

風力発電等技術研究開発  
洋上風力発電等技術研究開発  
洋上風力発電低コスト施工技術開発  
スリップジョイント施工技術実証

松木 聡／征矢 陽光

鹿島建設(株)、(株)小堀鐸二研究所、(一財)日本海事協会

2023年2月3日

問い合わせ先  
鹿島建設株式会社  
TEL: 03-5544-1111

# 事業概要

## 1. 期間

開始 : 2021年12月

終了(予定): 2023年3月

## 2. 最終目標

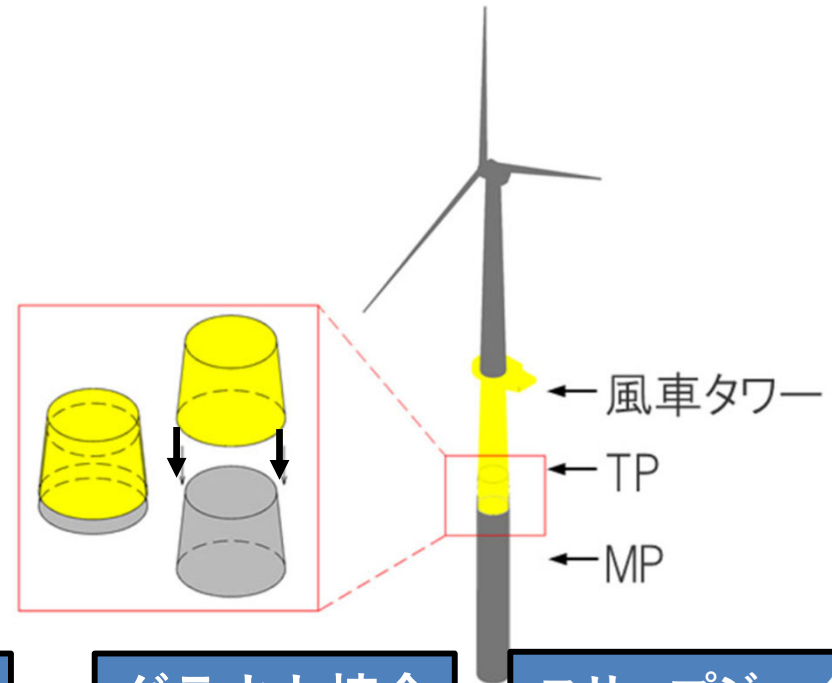
本事業の目標は、日本特有の荷重条件である地震に対して、実証実験によるスリップジョイントの耐震性検証及び耐震解析を実施すること、日本の海象条件・船舶条件に合わせた施工法を構築することである。グラウト接合方式からスリップジョイントへの転換によって資本費(CAPEX)20%以上低減する。

## 3. 成果・進捗概要

本事業で実施予定の実証実験は、2月下旬から実施予定のため現時点では未実施であるが、既往研究の調査、摩擦係数試験、スリップジョイントのばねモデル化、事前耐震解析などを実施し、本構造の耐震設計手法を確立するための基礎データを得た。今後、実証実験の結果とこれらを比較分析し、耐震設計手法の構築を完成させると共に、施工実証を実施する。

# スリップジョイントとは

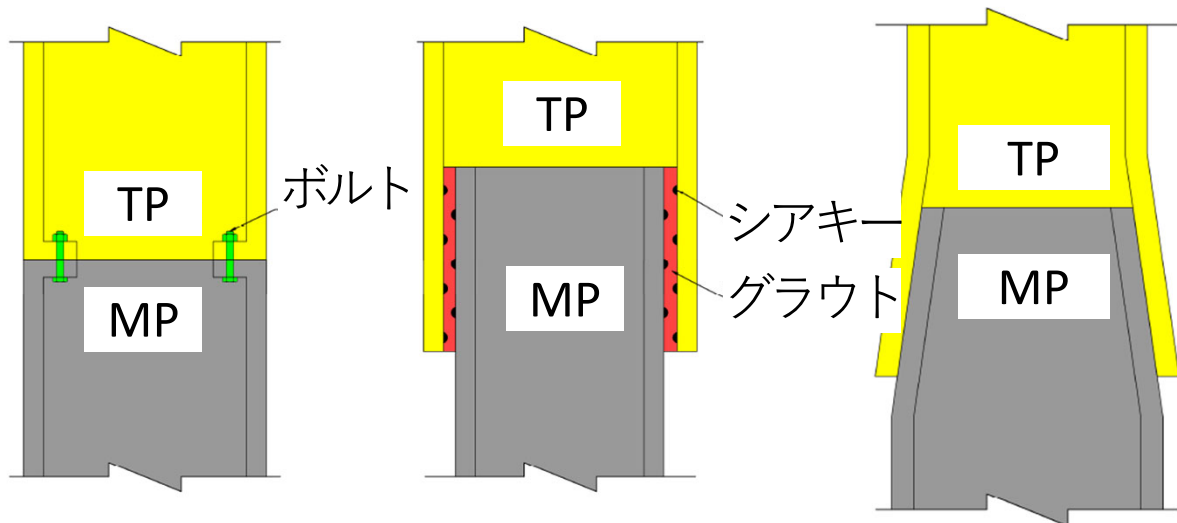
- 欧州にてモノパイル(MP)とトランジッションピース(TP)との**合理化接合構造**として開発
- **耐震性**の検証は未実施



ボルト接合

グラウト接合

スリップジョイント



# スリップジョイント適用による効果

## 1. コストダウン

- グラウト、ボルト不要
- 大型SEP船の作業時間短縮

## 2. 安全性向上

- グラウト打設、ボルト締付作業の省略

## 3. メンテナンスの効率化

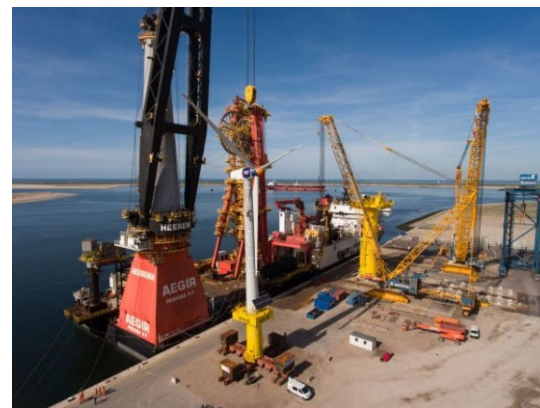
## 4. 日本国内に現有する起重機船で施工可能

## 5. 大型風車にも適用可能

- 大口径ボルトや高強度グラウト材等の認証が不要

# 欧州での技術動向

欧州では、Delft Offshore Turbine社(DOT)・Van Oord社を中心に、スリップジョイントの開発が進められてきた。



SJOR 陸上仮設



SJOR  
スリップジョイント設置

- 1995～2014 陸上風車適用
- 2010～ 室内実験の開始
- 2012～ FEMによる検証
- 2015～2016 0.5MW陸上風車での実証実験
- 2016～2019 1MW洋上風車での実証実験  
SJOR～SJOQプロジェクト
- 2020 オランダ・Borssele Vプロジェクトで  
商業用風車2基に適用



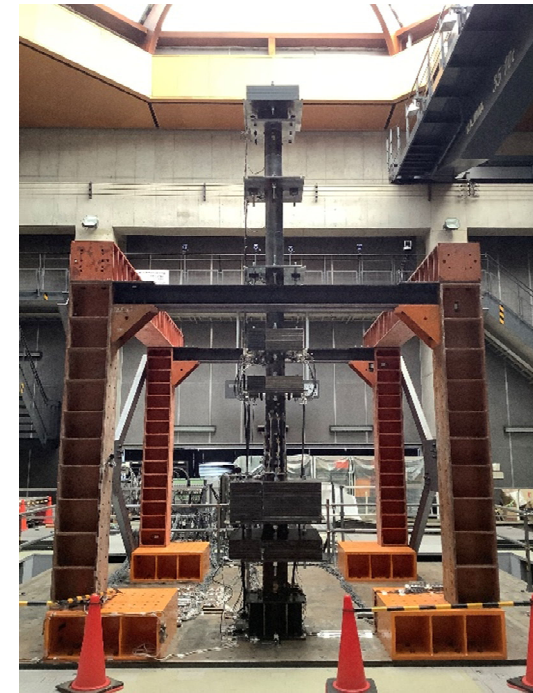
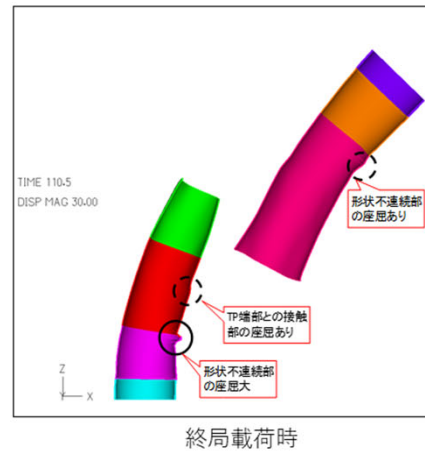
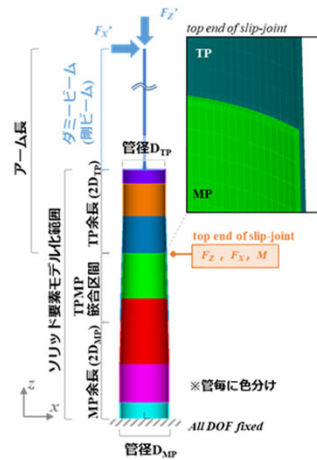
Borssele V  
スリップジョイント設置

## 技術開発の目的

1. 耐震検討手法の確立
  - 実証実験、再現解析
2. 低コストの施工法構築
3. 許認可・認証の課題を抽出し解決

# 鹿島・小堀研・ClassNKのスリップジョイント技術開発の経緯

日本での適用には耐震性の検証・設計法の構築が必要であるため、実験及びFEMにより技術開発を実施中である。



1/10試験体による交番载荷実験及びFEM  
(2020年度)

鹿島技術研究所  
高性能3次元振動台W-DECKER®  
(2021年度)

- 2019 鹿島がスリップジョイントの調査開始
- 2020 小堀研・ClassNKとの共同研究を開始、1/10試験体による交番载荷実験、FEMによる部材降伏までの終局载荷を実施
- 2021 1/30試験体による振動台実験を実施

# 実施内容

---

## ① 既往研究の調査

---

## ② 実証実験

---

試験体の事前・事後解析

---

計画・許認可・調達・施工

---

加振実験・計測

---

検証・まとめ

---

## ③ スリップジョイントの耐震解析

---

摩擦係数試験

---

実機におけるばね値等の評価

---

実機の耐震解析及び試設計

---

## ④ 施工法の構築

---

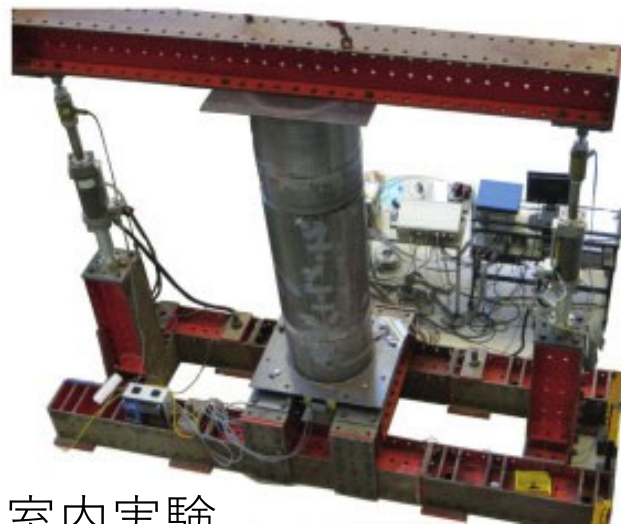
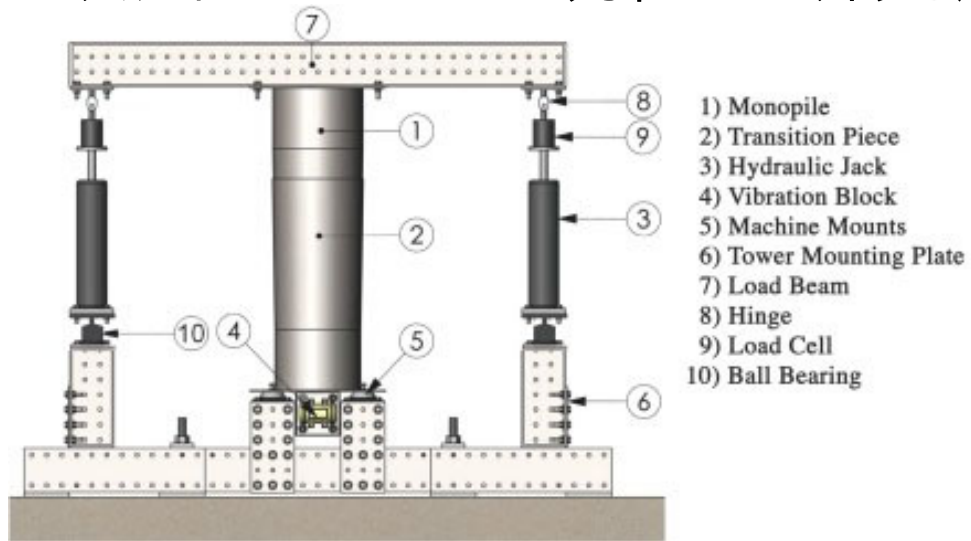
## ⑤ 許認可/認証/MWSの観点での課題抽出及び調査

---



# ① 既往研究の調査

- 欧州における既往の研究成果について調査・整理



室内実験

出典：Vibration-assisted installation and decommissioning of a slip-joint, Alessandro Cabboi etc, Engineering Structures volume 209 (2020)

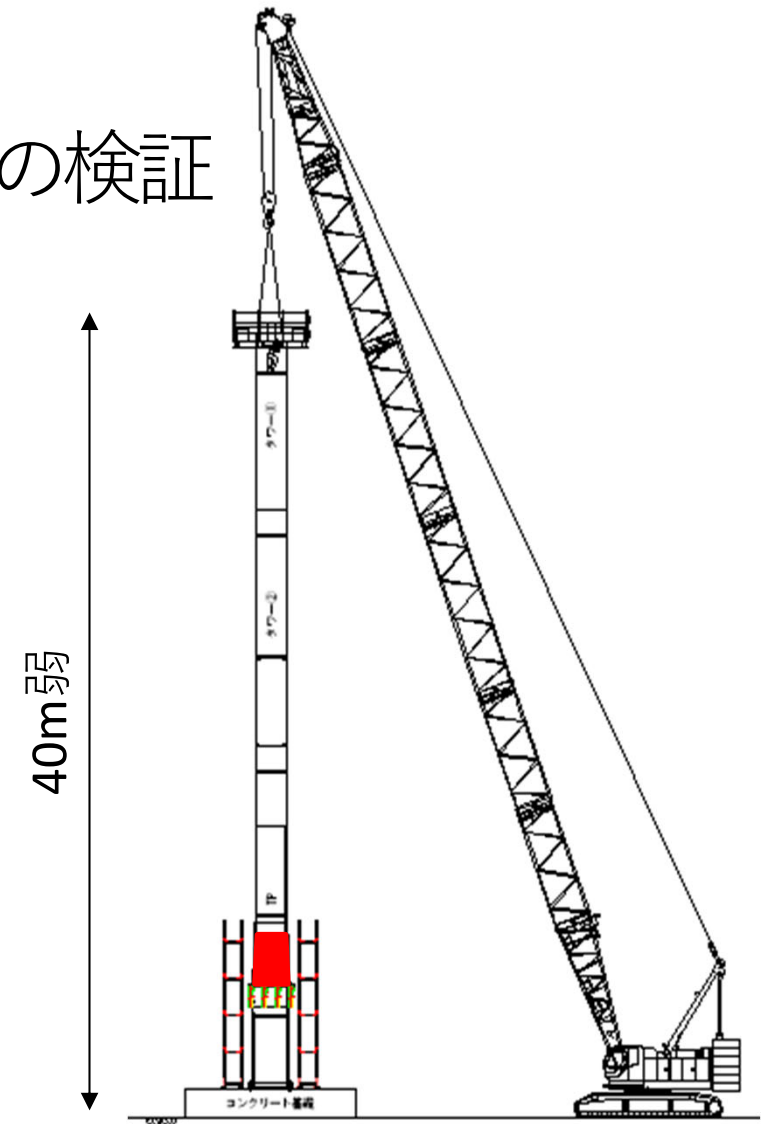


陸上実証実験

出典：Design, testing and verification of the DOT500 slipjoint support structure., T.P.J. Kamphuis, MSc Thesis report (2016)

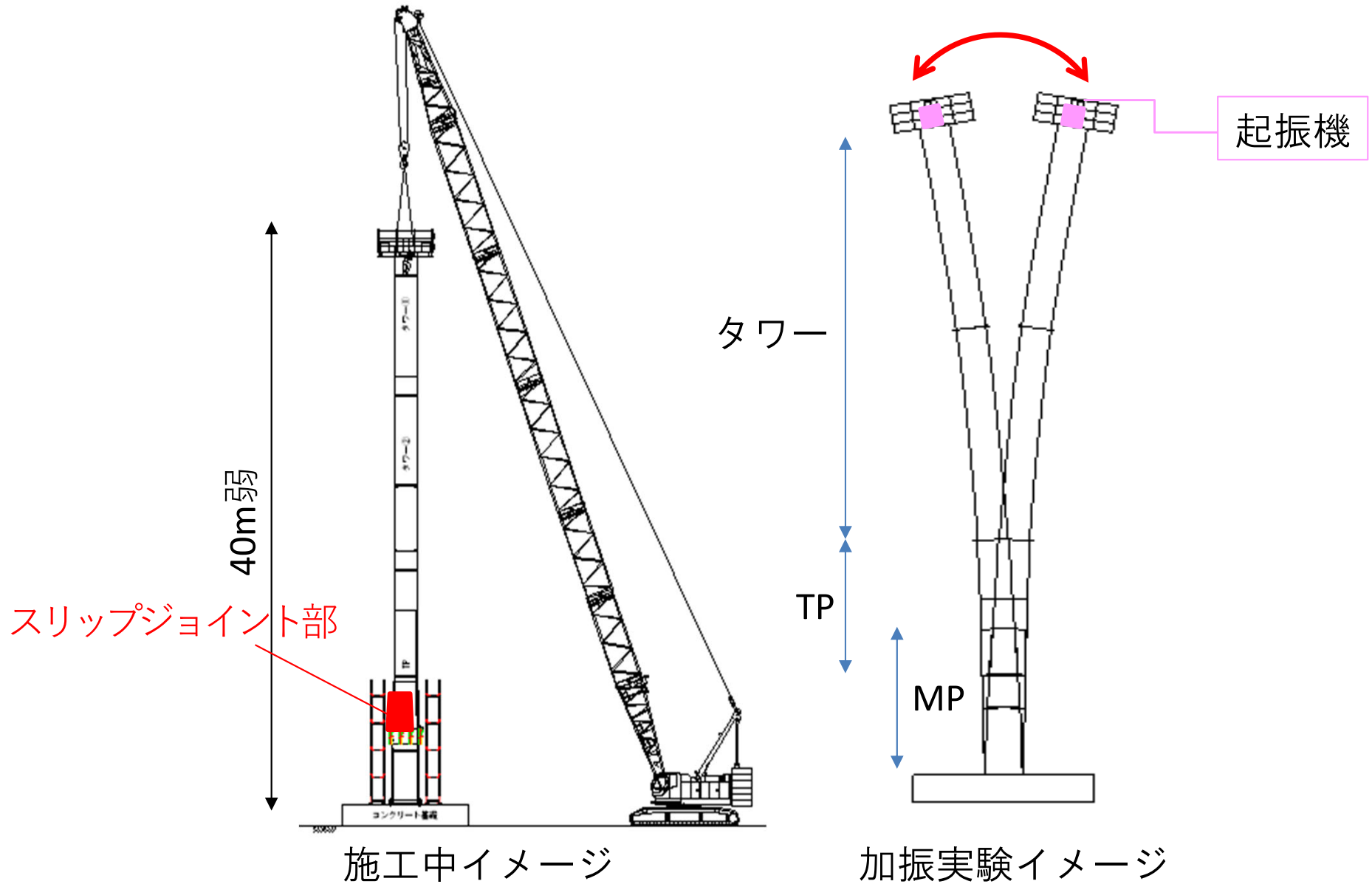
## ② 実証試験(試験概要)

- 1/4スケールの試験体
- 目的：スリップジョイントの耐震性の検証
- 実験場所：神奈川県横浜市扇島



## ② 実証試験(加振実験)

試験施工・陸上加振実験で、施工性と耐震性の検証を行う。



## ② 実証試験(計測)

スリップジョイントにおける動的特性を観測するため、各種計測を実施する。

ひずみゲージ (内外両面、検長鋼材用5mm)

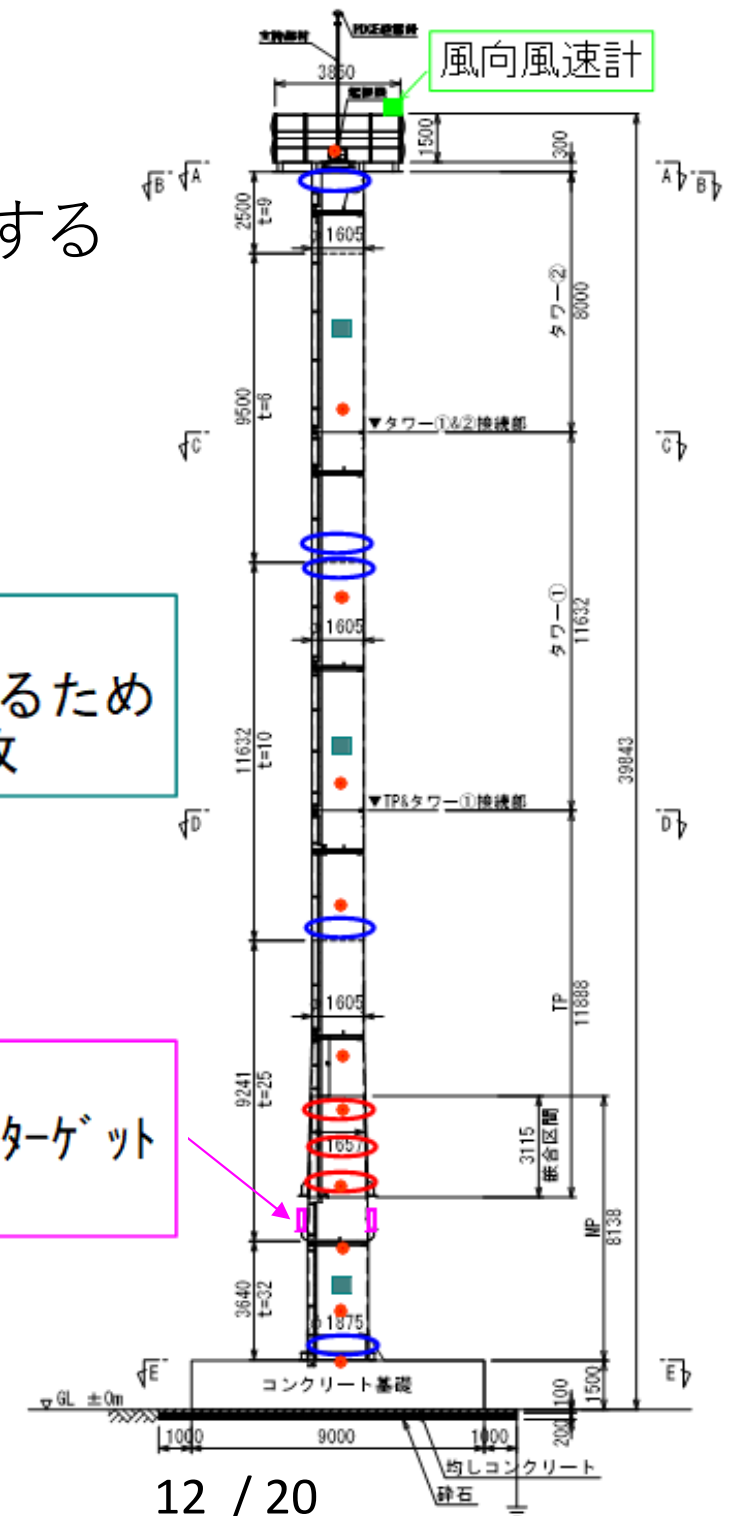
- スリップジョイント部 (3軸, 16方位, 3断面)
- その他断面 (1軸, 5断面, 8方位)

- 熱電対 (3断面各4枚)
  - ・ 筒内側 + 空中温度を測るため
  - ・ 筒外の日陰 & 筒中各1枚

- 加速度計 (合計11箇所)
  - ・ 設置、メンテナンスを考え内側に設置
  - ・ 配線経路検討必要 → 有線

- レーザー変位計 (沈下量計測)
  - ・ 下フランジに変位計、上フランジにターゲット
  - ・ 16方位

全体水平変位計測



## ③ スリップジョイントの耐震解析

### ③-1 摩擦係数試験

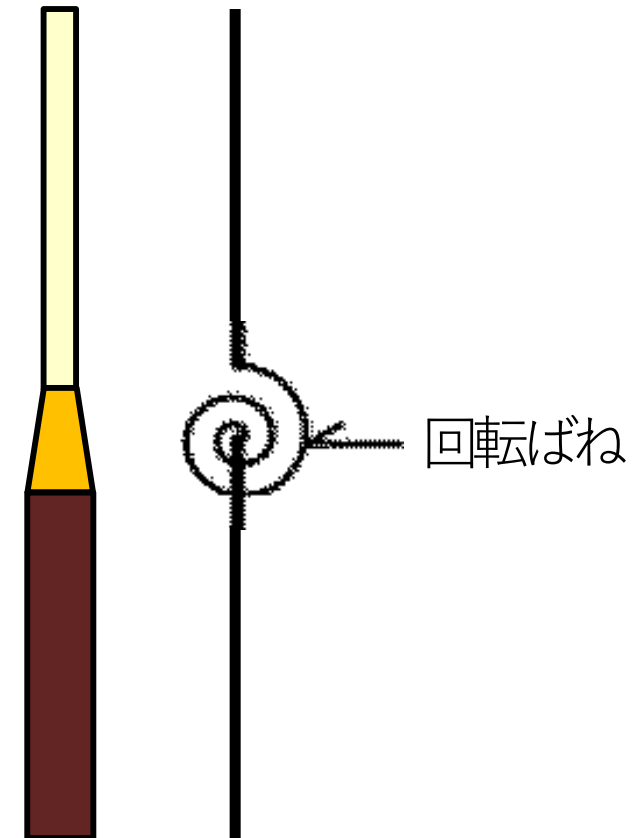
気中/水中条件の摩擦係数を測定

### ③-2 実機におけるばね値等の評価

実験データ及び3DFEMによる評価

### ③-3 実機の耐震解析及び試設計

実機スケールの地震時時刻歴応答解析を梁ばねモデルで実施

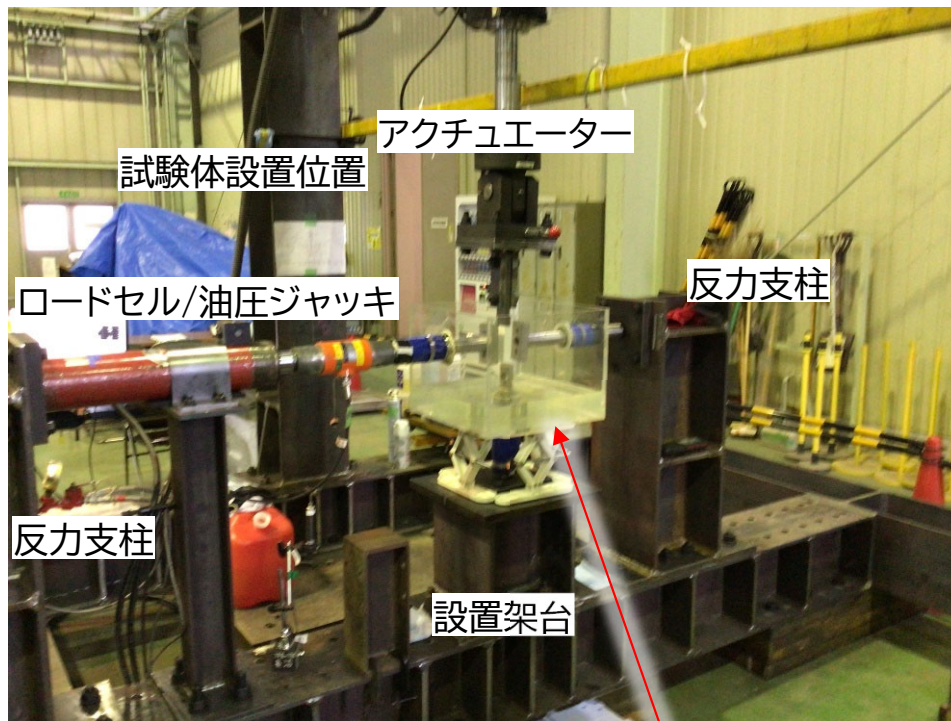


### ③-1 摩擦係数試験

#### 【実験概要：摩擦試験装置】

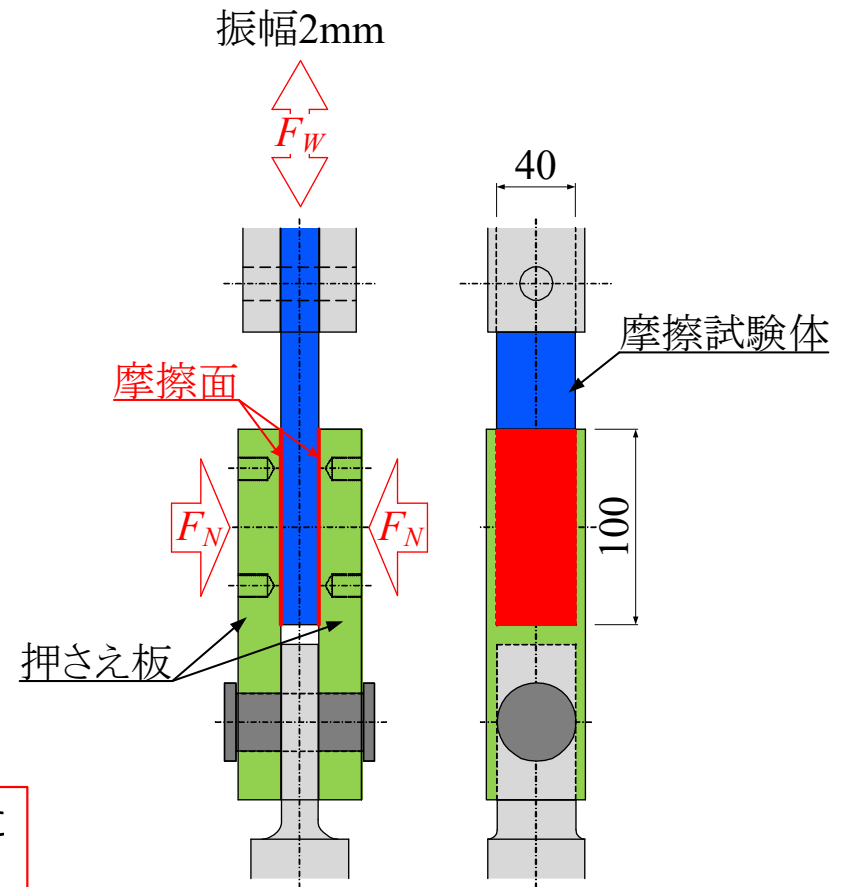
スリップジョイントは鋼材同士が直接接触するため、摩擦係数が設計に影響する。

#### 試験装置 (海水中条件)



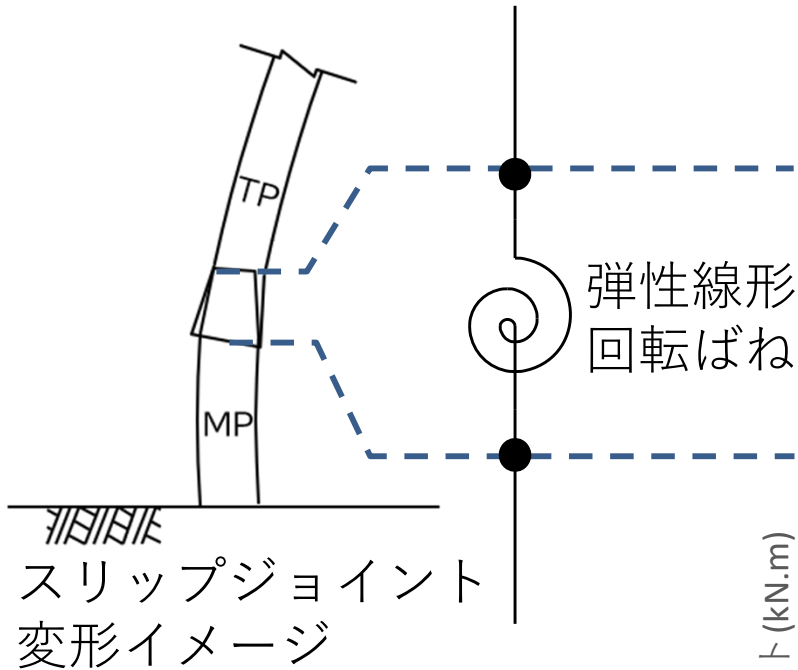
試験体周りに人工海水を入れた  
アクリル水槽を設置

#### 摩擦試験の機構



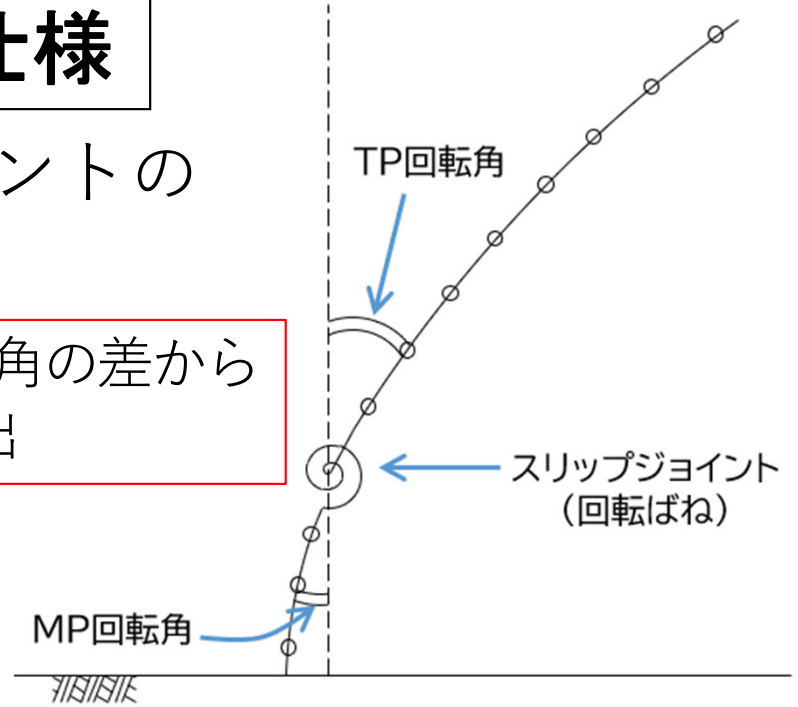
### ③-2,3 スリップジョイントの設計仕様

全体系モデルにおけるスリップジョイントのモデル化（弾性線形回転ばね）

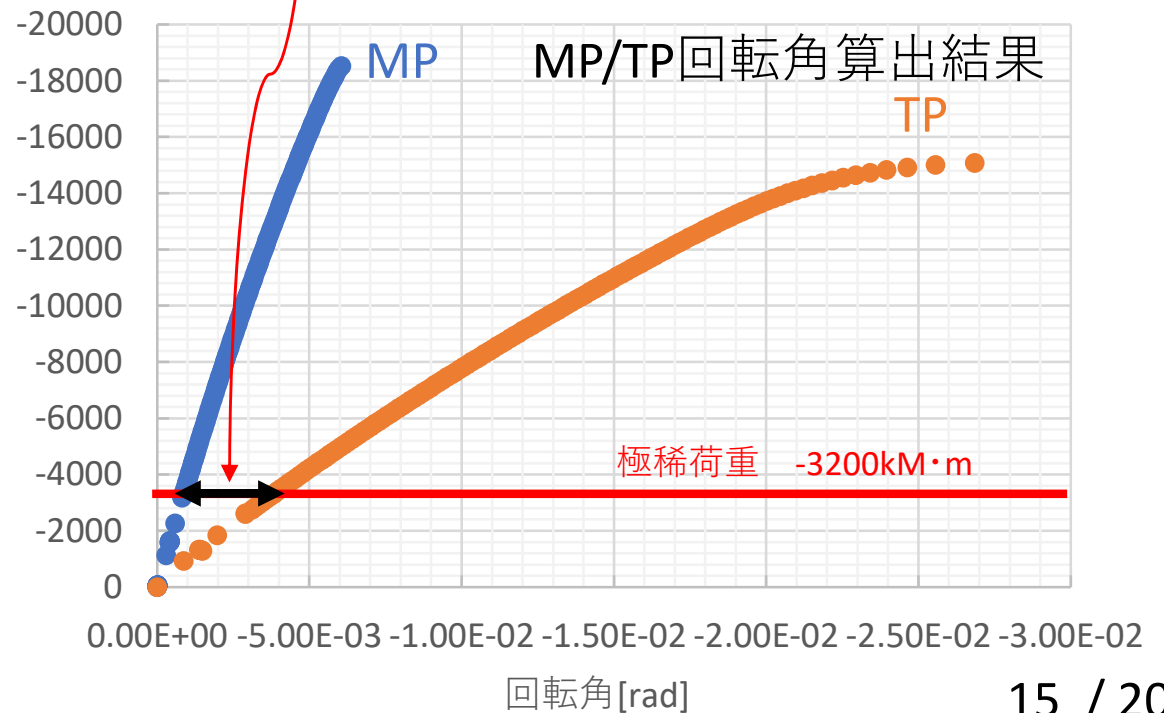


スリップジョイントモデル化  
イメージ

MP-TPの回転角の差から  
ばね値を算出

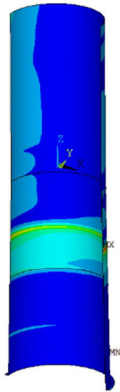
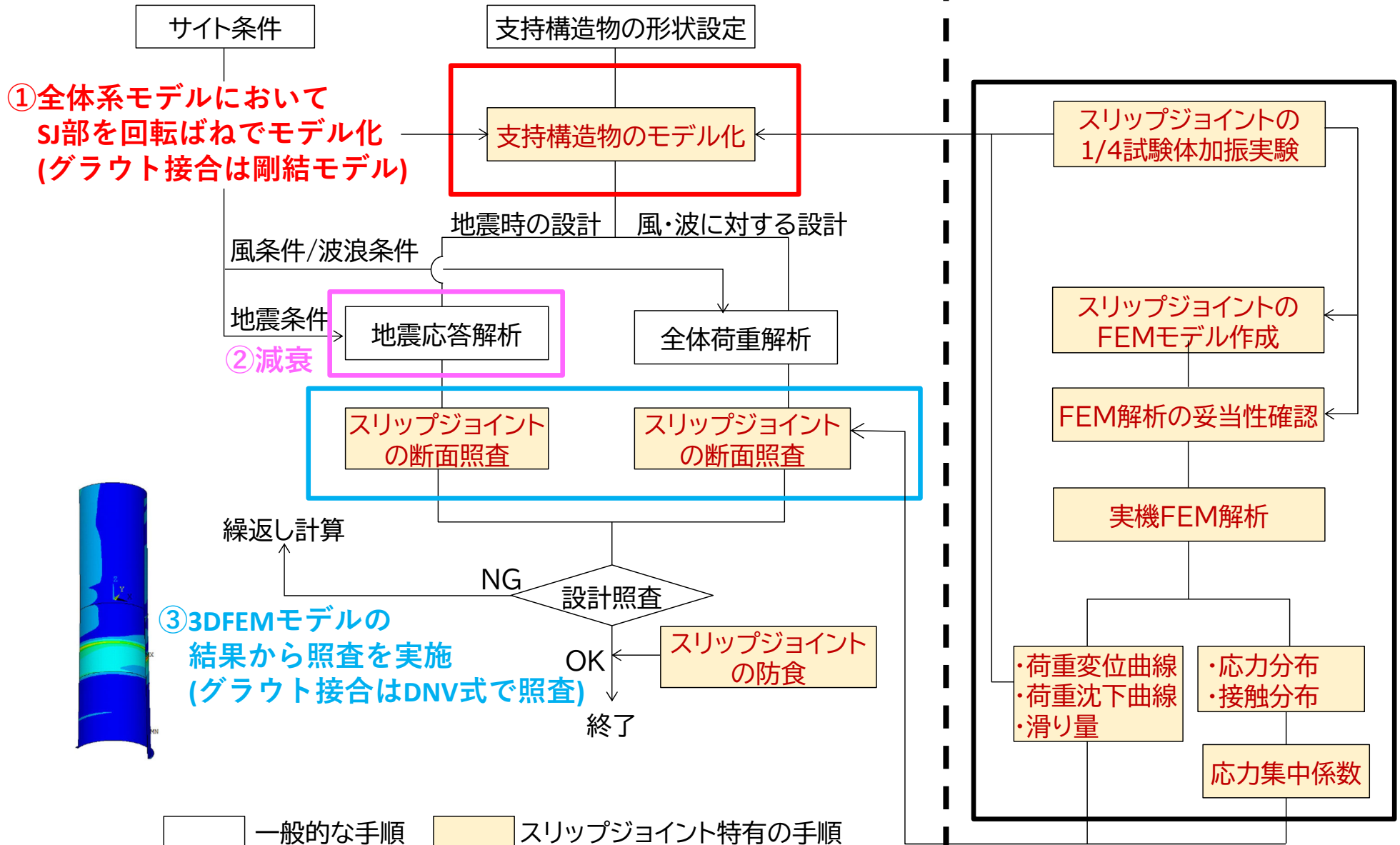


曲げモーメント (kN.m)



# ③-2,3 スリップジョイントの設計仕様

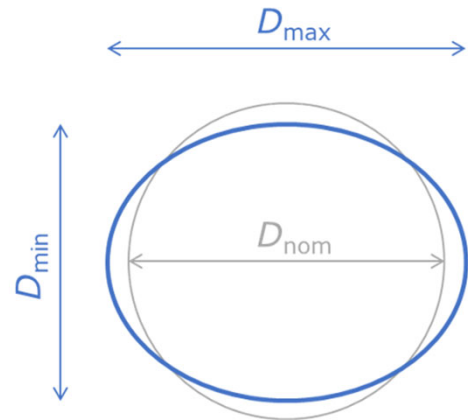
設計フロー ← → 検証フロー



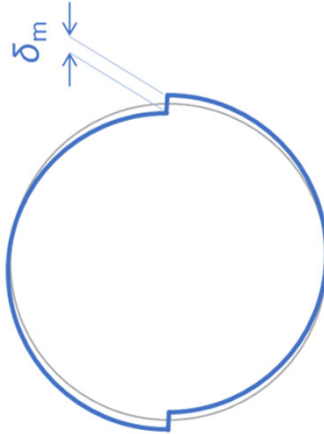


### ③-2,3 スリップジョイントの設計仕様

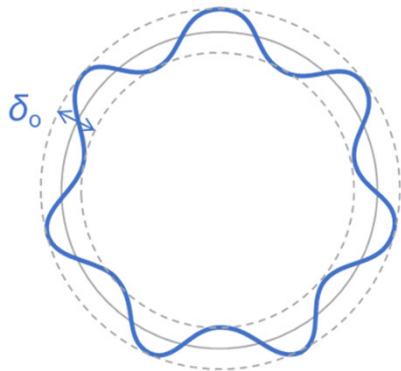
発生応力度に着目したFE解析を実施。  
設計パラメータと形状初期不整を考慮する。



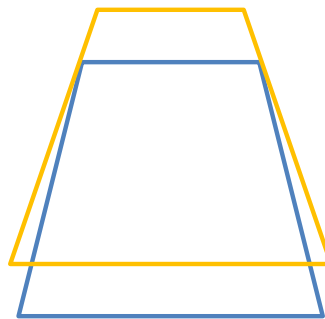
真円度



溶接ミスアラインメント

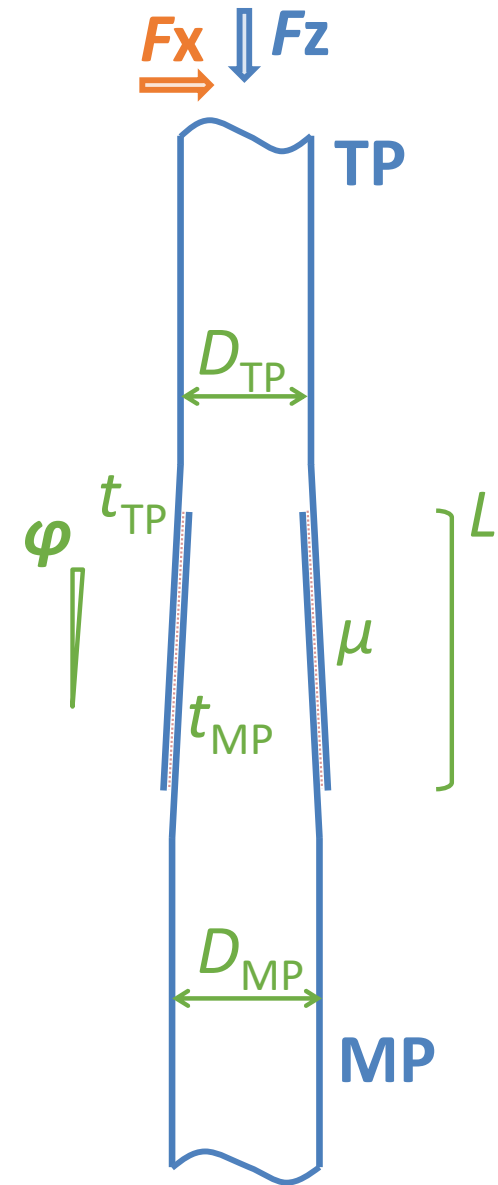


局所波形



角度のミスアラインメント

初期形状不整の例



設計パラメータ

## ④ 施工法の構築

- スリップジョイントを適用した場合の施工法について整理するとともに、グラウト接合を適用する場合との比較によりスリップジョイント適用の効果を定量的に検討する。

## ⑤許認可、認証及びMWSの観点での課題の抽出及びその対応の調査

- スリップジョイントの国内への導入にあたって、法令等の許認可及び認証における課題を抽出
- 本開発においてその課題の解決を図る。
- 施工において必要となるMWS(マリンワランティサーベイ)の観点での確認を行う。

# まとめ

スリップジョイント: 欧州で開発された合理化接合構造  
コストダウンなど利点が多い

## 1. 耐震検討手法の確立

- 鋼材間の摩擦係数の範囲を実験で確認
- スリップジョイントのばねモデル化手法を構築
- 加振実験にて検証予定

## 2. 低コストの施工法構築

- スリップジョイントを適用した場合の施工法について整理