

# 良好な花崗岩盤中に建設される ILC加速器トンネルおよび衝突実験空洞の耐震性検討

---

2016.8.10.

白岩丈幸(岩手県)

大山寛夫(鹿島建設)京谷孝史・佐貫智行・吉岡正和(東北大学)

武内邦文(大林組)名合牧人(大成建設) 福田和寛(清水建設)

山下了(東京大学)

# ■ 発表内容

---

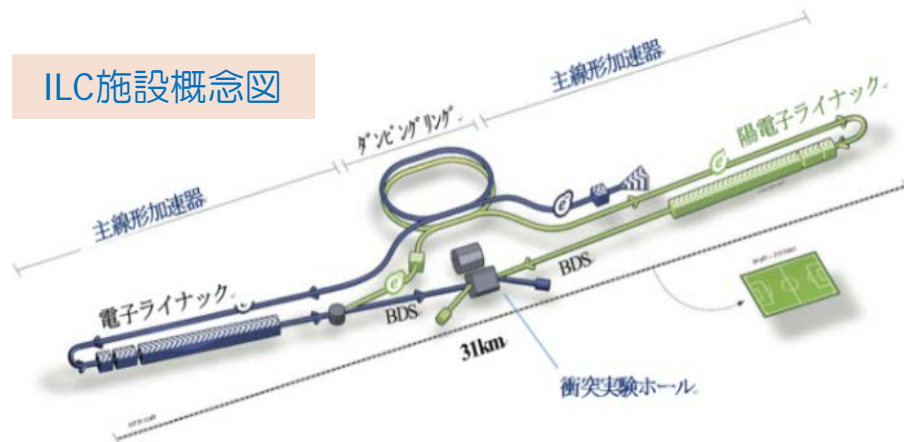
1. 研究背景と研究目的
2. ILC地下施設の概要と岩盤条件
3. 岩盤内構造物の耐震性に係る既往の知見
4. ILC地下施設耐震性評価の考え方
5. 入力地震動の設定
6. 地震被害の許容状態の定義
7. 解析対象・モデル化・解析条件
8. 加速器トンネルの耐震性評価結果
9. 衝突実験空洞の耐震性評価結果
10. まとめと今後の課題

# ■研究背景と研究目的

## 研究背景

- ◇国際リニアコライダー計画（ILCと呼ぶ、下図参照）は、2013年に技術設計報告書（TDR）がまとめられ、わが国に立地する場合には岩手県の北上山地が最適であると科学コミュニティが推薦
- ◇文科省が日本学術会議に依頼した所見では、政府において2～3年かけて審議すべきとなり、その有識者会議の中間とりまとめでは次の1項目を記載  
「ILC計画は建設・運転等が長期間にわたるものであり、**想定される地震の規模に応じた耐震設計およびそれに応じたコスト検討等のリスクの検討、対応策の検討**を詳細に行うことが必要である」

ILC施設概念図



## 研究目的

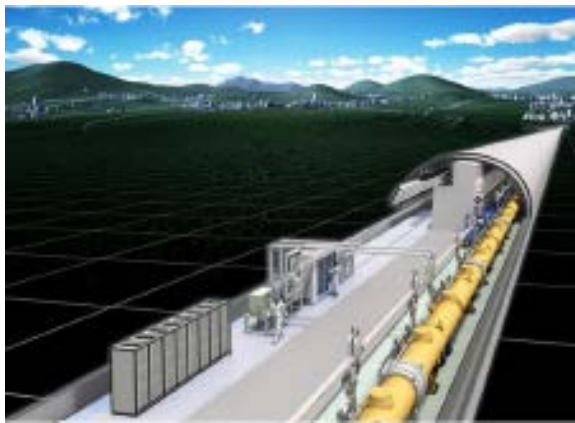
ILCをわが国に立地する場合の有望候補地である北上山地の良好な花崗岩体中に設置する加速器トンネルおよび衝突実験空洞を対象として、その地震時の耐震性能について概略的に検討

# ■ ILC地下施設の概要と岩盤条件

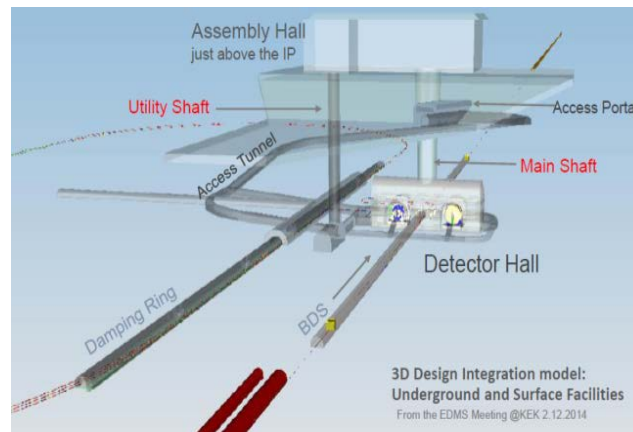
## ILC地下施設の概要

- ◇ 加速器トンネルは幅員9.5m×高さ5.5程度で、総延長は約31km（I期計画）
- ◇ 衝突実験空洞はアーチスパン27m×高さ42m×長さ108m程度で、立坑とともに周辺にトンネル群等を設置

加速器トンネル概念図



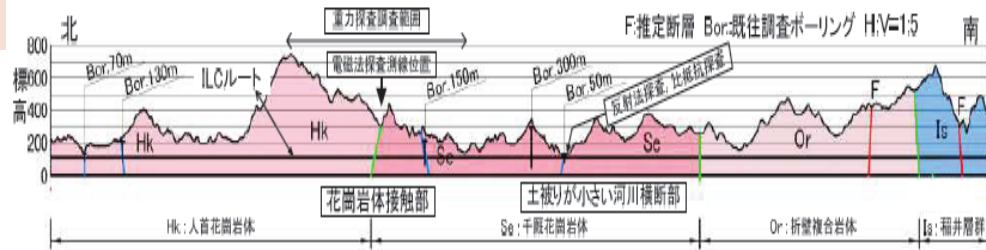
衝突実験空洞概念図



## 岩盤条件

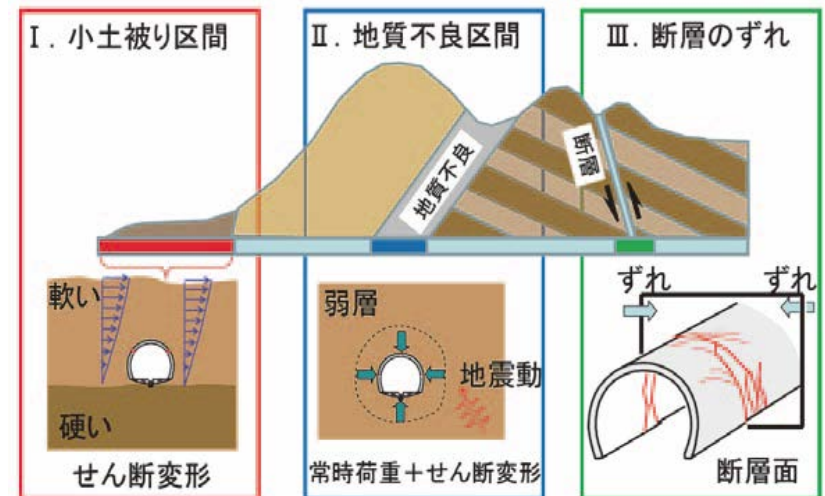
ILC本体施設設置周辺の岩盤条件はVpが4.5~5.0km/s程度の良好な花崗岩盤

地質縦断図



# ■ 岩盤内構造物の耐震性に係る既往の知見

① 良好な地山中のトンネルへの地震影響は、地表に対して地下地震動が半分以下である観測結果が多くあり、また、トンネル標準示方書でも「良好な地山中に建設されるトンネルは原則として地震の影響を考慮する必要はない」とされている。ただし、地質不良部や断面急変部等に対する配慮は個別に必要な場合もあり、野城らがまとめたトンネル構造物の典型的な地震被害の発生パターンを右図に示す。



朝倉ら(2000)より

- ② 海溝型巨大地震であった2011.3.11の東北地方太平洋沖地震の際には、北上地域でも大きな地震動が発生したが、基本的にはトンネルの地震被害は報告されていない。
- ③ 内陸近傍活断層による直下型地震であった兵庫県南部地震や新潟県中越地震では、地表構造物は最大震度7程度で大きな被害を受けたが、トンネルについては覆工の剥落等は生じたが大きな崩壊等は生じていない。

## ■ ILC地下施設耐震性評価の考え方

---

- ①本検討の目的は、概略的ながらも定量的解析評価を実施し、耐震性影響評価に一定の見通しをつけることである。したがって、原子力分野の耐震設計のような詳細ではなく、また、入力地震動も明確な根拠をもって設定しない。
- ②検討対象は良好な花崗岩中の加速器トンネルと衝突実験空洞とする。なお、小土被りの坑口部、地質不良部・地質急変部、空洞との接続部、立坑等については、地点が決定した後の設計で対応すべきと考える。
- ③ILC運用の実際では地震影響が全くない設計は現実的でなく、トンネル覆工の一部にひび割れ等が入っても修繕しながら運転を継続する。そこで、今回の定量的解析評価のためにILC施設での地震被害の許容状態を定義する。

# ■入力地震動の設定（1）

## 土木学会の耐震基準に関する提言

- ◇レベル1地震動：供用期間中に1～2度の発生確率→地震影響なし（弾性設計）
- ◇レベル2地震動：発生確率は低いが直下型地震または海溝型巨大地震→耐震性能は構造物の重要度を考慮して設定（終局設計）

## 高圧ガス設備指針によるレベル2地震動設定

$$K_H = 0.150 \mu_k \beta_1 \beta_2 \beta_3 \quad (1)$$

$$K_V = 0.075 \mu_v \beta_1 \beta_2 \beta_3 \quad (2)$$

ここに、 $K_H$ ：地表面における地震動の水平震度

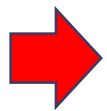
$K_V$ ：地表面における地震動の鉛直震度

$\mu_k$ ：地震動レベルに基づく係数（レベル2の場合、 $\mu_k=2.0$ 、 $\mu_v=1.0$ ）

$\beta_1$ ：重要度係数=1.0（最大値）

$\beta_2$ ：地域係数=0.8（岩手県全域）

$\beta_3$ ：表層地盤増幅係数=1.4（第1種地盤）



北上地域におけるレベル2地震動は、地表水平最大加速度で約340gal、地表鉛直最大で約90gal

# ■入力地震動の設定（2）

## 北上地域における地震観測結果

防災科研の強震地震網（KiK-net）によれば、北上地域近傍では右図の東和と藤沢観測点の地表と地下100mに地震計を設置

- 両地点ともVpが約5.0km/s程度の良い花崗岩（下図参照）
- ここ約20年の強震記録のうち最大は2011.3.11の東北地方太平洋沖地震（下表参照）

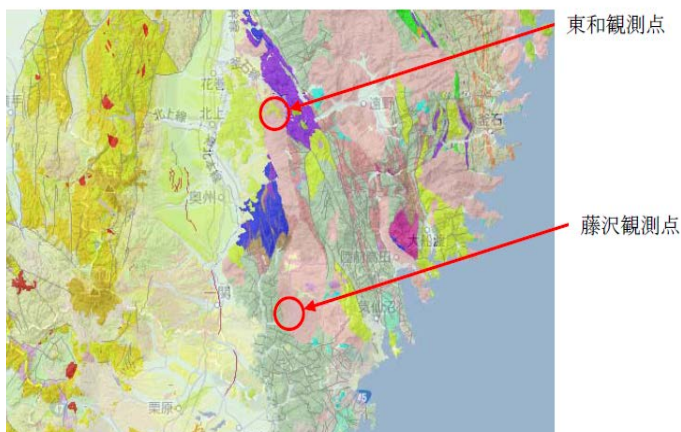
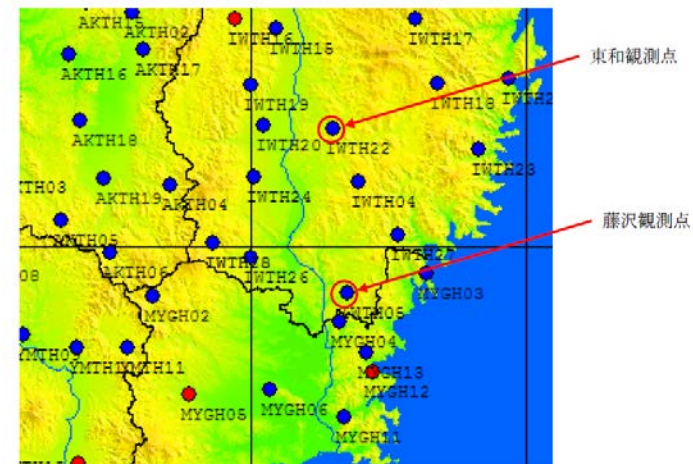


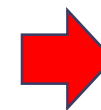
表-3.5 北上地域東和観測点の地表、地下最大加速度比較

| 地震名            | 観測点<br>設置深度(m) | 観測点                           |                           | 地下最大加速度/<br>地表最大加速度 |
|----------------|----------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------|
|                |                | IWTH22<br>地下地震計最大<br>加速度(gal) | 東和<br>地表地震計最大<br>加速度(gal) |                     |
| 三陸沖地震          | -100           | 0                             |                           |                     |
| 三陸沖地震          | 0              | 31.1                          | 107.1                     | 0.290               |
| 宮城県沖地震(2011年)  | 0              | 21.5                          | 93.8                      | 0.229               |
| 東北地方太平洋沖地震(余震) | 0              | 63.8                          | 321                       | 0.199               |
| 東北地方太平洋沖地震     | 0              | 73.2                          | 324.9                     | 0.225               |
| 岩手県沿岸北部地震      | 0              | 31.7                          | 252.3                     | 0.126               |
| 岩手・宮城内陸地震      | 0              | 41.7                          | 234.5                     | 0.178               |
| 宮城県沖地震(2005年)  | 0              | 19.3                          | 119.7                     | 0.161               |
| 宮城県北部地震(2003年) | 0              | 9.55                          | 67.01                     | 0.143               |
| 三陸南地震          | 0              | 64                            | 261.4                     | 0.245               |
| 岩手県内陸南部地震      | 0              | 20.5                          | 157.1                     | 0.130               |

表-3.6 北上地域藤沢観測点の地表、地下最大加速度比較

| 地震名            | 観測点<br>設置深度(m) | 観測点                           |                           | 地下最大加速度/<br>地表最大加速度 |
|----------------|----------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------|
|                |                | IWTH05<br>地下地震計最大<br>加速度(gal) | 藤沢<br>地表地震計最大<br>加速度(gal) |                     |
| 三陸沖地震          | -100           | 0                             |                           |                     |
| 三陸沖地震          | 0              | 14.5                          | 87.2                      | 0.166               |
| 宮城県沖地震(2011年)  | 0              | 13.8                          | 96.8                      | 0.143               |
| 東北地方太平洋沖地震(余震) | 0              | 158.1                         | 836.2                     | 0.189               |
| 東北地方太平洋沖地震     | 0              | 158.7                         | 654.7                     | 0.242               |
| 岩手県沿岸北部地震      | 0              | 46.7                          | 318.8                     | 0.153               |
| 岩手・宮城内陸地震      | 0              | 51.2                          | 211.3                     | 0.242               |
| 宮城県沖地震(2005年)  | 0              | 61.3                          | 237.7                     | 0.258               |
| 宮城県北部地震(2003年) | 0              | 31.9                          | 130                       | 0.245               |
| 三陸南地震          | 0              | 101                           | 570.6                     | 0.177               |
| 岩手県内陸南部地震      | 0              | 18.3                          | 134.7                     | 0.136               |

地表水平最大加速度は  
654.7gal、  
地下100m  
の水平最大  
加速度は  
158.7gal



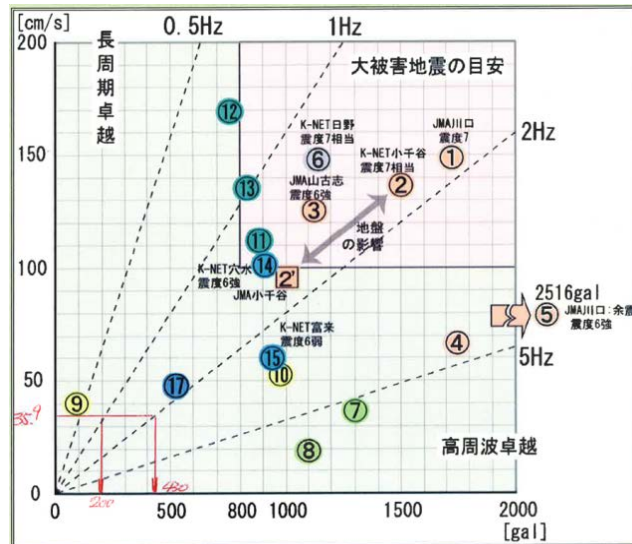
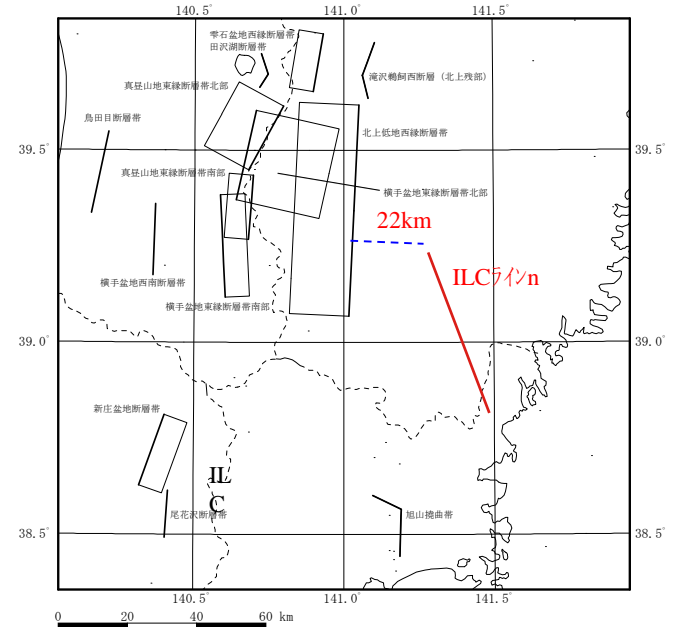


# ■入力地震動の設定（3）

## 近傍活構造に基づく設計地震動

北上周辺の活断層分布（右図参照）によれば、ILC地点に最も近いのは北上低地西縁断層帯で、長さは約61.1km、最短距離は約22km

- レベル2地震動の推定値はM7.8、地表水平最大速度は35.9cm/s（司・翠川による）
- 最大水平速度と最大加速度の関係（下図参照）から、レベル2の最大水平加速度を推定



→ 地表水平最大加速度は約200~430gal

# ■入力地震動の設定（４）

## 入力地震動の設定シナリオ

- 3種類の方法で北上地域におけるレベル2最大地震動を概略推定した結果、最大加速度となるのは2011.3.11の東北太平洋沖地震による強震記録波となり、その地表水平最大加速度としては約655gal
- 安全側として、この地震波を入力地震動として採用
  - その地下100mの水平最大加速度は158.7gal、上下最大加速度は76.7gal
  - 具体的な入力地震動を決定（下図参照）

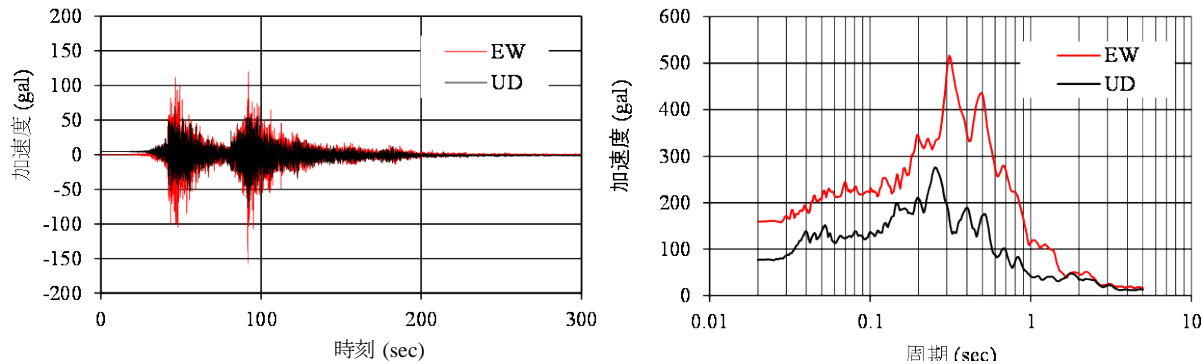
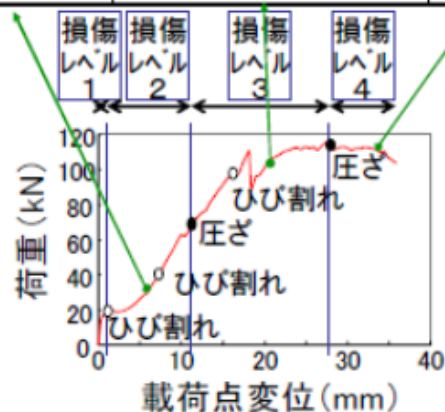


図-3.11 入力地震動(E+F)の時刻歴(左)と加速度応答スペクトル(右、h=5%)

# ■地震被害の許容状態の定義

## 土木学会のILCガイドライン

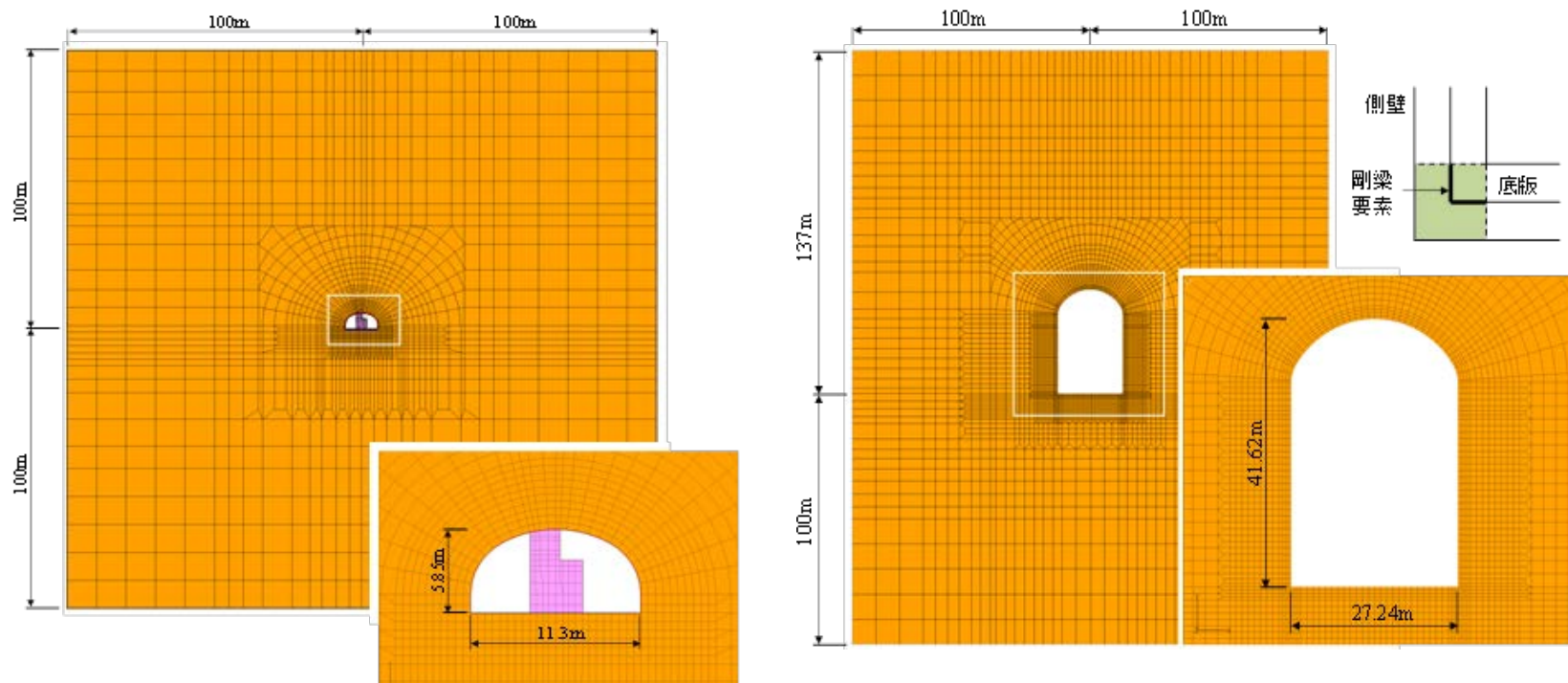
- ◇レベル2地震動に対して覆工の**損傷レベル3**（下図参照）まで許容
- ◇コンクリート破壊が1ヶ所までは崩落しないため許容するが、**圧ざ破壊が2ヶ所以上は覆工崩落の可能性**があるため許容しない



既存の実験結果  
による荷重～変  
位曲線

# ■解析対象・モデル化・解析条件（1）

- ◇良好な花崗岩盤中に掘削された加速器トンネルと衝突実験空洞を2次元FEMでモデル化（下図参照）、加速器トンネルの遮蔽壁の厚さは3.5mの場合と、安全側を考慮して遮蔽壁なしの場合
- ◇加速器トンネルの覆工厚さは30cmとし梁要素でモデル化、衝突実験空洞の吹付コンクリート厚さ24cmおよび覆工厚さ1.0mは梁要素でモデル化



## ■解析対象・モデル化・解析条件（2）

◇解析コードは耐震解析では実績の多いSuperFLUSHとし、境界条件としては底面は粘性境界、両側面はエネルギー伝達境界、上面は地表として自由境界

◇岩盤物性とコンクリート物性を以下に提示

### 岩盤物性

| 単位体積重量<br>kN/m <sup>3</sup> | $V_p$<br>km/sec | $V_s$<br>km/sec | $\nu_d$ | $G$<br>MPa | $h$<br>% |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|---------|------------|----------|
| 25.99                       | 5.2             | 3.0             | 0.247   | 23,850     | 3.0      |

### コンクリート物性

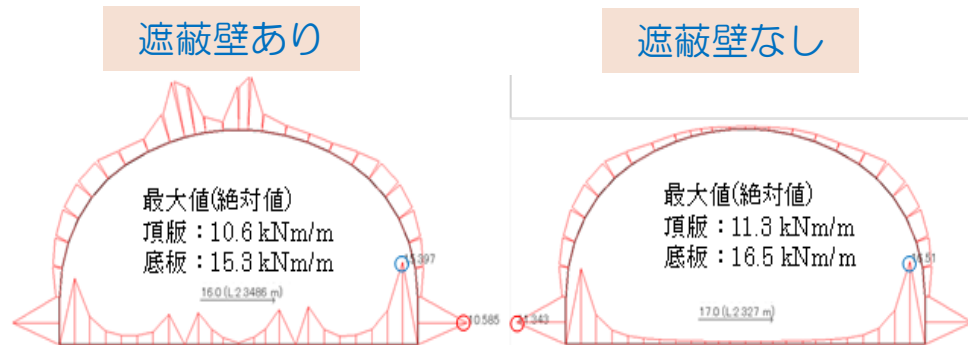
| 部位      |    | $\gamma$<br>kN/m <sup>3</sup> | $E$<br>MPa | $\nu_d$ | $H$<br>% | 厚さ m   |     |
|---------|----|-------------------------------|------------|---------|----------|--------|-----|
|         |    |                               |            |         |          | アーチ/側壁 | 底版  |
| 加速器トンネル | 覆工 | 24                            | 25,000     | 0.2     | 5.0*     | 0.3    | 0.4 |
| 衝突実験空洞  | 覆工 | 24                            | 25,000     | 0.2     | 5.0*     | 1.0    | 1.0 |
|         | 吹付 | 24                            | 29,800     | 0.2     | 5.0*     | 0.24   | —   |

# ■ 加速器トンネルの耐震性評価結果

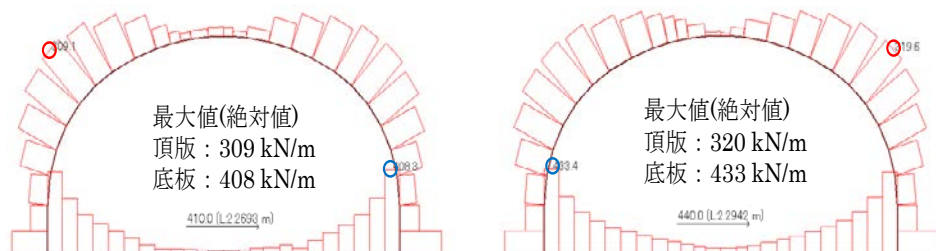
◇ 加速器トンネルの覆工に生じる部材の最大曲げモーメントと軸力の分布（下図参照、時系列無視）

◇ 覆工の応力評価結果（下表参照）

覆工の最大曲げモーメント分布



覆工の最大軸力分布



覆工の応力評価

|                 | 遮蔽壁あり  |       | 遮蔽壁なし  |        |
|-----------------|--------|-------|--------|--------|
|                 | 覆工     | 床板    | 覆工     | 床板     |
| M (kNm/m)       | 10.59  | 14.56 | 10.55  | 14.87  |
| N (kN/m)        | 231.75 | 408.3 | 268.11 | 433.45 |
| $\sigma$ (MPa)  | 1.48   | 1.57  | 1.60   | 1.64   |
| $f_{ck}/\sigma$ | 16.2   | 15.3  | 15.0   | 14.6   |



覆工の最大応力が設計基準強度の1/15程度で十分健全と評価

# ■ 衝突実験空洞の耐震性評価結果

◇ 衝突実験空洞の吹付コンクリートと覆工に生じる部材の**最大曲げモーメントと軸力の分布**（下図参照、時系列無視）

◇ 応力評価結果（下表参照）

## 応力評価

|                 | 吹付     | 覆工      |        |
|-----------------|--------|---------|--------|
|                 |        | 側壁      | 底版     |
| M (kNm/m)       | 4.14   | 1173.60 | 308.15 |
| N (kN/m)        | 699.67 | 3288.5  | 3144.7 |
| $\sigma$ (MPa)  | 3.35   | 10.33   | 4.99   |
| $f_{ck}/\sigma$ | 10.8   | 2.3     | 4.8    |

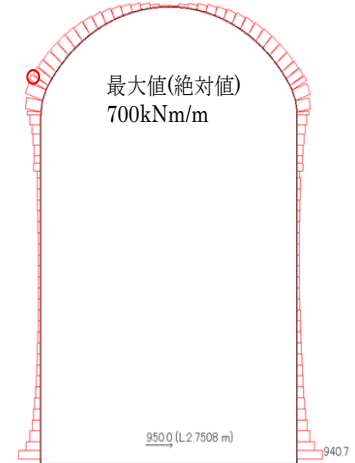
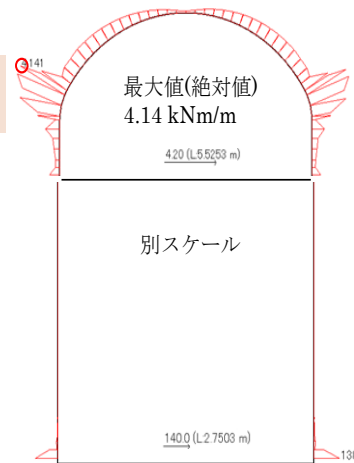


吹付コンクリートの最大応力が設計基準強度の1/10程度、覆工の最大応力は1/2~1/5程度で**十分健全と評価**

## 最大曲げモーメント分布

## 最大軸力分布

吹付



覆工



## ■まとめと今後の課題

---

1. 本研究では、北上候補地における良好な花崗岩盤中に建設されるILCの加速器トンネルと衝突実験空洞を対象に、概略的ではあるが定量的な地震影響を評価した。
2. その結果、加速器トンネルの覆工および衝突実験空洞の吹付コンクリートと側壁覆工に生じるレベル2地震動時の最大応力は、部材の設計基準強度に対して十分に小さく、地震時に崩落するような事象が生じる可能性は小さいと評価された。
3. 今後の課題としては、地下施設の交差部、地質変化部等については未検討であり、今後実施する設計等で確認すべきである。