

原子力リスク研究センター共研  
屋外重要土木構造物の断層変位に対する評価手法の  
確立に関する研究(カルバート編)

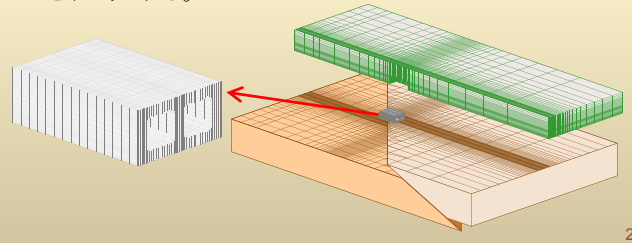
東北電力株式会社(幹事会社)  
北海道電力株式会社  
東京電力ホールディングス株式会社  
中部電力株式会社  
北陸電力株式会社  
関西電力株式会社  
中国電力株式会社  
四国電力株式会社  
九州電力株式会社  
日本原子力発電株式会社  
電源開発株式会社  
日本原燃株式会社

受託者:株式会社大林組

1. 研究概要

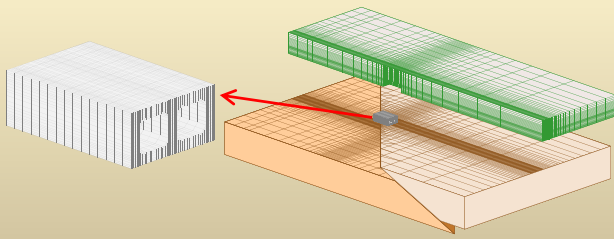
1.1 研究の目的

断層上に設置され、断層変位が作用する屋外重要土木構造物の機能に影響を及ぼす、損傷や破壊に対する裕度を、数値解析により定量的に評価する手法の確立を目的とする。



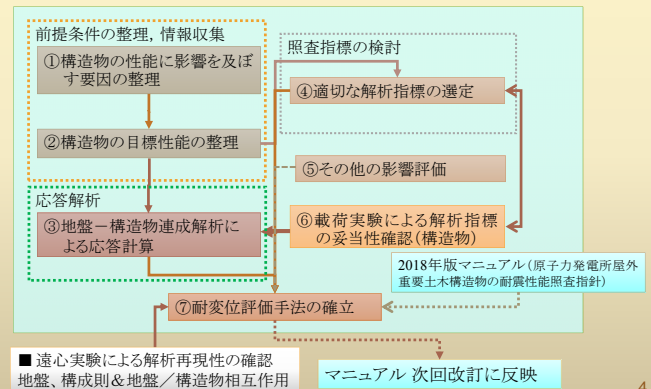
具体的成果

- ▶ 三次元地盤-構造物連成材料非線形解析を用いた解析方法の提案
- ▶ 対象構造物の要求性能に応じた限界値の提案
- ▶ 解析の限界と、適用範囲の明確化



1. 研究概要

1.4 研究項目の構成



2. 研究実施内容

- 2.1 構造物の性能に影響を及ぼす要因の整理
- 2.2 構造物の目標性能の整理
- 2.3 断層変位限界値の算定(応答値の算定)
- 2.4 適切な解析指標の選定
- 2.5 その他の影響評価
- 2.6 載荷実験による解析指標の妥当性確認

2.1 構造物の性能に影響を及ぼす要因の整理

要求機能	構造性能	影響を及ぼす要因
通水機能の確保	耐荷性能	必要な内空面積の喪失
貯水機能の確保	耐荷性能	必要な内空面積の喪失
	止水性能	過大なひび割れ 隣接ブロック、建屋間のずれ・開口等
支持機能の確保	耐荷性能	必要な内空面積の喪失 支持部のひび割れ かぶりコンクリートの剥離
	耐荷性能(変形)	隣接ブロック、建屋間のずれ等による相対変位

## 2.2 構造物の目標性能の整理

要求機能	構造性能	目標性能
通水機能の確保	耐荷性能	構造物が崩壊しない
貯水機能の確保	耐荷性能	構造物が崩壊しない
	止水性能	過大漏水の回避 土砂流入, 内水流出しない
支持機能の確保	耐荷性能	構造物が崩壊しない 配管支持部の健全性確保
	耐荷性能 (変形)	隣接ブロック, 建屋間に有害なズレ等が生じない

7

## 2.1 構造物の目標性能の整理

要求機能	構造性能	損傷(解析)指標とその閾値
通水機能の確保	耐荷性能	コンクリート圧壊, 限界変形など
貯水機能の確保	耐荷性能	コンクリート圧壊, 限界変形など
	止水性能	許容ひび割れ幅 躯体ブロックの剛体変位量
支持機能の確保	耐荷性能	コンクリート圧壊, 限界変形など 部材耐力(鉄筋降伏など)
	耐荷性能 (変形)	構造物の剛体変位量

8

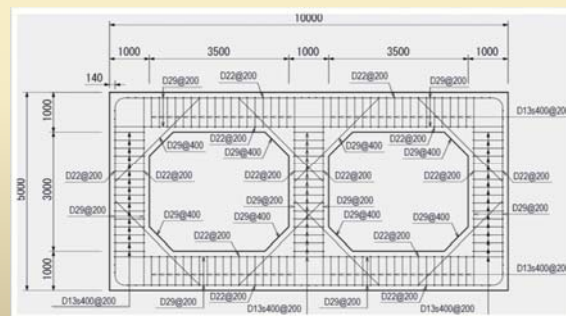
## 2. 研究実施内容

- 2.1 構造物の性能に影響を及ぼす要因の整理
- 2.2 構造物の目標性能の整理
- 2.3 断層変位限界値の算定(応答値の算定)
- 2.4 適切な解析指標の選定
- 2.5 その他の影響評価
- 2.6 載荷実験による解析指標の妥当性確認

9

## 2.3 断層変位限界値の算定(応答値の算定)

(1) 対象構造物(2連ボックスカルバート)

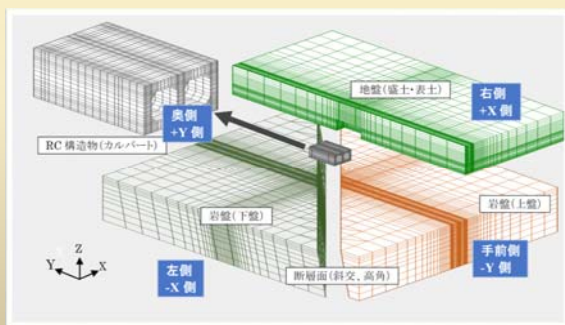


10

## 2.3 断層変位限界値の算定(応答値の算定)

(2) FEM解析モデル

地盤-構造物連成解析モデル(節点数、要素数 約150,000)

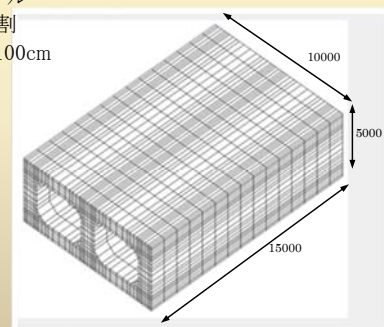


11

## 2.3 断層変位限界値の算定(応答値の算定)

(2) FEM解析モデル

構造物有限要素モデル  
部材厚さ方向6分割  
要素寸法15cm~100cm

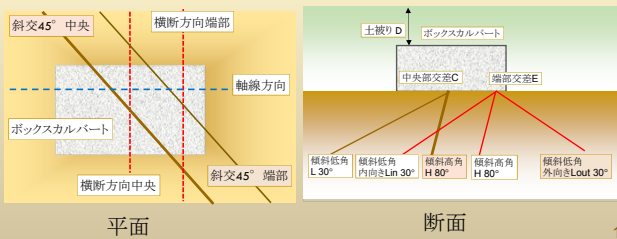


12

### 2.3 断層変位限界値の算定(応答値の算定)

#### (3) 連成解析のパラメータと解析ケース

- 成層地盤、土被りDパラメータ
- 断層交差位置(中央、端部)
- 走向斜交(45°)、傾斜(高角80°、低角30°)
- 断層センス(縦ずれ、横ずれ)



13

### 2.3 断層変位限界値の算定(応答値の算定)

#### (3) 連成解析のパラメータと解析ケース

- 成層地盤、土被りD=1m~25m
- 断層交差位置(中央、端部)
- 走向斜交(45°)、傾斜(高角80°、低角30°)
- 断層センス(縦ずれ、横ずれ)

	地盤・岩盤形状		断層面定義		変位センス		
	土被りD(m)	土層	交差位置	走向	傾斜	縦ずれ	横ずれ
C-1.1	1	成層	中央	45°(斜交)	高角80°	逆断層	
C-1.2	4	成層	中央	45°(斜交)	高角80°	逆断層	
C-1.3	8	成層	中央	45°(斜交)	高角80°	逆断層	
C-1.4	25	成層	中央	45°(斜交)	高角80°	逆断層	
C-1.5	8	成層	中央	45°(斜交)	高角80°	正断層	
C-2	8	成層	端部	45°(斜交)	低角30°	正断層	
C-3.1	8	成層	中央	45°(斜交)	高角80°		右横ずれ
C-3.2	8	成層	中央	45°(斜交)	高角80°		左横ずれ
C-3.3	8	成層	中央	45°(斜交)	高角80°	逆断層	右横ずれ

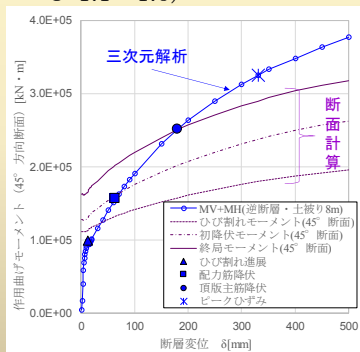
14

### 2.3断層変位限界値の算定(応答値の算定)

#### (4) 応答解析結果(ケースC-1.1~1.5)

##### ケースC-1.3(土被り8m)

- 曲げ損傷、曲げ降伏
- 側圧による軸力を考慮した曲げによる
  - ひびわれモーメント
  - 降伏モーメント
  - 終局モーメント
 と整合した応答となる。
- 最終的には表層地盤が、せん断破壊する



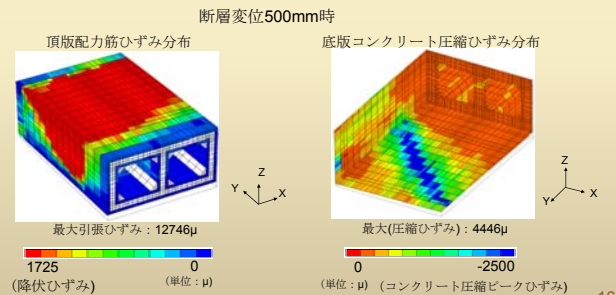
15

### 2.3断層変位限界値の算定(応答値の算定)

#### (4) 応答解析結果(ケースC-1.1~1.5)

##### ケース C-1.3(土被り8m)

- 破壊モードは、頂版配力鉄筋曲げ降伏後の地盤せん断破壊



16

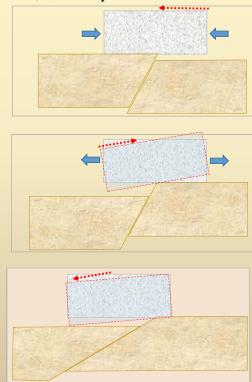
### 2.3断層変位限界値の算定(応答値の算定)

#### (5) 解析条件パラメータ選定(ケースC-2)

##### ケースC-2のパラメータ選定

- 断層交差位置: **端部**、斜交
- 断層傾斜角: **30° 低角**
- 断層変位センス: **正断層**

構造物が転倒し、先端(つま先)が下がり先端が岩盤に接地する。その結果、変形/損傷モードは複雑となる。



17

### 2.3 断層変位限界値の算定(応答値の算定)

#### (5) 応答解析結果(ケースC-2)

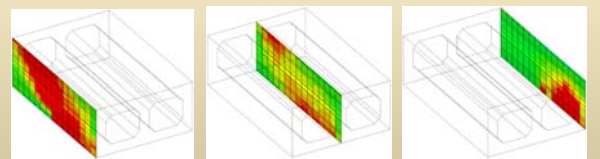
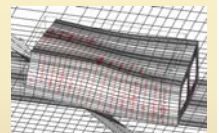
作用荷重: 下向きの上載荷重と自重

**上盤側:**断層線から先が浮き上がり断層線を固定端とした**片持ち梁構造**

→上側引張の曲げ変形

**下盤側:**構造物が転倒、端部は下盤岩盤に接触し、断層線と接触点を支持点とした**梁構造**

→岩盤接触部から岩盤水平変位による摩擦力が構造物底面に引張力が作用、下側引張の曲げ変形



構造物縦断面壁縦断方向ひずみ分布(赤色が引張)

18

## 2. 研究実施内容

- 2.1 構造物の性能に影響を及ぼす要因の整理
- 2.2 構造物の目標性能の整理
- 2.3 断層変位限界値の算定
- 2.4 適切な解析指標の選定
- 2.5 その他の影響評価
- 2.6 載荷実験による解析指標の妥当性確認

19

## 2.4 適切な解析指標の選定

- ▶ 構造物の損傷, 要求性能と解析指標の整理
- ▶ 被災事例調査(RC構造物の破壊・損傷例と性能)
- ▶ 既往研究での解析指標と損傷に対する閾値の整理

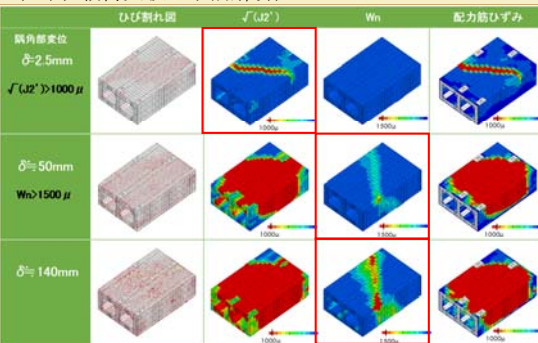


載荷実験結果等を踏まえて, 解析指標の選定, 適用性を検討していく

20

## 2.4 適切な解析指標の選定

コンクリート標準示方書の材料損傷指標の適用性検討  
(一例: 載荷実験の事前解析)



21

## 2. 研究実施内容

- 2.1 構造物の性能に影響を及ぼす要因の整理
- 2.2 構造物の目標性能の整理
- 2.3 断層変位限界値の算定
- 2.4 適切な解析指標の選定
- 2.5 その他の影響評価
- 2.6 載荷実験による解析指標の妥当性確認

22

## 2.6 載荷実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (1) 実験の目的

- ① 断層変位による損傷～破壊現象の三次元材料非線形解析による解析追従性の検証
- ② 実験時に計測, 目視により確認できる構造物の損傷・破壊状況と解析指標との関係を明らかにする

以上から, 断層変位評価において適用する,

- ・要求性能に応じた解析指標とその閾値
- ・強非線形域での解析限界

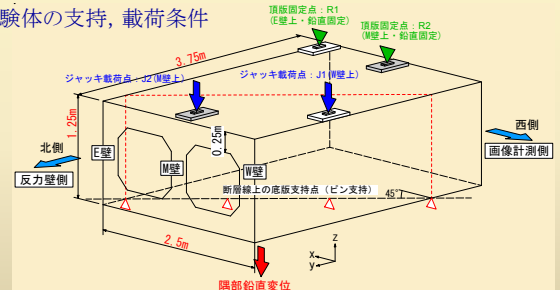
を設定するバックデータとする。

23

## 2.6 載荷実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (2) 実験の概要

#### 試験体の支持, 載荷条件



支持条件: 底版を構造物軸線方向に対して45°方向の線上に支持、  
頂版を2点で固定(E壁・M壁上、端部)

載荷条件: ジャッキ2台で載荷(W壁・M壁上、底版支持点に平行)

24

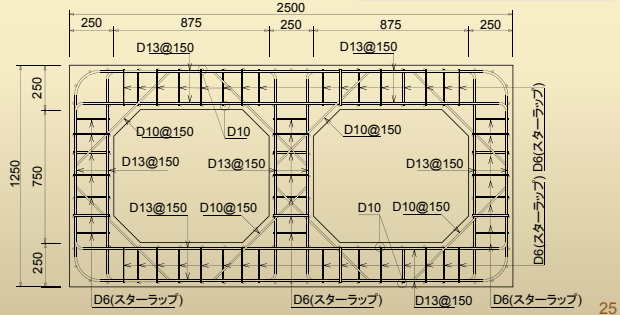


## 2.6 載荷実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (2) 実験の概要 試験体諸元

外形寸法:幅2.5m×1.25m×奥行き3.75m  
 (「実構造物」の1/4縮尺・重量約17 tf)  
 部材厚:0.25m(全部材共通)

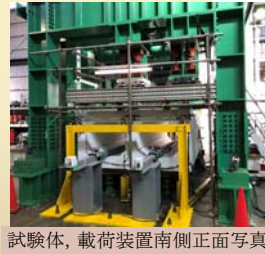
主筋:D13, D10  
 配力筋:D8  
 セン断補強筋:D6  
 コンクリート強度:24N/mm<sup>2</sup>相当  
 鉄筋:SD345相当



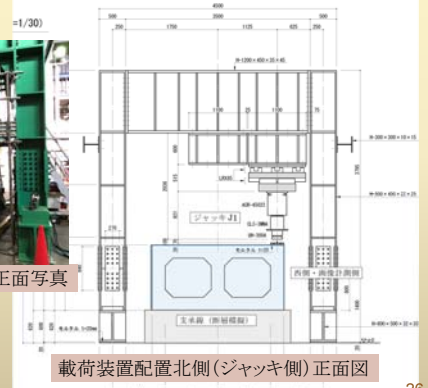
## 2.6 載荷実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (2) 実験の概要

#### 載荷装置



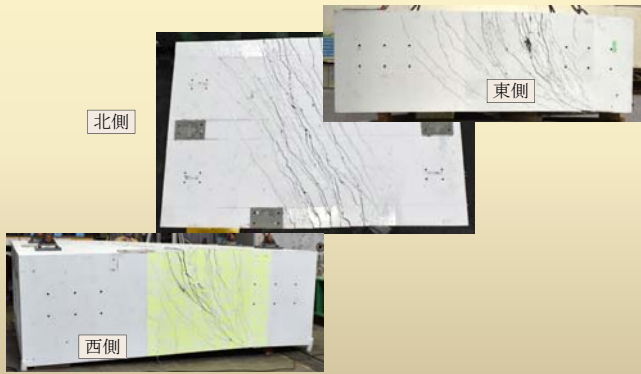
試験体, 載荷装置南側正面写真



載荷装置配置北側(ジャッキ側)正面図

## 2.6 載荷実験による解析と評価手法の妥当性確認

### 実験終了時ひびわれ分布(除荷後撤去時写真)(二体目)



- ✓頂版上面ひび割れが広範囲に発生(ひび割れ幅1cm超)
- ✓底板下支承線直上の頂版鉄筋の降伏が先行し、その後壁鉄筋が降伏する曲げ損傷/破壊モード



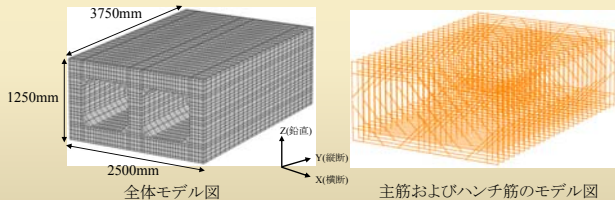
## 2.6 載荷実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (4) 解析による損傷・破壊モードの確認

#### 解析モデル, 解析条件

要素数:約30000  
 各部材は厚さ方向に5分割

主筋・ハンチ筋:トラス要素  
 配力筋・セン断補強筋:埋込み鉄筋

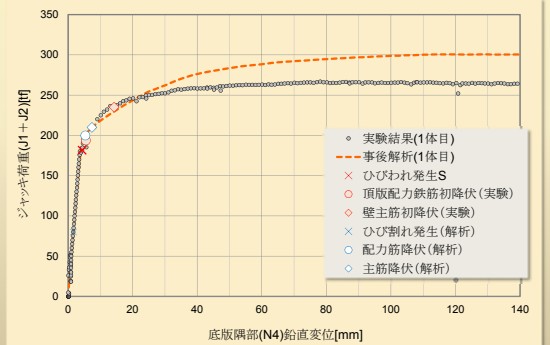


- 解析コード:FINAL
- コンクリート, 鉄筋に材料非線形特性を考慮
- 荷重制御 → 変位制御への移行を考慮

## 2.6 載荷実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (4) 解析による損傷・破壊モードの確認

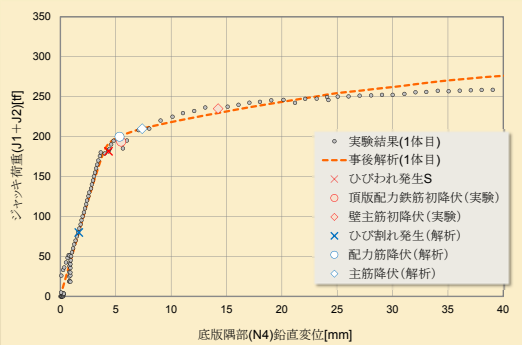
#### 荷重変位関係 実験結果と事後解析(一体目)



## 2.6 載荷実験による解析と評価手法の妥当性確認

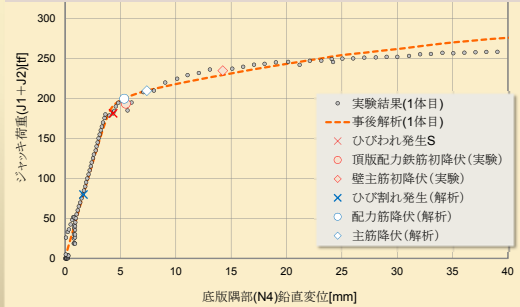
### (4) 解析による損傷・破壊モードの確認

荷重変位関係 実験結果と事後解析(一体目拡大)



31

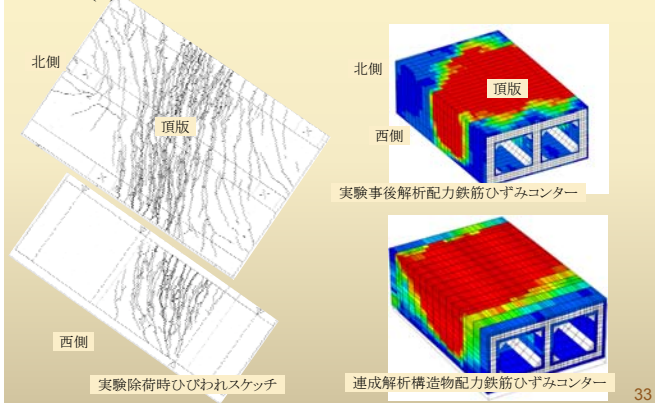
- ✓ 配力筋の初降伏(約5mm)の8倍(8・δy=約40mm)までの範囲では荷重～変位関係はよく一致している。
- ✓ 解析は構造物の挙動を良く再現している。
- ✓ 10・δy超の大変形領域(～140mm)でも、破壊/損傷モードは解析による再現性は認められる



32

## 2.6 載荷実験による解析と評価手法の妥当性確認

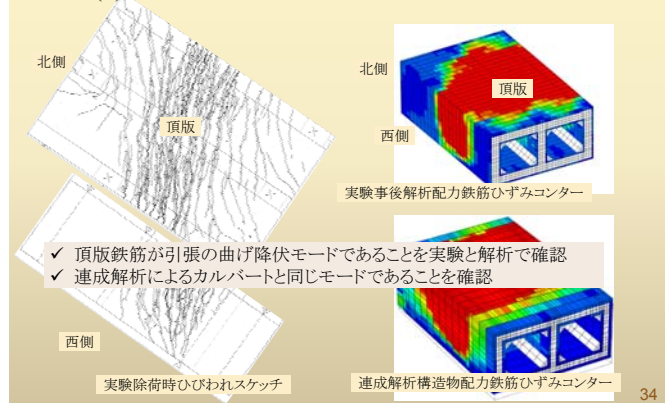
### (4) 解析による損傷・破壊モードの確認



33

## 2.6 載荷実験による解析と評価手法の妥当性確認

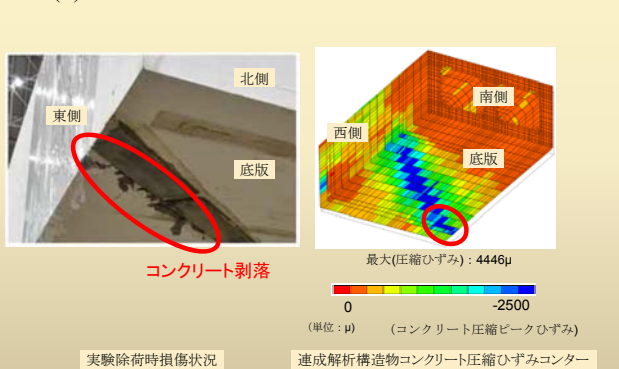
### (4) 解析による損傷・破壊モードの確認



34

## 2.6 載荷実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (4) 解析による損傷・破壊モードの確認



35

## 2.6 載荷実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (5) 実験計測計画と計測結果速報

- 1) 試験体の損傷/破壊計測  
ひずみ/ひびわれを複数の方法によって計測
- 2) 試験体の変形モードの計測  
構造物全体としての挙動の把握と評価に必要なデータ取得

載荷実験と解析結果との対比を実施することから、解析結果(分散ひびわれ/平均ひずみ)との親和性の高い計測内容・方法を選定

計測方法	目的と特徴	計測点数
鉄筋ひずみゲージ	鉄筋の局所ひずみをゲージにより多点で測定	105
変位計(L=300)によるひずみ計測	試験体表面の長さ30cmの範囲の平均ひずみ	頂版およびE壁 12
3方向の計測により軸、せん断ひずみを測定		
光ファイバーひずみ計	頂版の鉄筋(配力筋)に沿ったひずみ分布(試験体Ⅱのみで実施)	頂版配力筋1
変位計測	載荷点、頂点の変位、変形モード抽出	12点26成分
内空ひびわれ計測	デジタル撮影画像によるひびわれ抽出	内空2(壁、天井3面)
画像計測	3Dカメラとデジタル画像相関法によるひずみ/変位分布	W壁
頂版写真撮影	デジカメによる頂版のひびわれ損傷状況の確認	頂版2

36

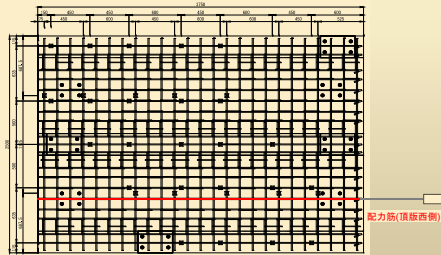
## 2.6 荷重実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (5) 実験計測計画と計測結果速報

#### 光ファイバーひずみ計

頂版上で配力筋1本のひずみを全長光ファイバーによって測定

- 鉄筋ひずみを連続測定することが可能
- ひびわれ発生後も、鉄筋に沿ったひずみ分布を計測することが可能
- 更に解析の平均ひずみとの比較にも有用

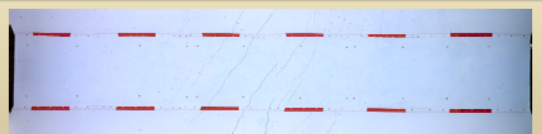
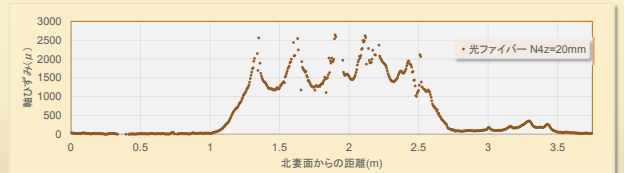


37

## 2.6 荷重実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (5) 実験計測計画と計測結果速報

#### 光ファイバーひずみ計

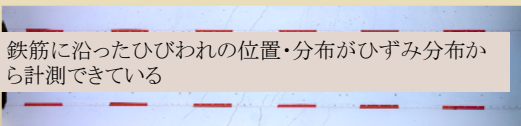
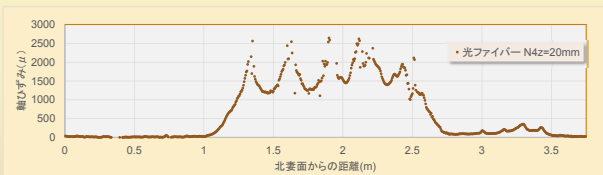


38

## 2.6 荷重実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (5) 実験計測計画と計測結果速報

#### 光ファイバーひずみ計



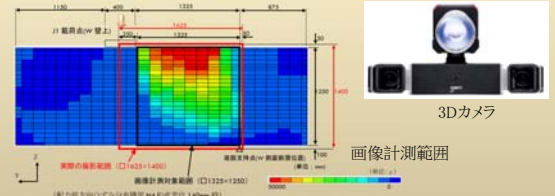
39

## 2.6 荷重実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (5) 実験計測計画と計測結果速報

#### 画像計測 西側側壁

- 曲げ降伏する過程で、荷重点側の側壁は、頂部に引張りひずみ／ひびわれが発生、さらに中立軸が下がり下端では圧縮ひずみが增大
- 壁は壁面内の損傷／破壊モードの進展が顕著に表れる
- 面外方向にも剛体変位による傾きが生じ、荷重点側壁を対象として、3Dカメラを用いた画像計測により、変位／ひずみ分布を測定



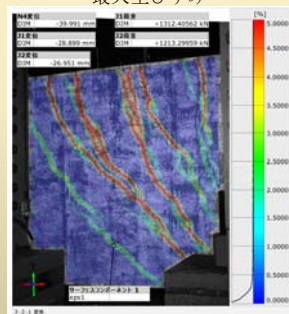
40

## 2.6 荷重実験による解析と評価手法の妥当性確認

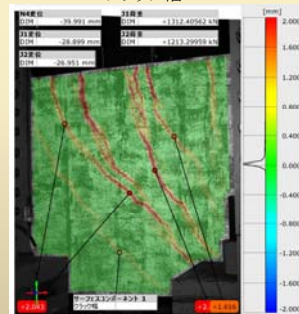
### (5) 実験計測計画と計測結果速報

#### 画像計測 西側側壁

##### 最大主ひずみ



##### クラック幅



41

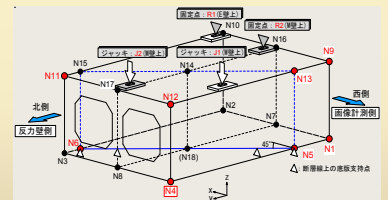
## 2.6 荷重実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (5) 実験計測計画と計測結果速報

#### 変位計測

##### 変位計測の目的

- 着目部材の構成点変位を剛体変位／変形成分に分離、マクロ損傷評価に適用
- 実験における荷重制御において参照する変位(N4, J1, J2)の取得
- 実験と解析結果の整理で用いる変位代表値(N4)の取得



各点の変位には3変位成分(と回転成分)を含むため、事前解析による想定変位量を考慮して計測方法と計測器具を選定した。

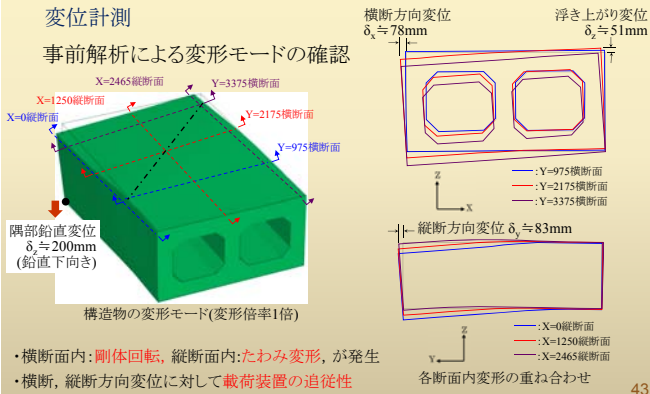
42

## 2.6 荷重実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (5) 実験計測計画と計測結果速報

#### 変位計測

#### 事前解析による変形モードの確認



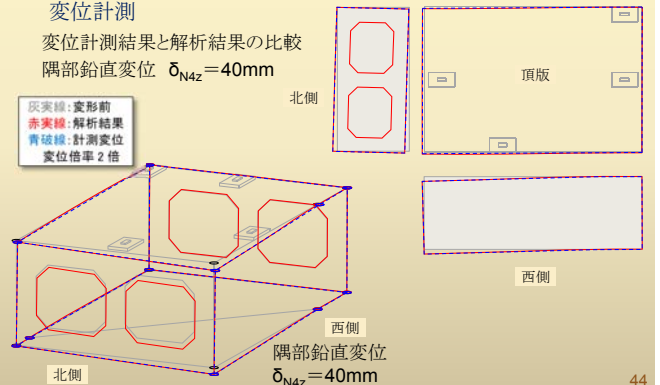
## 2.6 荷重実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (5) 実験計測計画と計測結果速報

#### 変位計測

#### 変位計測結果と解析結果の比較

隅部鉛直変位  $\delta_{N4z} = 40\text{mm}$



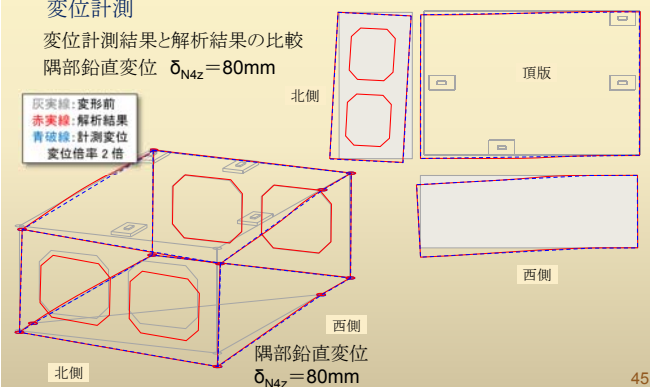
## 2.6 荷重実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (5) 実験計測計画と計測結果速報

#### 変位計測

#### 変位計測結果と解析結果の比較

隅部鉛直変位  $\delta_{N4z} = 80\text{mm}$



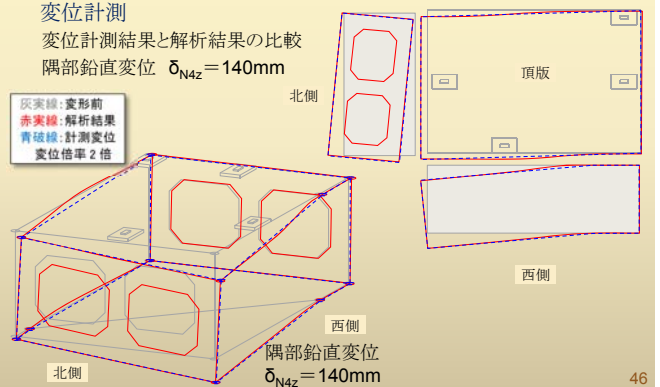
## 2.6 荷重実験による解析と評価手法の妥当性確認

### (5) 実験計測計画と計測結果速報

#### 変位計測

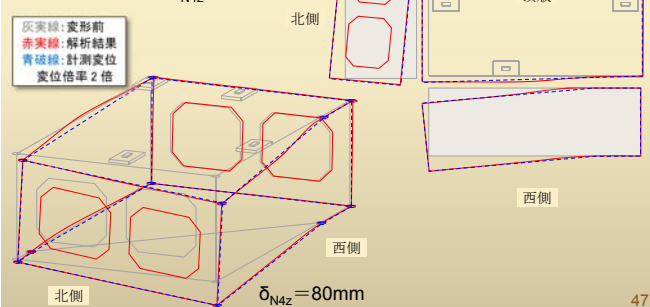
#### 変位計測結果と解析結果の比較

隅部鉛直変位  $\delta_{N4z} = 140\text{mm}$



- ✓ 変形モードは実験最後の隅部鉛直変位140mmまで、解析結果は実験計測結果を良く再現している。
- ✓ 実験においても、解析でも安定しており、曲げ降伏モードでは構造的、解析的な十分に靱性を有しており、不安定現象は見られない。

隅部鉛直変位  $\delta_{N4z} = 140\text{mm}$



## 3. まとめ

・今後、実験の損傷状況と解析指標の閾値との関係性を把握し、「連成解析による応答計算」と「選定された解析指標」により、耐変位評価手法の確立を目指す。  
各検討ケースにおいて、目標性能に対する限界断層変位量を算定する。

・本手法は一般のカルバート構造物にも適用可能であると考える。

・「断層変位と地震動との重畳問題」及び「隣接ブロック間との開き、接触」についても今後取り組む予定である。