3回目の研究会「工学と国際開発」
日時：2013年6月12日（水）13:30-15:30
場所：東京工業大学大岡山キャンパス石川台4号館地下B02-05室

炭鉱採掘へ向けた工学と国際開発

ピパットポンサー・ティラポン　准教授
東京工業大学
学術国際情報センター

地球球体説

紀元前6世紀: 古代ギリシア ピュタゴラス，ヘロドトス，プラトン，アリストテレス

ほぼ歴史的に考察された順序に並べた:

1. 海で、低い地面の前の空間や船体の前の船の帆に高山や地上型灯器が見えた場合。船の上の方に上った場合か、陸地なら高い崖の上にいる場合に、さらに遠くが見える。北国へ旅すると太陽は低く上るが、北極星のような北にある星は高く上るようになる。エジプトで見えるカノープスのような他の明るい星は空に見えなくなる。
2. 地球は月食の際に月に円形の影を投じる。
3. 月食が報告される時刻(月食の起こる時間帯自体はある特定の時間帯のはずである)が、東方（例えばインド）では西方（例えばヨーロッパ）よりも数時間遅れている。時差はクロノメーターや電信を用いた旅行によって後に確かめられた。
4. エチオピアやインドなど非常に南へ行くと、1年の内ある時期には影が南側に生じる。さらに南（例えばアルゼンチン）に行くと常に南側に影が生じる。
5. 世界周航が可能である; つまり、世界を一周して自分が元いた位置に戻ってくることが可能である。
6. 世界を一周する旅行家は、していない人と比べて一日の長さが増減する。国際日付変更線を参照。
7. 人工衛星は地球の周囲を回り続け、さらに静止軌道にある衛星は地球から見て不動でありつづけられる（静止衛星）。
8. 宇宙から地球の写真を撮ると、観点に関わらず円形に見える。

参考:

http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E7%90%83%E4%BD%93%E8%AA%AC

The Earth seen from Apollo 17 (NASA)

写真の力が凄い！

理論的な研究

学会発表で把握したこと

1. 理論屋さんは，自分以外，誰も信じてくれない。
2. 実験屋さんは，自分以外，皆が信じてくれる。

研究成果の例（2005～2008年）

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial p}\frac{\partial p}{\partial \boldsymbol{\sigma}} + \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{q}}\frac{\partial \bar{q}}{\partial \boldsymbol{\sigma}}$$

$$\bar{f} = p - p_c$$

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial \boldsymbol{\sigma}_c} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial p_c}\frac{\partial p_c}{\partial \boldsymbol{\sigma}_c}$$

$$\frac{\partial p}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{1}{3}\mathbf{1}$$

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{q}} = 0$$

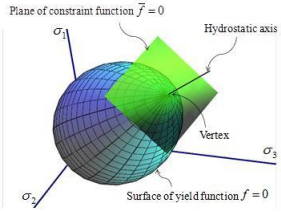
$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial p} = 1$$

$$\frac{\partial p_c}{\partial \boldsymbol{\sigma}_c} = \frac{1}{3}\mathbf{1}$$

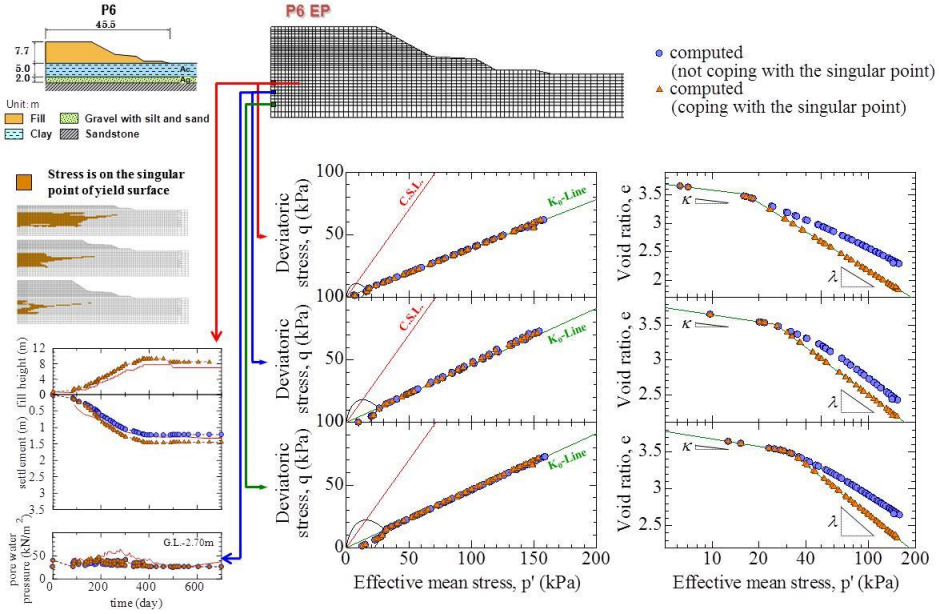
$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial p_c} = -1$$

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{1}{3}\mathbf{1}$$

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial \boldsymbol{\sigma}_c} = -\frac{1}{3}\mathbf{1}$$



関口・太田モデルの特異点処理法



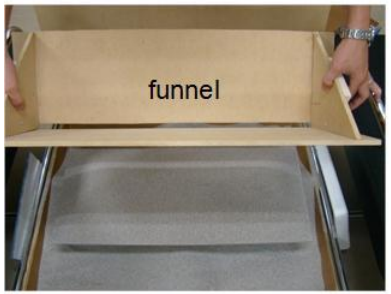
盛土の有限変形解析

研究手法のバランスを取らなくてはいけない！

実験的に実現可能な理論

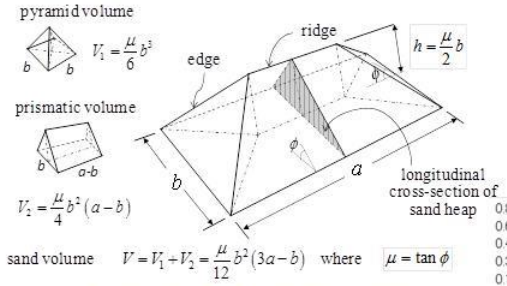
砂山の物理現象に関する研究 → 応力分布解析解の提案

網ふるい落下法による堆積

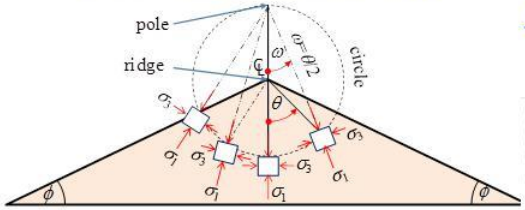


空中落下法による堆積

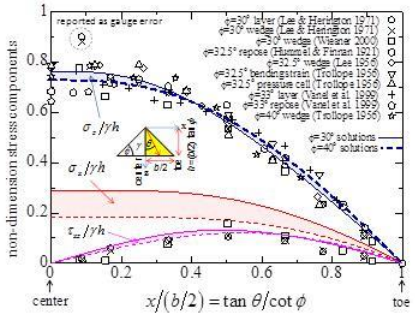
砂山の安息角



長方形の剛性板上に形成した砂山

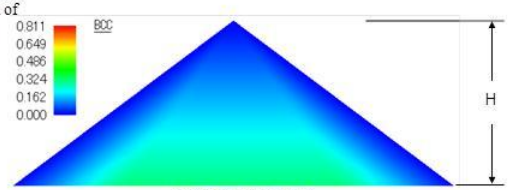


分極主応力軸仮定

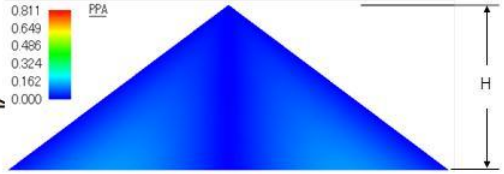


過去実験結果と比較

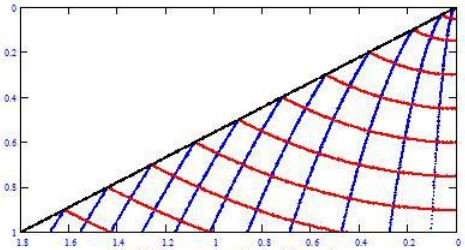
鉛直応力分布



水平応力分布



せん断応力分布



放物線の主応力軸回転

Statics of loose triangular embankment under Nadai's sand hill analogy, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol.58 (10), pp.1506-152, 2010

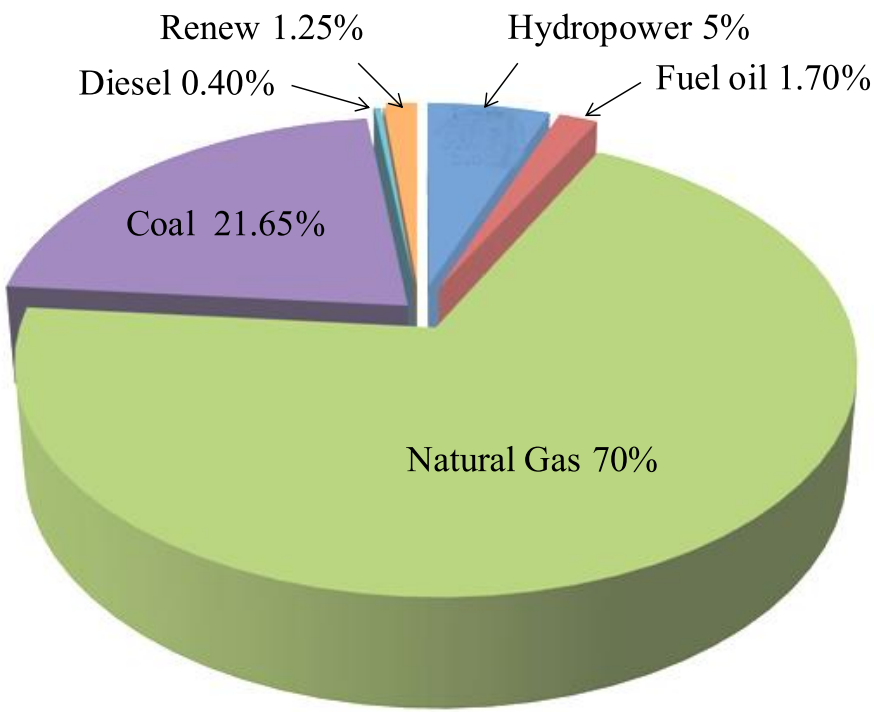
現場訪問

2009年3月15日～21日：　タイ北部，バンコク

1．Dr. Thirapong PIPATPONGSA（東工大：力学）
2. Mr. Mohammad Khosravi Hossein（東工大：鉱山）
3. Dr. Barames Vardhanabhuti （カセサート大学：土質）
4. Dr. Pitiwat Wattanachai（チェンマイ大学：コンクリート）
5. Dr. Cheowchan Leelasukseree（チェンマイ大学：鉱山）

訪問地：　タイ北部メモ炭鉱，チェンマイ大学，チュラロンコン大学

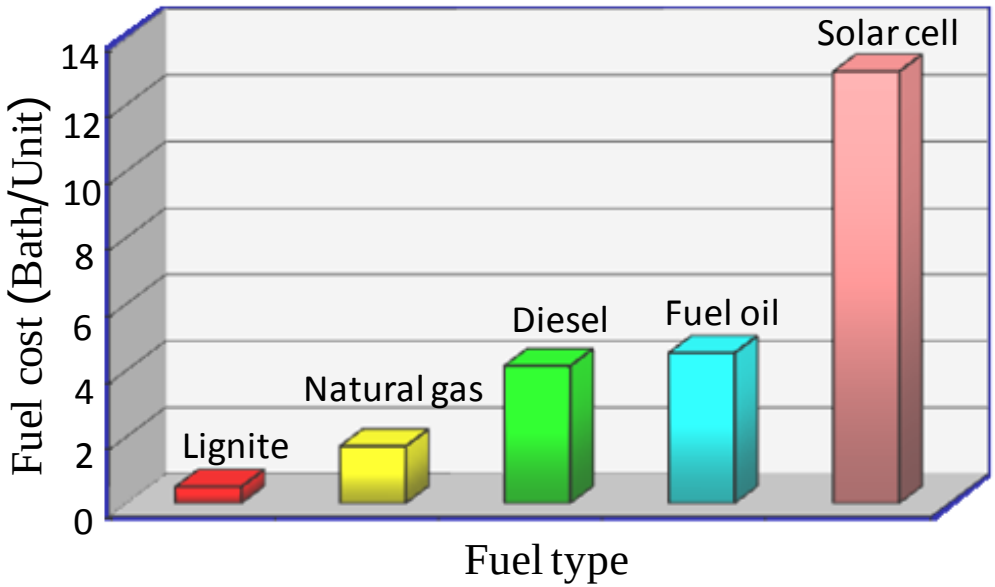
タイ発電公社（EGAT）



Electricity sources in Thailand as of June 2008

courtesy of ***EGAT***

courtesy of ***EGAT***



Relative fuel cost in Thailand as of April 2008

住所：Geotechnical Engineering Department, Planning & Administration Division, EGAT, Mae Moh, Lampang 52220 THAILAND

メモ炭鉱

http://maemohmine.egat.co.th/

タイ北部を中心に分布している褐炭の炭田は，年産1,600万トン程度と全国生産量の80%以上を占めている東南アジア最大生産拠点である。

埋蔵量

予想埋蔵量	11.4億トン
可採埋蔵量	8.14万トン
採掘体積	52.4億m^3
平均剥土比	6.44 m^3/ton
既生産分	3億トン (2007年より)
総量切土	16.06億万m^3

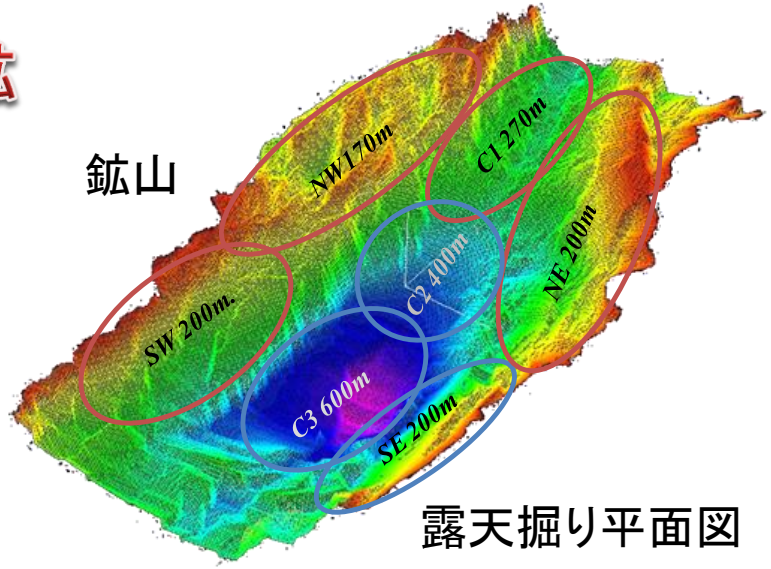
生産量

一日生産量	約5.2万トン
年間生産量	約1600-1700万トン
年間切土	6,000-8,000万 m^3
全国生産量: 約80%-85%	

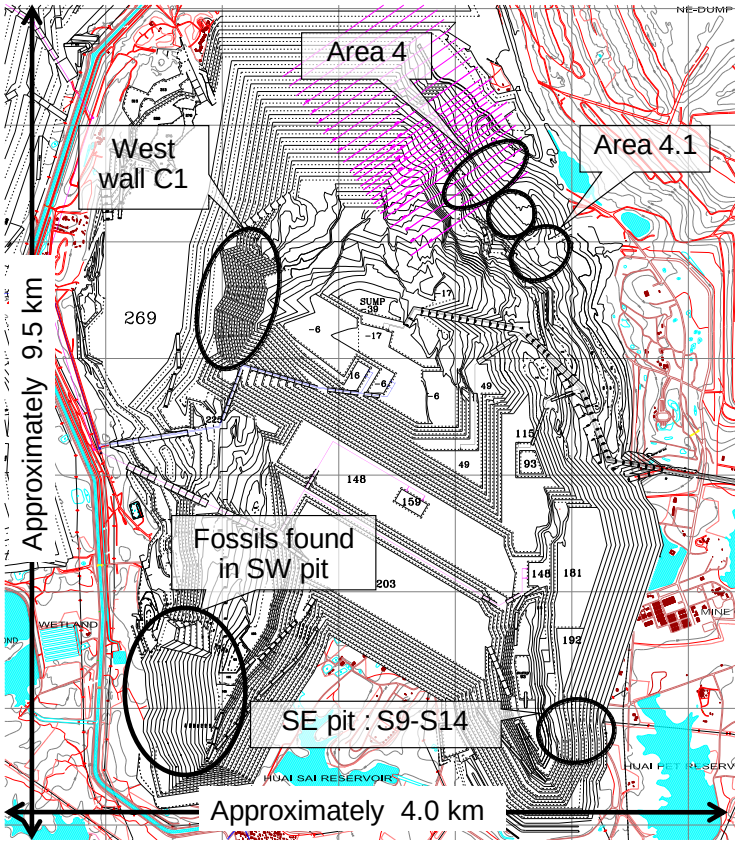
東南アジア最大規模の露天掘り炭鉱

メモ炭鉱の鳥瞰図

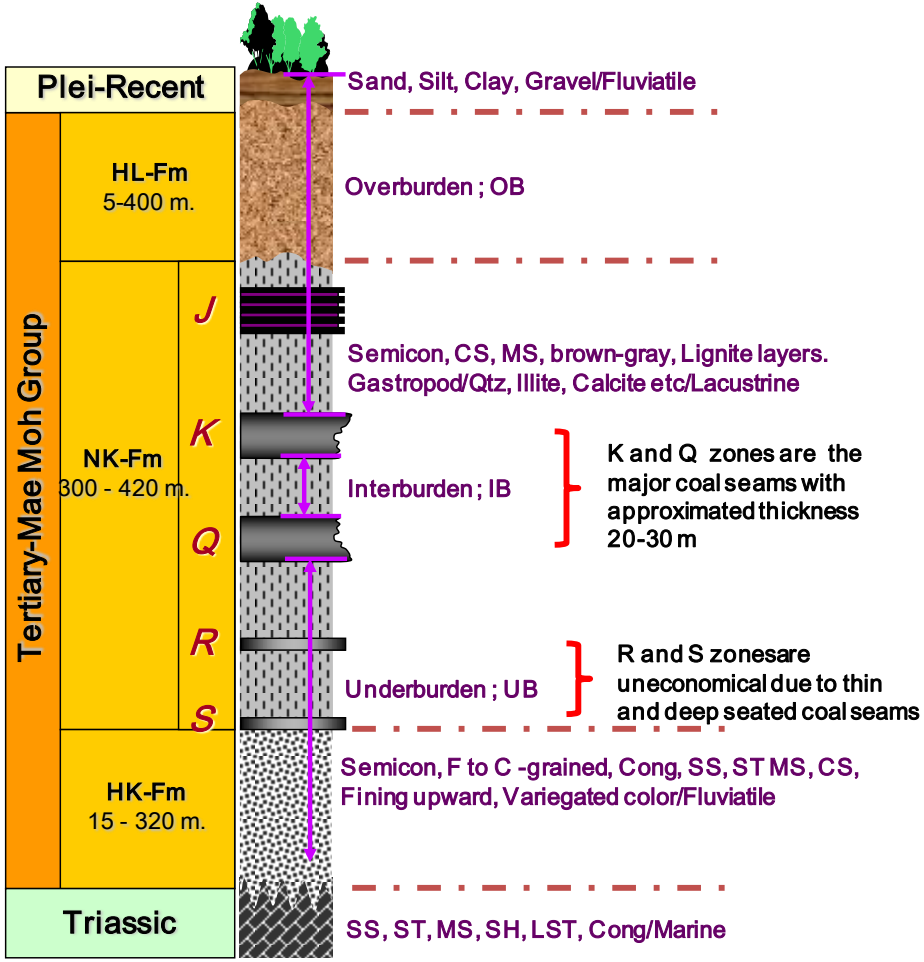
亜炭採掘

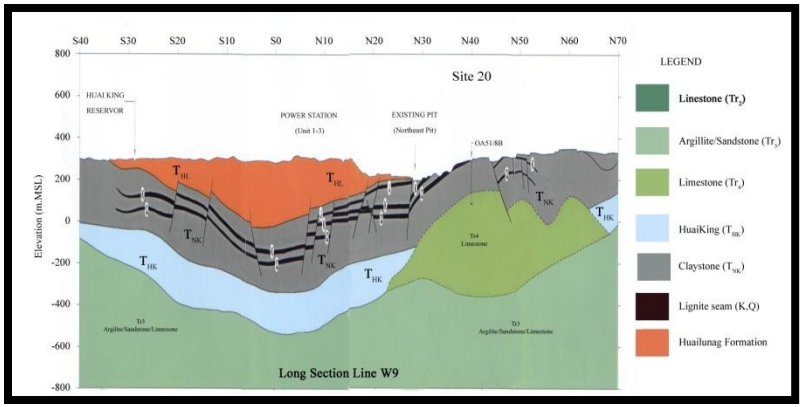


露天掘り平面図

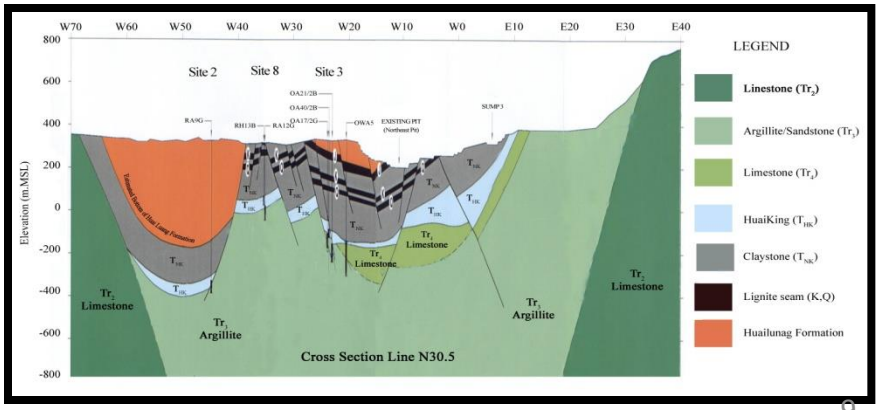


亜炭層





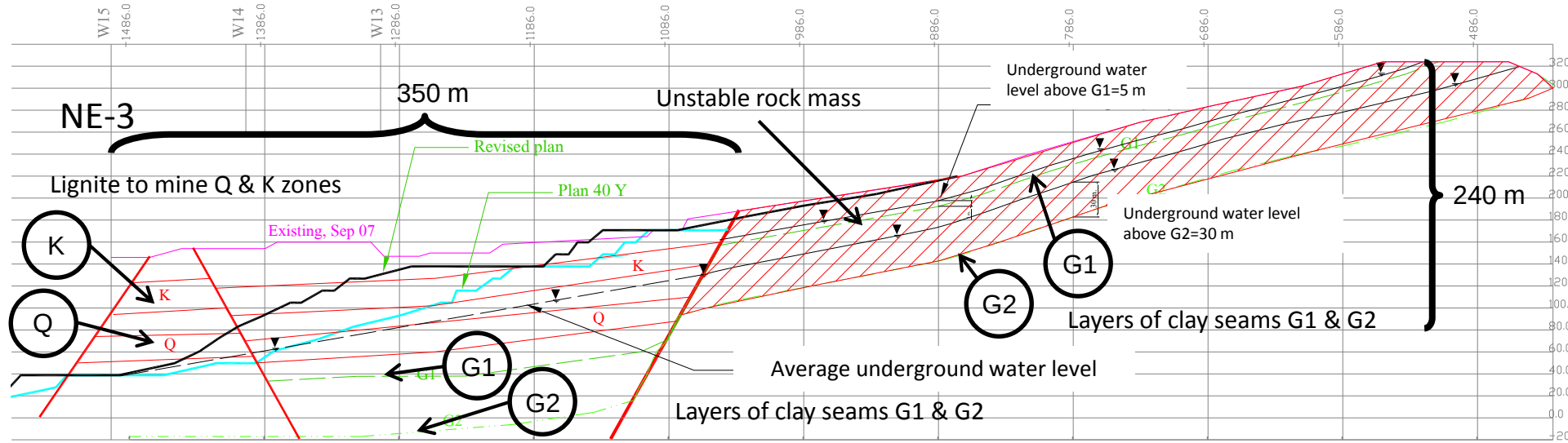
南北断面

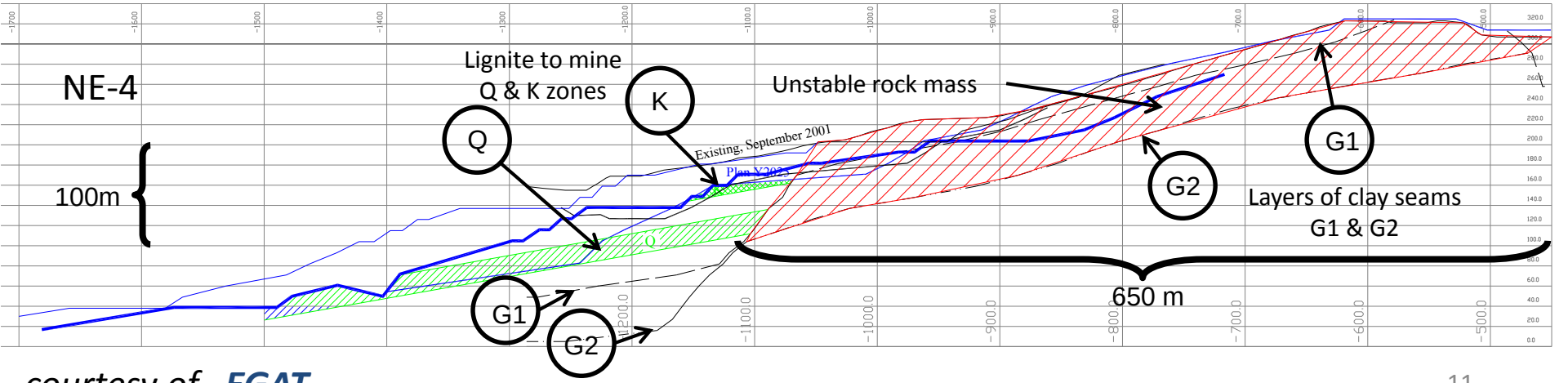


東西断面

メモ炭鉱現場の斜面崩壊

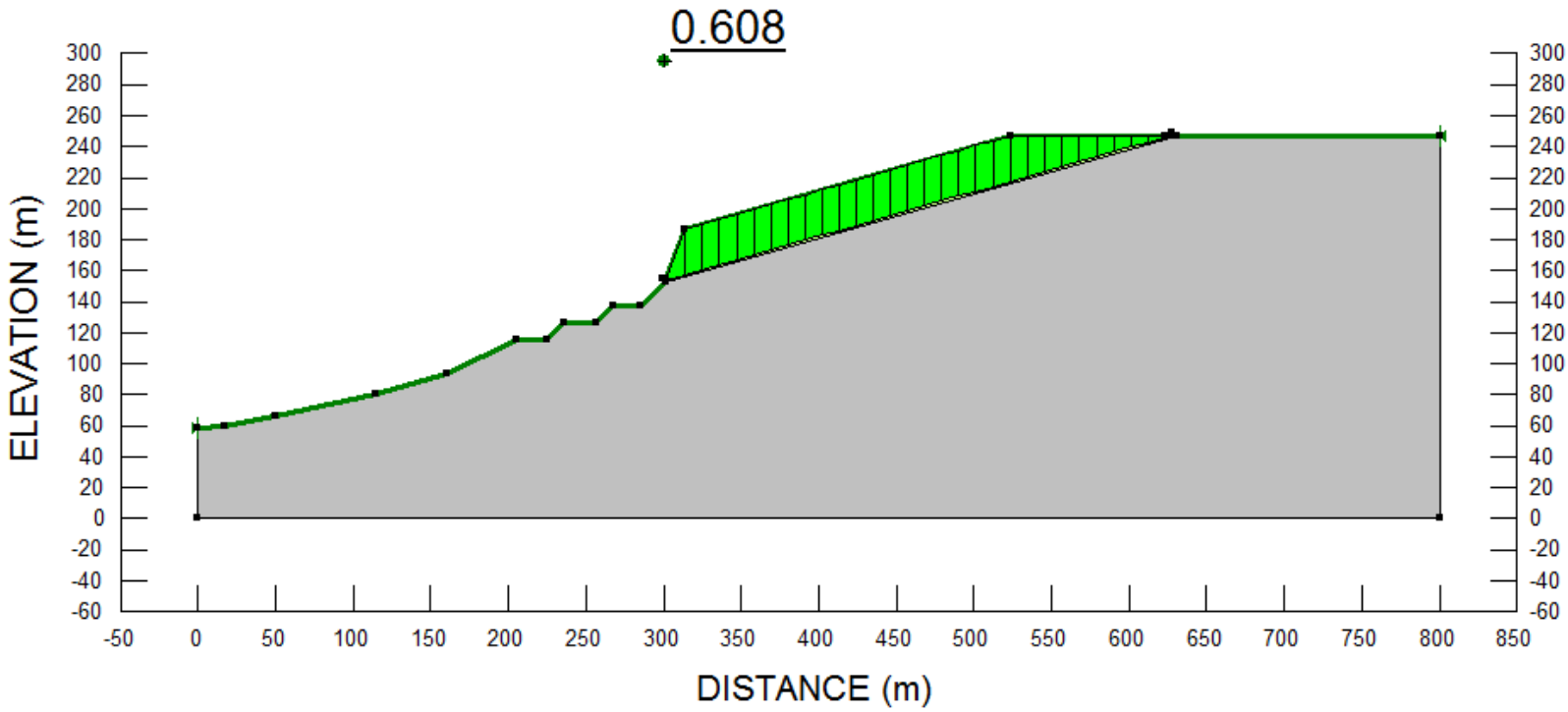
解決できない現場の問題





courtesy of ***EGAT***

Lowwall Area 4.1 2D Stability Analysis



courtesy of ***EGAT***

問題解決の選択

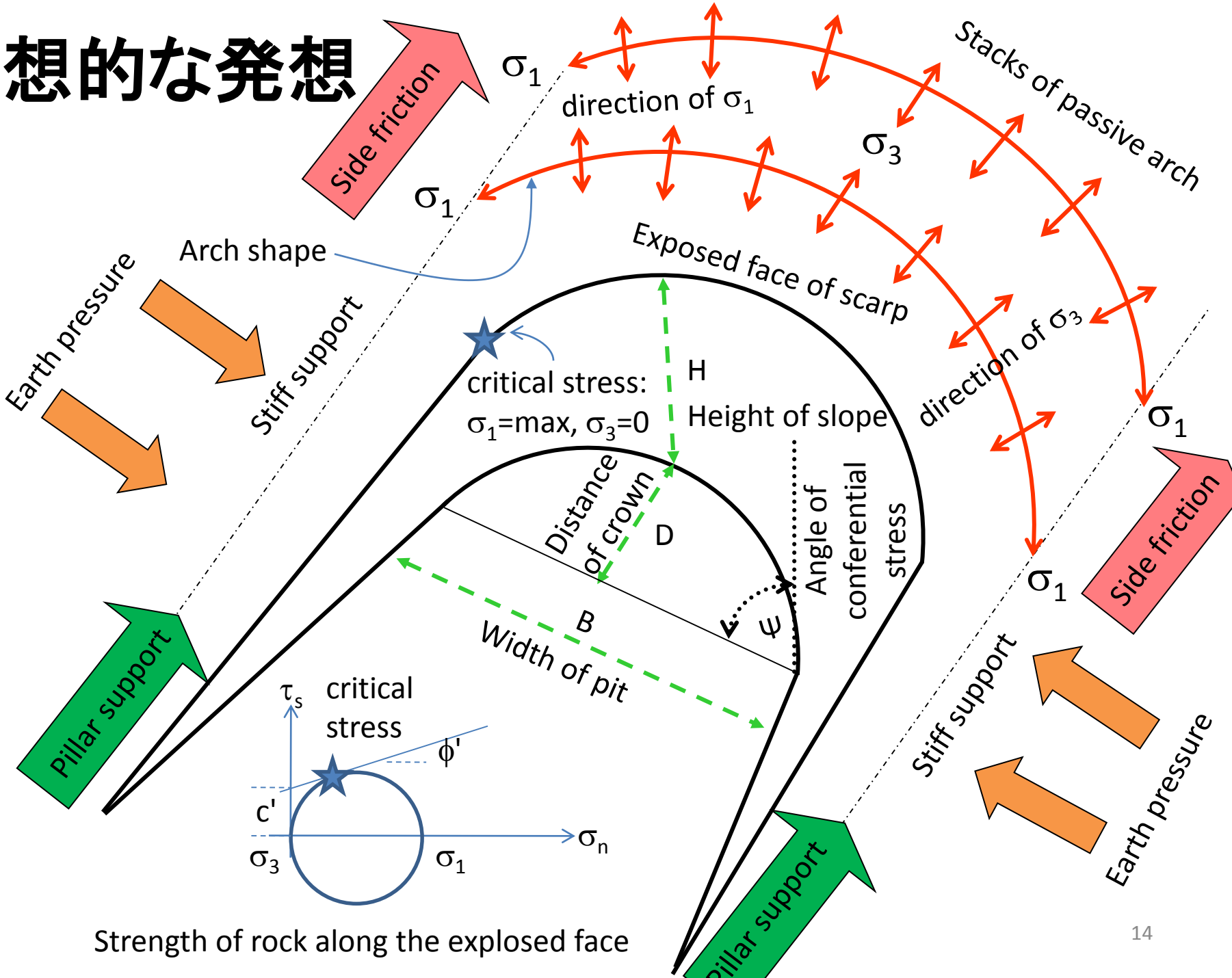
1. 不安定斜面を全面的に撤去　＜却下＞
（オーストラリアの顧問）

2. 直径0.15mの鉄筋杭で2,400本を打つ　＜却下＞
（ドイツのコンサルト会社）

3. 巨大な埋込み杭+アンカーを導入　＜却下＞
（チュラロンコン大学の専門家）

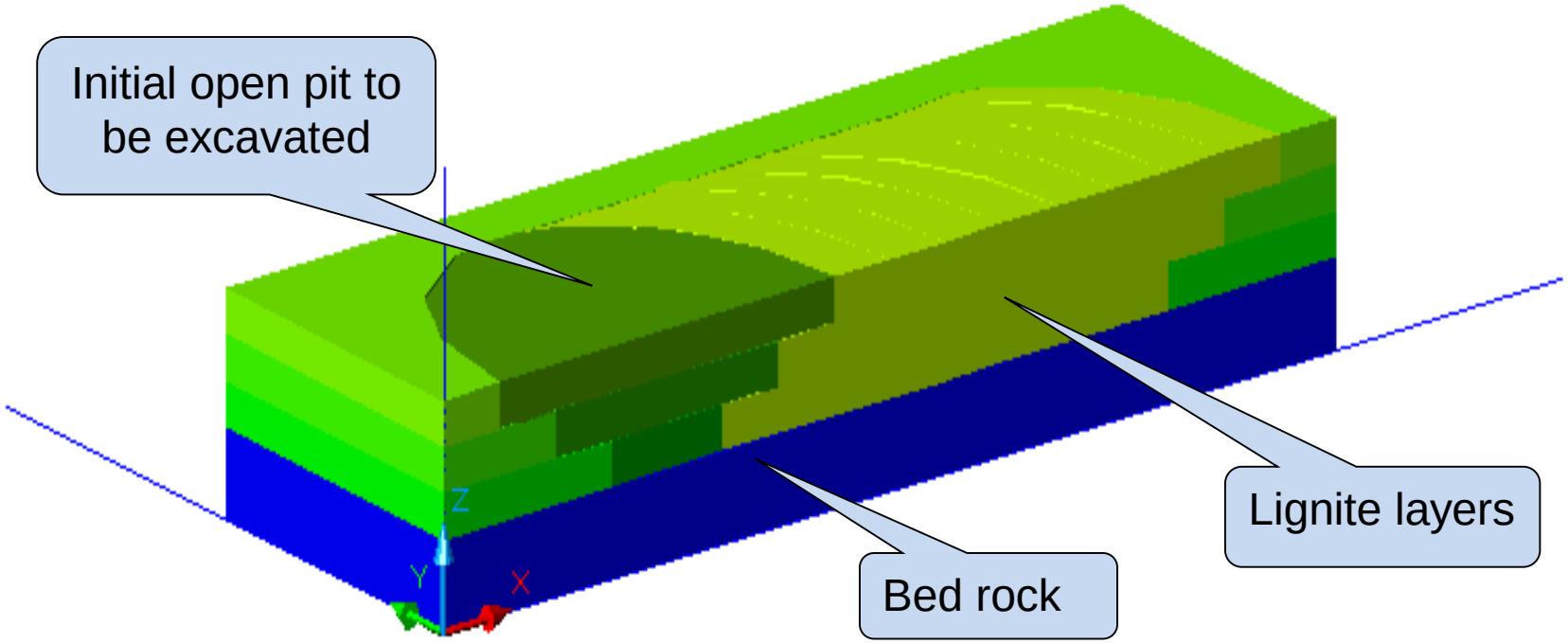
4. 杭一本が不要で，斜面を全面的に撤去もしない
（**危ない橋も一度は渡れ！**）

理想的な発想

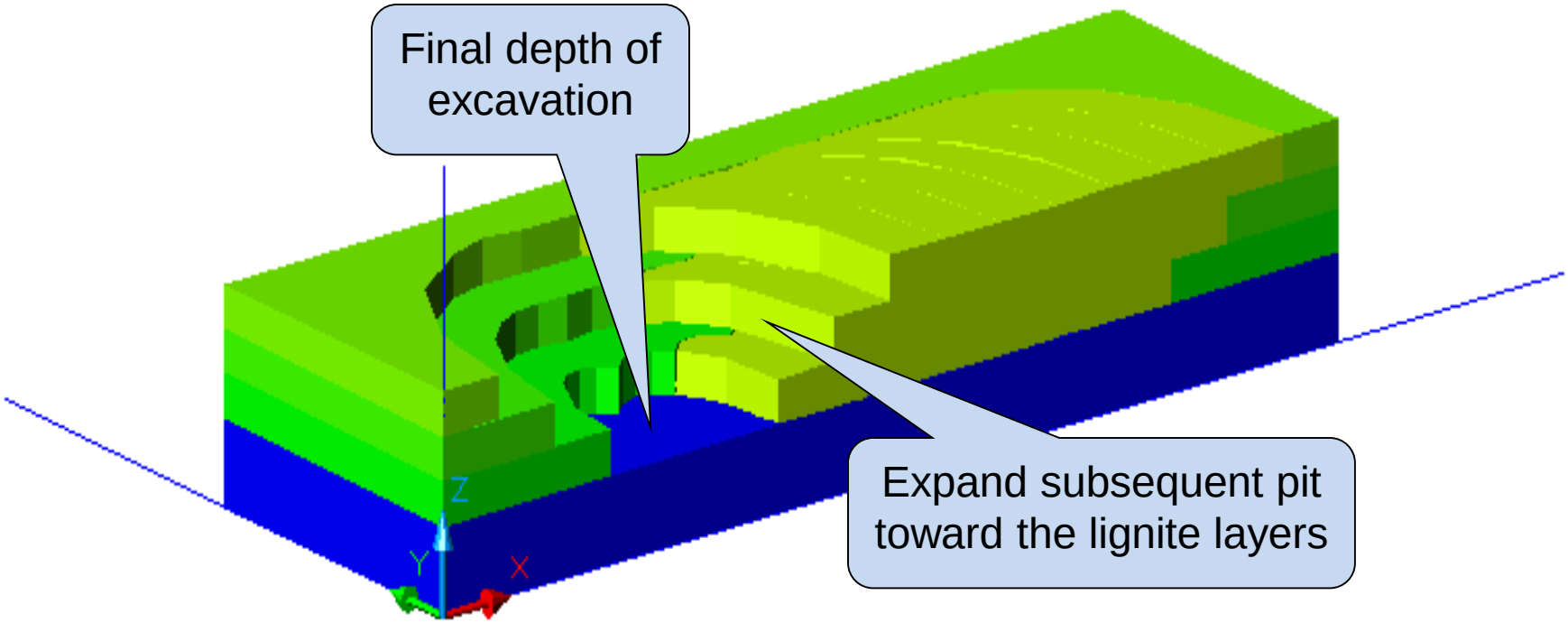


Strength of rock along the explosed face

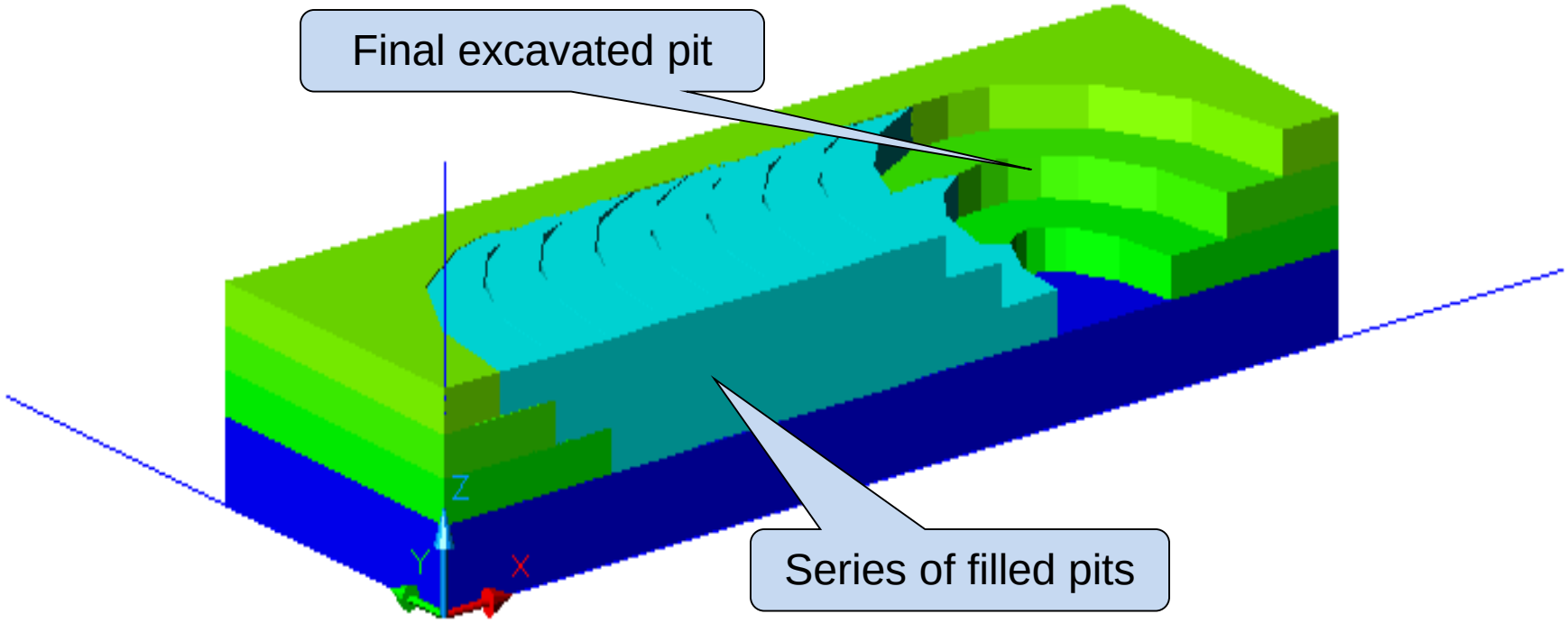
Moving-pit excavation

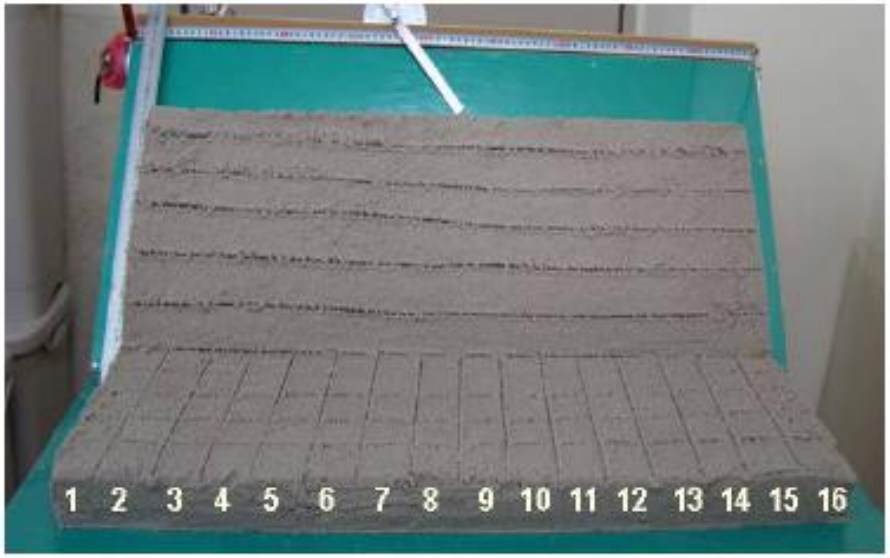


Moving-pit excavation

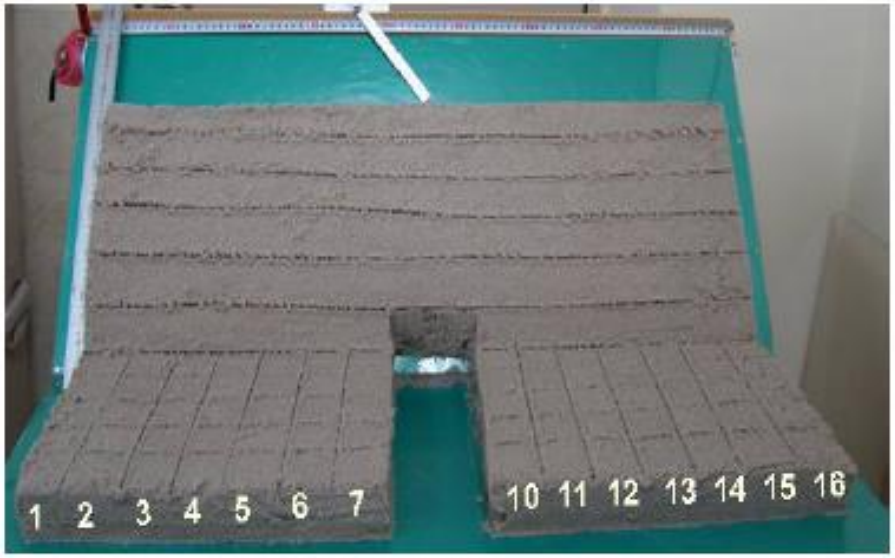


Moving-pit excavation

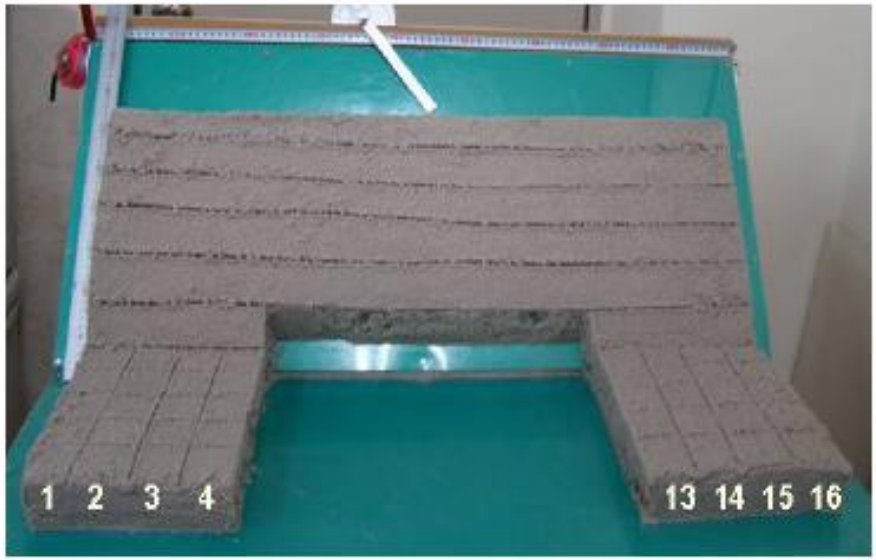




a) Compacted sand, no surcharge, no side support



b) First cut: slices 8 and 9



c) Max. stable span before failure: 40cm (slices 5-12)

d) Failure mode: arched collapse over the cut slices

研究計画の提案

アーチ効果を利用した亜炭採掘手法に関する研究

本研究は、タイ国チェンマイ大学工学部と部局間国際交流協定を締結することに基づいて，タイ電力公社（EGAT）の協力の下に共同研究を進めている。アーチ効果による荷重伝達メカニズムと粘土薄層に沿う不安定斜面に適用する充填採掘法を課題として，アーチ効果を利用した亜炭採掘手法およびその安定解析・シミュレーションに関して研究している。

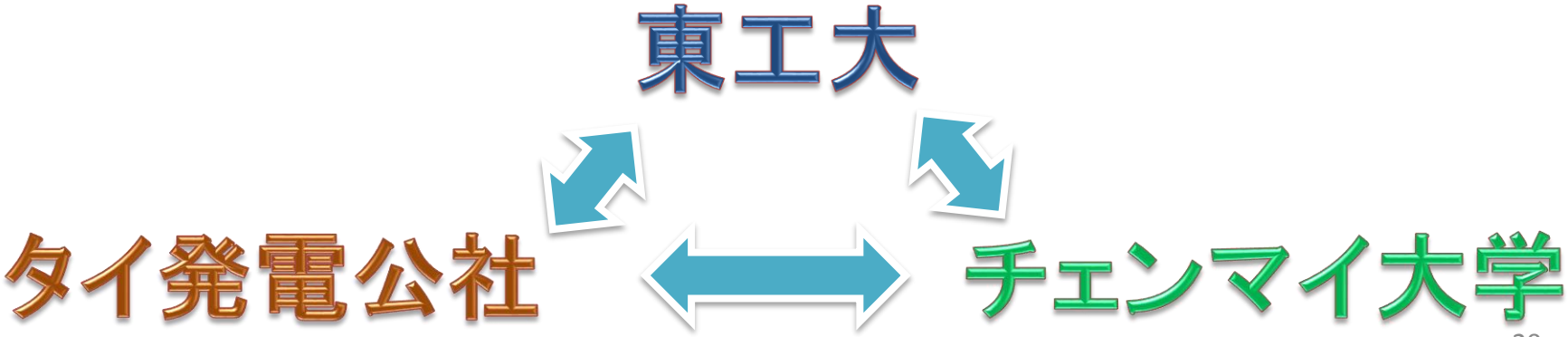
チェンマイ大学工学部とのMOU締結

“Modeling and Simulation of Large-Scale Open-Pit Coal Mining”との国際共同研究テーマで、GSIC・チェンマイ大学工学部の部局間交流協定が締結された。第一段階で、アーチ効果を利用した炭鉱採掘手法およびその安定解析手法を応用することをテーマとして、2010～2011年に共同研究を進める。その結果を踏まえて，第二段階では、大規模解析プログラムを開発し、TSUBAMEを利用した掘削のよるシミュレーションを実施する計画である。

エネルギー資源開発に向けた国際共同研究

タイは東南アジア第2位の石炭生産国にもかかわらず、輸出せずに国内火力発電用の褐炭を生産している。現在の全国年間生産量約1,600万トンのうち、80%以上が北部ランパーン市近郊に位置するメモ（Mae Moh）炭鉱から採掘されている。タイ発電公社（EGAT）は、この東南アジア最大規模の露天掘り炭鉱を所有し、2028年までに地表から490mに達する予定である。メモ炭鉱はこの様にタイの生産活動促進において、重要な位置づけとなっているが、岩盤の間に複数の粘土薄層を挟むため、採炭に伴い、巨大な（4 km×9.5 km）の坑内の安定性が重要課題となっている。

2009年3月16日～18日，10月27日～30日,2010年5月5日～８日，メモ炭鉱の調査結果に基づくこの背景を受けて実施されたGSIC・チェンマイ大学・タイ発電公社との協働のもと、掘削のコスト削減および安定性を定量的に評価できる新しい唖炭掘削工法のモデル化および数値解析についての国際共同研究を進める。



共同研究プロジェクト

代表：　チェンマイ大学

チェンマイ大学：　研究者２名，顧問１名，学生４名

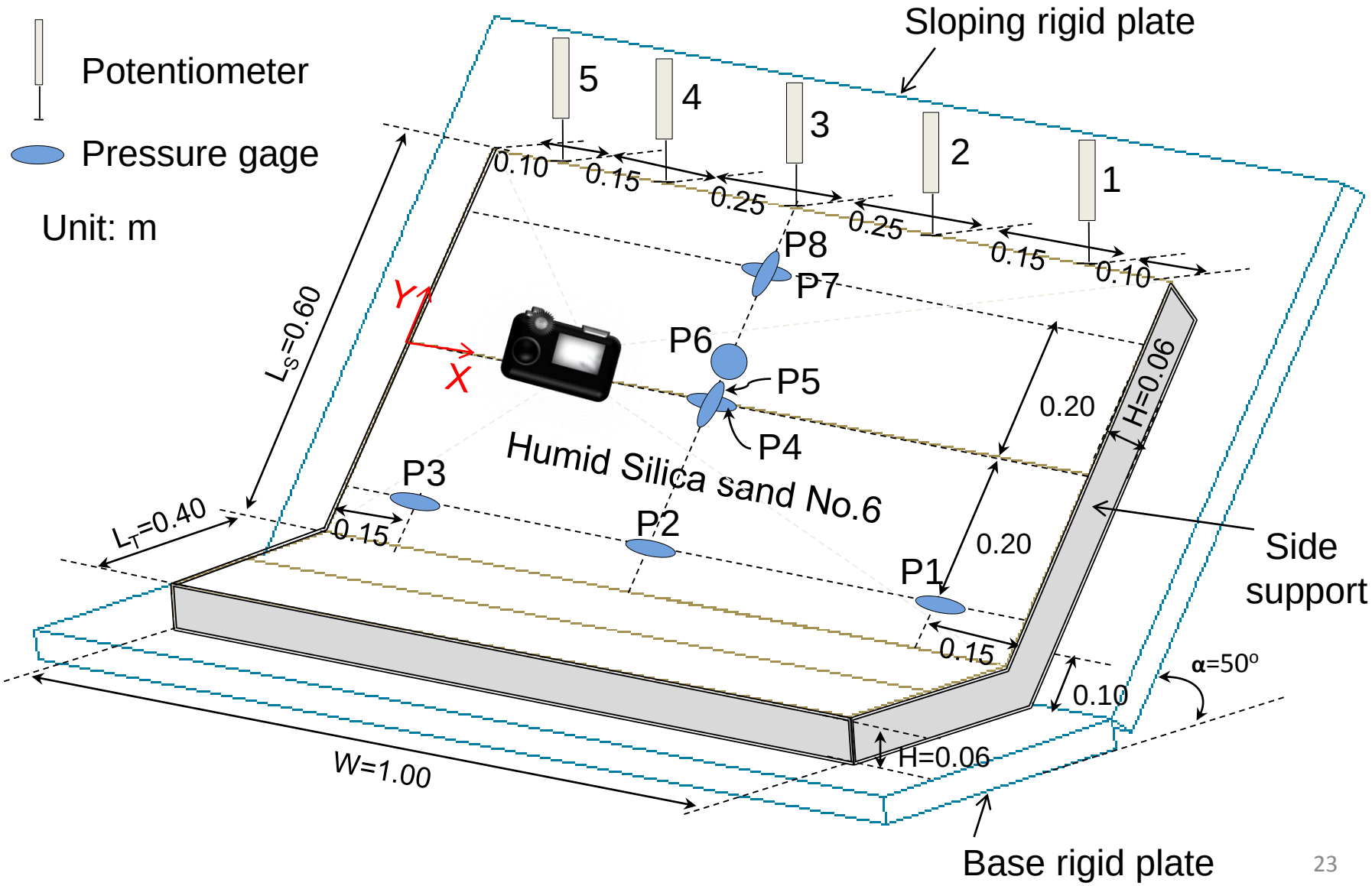
カセサート大学：　研究者２名，顧問１名，学生４名

東工大：　研究者１名，顧問１名（土木工学），学生４名（国際開発工学専攻）

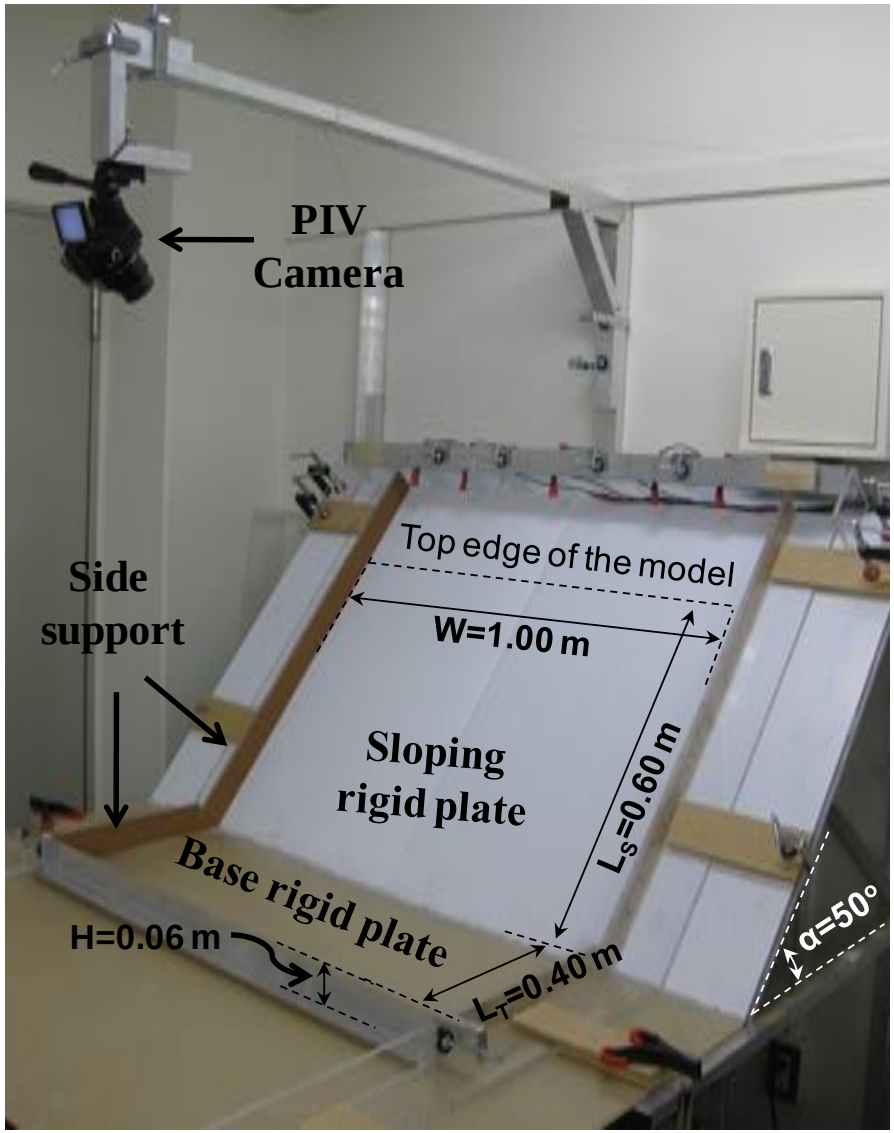
Missions of contracted research

- Material properties → Tokyo Institute of Technology
- Physical modeling → Tokyo Institute of Technology
- Numerical simulation → Chiang Mai University
- Back-fill reinforcement → Chiang Mai University
- Monitoring/Warning devices → Kasetsart University

Schematic of the model with the locations of instruments

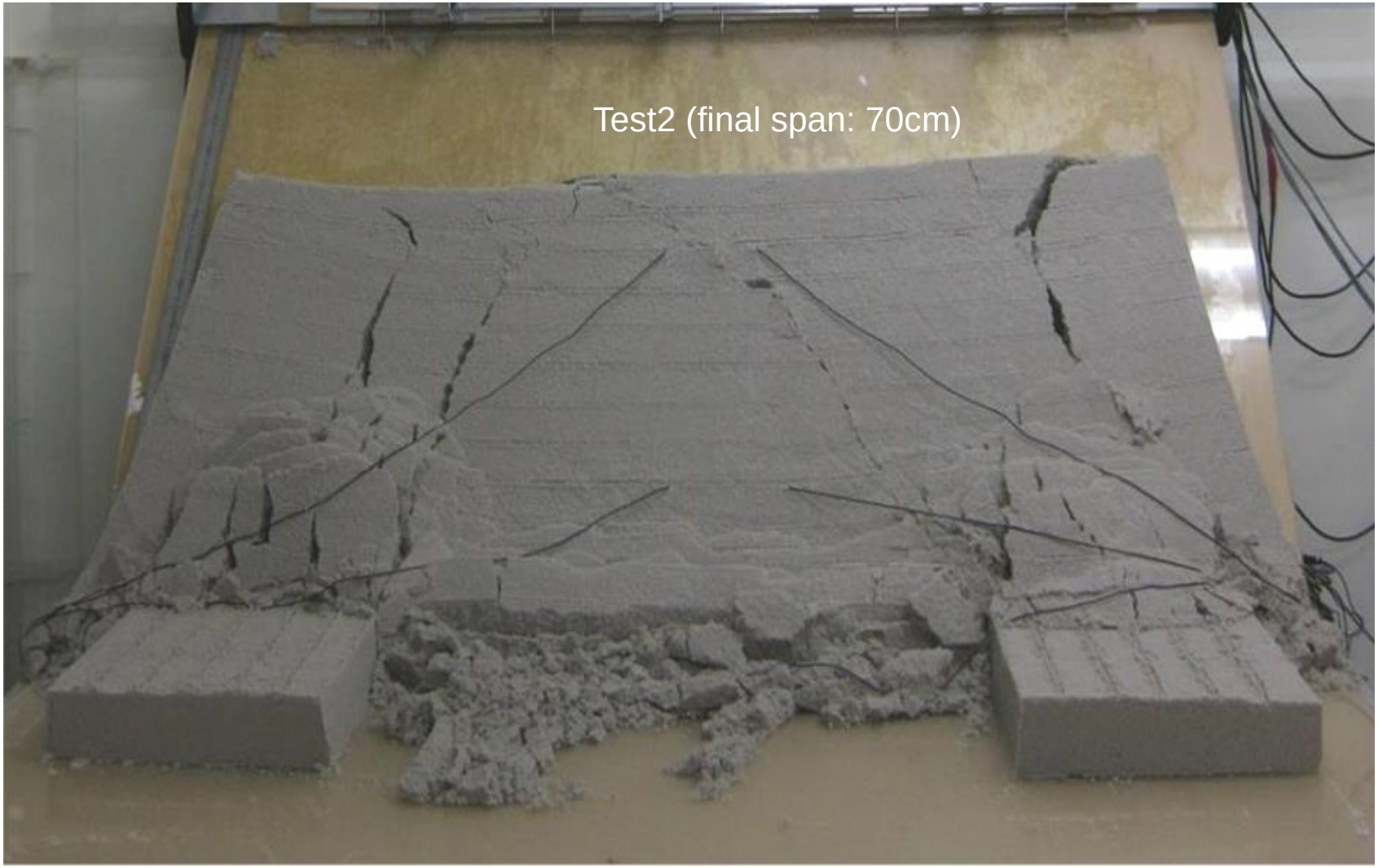


Model set-up

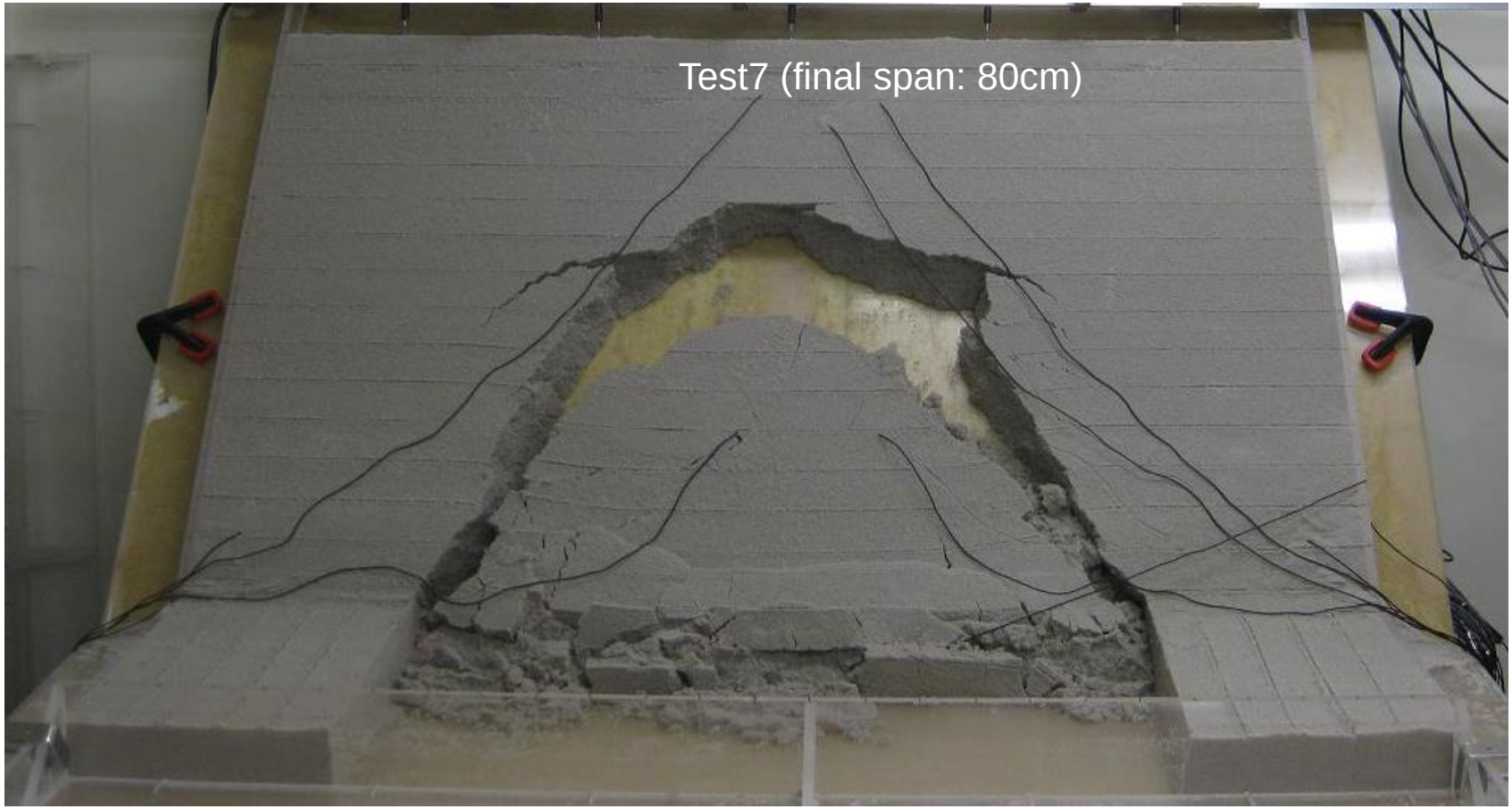


High speed camera

Mode of failure for the model tests without the side supports

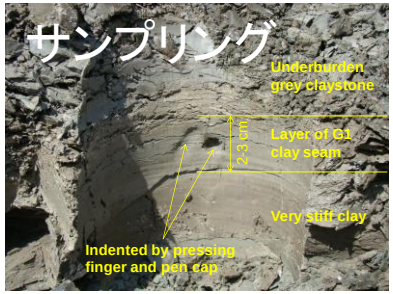


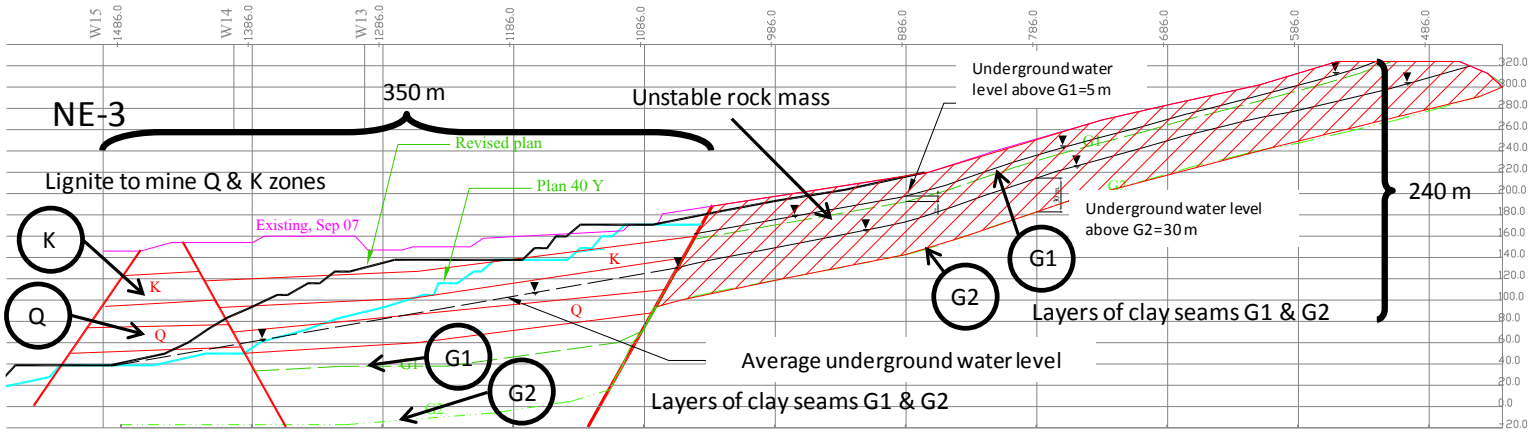
Mode of failure for the model tests with the side supports



対象サイト

ボーリング

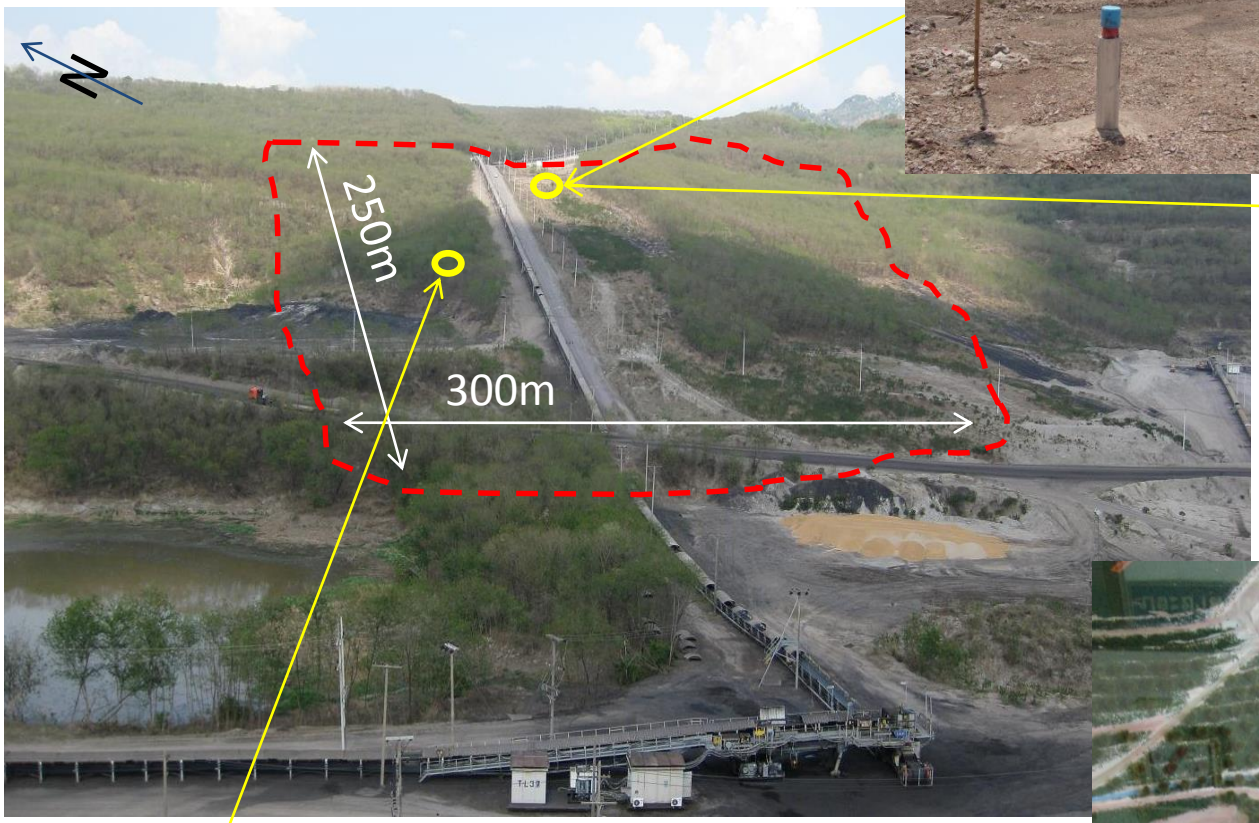




断面

サイト調査

Area 4-1



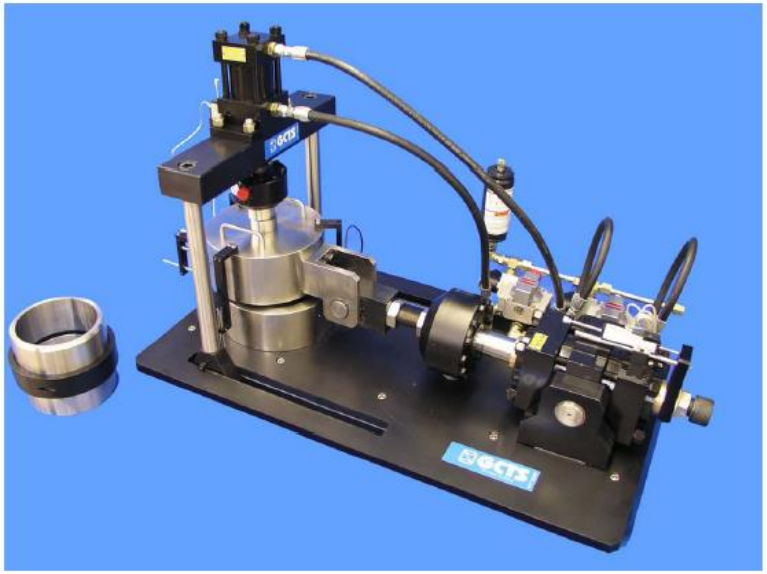
Borehole NEI N29

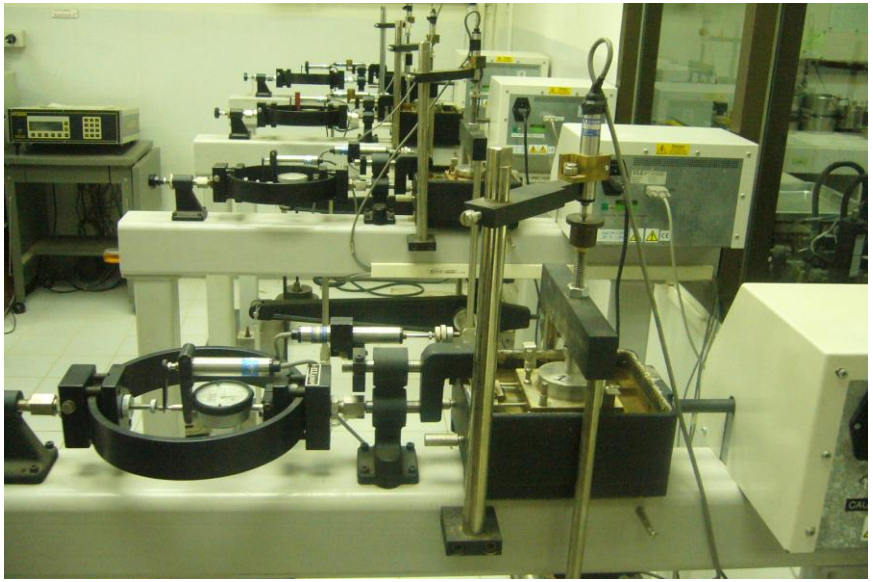
Schmidt hammer test

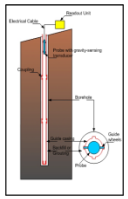
Model

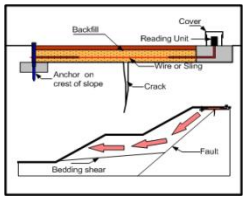
Schmidt hammer test

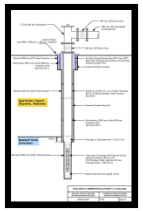
タイ発電公社の設備





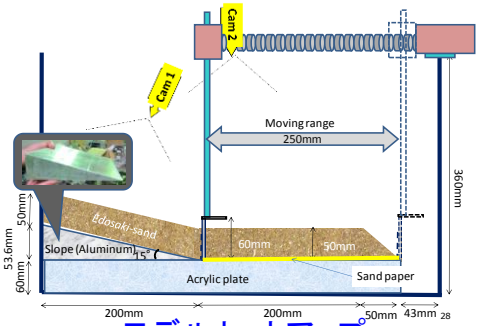



Backfill
Cover
Reading Unit
Wire or Sling
Anchor on crest of slope
Crack
Fault
Bedding shear

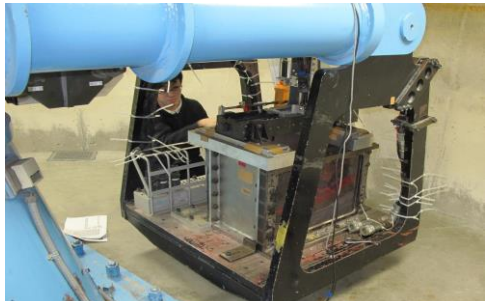


【アーチ効果による荷重伝達メカニズム】実施：2009-2011　協働：土室研グループ

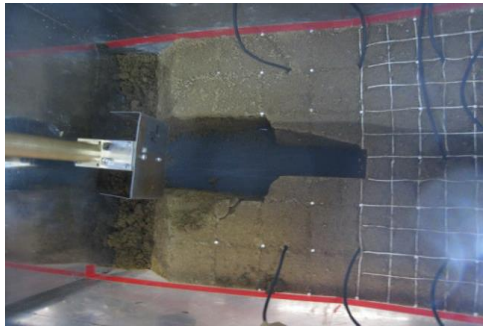
遠心模型試装置（土室グループ）



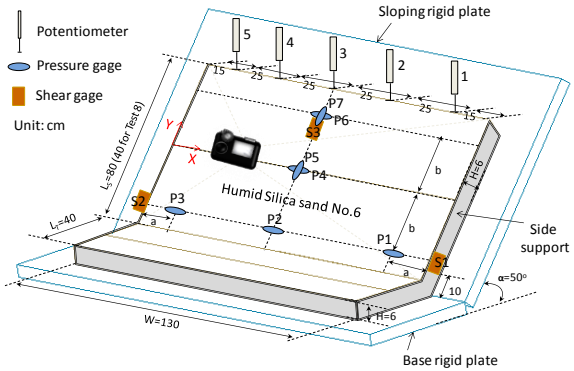
モデルセットアップ



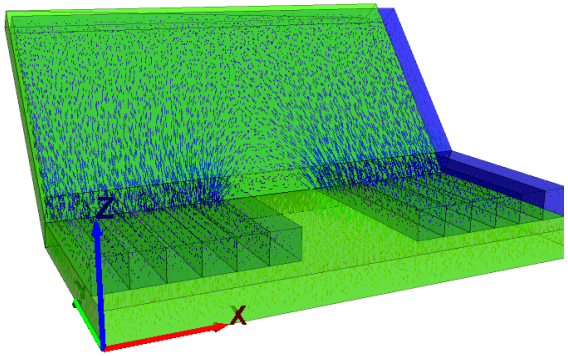
遠心模型実験のセットアップ



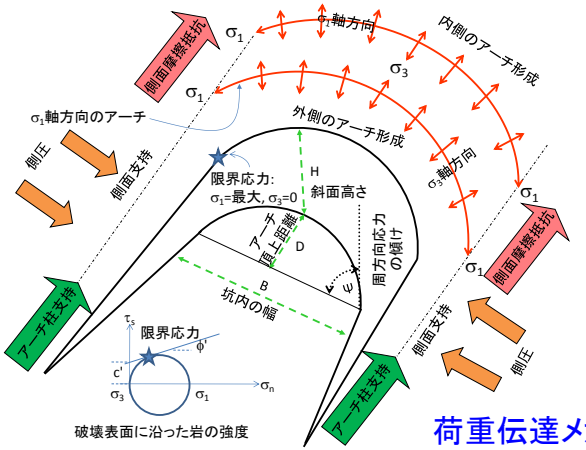
ロボットによる掘削の様子



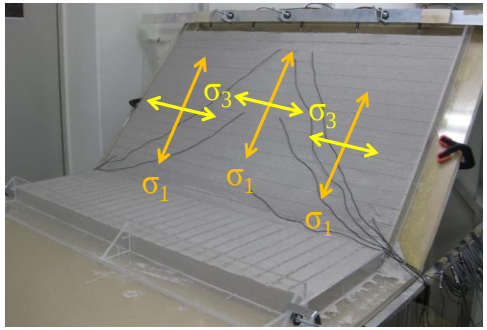
物理模型実験のセットアップ

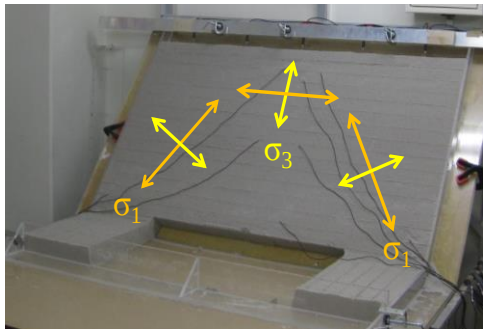


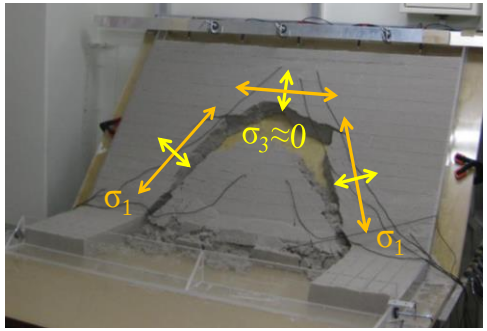
不連続変形法の計算結果



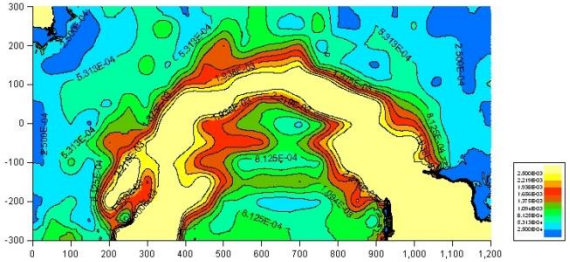
荷重伝達メカニズム







原型・模型実験の破壊モード



粒子画像流速測定法による結果

【破砕土（亜炭・化石）の強度に関する研究】実施：2010-2011　協働：タイ発電公社

亜炭層

亜炭供試体採取

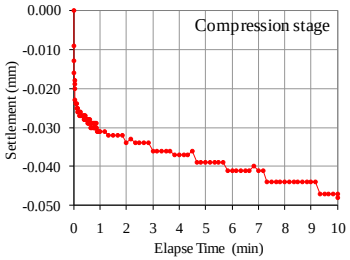
供試体準備

せん断箱に入れた石こうプラスター

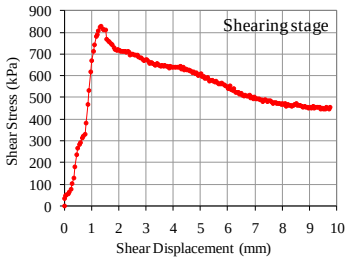
岩盤の一面せん断試験＠タイ発電公社

Shear plane

亜炭の供試体



圧縮段階の
実験結果



せん断段階
の実験結果

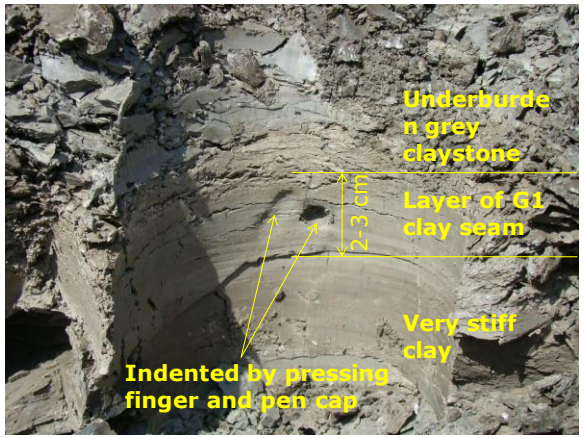
【粘土薄層のパラメター決定法に関する研究】実施：2009-2010　協働：タイ発電公社

タイ国ランパーン県

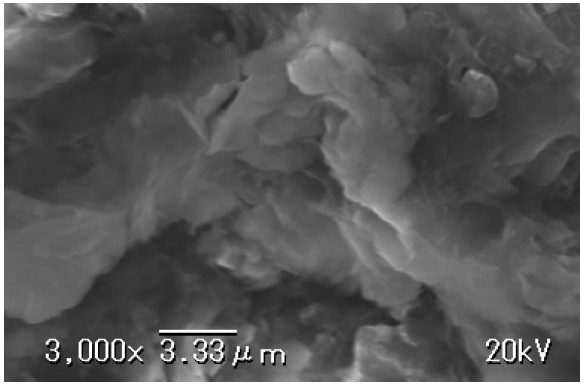
メモ炭鉱現場（採掘体積52.4億m^3）

粘土薄層に沿った地すべり

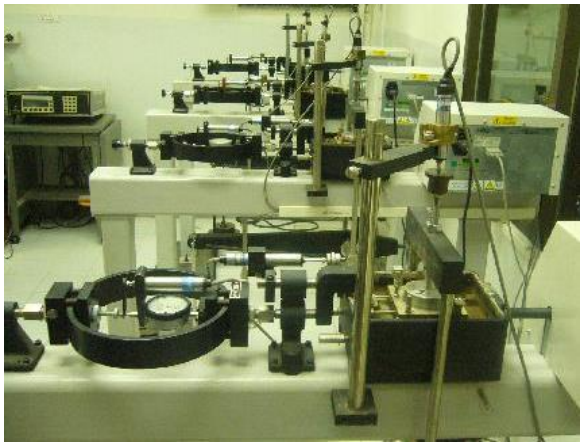
サンプル採取



粘土薄層



粘土の走査型電子顕微鏡（SEM）観察画像

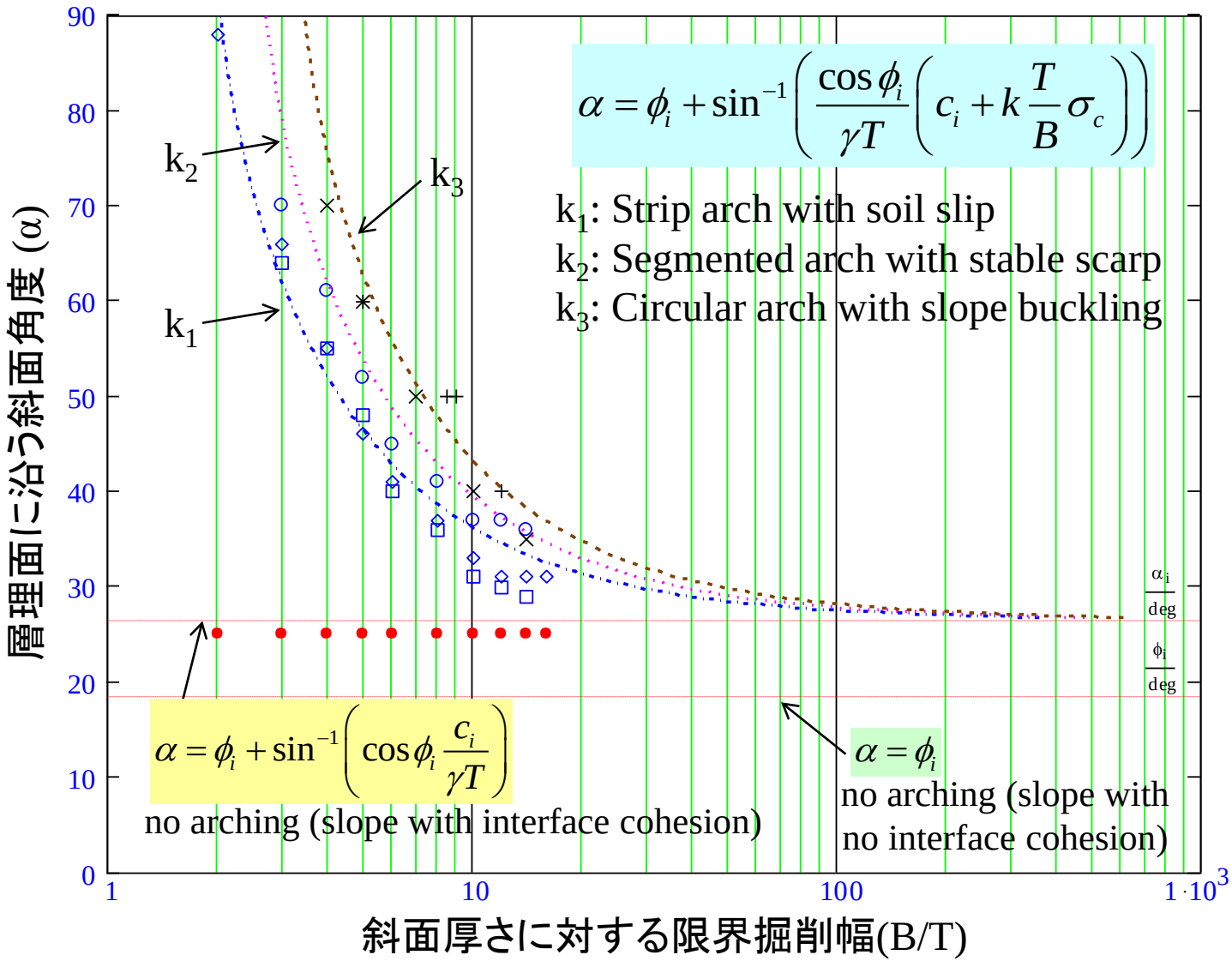


一面せん断試験機＠タイ発電公社

単純せん断＠チュラロンコン大学

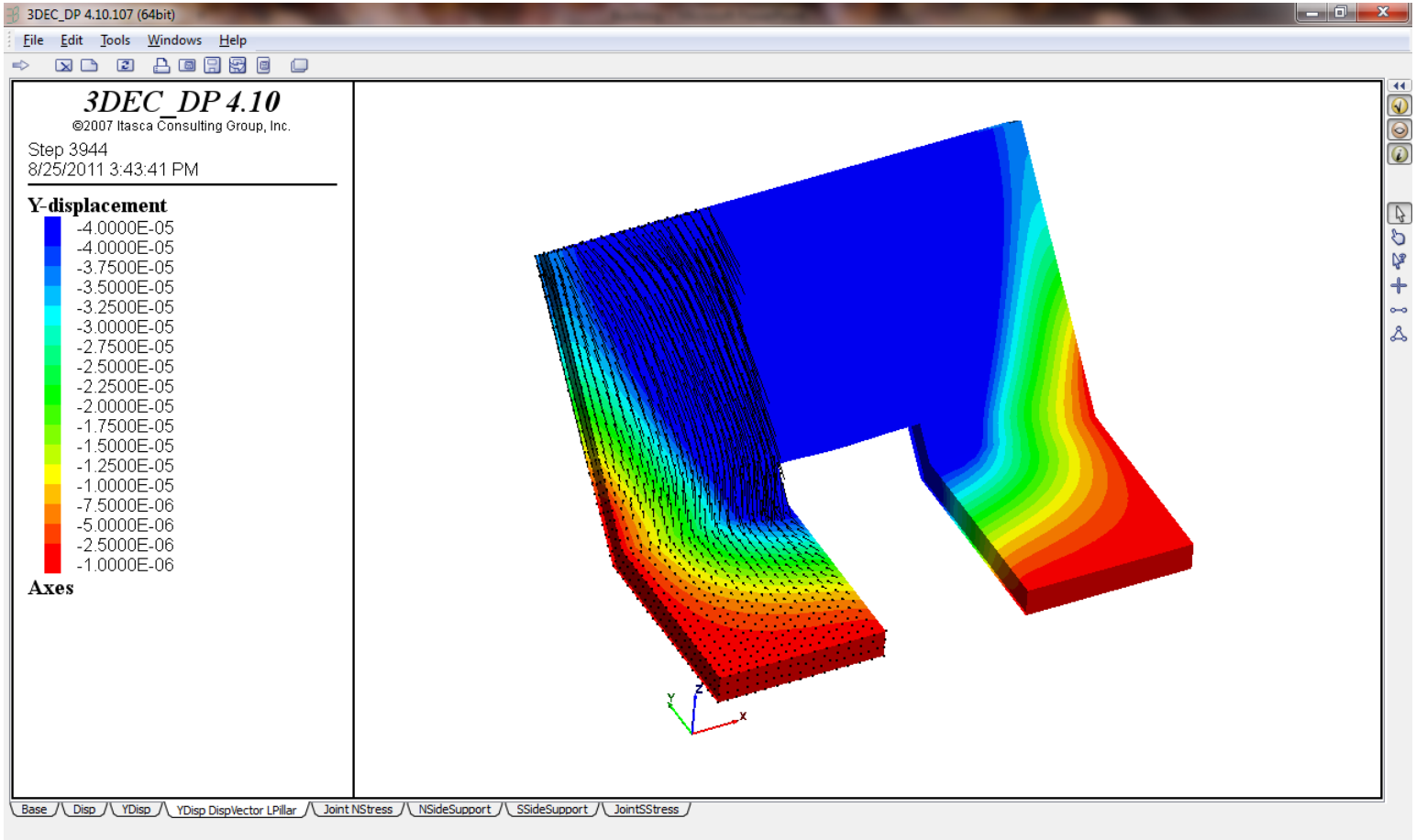
定体積一面せん断試験機＠GSIC

模型実験結果と開発した理論との比較



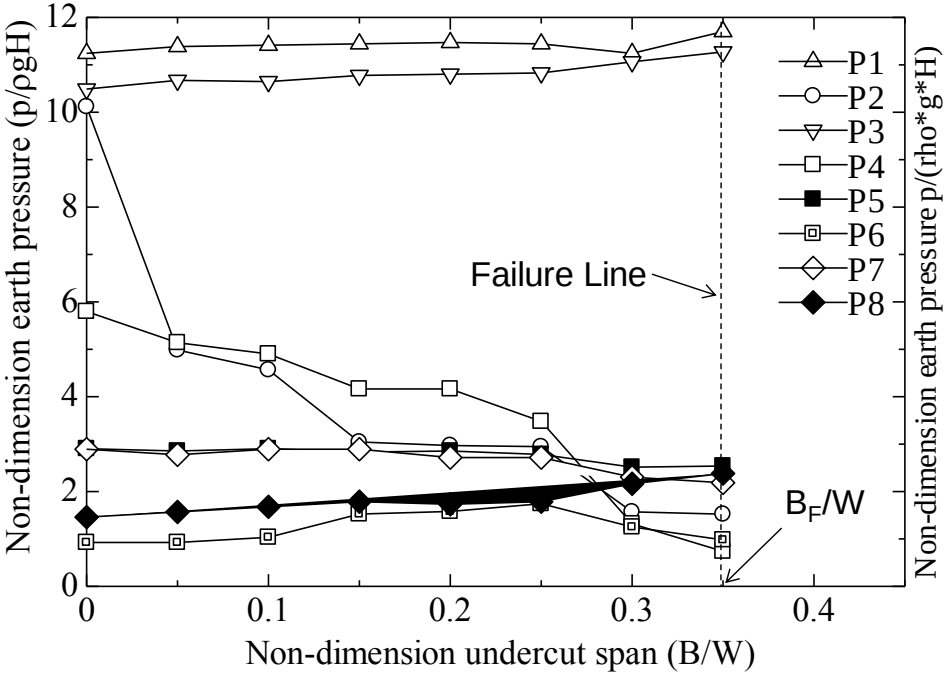
チェンマイ大学側の成果

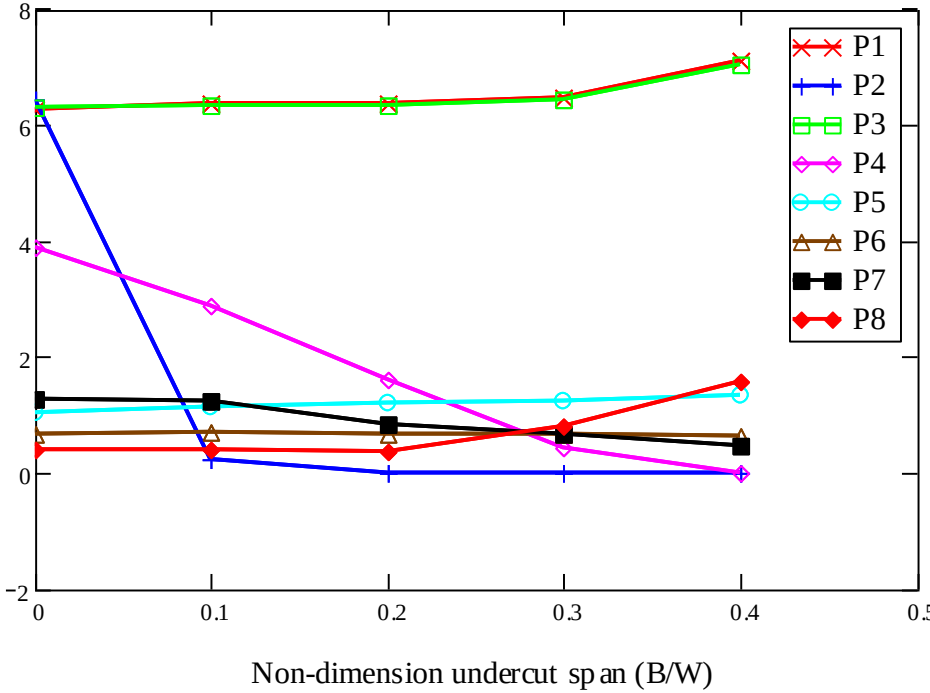
Numerical simulation based on physical model



30-cm excavated span

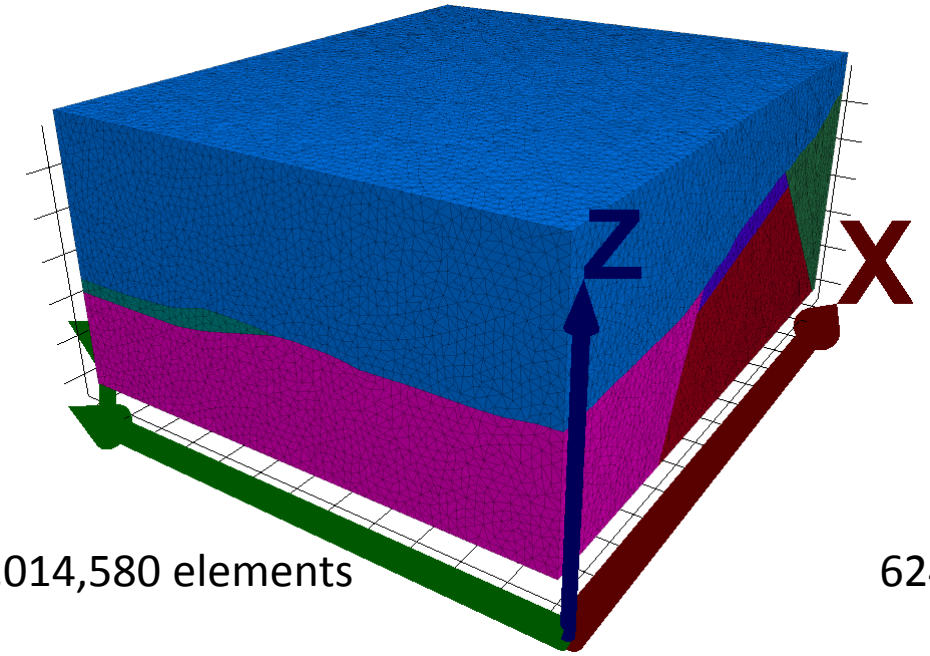
Comparison between simulation and physical model test



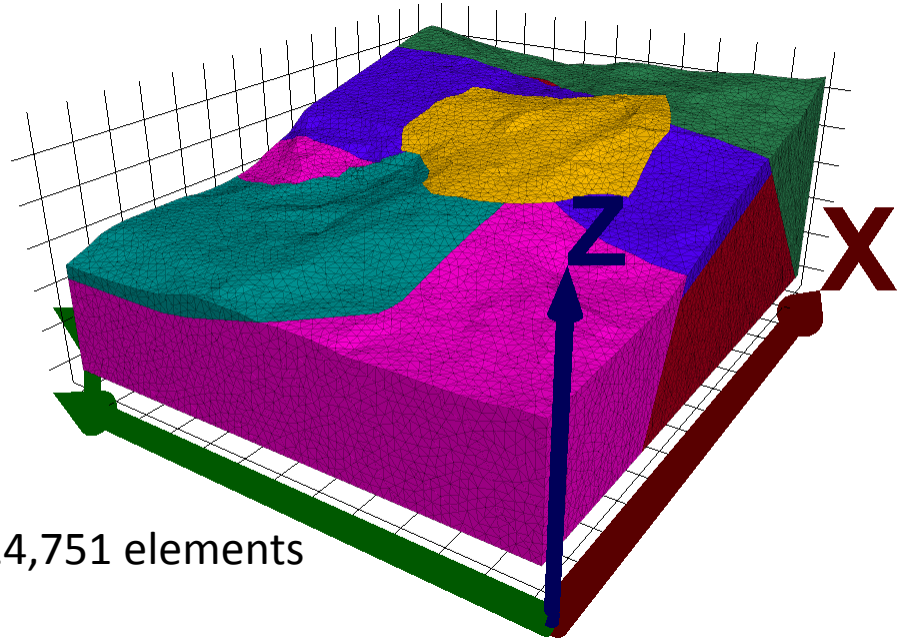


Average element edge = 10 m

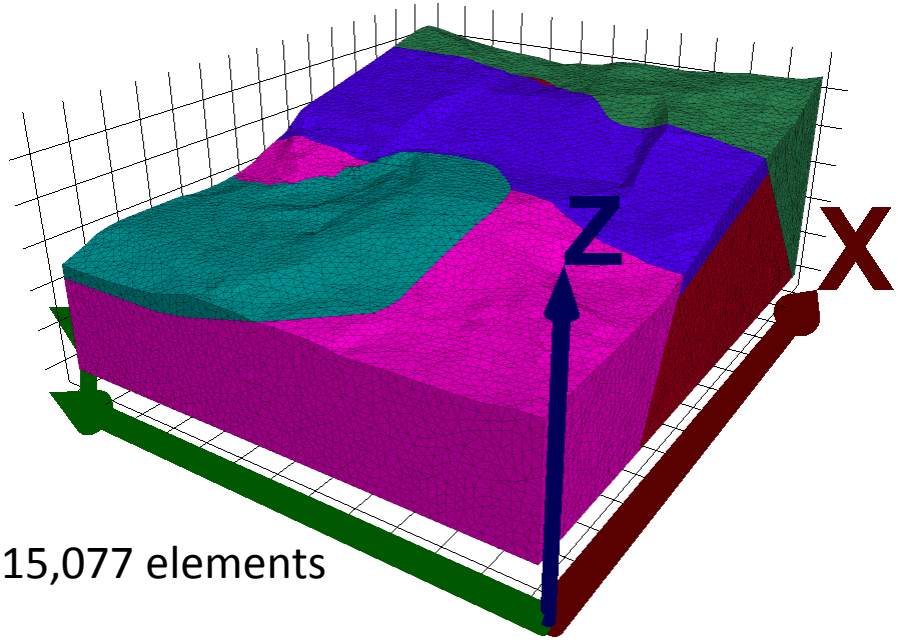
Numerical simulation of Area 4.1



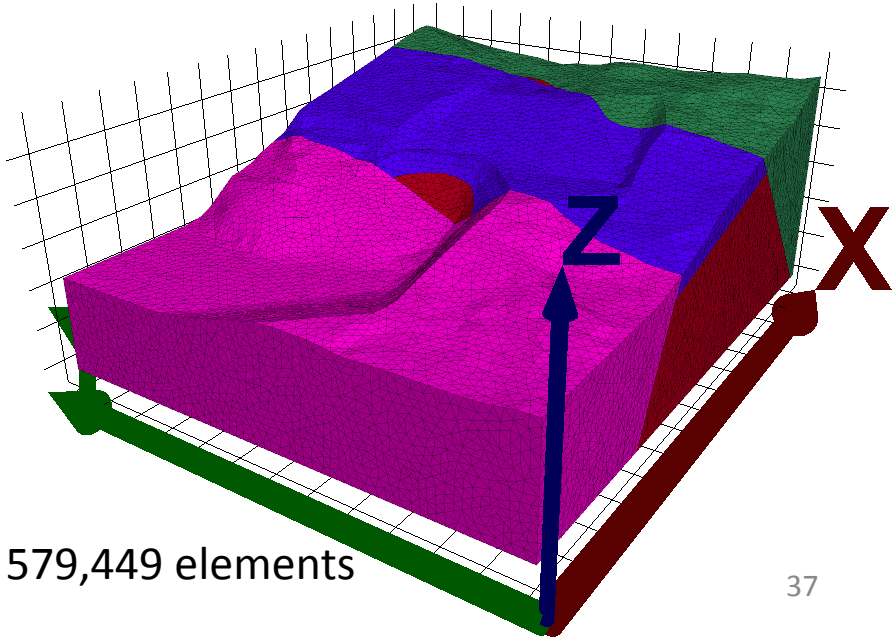
1,014,580 elements



624,751 elements

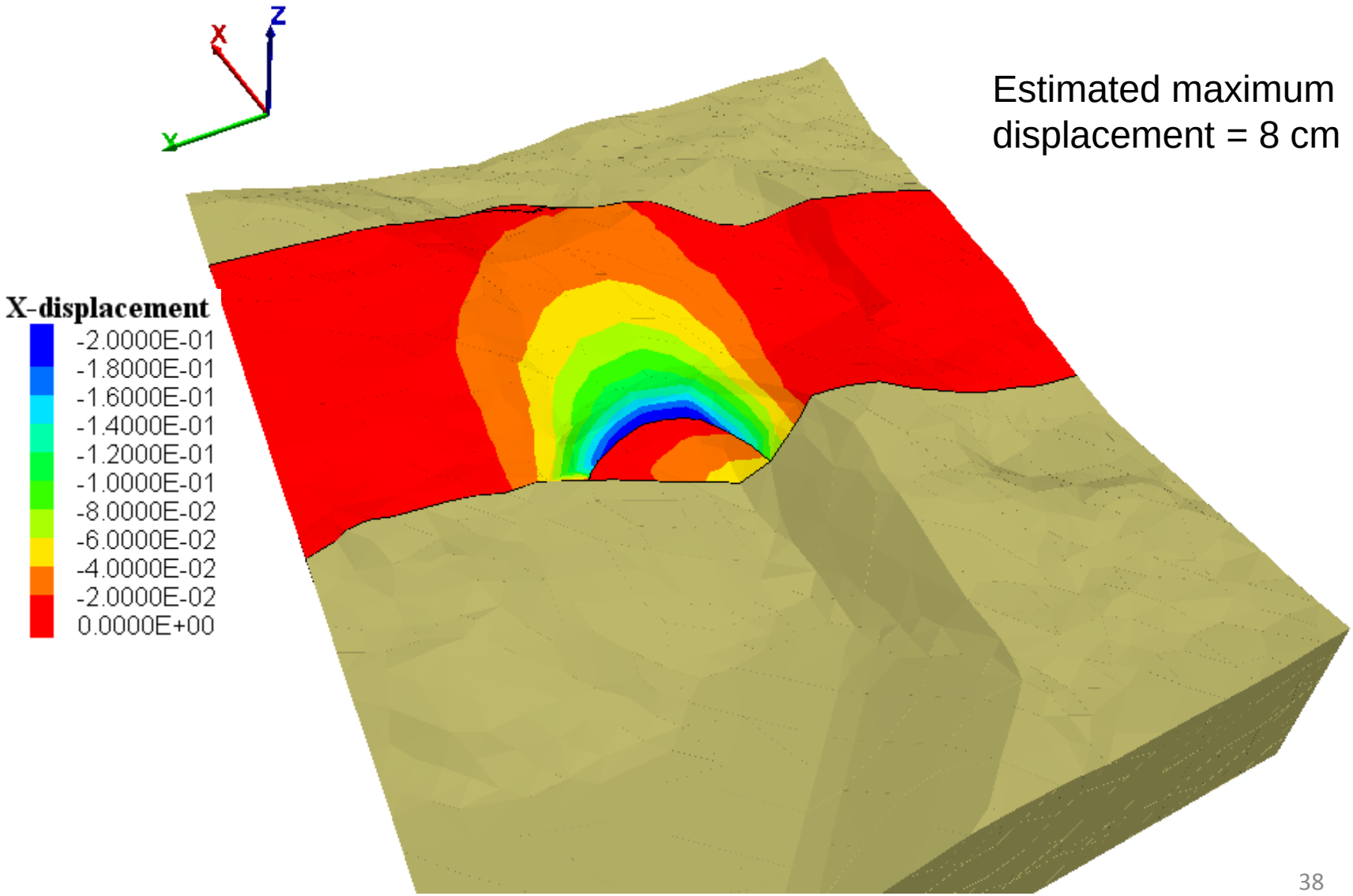


615,077 elements



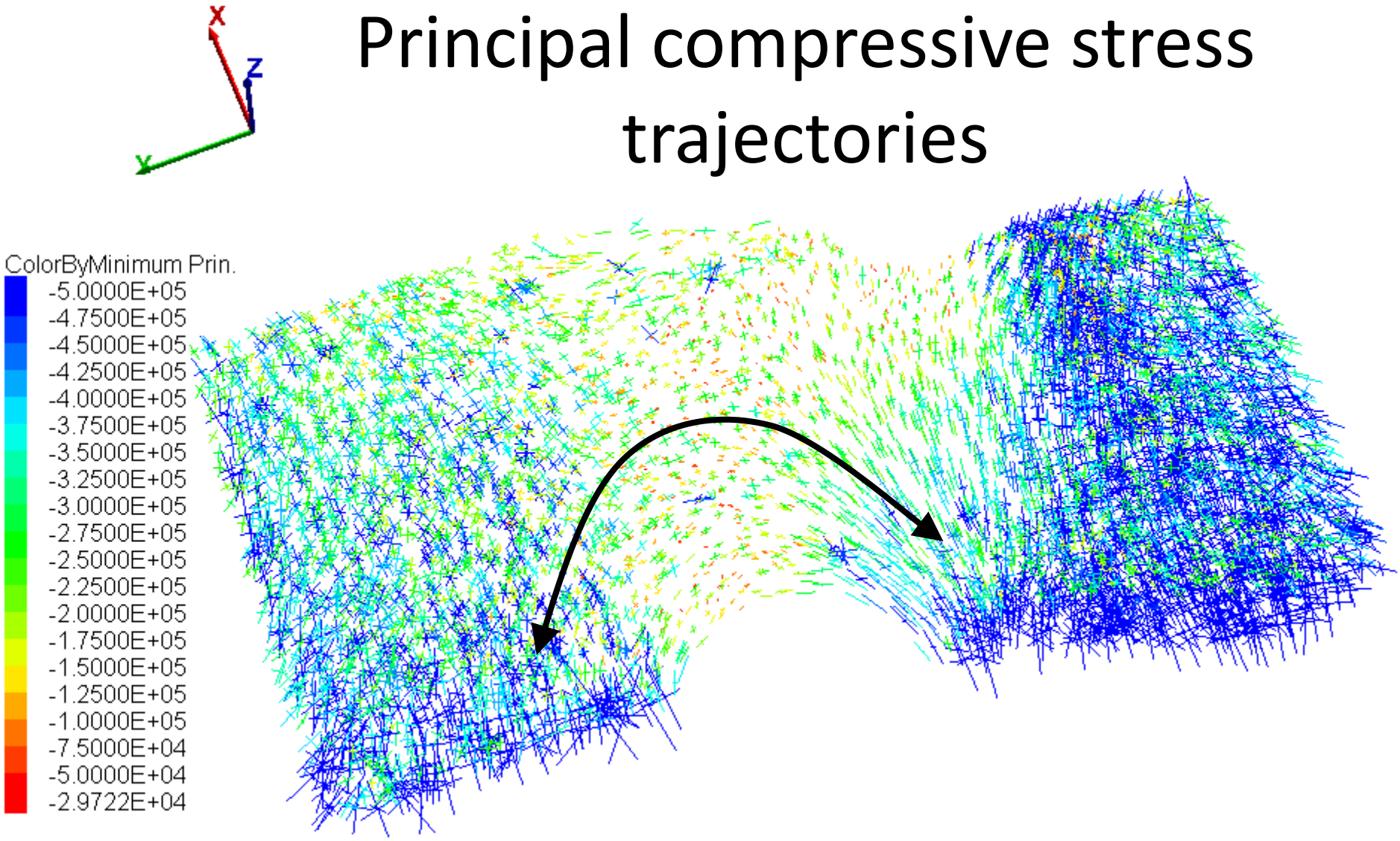
579,449 elements

Displacement

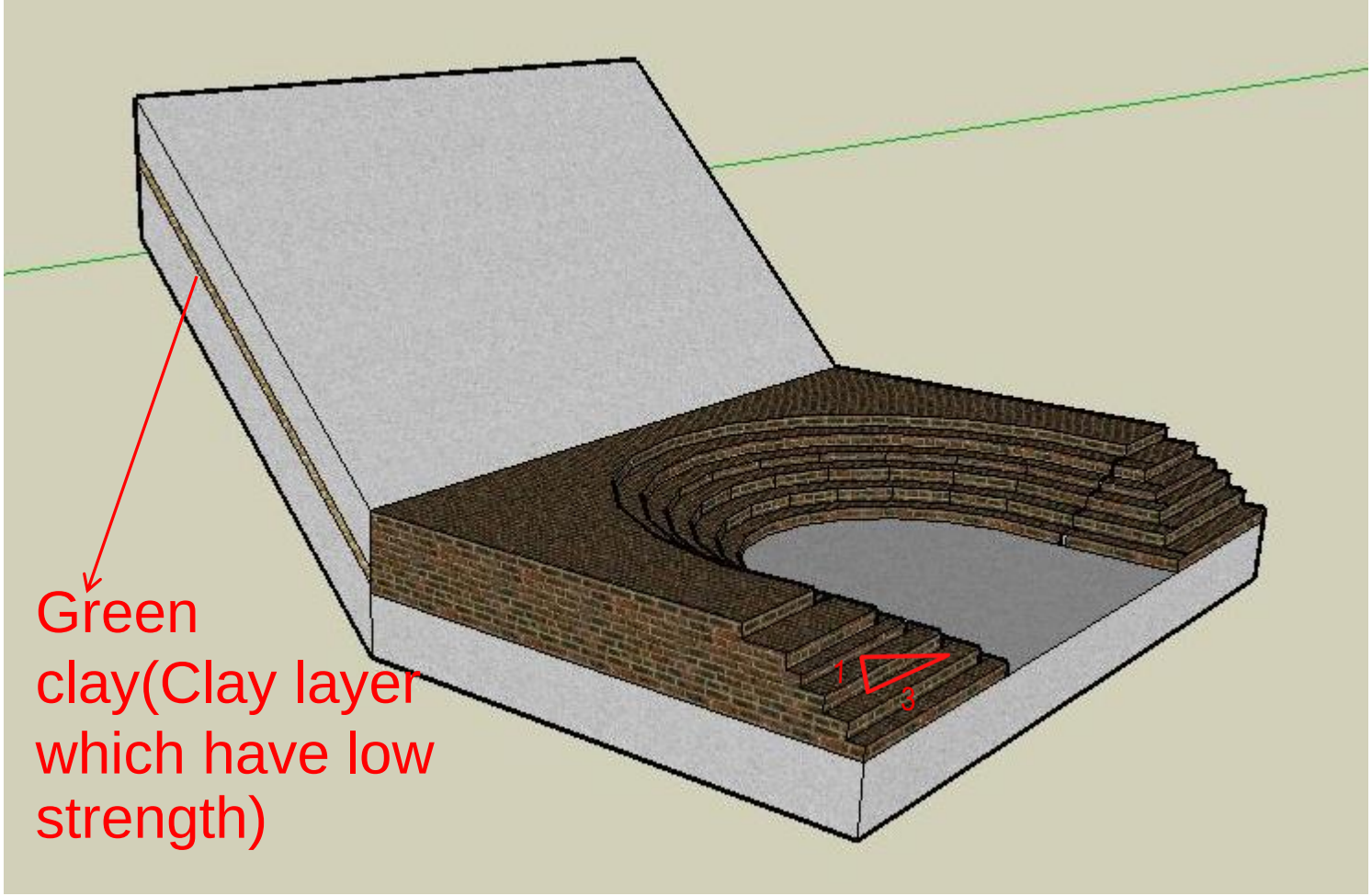


Estimated maximum displacement = 8 cm

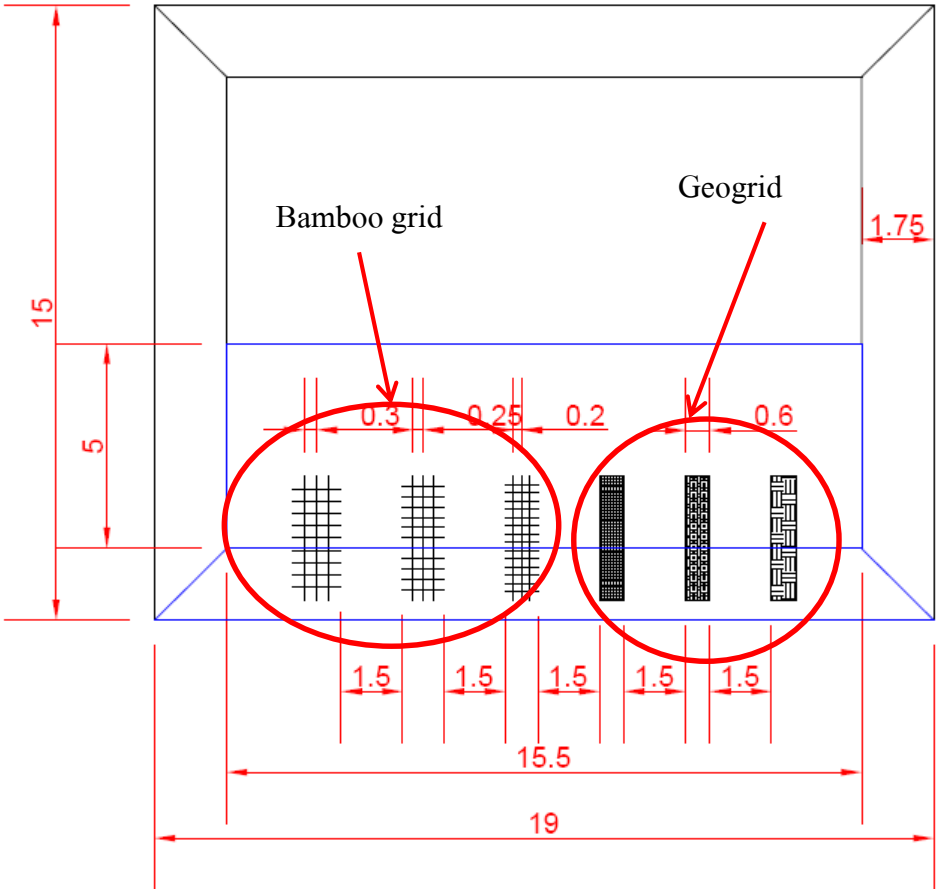
Principal compressive stress trajectories



Requirement on supporting earth



Pullout test of Bamboo & Geogrid



Bamboo grid

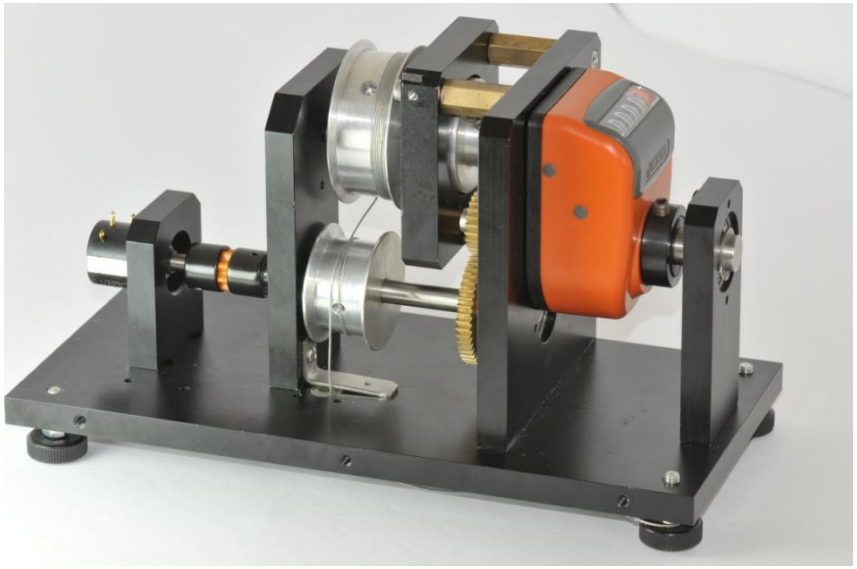
Geogrid

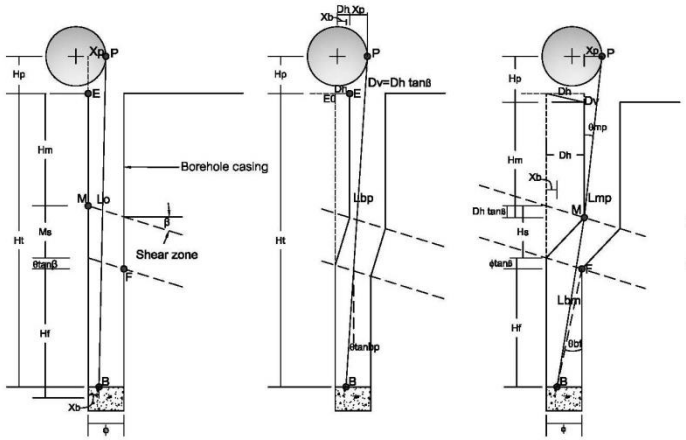
Full-scale embankment tests

カセサート大学側の成果

Slope Extensometer

Specifications of the prototype slope extensometer



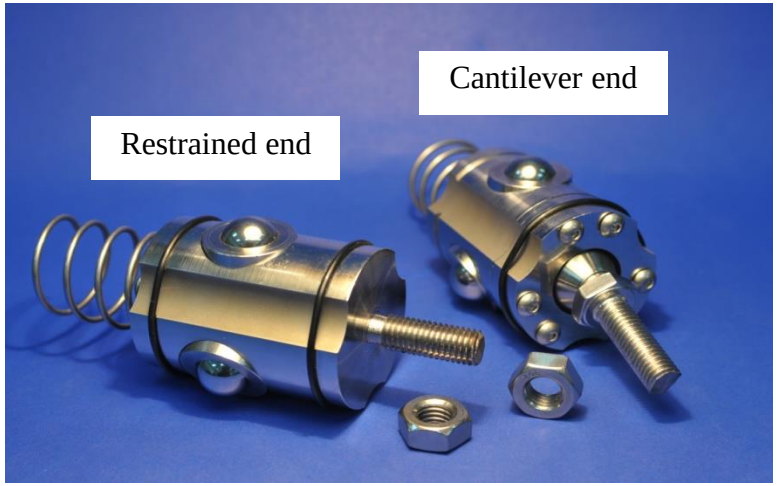


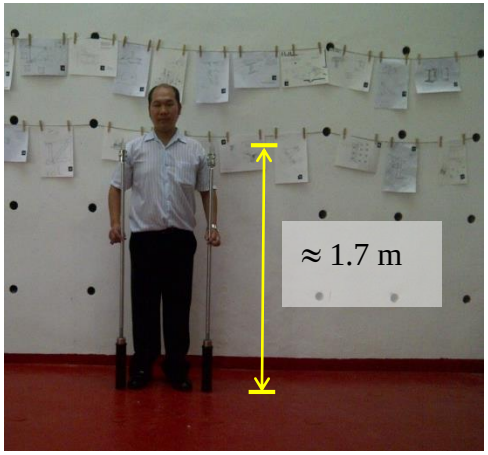
Descriptions	Size and Specification
1. Dimensions	
1.1 width x length x height	60 x 155 x 91 mm
1.2 depth of borehole	< 100 m
1.3 maximum movement	< 800 mm
1.4 display unit	mm
2. Potentiometer	
1.1 resistance	50 kΩ
1.2 maximum number of rotation	10
3. Instrument box	
3.1 size (width x length x height)	15 x 220 x 50 mm

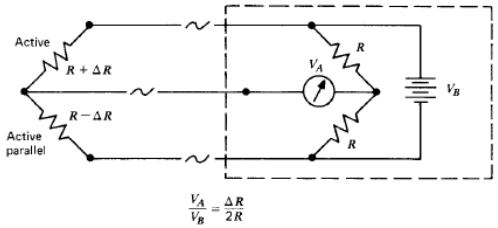
Borehole Joint Meter

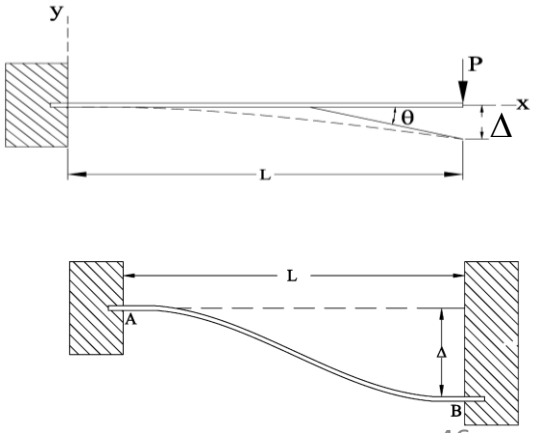
Specifications of the prototype borehole joint meter

Descriptions	Size and Specification
diameter x length	60 x 1,700 mm
diameter of steel bar	20 m
diameter of borehole	> 100 mm
depth of borehole	< 100 m
maximum movement	40 mm



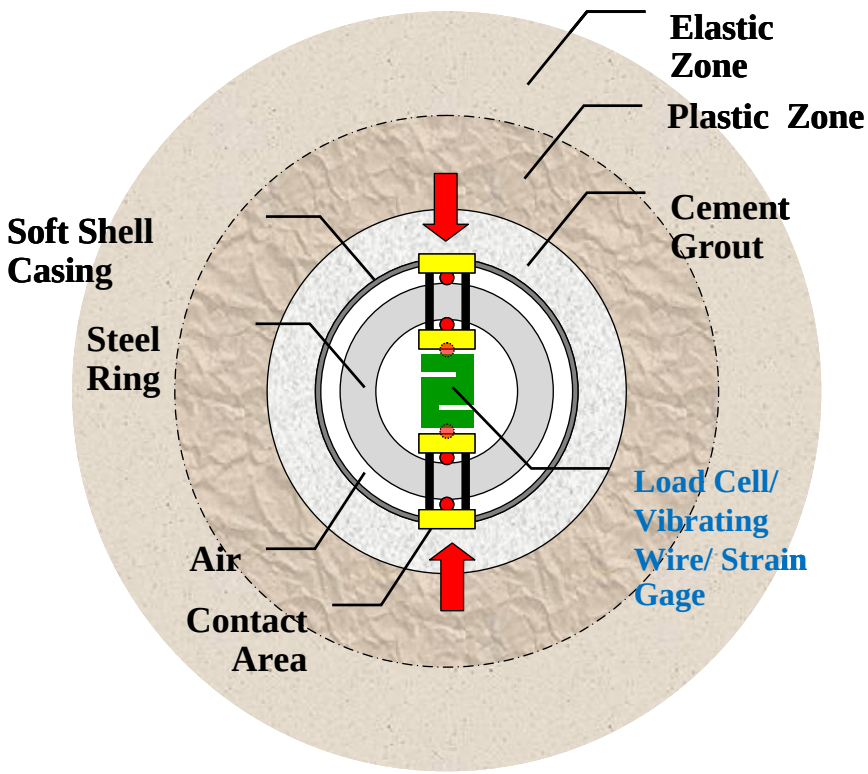




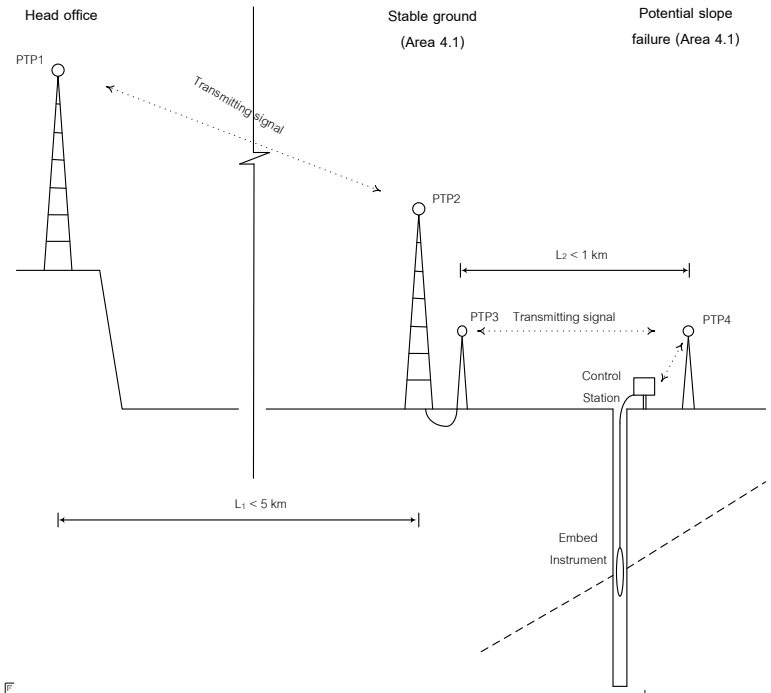


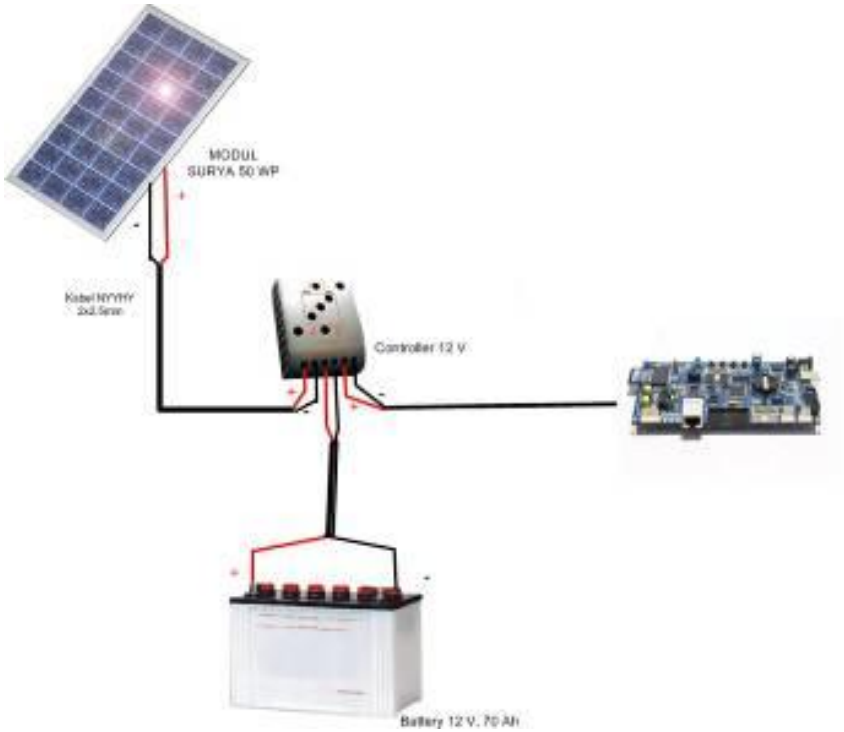
Borehole Stress Meter

The primary application of borehole stress meter is for measurement of stress change in pillar and wall along the toe slope during mining.



ICT Remote monitoring system

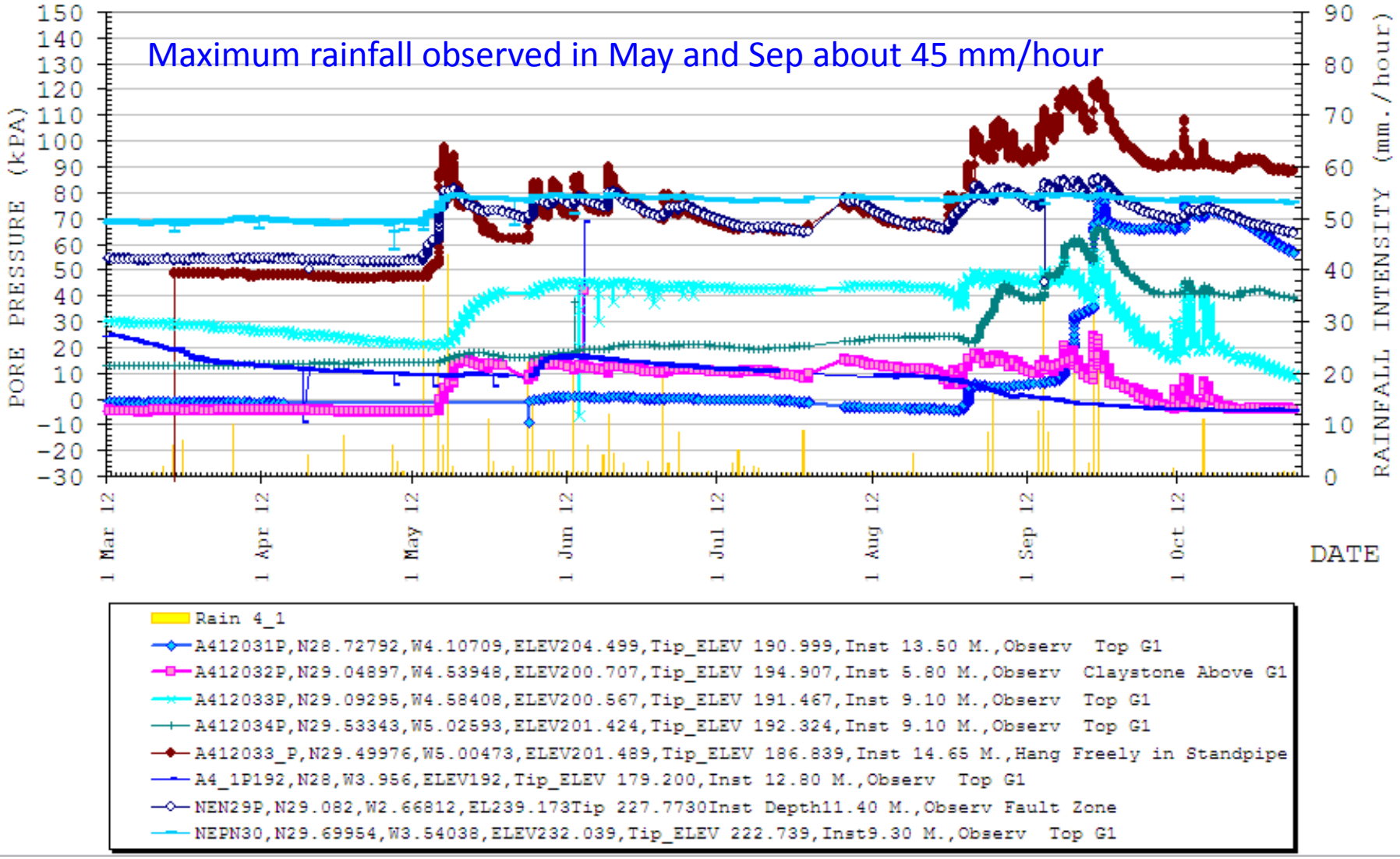




The wireless network and access points connecting between the potential slope failure area and the head office

Excavation activities in Area 4.1 in July 2011

Rainfall intensity & Pore pressure (March – October 2012)



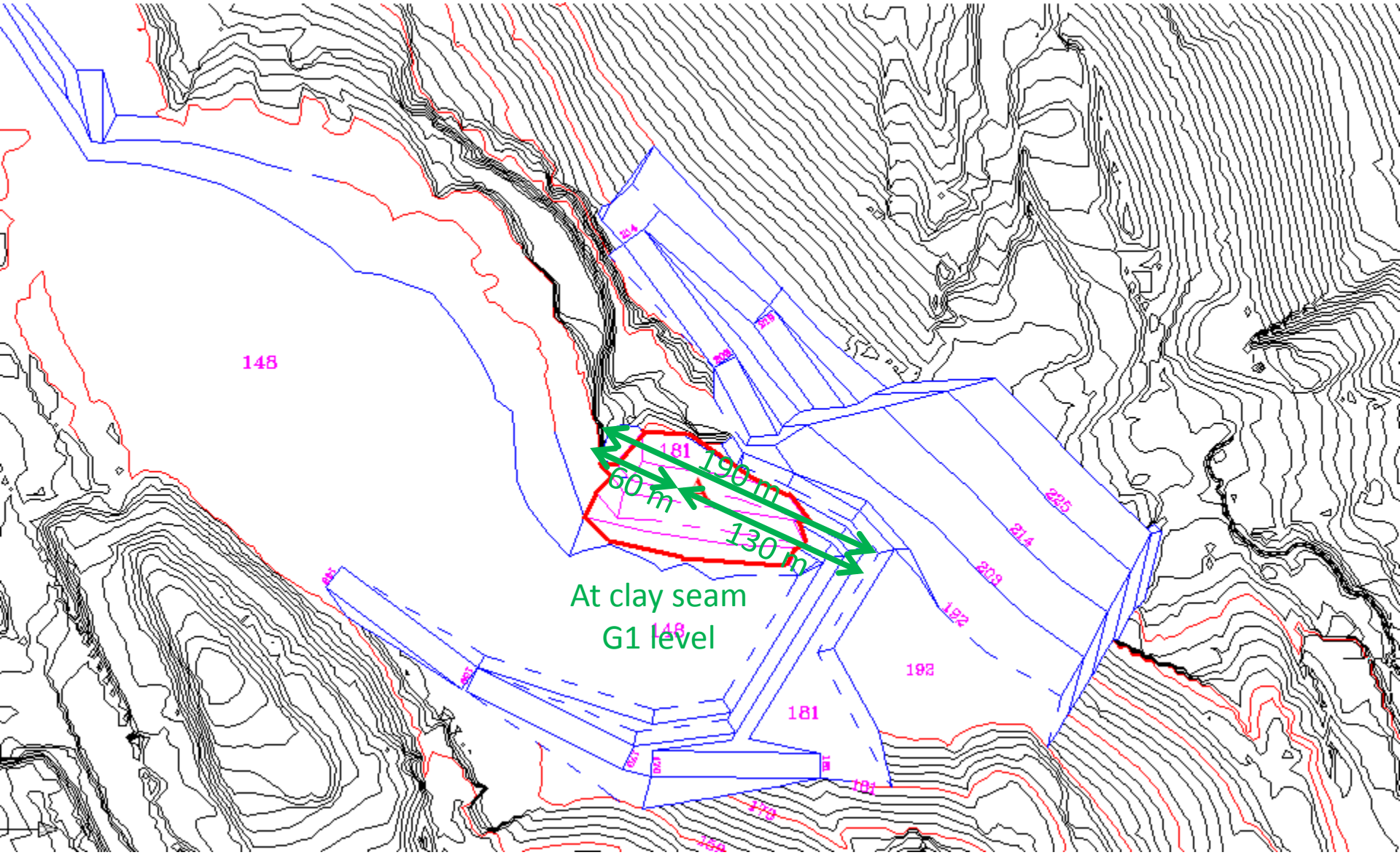
設計した安全率

Lowest factor of safety during rainy season
(submerged condition with full hydrostatic pressure)

$$FS = \frac{B_f}{B} = \frac{142\ m}{130\ m} = 1.09$$

Initial achievement with no failure for the first pit

Current mining stage (Oct 31, 2012)
Area 4.1 of Mae Moh mine

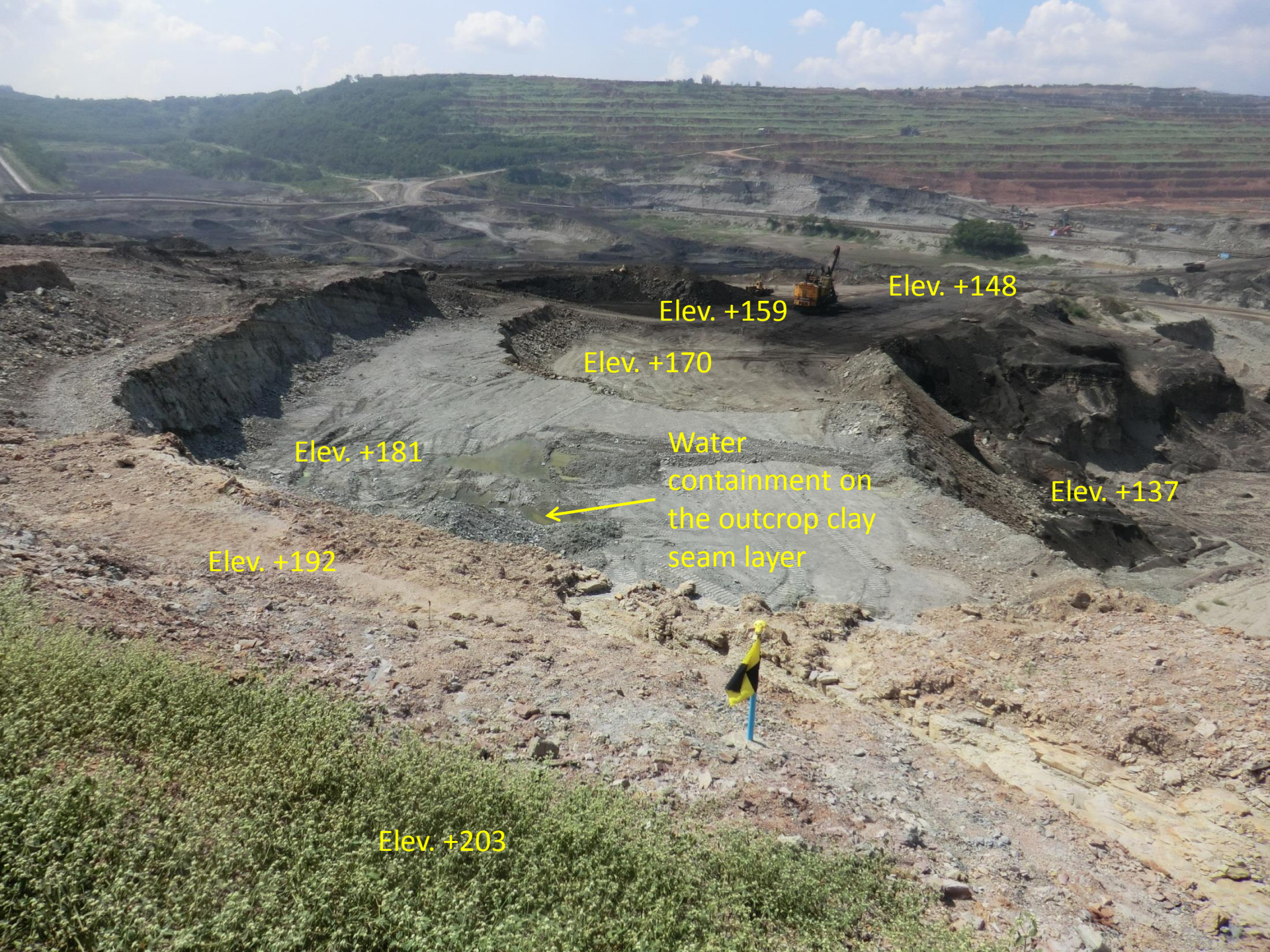


Backfill ELEV. 148-159 m

法尻掘削におけるアーチ効果を利用する採掘手法
（タイ国メモ露天掘り炭鉱の実用例）

層理面に沿う法尻の限界掘削幅を予想できた新理論
(2012年5月の掘削段階)

Excavation stage during March 28, 2012


Elev. +148
Elev. +159
Elev. +170
Elev. +181
Water containment on the outcrop clay seam layer
Elev. +137
Elev. +192
Elev. +203

Joint symposia/workshops

- Joint Symposium 2010 on Challenging Geotechnical Engineering Problems @ Headquarters of EGAT, May 4th, 2010 (9 presentations, 75 participants)
- International Symposium on Exploring New Frontiers in Coal Mining and Geo-environment @ Chiang Mai Univ., Sep 24, 2010 (11 presentations, 53 participants)
- International Symposium on Earthquake Hazard Potential and Preparedness for Safety in Coal Mining @ Maemoh, EGAT, July 22, 2011 (10 presentations, 99 participants)
- International Workshop on Groundwater Decontamination and Quality Evaluation @ Chiang Mai Univ., Sep 12, 2011 (5 presentations, 14 participants)

企業へのアプローチ⇒GSIC国際シンポジウム（2012年5月14日＠バンコク）

参加人数は，講演者9名を含む計72名であり，大学からは東工大，カセサート大学，チェンマイ大学，チュラロンコン大学，マヒドン大学，ナレスアン大学の教員および学生，行政機関からはタイ農業・協同組合省土地開発局，タイ最大の発電企業であるタイ発電公社（EGAT），企業からは石炭採掘量で世界6位につけているタイ大手企業のバンプー（BANPU）社，ラオスで埋蔵量6 億トンのリグナイト生産に参入しているホングサー（HONGSA）パワー社，タイ素材大手のサヤム・セメント・グループ(SCG)の他，材料会社，測定機器会社，コンサルタント会社などの技術者が多数参加し，成功裏に終えることができた。

オーストラリアのACGは，本研究成果について興味を示していたことで，共同研究をしたい旨の連絡があった。開発した鉱山技術が取られる懸念が考えられるため，有名な組織との共同研究より，むしろ海外企業との産学連携を直接に進ませたほうがいいと判断して，本推進支援プログラムを申請した。

ACGの設立の目的は、世界の鉱業界に教育訓練やセミナー活動を通して、採鉱学の調査研究の場を与え、最新の技術と知識を提供することにある。

ACG AUSTRALIAN CENTRE FOR GEOMECHANICS

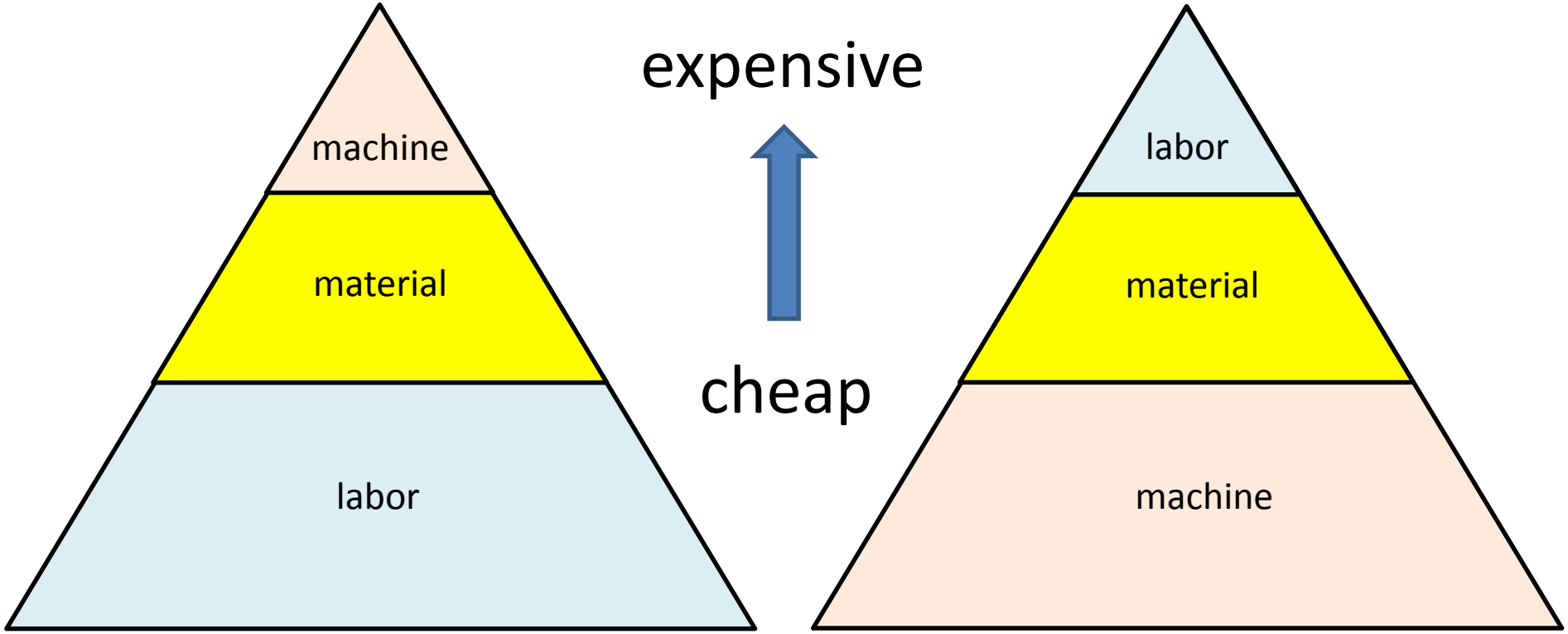
共同研究内容⇒革新的な出炭手法

露天掘り鉱山における斜面崩壊防止および合理的出炭過程のために、斜面不安定化の複合現象を把握することは重要である。本研究は、不連続面に沿った斜面の下部を掘削した場合に、上部が不安定化するメカニズムについて実験的な検討を加え、理論的に考察を行った。その成果は、層理面に沿う法尻の限界掘削幅、斜面法尻掘削時安定性について、東南アジア最大規模の露天掘り炭鉱に実用して、革新的な出炭手法の開発に成功した。

⇩

タイ発電公社・チェンマイ大学の共同研究（2009～2011年）の事例・過去国際共同研究成果

Different conditions of three components



Developing countries **Developed countries**

結論

１．日本側の基本研究は発展途上国に応用研究を適用する余地がある.

２．現地に導入技術は，精度が高いものではなくて，実現可能な技術のものである.

３．現地技術者・経営者とのコミュニケーションをうまくとる方法には，写真の力を利用することは必要.

４．同じ問題を解決するのに，他分野の協力が重要.

５．海外へ行く前，学生に英語（専門用語）および実験訓練をさせなければならない.