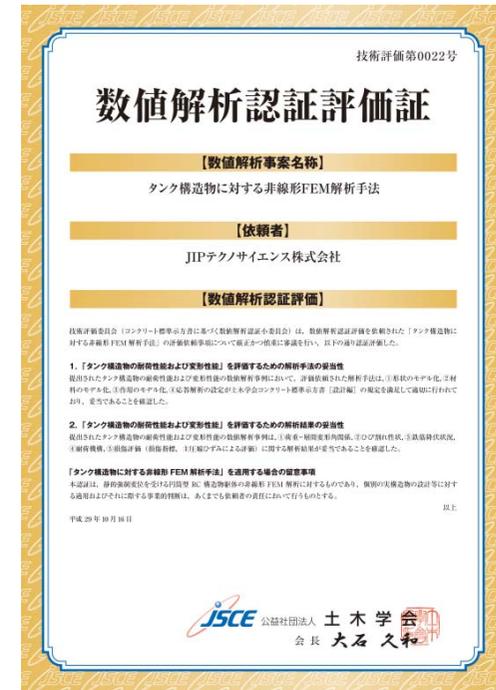




土木学会 『技術評価証』 取得

タンク構造物に対する

非線形FEM解析手法



JIPテクノサイエンス株式会社

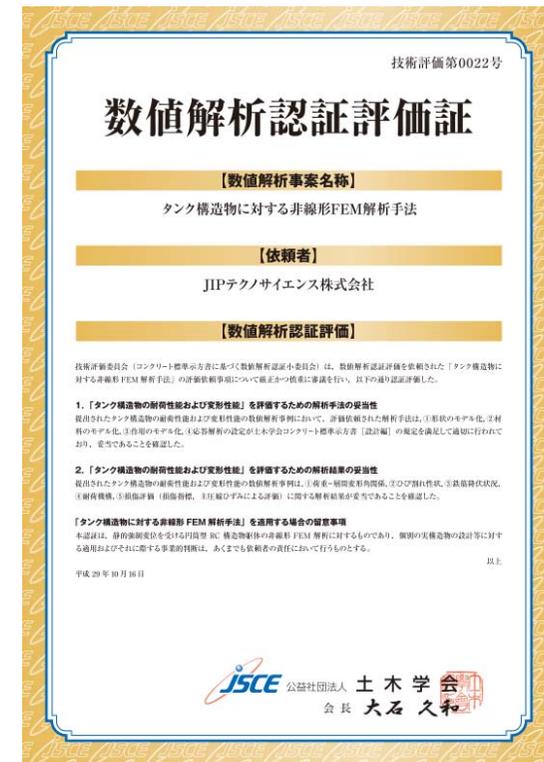
Trusted Global Innovator **NTT DATA**
NTT DATA Group

(公社) 土木学会 『技術評価制度』 ※1

初の数値解析に対する認証評価 (2017年10月16日)

(区分5：土木学会コンクリート標準示方書 [設計編] の
規程に基づく数値解析)

- **解析手法・解析結果の妥当性の評価**
 - **汎用FEMソフト「DIANA」利用**
 - **LNGタンク※2を対象**
 - **非線形FEM解析**



※1：公益社団法人土木学会技術推進機構。 <http://committees.jsce.or.jp/opcet/hyoka>

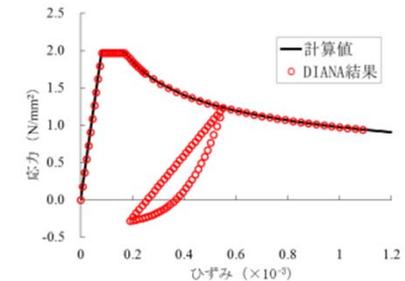
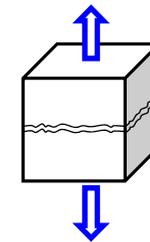
※2：原田 光男, 鬼東 俊一, 山谷 敦, 松尾 豊史：地震時におけるLNG地下タンク躯体の耐荷機構, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.3, pp.517-529, 2011.

- **V & V (検証と妥当性確認)**

近年、**解析結果の品質と信頼性を保証**するための方法論として、**検証と妥当性確認 (V&V ; Verification and Validation) の重要性が高まっている**※1,2。

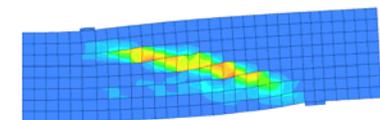
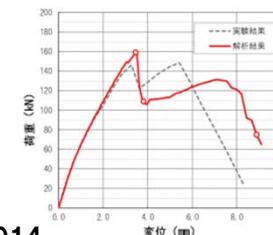
- ✓ **【検証 : Verification】**

計画した解析が論理的および数値的に正しく行われたかを確認するプロセス



- ✓ **【妥当性確認 : Validation】**

解析結果が用途に対して許容される範囲で工学的に妥当かを確認するプロセス

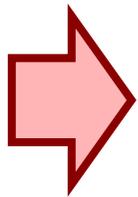


※1 : 日本計算工学会 : 日本計算工学会標準 工学シミュレーションの品質マネジメント, 2014.

※2 : 日本計算工学会 : 日本計算工学会標準 工学シミュレーションの標準手順, 2015.

- **V & V**（検証と妥当性確認）

- V&Vのプロセスによって、信頼性の高い解析が実現でき、**客観的かつ定量的な解析結果の評価が可能に。**



合理的かつ経済的なコンクリート構造物を構築するための
信頼すべきツールに。

DIANA FEA社：2003年1月にTNO（オランダ応用科学研究機関）から分社
1975年に発売以来、全世界で利用、土木・建築分野を中心
鋼・コンクリート・地盤構造物に対して、数多くの実績

● 開発元による検証

- 5400以上の要素
および部材テスト
- ベンチマークテスト

● 数多くの利用実績

- 学術論文
- 実務設計での利用
- 研究での利用

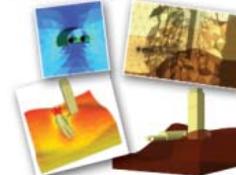
Geotechnical & Tunnelling

- Soil and soil-structure interaction
- Wide range of soil and rock models
- Coupled ground water flow stress
- Drained and undrained behaviour
- Dedicated pile elements for piled-raft foundations
- Large deformations and strains



Tunnels and Underground Structures

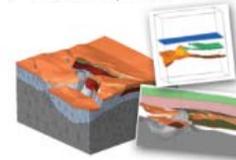
- Realistic modelling of subsurface strata and terrain
- All tunnel and interconnection types
- Ground freezing analysis



Oil & Gas

Geo-mechanical analysis of oil & gas reservoirs and wellbores

- 3D geo-mechanical depletion analysis
- Borehole stability
- Mechanics of completed wells



Masonry & Historical Constructions

Analysis of existing/historical constructions prior to or following additional loading or events such as earthquakes

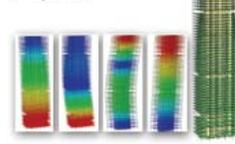
- Dedicated models for masonry
- Meso to macro modelling functionalities
- Modelling of joints and cracking



Earthquake Engineering

Linear and nonlinear dynamic analysis

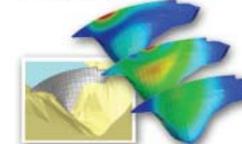
- Frequency response analysis
- Transient analysis (linear and nonlinear)
- Hybrid frequency-time domain analysis
- Fluid-structure interaction
- Liquefaction



Dams & Dikes

2D and 3D behaviour modelling and analysis of concrete and earth/rock-fill dams

- Functionalities for analysis of all dam types
- Nonlinear analysis of joint behaviour
- Dynamic analysis of dams
- Fracture of concrete



Structural Fire Analysis

Wide ranging analysis functionality to assess structural behaviour under fire

- Coupled thermo-stress analysis
- Temperature degradation of materials
- Mechanical damage



Reinforced Concrete

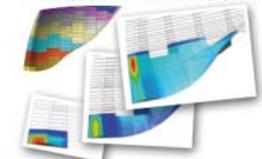
Plain and reinforced concrete during construction, service and ultimate state

- Wide range of crack models
- Creep and shrinkage
- Code based materials
- Design checks for reinforcements
- Simplified nonlinear analysis using linear sequential approach



Young Hardening Concrete

- Temperature and stress development during hardening
- Cooling technique
- Crack development assessment
- Maturity dependence of mechanical properties



Nuclear Structures

3D structural analysis to support nuclear component integrity

- Reinforced and prestressed concrete containment
- Underground waste storage tanks
- Seismic performance



- **区分5は2015年3月に新設**

区分	対象分野	内容
1	材料・工法等の新技术（海外導入技術も含む）	・新技术（材料、工法等海外で開発された新技术も含む）の評価 ・設計・施工指針等の監修による評価
2	コンピュータソフトウェア	ソフト分野の技術評価で、解析、計画、シミュレーション、設計、管理等に用いるコンピュータソフト技術の評価
3	研究段階にある技術の実用可能性	研究に近い領域の技術成果等の評価で、大学等における研究成果に基づく新技术の実用可能性の評価
4	工事の計画・発注段階での提案技術	工事の計画段階や発注段階における提案技術について、専門家が少ない発注機関等の要請により行う技術内容の評価
5	土木学会コンクリート標準示方書[設計編]の規定に基づく数値解析	数値解析事案の客観的・技術的事項（モデル化、入力値の設定、応答値算定結果の解釈、解析係数の設定など）に関する評価

数値解析認証評価依頼項目

7

依頼者名	JIPテクノサイエンス（株）
数値解析事案名称	タンク構造物に対する非線形FEM解析手法
構造物等の種類	タンク構造物（円筒型鉄筋コンクリートシェル構造物）
数値解析の種類	3次元静的非線形FEM解析
評価依頼事項	<p>タンク構造物の耐荷性能および変形性能を評価するための解析手法および解析結果の妥当性に関する評価</p> <p>(1) 解析手法の妥当性</p> <p>①形状のモデル化 ②材料のモデル化 ③作用のモデル化 ④応答解析の設定</p> <p>(2) 解析結果の妥当性</p> <p>①荷重－層間変形角関係 ②ひび割れ性状 ③鉄筋降伏状況 ④耐荷機構 ⑤損傷評価（損傷指標、主圧縮ひずみによる評価）</p>
使用ソフトウェア	DIANA Release 10.1（開発元：DIANA FEA社）
ベンチマーク解析の有無	有（RCはり部材を対象とした損傷指標に関する検証解析）
類似の数値解析の実績	特になし
特記事項	特になし
評価依頼の目的・理由	タンク構造物の耐震性能評価における非線形FEM解析の信頼性向上と活用

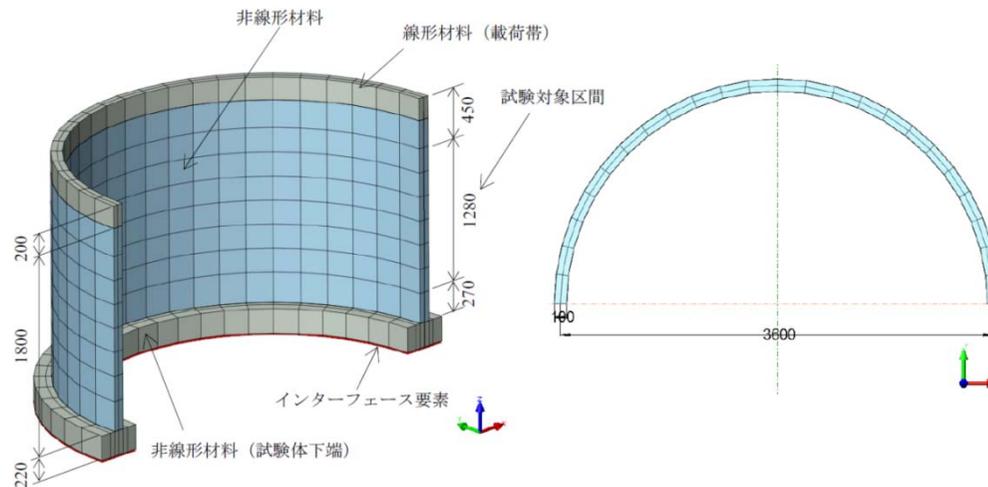
解析手法（抜粋）

- 3次元静的非線形FEM解析

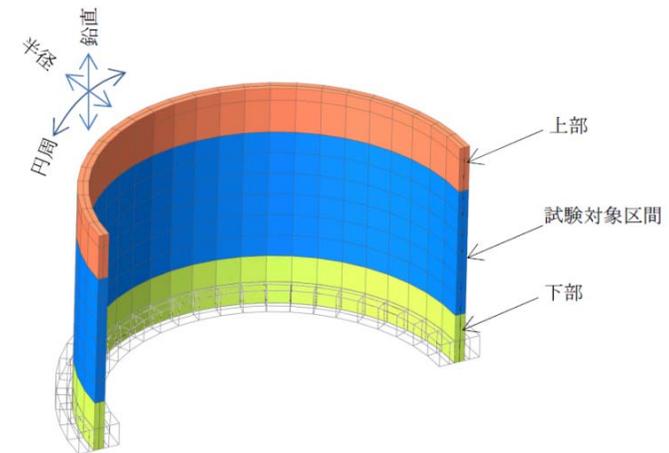
汎用FEM解析ソフトウェア『DIANA Release 10.1』

- 形状のモデル化

- 3次元ソリッド要素（1/2対称モデル）
- 分散鉄筋モデル



解析モデル図



分散型埋込鉄筋要素図

● 材料のモデル化

➤ コンクリート

- ✓ 多方向固定ひび割れモデル（前川－福浦モデル）
- ✓ 弾塑性破壊モデル（ひび割れ前）
- ✓ アクティブクラックモデル
- ✓ 引張剛性モデル
- ✓ せん断伝達の劣化
- ✓ ひび割れによる圧縮強度低減

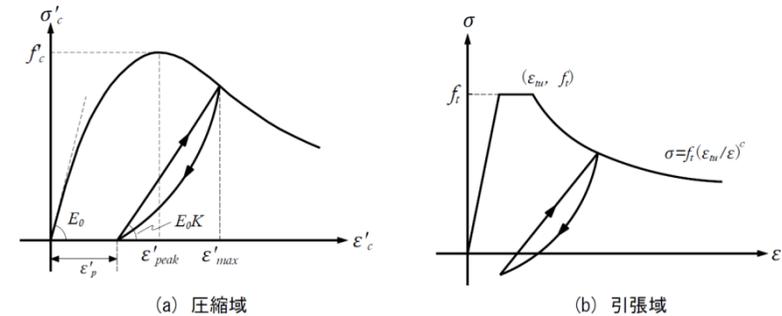
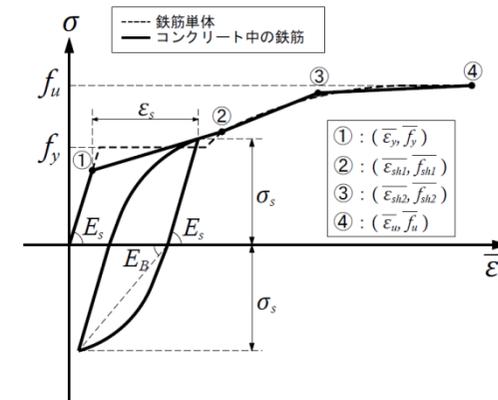


図 3.2.1-1 コンクリートの応力-ひずみ関係⁴⁾

➤ 鉄筋

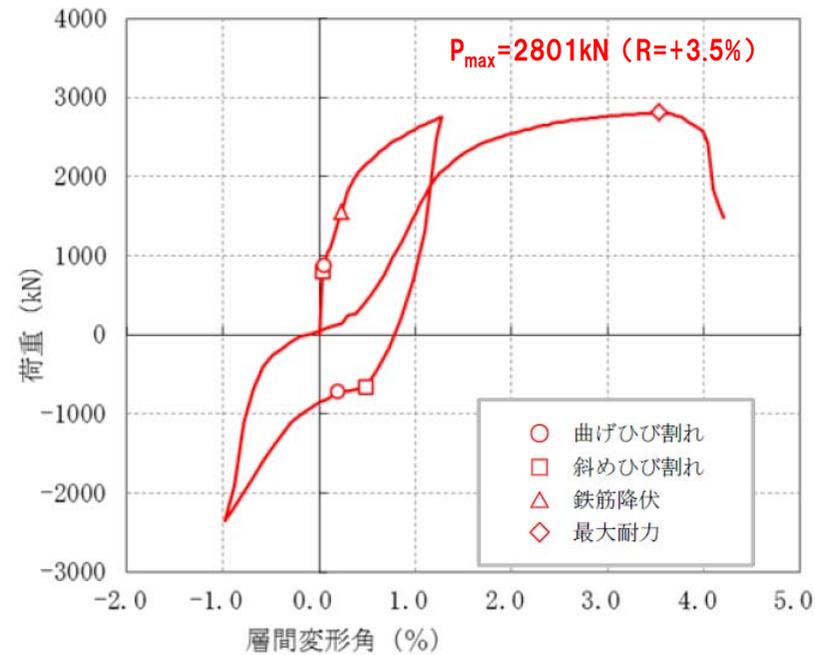
- ✓ コンクリート中の平均応力-平均ひずみ関係



解析結果（抜粋）



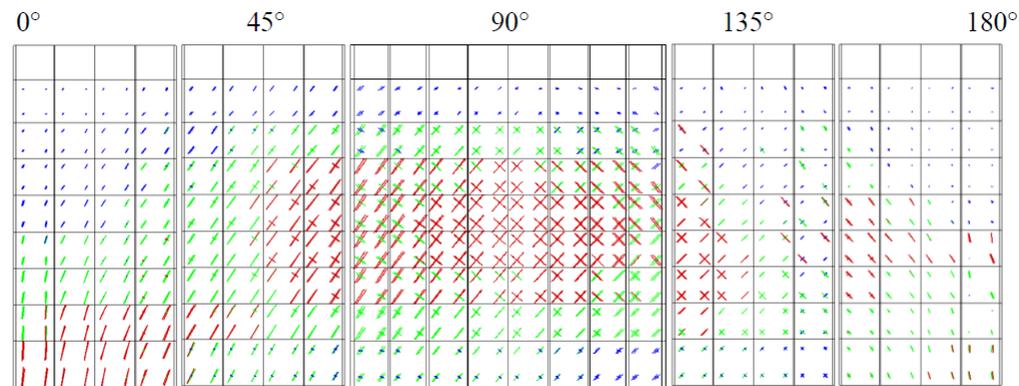
● 荷重－層間変形角関係



(b) 解析結果

- 実験結果と良い対応
- 最大耐力は2801kN で、実験結果の2871kN とほぼ一致

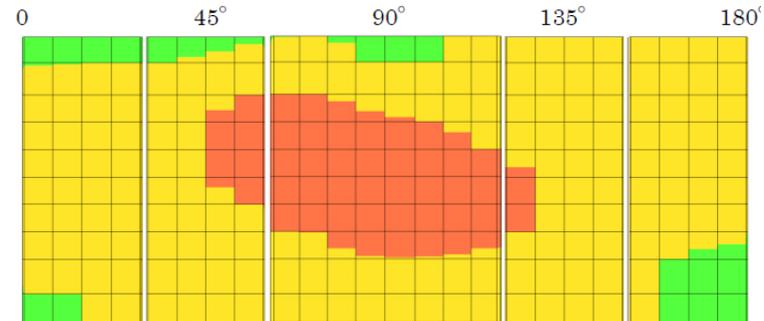
- ひび割れ性状（ひび割れひずみベクトル図）
（ $R=+1.3\%$ および $R=-1.0\%$ ）



(a) ひび割れひずみベクトル図（ $R=+1.3\%$ および $R=-1.0\%$ 時）※

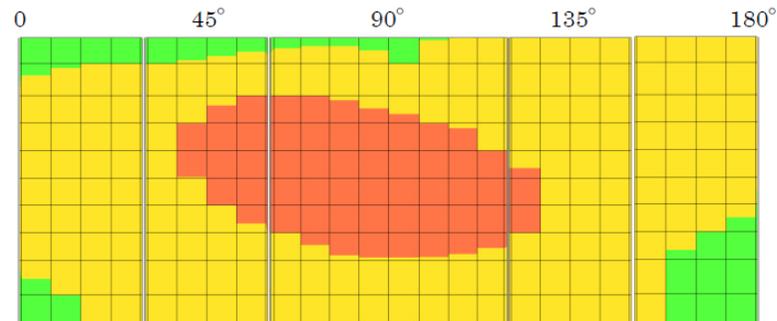
- ウェブ面（ 90° 方向を中心）の広い範囲にほぼ 45° の角度で一様にひび割れ発生
- 実験結果は殆どが $40\sim 50^\circ$ （平均で 45° ）であり整合

- 鉄筋の降伏状況（円周方向鉄筋、 $R=+1.3\%$ ）



鉄筋ひずみコンター

円周方向鉄筋（内側）



鉄筋ひずみコンター

円周方向鉄筋（外側）

➤ 降伏している領域は、実験結果と概ね良い対応

- 照査（材料の損傷に基づく破壊の照査指標）

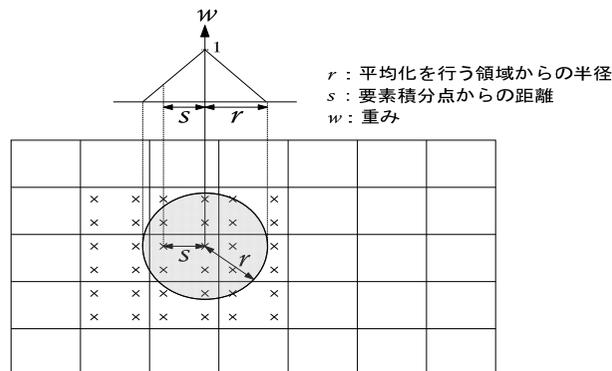
- 引張損傷：偏差ひずみ第2不変量（限界値： $\sqrt{J_2} = 1000 \mu$ ）

$$\sqrt{J_2} = \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_y - \varepsilon_z}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_x}{2} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{yz}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{zx}}{2} \right)^2}$$

- 圧縮損傷：正規化累加ひずみエネルギー（限界値： $\overline{W}_n = 1500 \mu$ ）

$$W_n = \frac{1}{f} \sum_{k=1}^n (\sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij})^{(k)} = W_{n-1} + \frac{1}{2f} (\sigma_{ij}^{(n-1)} + \sigma_{ij}^{(n)}) \cdot (\varepsilon_{ij}^{(n)} - \varepsilon_{ij}^{(n-1)})$$

- 空間的重み付き平均化処理：

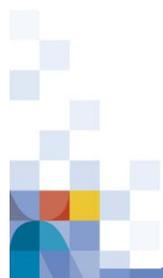
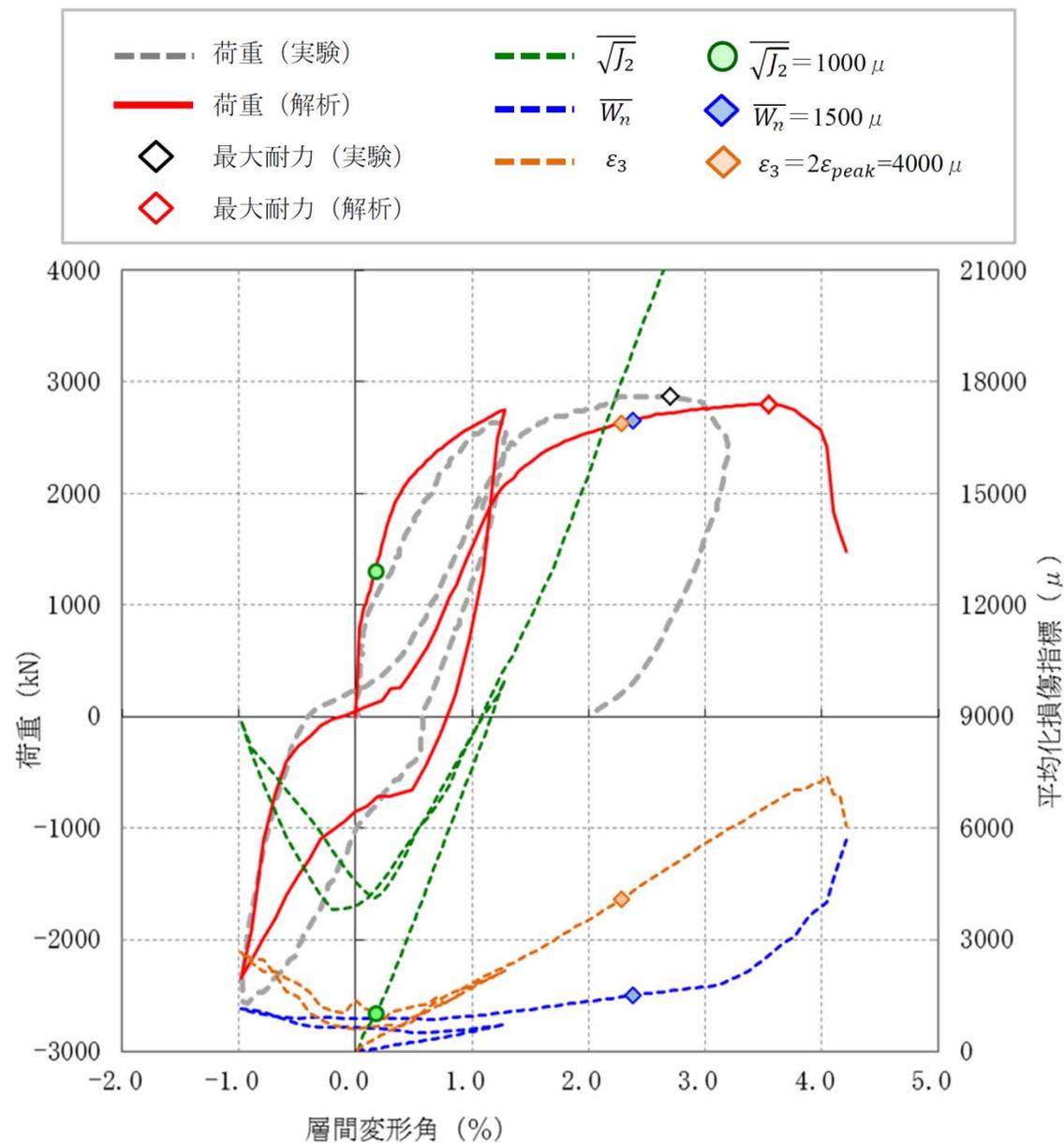


平均化指標：
$$\overline{D_d} = \frac{\int_V D_d \cdot w(s) dV}{\int_V w(s) dV}$$

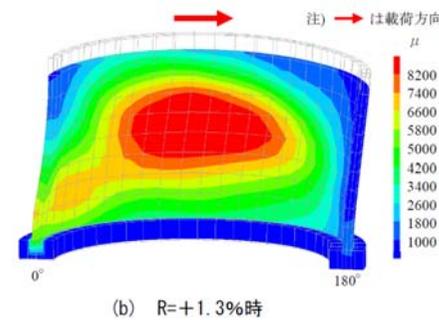
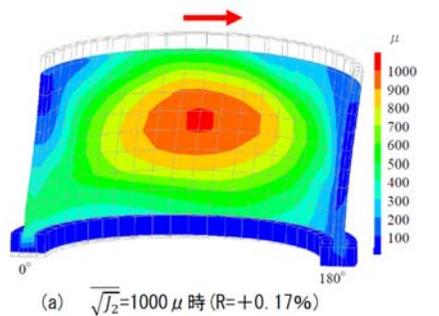
重み関数：
$$w(s) = \begin{cases} 1 - s/r & (s \leq r) \\ 0 & (s > r) \end{cases}$$
 (※ $r=150\text{mm}$)

● 照査

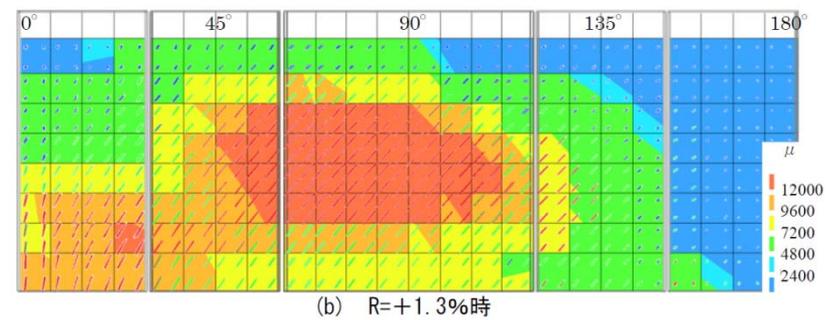
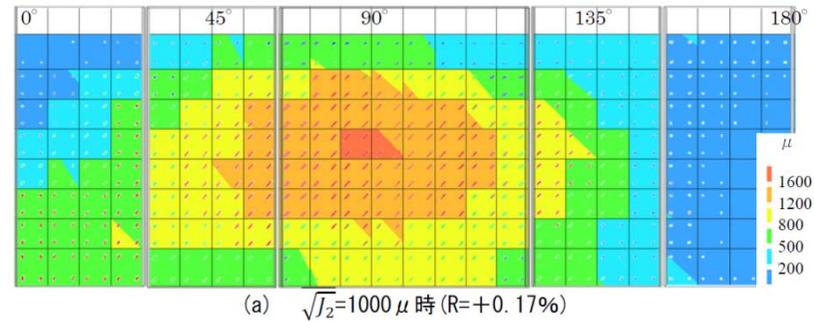
- $\sqrt{J_2}$ 一層間変形角関係
- \bar{W}_n 一層間変形角関係
- ε_3 一層間変形角関係



- $\sqrt{J_2}$ による評価（ $\sqrt{J_2} = 1000 \mu$ 時、 $R = +1.3\%$ 時）



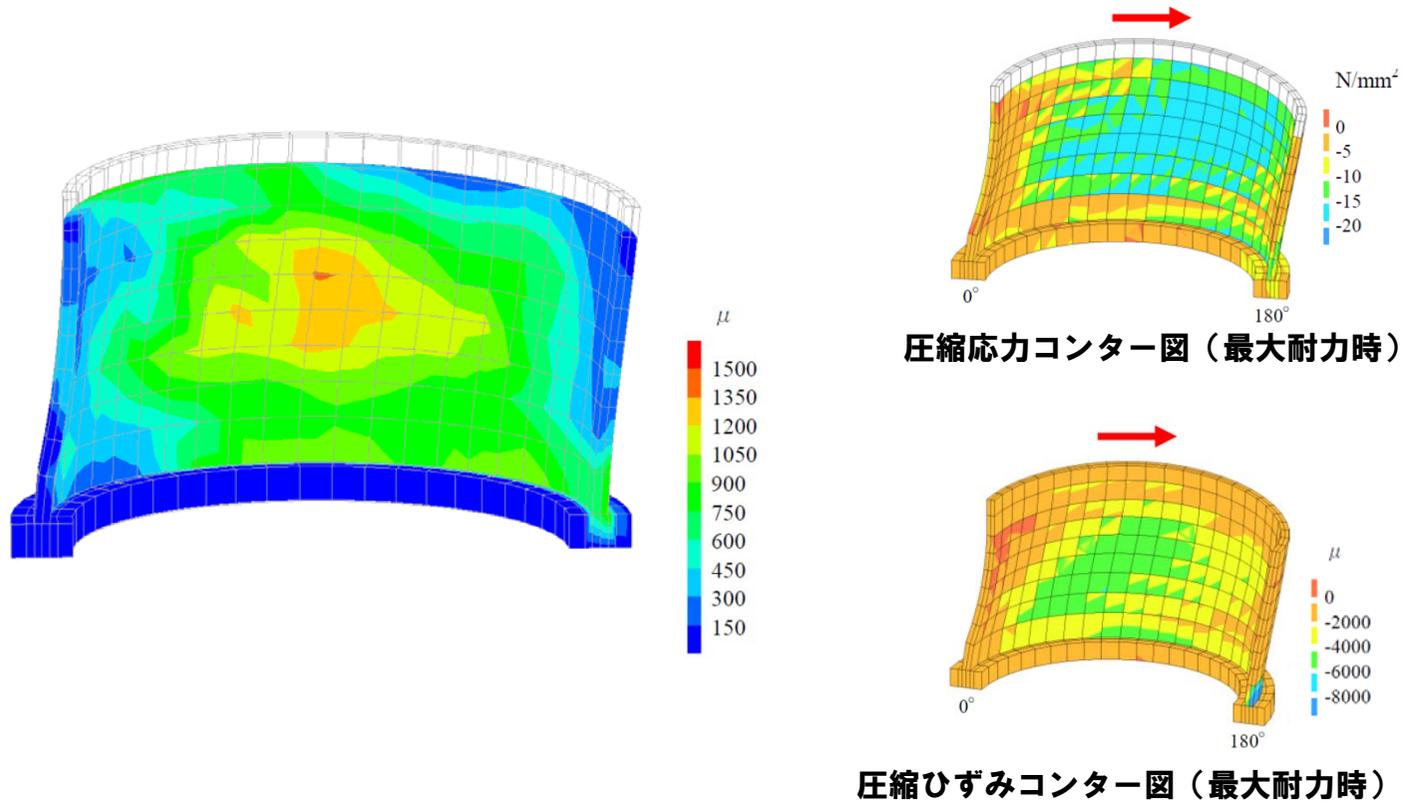
$\sqrt{J_2}$ コンター図



ひび割れひずみコンター図およびベクトル図

- 最初に $\sqrt{J_2}$ が 1000μ に達した箇所はウェブ中腹部
- ひび割れひずみコンター図は、 $\sqrt{J_2}$ のコンター図と類似。
- $\sqrt{J_2}$ によって斜め方向のひび割れと鉄筋降伏に伴う曲げひび割れによる損傷が表現

- \overline{W}_n による評価（ $\overline{W}_n = 1500 \mu$ 時）



- 最初に \overline{W}_n が1500 μ に達した箇所はウェブ中腹部
- 圧縮応力の高い領域や圧縮強度に対するひずみを超える領域と同様
- \overline{W}_n によって圧縮ストラットの形成や、コンクリートの圧縮破壊が表現

- 円筒型の鉄筋コンクリートシェル構造物であるLNG地下タンク躯体の縮小模型実験※を対象に、汎用FEM解析ソフトウェアを用いて3次元静的非線形FEM解析を実施
- **解析結果は実験結果を概ね再現**（荷重－層間変形角関係、タンク躯体のひび割れ性状、鉄筋の塑性状況、タンク躯体の変形状況）
- **損傷および変形性能が解析的に表現**（示方書に基づく損傷評価、主圧縮ひずみによる変形性能）



- 適用した**解析手法と解析結果の妥当性**を確認
- コンクリート標準示方書〔付属資料〕に紹介されている「**ベンチマーク解析**」のひとつとして利用できると考えられる

※参考文献：原田 光男，鬼束 俊一，山谷 敦，松尾 豊史：地震時におけるLNG地下タンク躯体の耐荷機構，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.67，No.3，pp.517-529，2011.

1. 目的および概要
 2. 解析対象試験体および実験結果の概要
 3. 解析手法
 - 3.1 形状のモデル化
 - 3.2 材料のモデル化
 - 3.3 作用のモデル化
 - 3.4 応答解析の設定
 4. 解析結果の妥当性確認
 - 4.1 解析結果と実験結果の比較
 - 4.2 耐荷機構の確認
 - 4.3 巨視的観点および微視的観点からの妥当性に関する確認
 - 4.4 損傷評価
 5. まとめ
- 【付録】

- A 各イベントにおけるコンター図
- B 損傷指標に関する検証



※「タンク構造物に対する非線形FEM解析手法」に関する技術評価（数値解析認証）報告書，技術推進ライブラリーNo.22，土木学会技術推進機構，2017.10

● 全51項目に対する評価

- 解析計画（5項目）
- 解析手法の検証（3項目）
- 材料のモデル化（10項目）
- 形状のモデル化（7項目）
- 作用のモデル化（4項目）
- 応答解析（3項目）
- 妥当性評価（14項目）
- 解析の実績（3項目）
- 評価依頼の適正（2項目）

● 全22項目の質疑応答

解析計画	解析目的の明示	解析目的が明確であるか
	解析対象の設定	解析の対象や解析の範囲が解析目的を達成できるものであるか
	解析手法の選定	選定した解析手法が解析目的を達成できるものであるか
	評価方法	評価の項目や指標が解析目的を達成できるものであるか
	安全係数の設定	安全係数は適切に設定されているか
解析手法の検証	解析コードの選定	適切な解析コードが選定されているか
	検証の方法	信頼できる実験結果との比較等、検証の方法が適切であるか
	検証対象の設定	検証に用いる実験等の種類、条件、精度、量等が検証に適したものであるか
材料のモデル化	材料モデルの選定	使用した材料モデルの種類や組合せが適切であるか
	コンクリート	圧縮、引張、せん断
	ひび割れモデル	せん断伝達モデルとの組合せ
	鉄筋	降伏、破断
	鉄筋とコンクリート間の付着	付着すべり、テンションスティフニング、伸び出し
	緊張材・定着部・偏向部	プレストレス、端部処理
	除荷、内部履歴	除荷剛性の設定、内部履歴ループの形状
	接合面	接合要素、パネの材料モデル
	その他の材料	鋼板、FRP
	材料定数の設定	設定した材料定数が適切であるか



お問合せ先

JIPテクノサイエンス株式会社
解析ソリューション事業部
東京技術営業部 DIANA担当

E-mail : fem_sales@cm.jip-ts.co.jp

URL : <https://www.jip-ts.co.jp/>

 **JIP Techno Science Corporation**

Trusted Global Innovator

NTT DATA Group

NTT data

2018 © JIP Techno Science Corporation