러나 폐공동의 보강법으로서 그라우팅 기둥은 주입재의 채굴적내 배치를 모니터할 수 없고 상반과의 접촉율을 결정할 수 없다는 단점을 가지고 있다.



<그림 4.5> 그라우트 기둥

### 5. 보강공사 예

석탄산업합리화사업단에서 시행한 강원도 태백시 철암동 일대의 철도 및 도로시설 안정성을 확보하기 위한 공사예를 간략히 소개한다.

#### 5.1 석탄채굴 현황

본 지역은 구강원탄광이 가행하던 곳으로 연간 약 700,000t 정도의 탄을 생산하던 곳이다. 탄층 부존상태는 빈, 부광의 변화가 극심하지만 평균탄폭은 약 4m정도로 추정되고 기록에 의한 최대탄폭은 약 10m정도이다. 탄층심도는 지표에서 약 5m 하부에서부터 나타나고 있다.

#### 5.2 지반침하

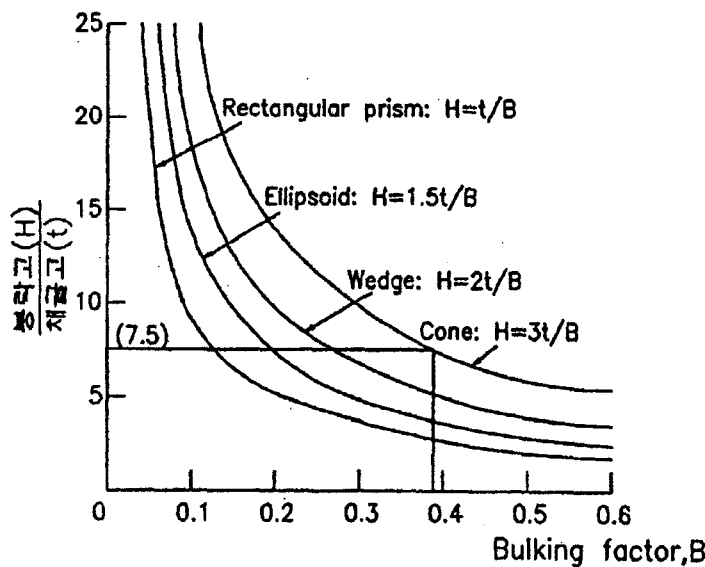
철암천교 남쪽 약 15m지점에서 직경 약 20m에 달하는 지표함몰 현상이 발생하였고 철암천교는 지표 침하현상에 의해 철도청에서 철암천교 지반보강공사(1979년)를 수행한 적이 있다.

#### 5.3 지반안정도 검토

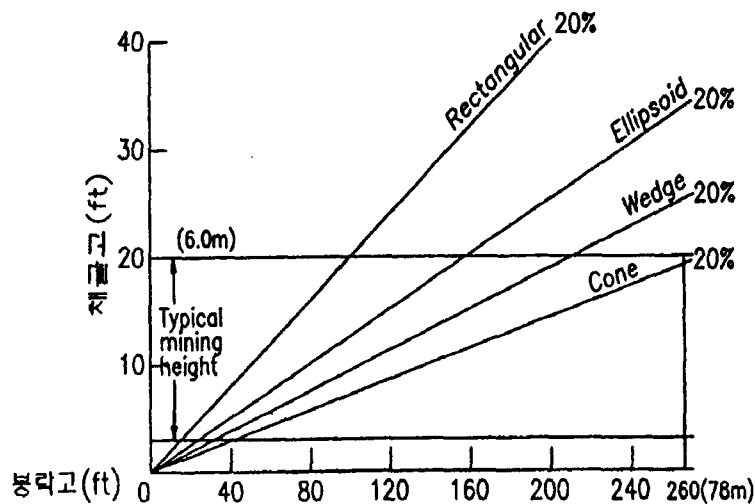
본 구역의 평균적인 상반암석 Bulking factor를 1.4(40%의 체적증가율)로 간주했을 때 <그림 5.1>에 의한 붕락고/채굴고는 파쇄암석의 형태를 Cone(암추)형으로 가장 나쁜 경우를 가정하더라도 "7.5"를 넘지 못

한다. 따라서 본 구역의 평균탄폭 4m 및 최대탄폭 10m를 감안하면 Sink-hole형 침하가능심도는 평균 30m, 최고 75m정도에 해당한다. <그림 5.2>에서 Bulking factor를 20%로 가정하고 전형적인 채굴고를 6m로 했을때의 붕락고는 약 78m에 이른다. 따라서 본 구역에서는 지반안정도를 다음과 같이 분류하였다.

- 안정도 검토대상 구간 : 시설물(철도, 도로) 하부에 채굴로 확인되거나 부분채굴로 간주되는 탄층이 부존되는 구간
- 위험도 분류를 위한 기하학적 위치관계
  - 위험 구간 : 시설물 직하부 80m 미만에 탄층부존
  - 준위험구간 : ① 시설물 직하부 100m 미만이거나  
② 시설물에서 60° (안식각) 범위내의 심도 80m 미만에 탄층이 존재하는 경우
  - 안정 구역 : ① 시설물 직하부 150m 미만인 경우 (안정구역이지만 장기관리가 요구되는 구역)  
② 시설물 하부 150m 이상의 경우(안정구역)



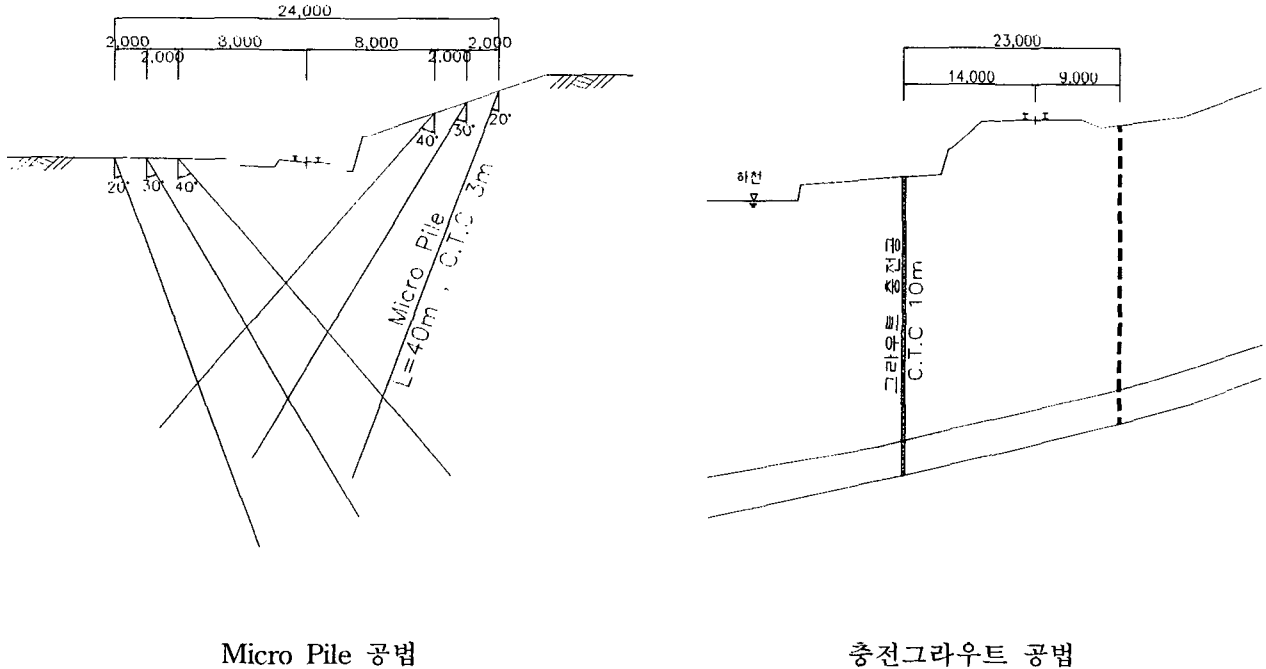
<그림 5.1> 천반붕락(Sink-hole형)의 최대높이(after piggott and Eynem)



<그림 5.2> Bulking factor 20%에서의 Sink-hole형 천반붕락과 채굴고와의 관계(after Karfakis)

## 5.4 적용공법

위험구간은 공동상부 보강법중 Micro Pile공법과 충전그라우트 공법을 적용하였으며 준위험구간은 Micro Pile공법만 적용하였다.



<그림 5.3> 공법 적용예

### 참고문헌

1. 석탄산업합리화사업단(1995), "지하채굴에 따른 지반안정성 평가 및 대책연구", pp.227~230
2. 석탄산업합리화사업단(1995), "철암지역 지반보강공사 실시설계 보고서", pp.4~75
3. 석탄산업합리화사업단(1997), "폐광지역 지반침하 메카니즘 및 침하방지 공법에 관한 연구", pp.26~61
4. Antony C. Walthan(1989), "Ground Subsidence", Blackie, pp.72~97
5. B. H. G. Brady and E. T. Brown(1985), "Rock Mechanics for Underground Mining", George Allen & Unwin, pp.405~432
6. F. G. Bell(1975), "Site Investigation in Areas of Mining Subsidence", Newnes-butterworths, pp.109~163
7. Helmut Kratzsch(1983), "Mining Subsidence Engineering", Springer-Verlag, pp.363~418
8. National Coal Board Mining Department(1975), "Subsidence Engineers' Handbook", Camgate Litho Ltd, pp.111
9. S. Thorburn, G. S. Littlejohn(1993), "Underpinning and Retention", Blackie Academic & Professional, pp.84~156
10. Tang, D. H. Y & Peng, S. S.(1983), "Effects of Strata Sequence on the Flexural Behavior of the Immediate Roof", Proceeding of the 1st Conference on Use of Computers in the Coal Industry, Aug. 1-3, pp.518~532
11. Wittaker, B. N. & Reddish, D. J.(1989), "Subsidence Occurrence, Prediction & Control, Elsevier, pp.205~256