

屋外重要土木構造物の断層変位に対する影響評価技術

小委員会幹事

熊田広幸（東北電力）

永井秀樹（大林組）

山口和英（電力中央研究所）

1

別冊の構成

テキスト

原子力発電所
 屋外重要土木構造物の
 耐震性能照査指針<別冊>
 断層変位に対する影響評価技術
 2021



第1章 断層変位に対する影響評価技術

- 1.1 基本的な考え方
- 1.2 基本事項の整理
- 1.3 解析手法の選定と断層変位解析
- 1.4 断層変位に対する照査

第2章 断層変位に対する性能照査の照査例

第3章 断層変位に対する影響評価技術に係る諸検討

- 3.1 断層変位を受ける地中RCボックスカルバートに対する載荷実験とその解析
- 3.2 様々な断層変位に対する地中RCボックスカルバートの耐変位評価
- 3.3 断層変位と地震との重畳が地中RCボックスカルバートの応答挙動に及ぼす影響評価
- 3.4 地中RCボックスカルバートと隣接構造物との相互影響評価
- 3.5 立坑を含めた地中RCボックスカルバート全体系の損傷評価

2

背景と位置付け

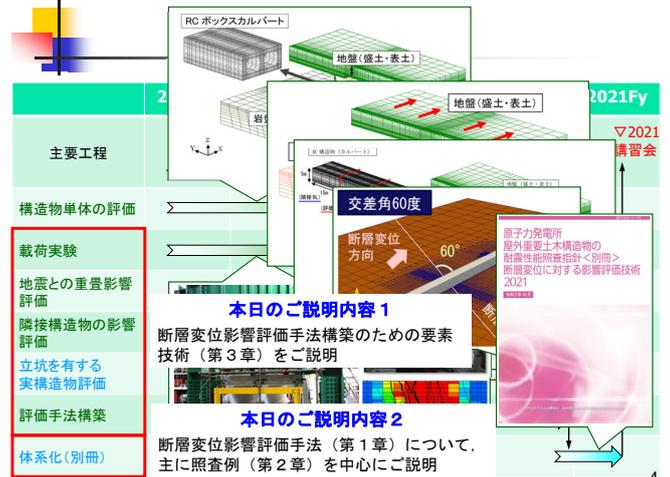
◆ 背景

- 東日本大震災（3.11）を契機に原子力発電所の新規制基準が制定され、地震・津波・火山など自然事象に関する設計基準が強化された。
- 断層に関しては、将来活動する可能性のある断層等の露頭のある地盤には、屋外重要土木構造物の設置が認められていない。
- 一方で、断層変位が生じる残余のリスクに対して定量的な評価手法を構築しておくことは重要である。

◆ 本書の位置付け

- 屋外重要土木構造物の断層変位に対する評価方法の一例を示すもの。
- 一般的な地中構造物の評価にも適用可能。

3



4

別冊の構成

テキスト

原子力発電所
 屋外重要土木構造物の
 耐震性能照査指針<別冊>
 断層変位に対する影響評価技術
 2021



第1章 断層変位に対する影響評価技術

- 1.1 基本的な考え方
- 1.2 基本事項の整理
- 1.3 解析手法の選定と断層変位解析
- 1.4 断層変位に対する照査

第2章 断層変位に対する性能照査の照査例

第3章 断層変位に対する影響評価技術に係る諸検討

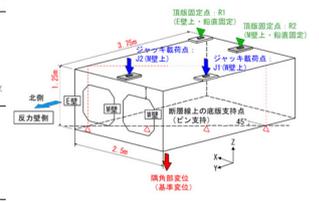
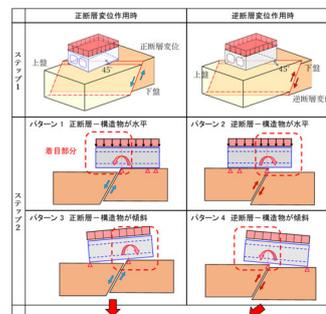
- 3.1 断層変位を受ける地中RCボックスカルバートに対する載荷実験とその解析
- 3.2 様々な断層変位に対する地中RCボックスカルバートの耐変位評価
- 3.3 断層変位と地震との重畳が地中RCボックスカルバートの応答挙動に及ぼす影響評価
- 3.4 地中RCボックスカルバートと隣接構造物との相互影響評価
- 3.5 立坑を含めた地中RCボックスカルバート全体系の損傷評価

5

3.1 断層変位を受ける地中RCボックスカルバートに対する載荷実験とその解析

p.50~68

◆ 載荷実験の概要



実験の目的

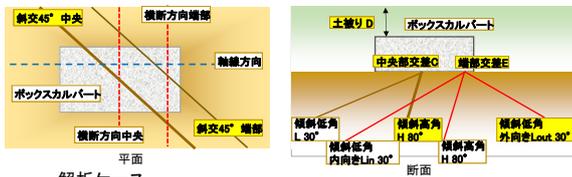
- 三次元解析の強非線形領域までの追従性の検証
- 三次元解析での損傷指標の適用性の検証

6

3.2 様々な断層変位・センスに対する地中RCボックスカルバートの耐変位評価

p.89~98

◆ 様々な断層変位・センス



解析ケース

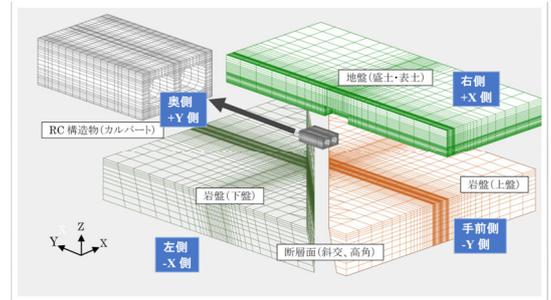
解析ケース	地盤・岩盤形状		断層面定義			変位センス	
	土被り D (m)	土層	交差位置	走行	傾斜	縦ずれ	横ずれ
C-1-1	1	成層	中央	斜交 45°	高角 80°	逆断層	
C-1-2	8	成層	中央	斜交 45°	高角 80°	逆断層	
C-1-3	25	成層	中央	斜交 45°	高角 80°	逆断層	
C-1-4	8	成層	中央	斜交 45°	高角 80°	正断層	
C-2	8	成層	端部	斜交 45°	低角 30°	正断層	
C-3-1	8	成層	中央	斜交 45°	高角 80°		右横ずれ
C-3-2	8	成層	中央	斜交 45°	高角 80°		左横ずれ
C-3-3	8	成層	中央	斜交 45°	高角 80°	逆断層	右横ずれ

13

3.2 様々な断層変位・センスに対する地中RCボックスカルバートの耐変位評価

p.89~98

◆ 解析モデル



地盤-構造物連成解析モデル
(要素数 約150,000)

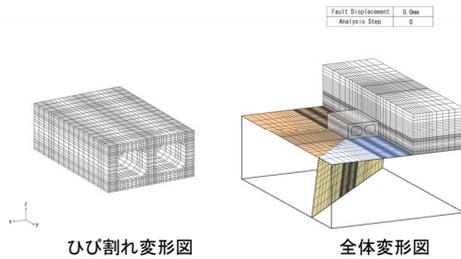
14

3.2 様々な断層変位・センスに対する地中RCボックスカルバートの耐変位評価

p.89~98

◆ 解析結果 (Case1-2)

(土被り8m, 逆断層, 中央・高角)



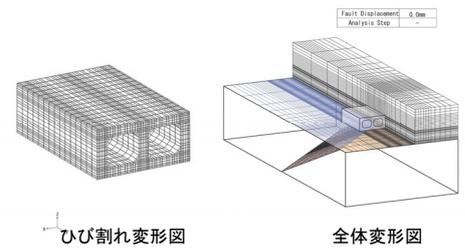
15

3.2 様々な断層変位・センスに対する地中RCボックスカルバートの耐変位評価

p.89~98

◆ 解析結果 (Case2)

(土被り8m, 正断層, 端部・高角)



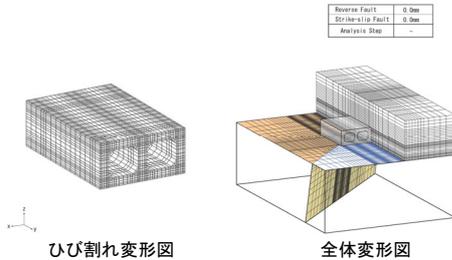
16

3.2 様々な断層変位・センスに対する地中RCボックスカルバートの耐変位評価

p.89~98

◆ 解析結果 (Case3-3)

(土被り8m, 逆断層+横ずれ断層, 中央・高角)



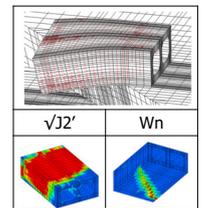
17

3.2 様々な断層変位・センスに対する地中RCボックスカルバートの耐変位評価

p.89~98

◆ 耐変位評価の結果 (Case1-2)

(土被り8m, 逆断層, 中央・高角)



要求性能	損傷状況	損傷指標	閾値	閾値を超える断層変位量
通水性能	構造物全体の崩壊	頂版・側壁の変形 ・部材厚増分 ・コンクリート圧縮限界の分布	頂版の崩壊 5mm 10,000 μ	解析の最大変位量 ($\delta=500$ mm)
間接支持性能	主筋降伏 コンクリート圧縮損傷 面外せん断損傷	σ_s W_s $\sqrt{J_2}$	1725 μ 1500 μ 2000~2500 μ	$\delta=149$ mm $\delta=310$ mm(壁) $\delta=140$ mm(壁)
貯水性能	ひび割れ幅: 0.2mm以下 ひび割れ幅: 2.0mm以下	$\sqrt{J_2}$ $\sqrt{J_2}$	1000 μ 5000 μ	$\delta=32$ mm(壁) $\delta=286$ mm(壁)

18

別冊の構成

テキスト

原子力発電所
屋外重要土木構造物の
耐震性能照査指針<別冊>
断層変位に対する影響評価技術
2021



第1章 断層変位に対する影響評価技術

- 1.1 基本的な考え方
- 1.2 基本事項の整理
- 1.3 解析手法の選定と断層変位解析
- 1.4 断層変位に対する照査

第2章 断層変位に対する性能照査の照査例

第3章 断層変位に対する影響評価技術に係る諸検討

- 3.1 断層変位を受ける地中RCボックスカルバートに対する載荷実験とその解析
- 3.2 様々な断層変位に対する地中RCボックスカルバートの耐変位評価
- 3.3 断層変位と地震との重畳が地中RCボックスカルバートの応答挙動に及ぼす影響評価
- 3.4 地中RCボックスカルバートと隣接構造物との相互影響評価
- 3.5 立坑を含めた地中RCボックスカルバート全体系の損傷評価

19

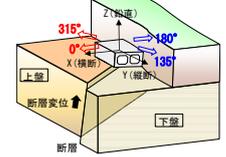
3.3 断層変位と地震との重畳が地中RCボックスカルバートの応答挙動に及ぼす影響評価

p.99~128

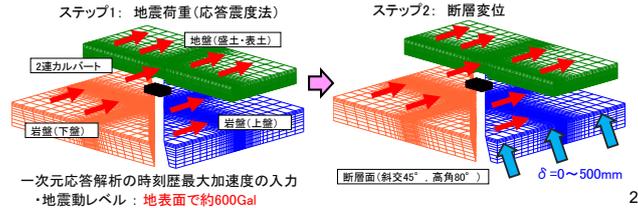
①重量イベントの順序

ケース	イベント順序(作用する荷重順序)
Case1	地震動(本震) ⇒ 断層変位
Case2	断層変位 ⇒ 地震動(余震)

③断層面と地震動の関係



②解析方法



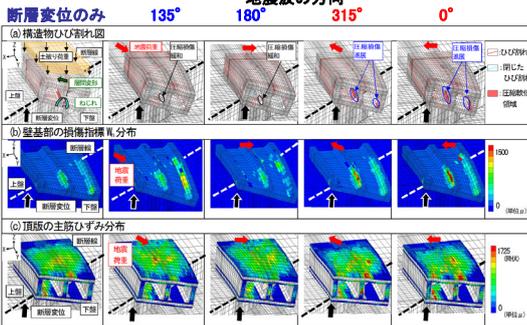
一次元応答解析の時刻歴最大加速度の入力
・地震動レベル：地表面で約600Gal

20

3.3 断層変位と地震との重畳が地中RCボックスカルバートの応答挙動に及ぼす影響評価

p.99~128

◆解析結果



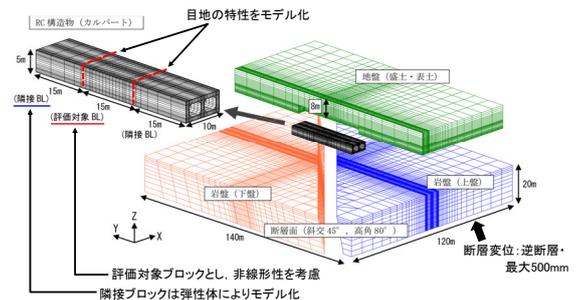
➤ 断層変位と地震動の重畳について、地震動の方向による影響についても、適切に考慮する必要がある。

21

3.4 地中RCボックスカルバートと隣接構造物との相互影響評価

p.129~156

◆解析モデル



評価対象ブロックとし、非線形性を考慮
隣接ブロックは弾性体によりモデル化

22

3.4 地中RCボックスカルバートと隣接構造物との相互影響評価

p.129~156

◆検討ケース

(隣接BLによる拘束：小)

解析ケース	隣接BLの条件	変位成分(逆断層)	備考
Case-1	・両側に1BL	高角80°	・隣接BLを両側に1BLモデル化
Case-2	・軸方向パネによる拘束	高角80°	・隣接BLが複数(5BL)連なる条件
Case-3	・軸方向パネによる拘束	低角30°	・隣接BLが複数(5BL)連なる条件
Case-4	・端部を岩盤に固定	低角30°	・隣接BLが拘束される条件 (Ex.隣接BLが建屋に隣接するなど)

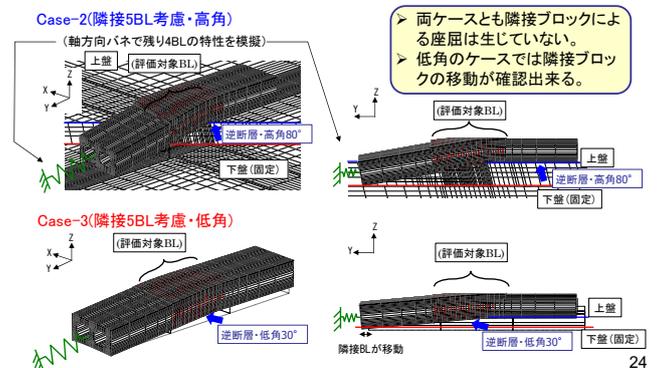
(隣接BLによる拘束：大)

23

3.4 地中RCボックスカルバートと隣接構造物との相互影響評価

p.129~156

◆解析結果 (断層変位500mm時・変形倍率10倍)

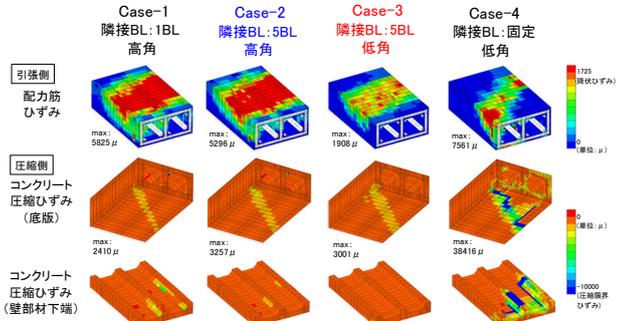


24

3.4 地中RCボックスカルバートと隣接構造物との相互影響評価

p.129~156

◆解析結果 (隣接ブロックの影響度: 断層変位250mm時)



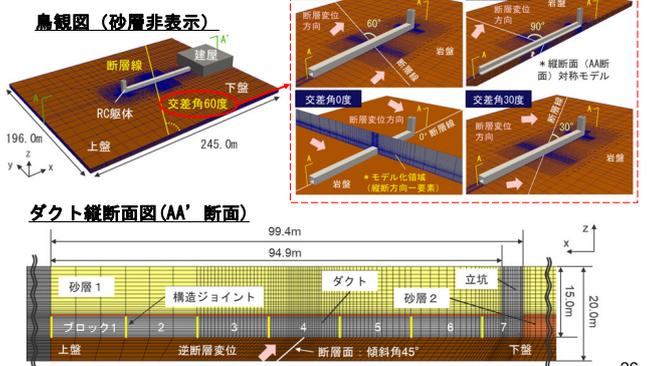
- > 隣接5ブロック程度の場合は、隣接ブロックによる影響は小さい。
- > 隣接ブロックの拘束が大きい場合などは、その影響の考慮が必要である。

25

3.4 地中RCボックスカルバートと隣接構造物との相互影響評価

p.157~171

◆解析モデル

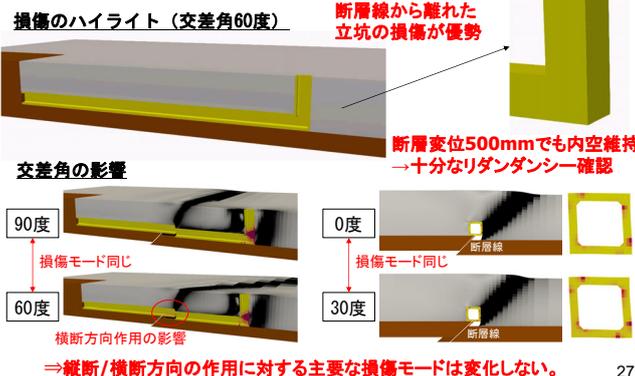


26

3.5 立坑を含めた地中RCボックスカルバート全体系の損傷評価

p.129~156

◆解析結果



27

3.4 地中RCボックスカルバートと隣接構造物との相互影響評価

p.157~171

◆まとめ

- 立坑を有する配管ダクト全体系の損傷過程 (交差角60度)
 - ・ 屈曲部の曲げ損傷と構造ジョイントのずれが支配的であることを確認
 - ・ 断層変位レベルに応じたモデル化手法を提案
- 交差角の違いによる損傷モードの変化
 - 縦断方向の作用が優勢の場合 (交差角60度/90度)
 - ・ 屈曲部の曲げ損傷に対する交差角の影響は小さい
 - ・ 交差角90度のケースで概ね安全側に評価可能
 - 横断方向の作用が優勢の場合 (交差角0度/30度)
 - ・ 三次元的に断層が交差する場合、断層直撃部の損傷が最大とは限らない
 - ・ 着目断面や、断層変位レベルによっては2次元 (交差角0度) で評価可能

断層変位レベルに応じた損傷評価
~20mm 断層直撃部のみでOK
~100mm 弾性モデルでOK
~500mm 3次元モデル必要

28

別冊の構成

テキスト



- 第1章 断層変位に対する影響評価技術
- 1.1 基本的な考え方
 - 1.2 基本事項の整理
 - 1.3 解析手法の選定と断層変位解析
 - 1.4 断層変位に対する照査
- 第2章 断層変位に対する性能照査の照査例
- 第3章 断層変位に対する影響評価技術に係る諸検討
- 3.1 断層変位を受ける地中RCボックスカルバートに対する載荷実験とその解析
 - 3.2 様々な断層変位に対する地中RCボックスカルバートの耐変位評価
 - 3.3 断層変位と地震との重畳が地中RCボックスカルバートの応答挙動に及ぼす影響評価
 - 3.4 地中RCボックスカルバートと隣接構造物との相互影響評価
 - 3.5 立坑を含めた地中RCボックスカルバート全体系の損傷評価

29

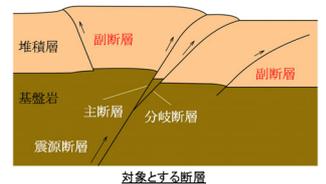
1.1 基本的な考え方

p.1~2

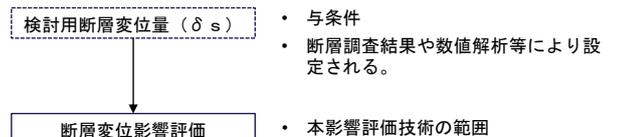
◆対象とする断層

(1.1.1: 図1.1-1)

- > 震源断層の活動により永久変位が生じる副断層を対象とする。
- > 断層変位量は、既往の文献を参照して、岩盤上面で数十cm程度とする。



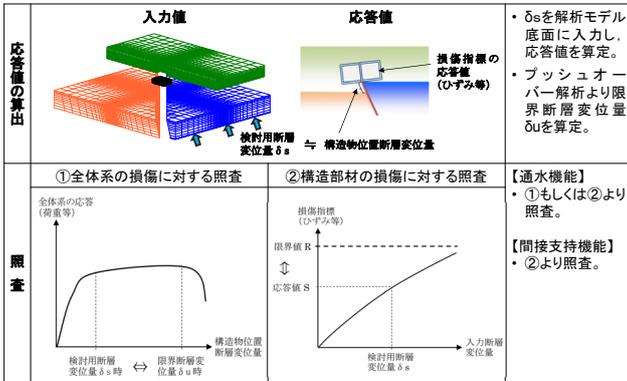
◆評価の流れ (1.1.3: 図1.1-2)



30

1.1.4 断層変位に対する性能照査の概要

p.3

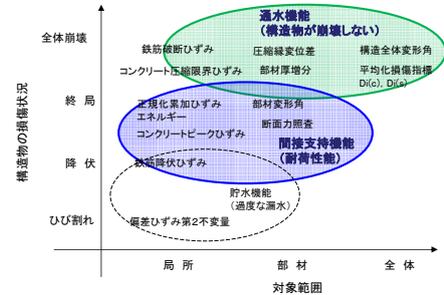


※ 図1.1-4に加筆 31

1.2.4 既往の損傷指標およびその閾値の整理

p.11~14

◆ 各機能に対する損傷指標 (図1.2-4)



◆ 評価に用いる損傷指標

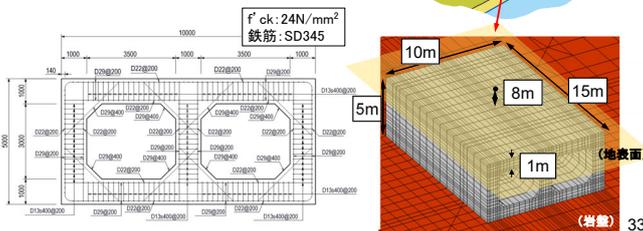
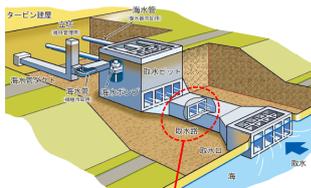
▶ 上記から、構造物の要求機能や変形モード等を考慮して選定。

2.3 照査条件

p.27~30

◆ 対象構造物

- ▶ 岩盤上に設置される鉄筋コンクリート製の取水路を対象。
- ▶ また、配管ダクトと仮定して配管の支持に関する照査も例示。
- ▶ 幅10m × 高さ5m × 延長15m、部材厚さ1m、土被り8m。

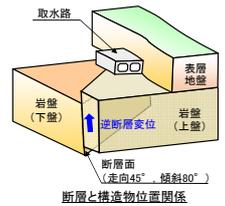


2.3 照査条件

p.27~30

◆ 自然・地質条件

- ▶ 表層地盤は砂層とし、土被り厚さ8m。
- ▶ 地下水位は表層地盤内には存在しない。
- ▶ 断層は取水路の中央付近で交差する逆断層(走向45°、傾斜80°)。



◆ 荷重条件

- ▶ 検討用断層変位量 δs 200mm (与条件)
- ▶ 解析最大変位量 500mm
(既往文献より、副断層の岩盤上面の最大変位量が概ね300mmであることを考慮して設定)

◆ 配管条件

- ▶ 断層変位に対する許容変位量 200mm (機器側からの与条件)

2.2 断層変位に対する性能設定

p.26~27

◆ 要求性能 (表1.2-2, 表2.2-1)

対象構造物	要求機能	通水機能	間接支持機能
取水路、取水ピット(スクリーン室)等	所要の海水を通水できる (必要な内空断面の確保)	所要の海水を通水できる (必要な内空断面の確保)	—
取水ピット(海水ポンプ室)、配管ダクト等	所要の海水を通水できる (必要な内空断面の確保)	機器・配管を安全に支持できる (機器・配管の設置空間の確保)	機器・配管を安全に支持できる (間接支持機能の確保)

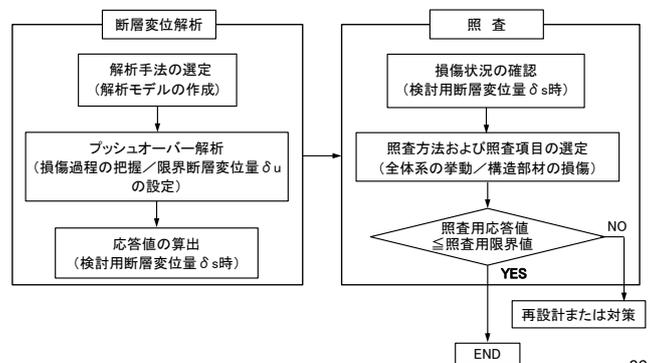
◆ 要求性能に影響を及ぼす要因 (表1.2-3, 表2.2-2)

評価性能	耐荷性能	止水性能・その他	床応答 (フロレスポンス)
通水機能	構造物・部材の耐力力・変形・損傷 (必要な内空断面の確保、機器・配管の設置空間の確保)	対象ブロックの変位による隣接ブロック、建屋との接続部の開き/ずれ/接触および損傷(内水の流出、外部土砂の流入など)	—
間接支持機能	機器・配管支持部の損傷(ひび割れ、剥離等)	ブロック間相対変位(機器・配管の変位追従性) 部材変形や傾斜など	変位と回転 時刻歴加速度応答 → 機器側での照査

1.4.1 照査の手順

p.19~20

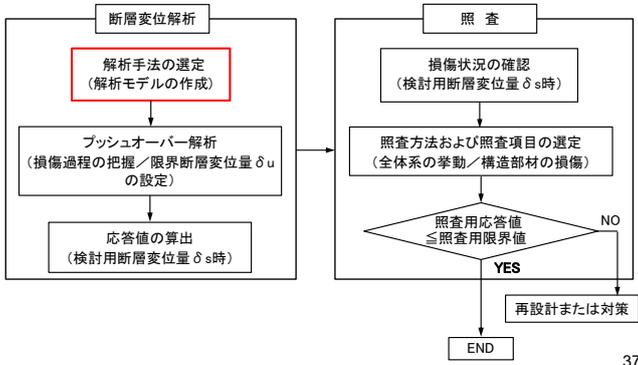
◆ 照査フロー (図1.4-1)



1.4.1 照査の手順

p.19~20

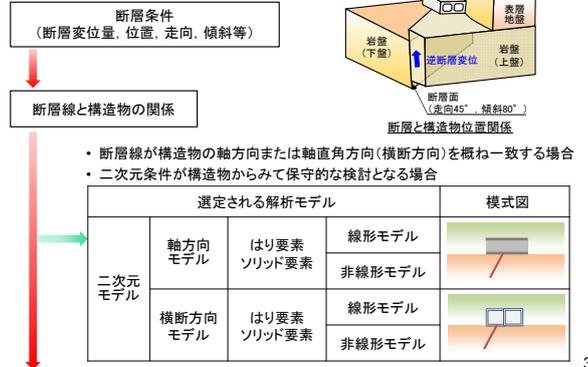
◆ 照査フロー (図1.4-1)



1.3.1 解析手法の選定

p.15~16

◆ 解析手法の選定フロー (図1.3-1)



1.3.1 解析手法の選定

p.15~16

構造物の損傷モード

- 構造物軸線と断層線が任意の角度で交差する場合
- 構造物が三次元的な形状であるが、破壊モードが明確で単純な場合

選定される解析モデル	模式図
三次元モデル	はり要素 シェル要素 積層シェル要素
	線形モデル 非線形モデル

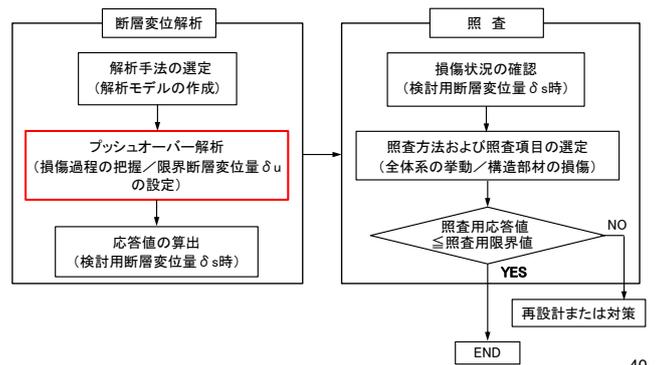
- 構造物が三次元的な形状であり、破壊モードが複雑な場合

選定される解析モデル	模式図
三次元モデル	ソリッド要素 非線形モデル

1.4.1 照査の手順

p.19~20

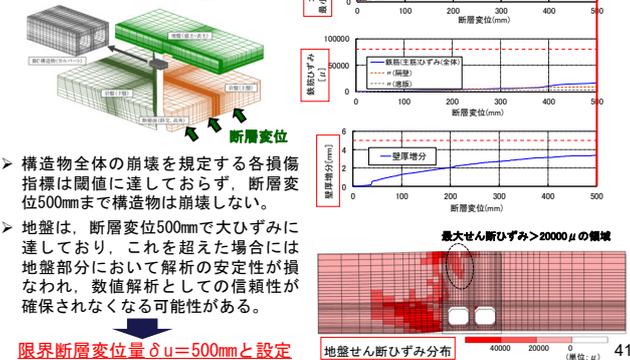
◆ 照査フロー (図1.4-1)



2.4.2 プッシュオーバー解析

p.34~43

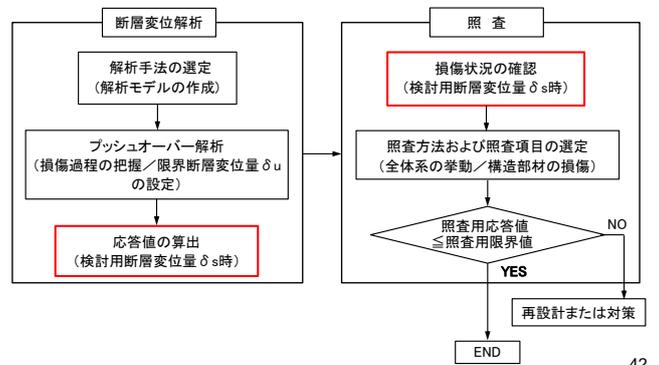
◆ 限界断層変位量 δu の設定 (2.4.2(2): 図2.4-11)



1.4.1 照査の手順

p.19~20

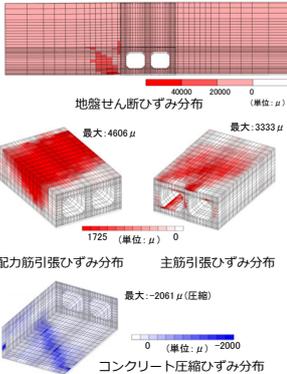
◆ 照査フロー (図1.4-1)



2.5.1 応答値の算出および損傷状態の確認

p.43~44

◆ 損傷状態 ($\delta s=200\text{mm}$)



- 地盤のせん断ひずみは、断層の延長線上の一部に20,000 μ を超える領域が分布するが地盤は全体的には健全といえる。
- 配筋引張りひずみは、断層延長線上の側壁の一部～頂版の広い範囲で降伏ひずみを超えているが、破断ひずみには達していない
- 主筋引張りひずみは、断層線から下盤側の頂版等の一部で降伏ひずみを超えているが、破断ひずみには達していない。
- コンクリートの圧縮ひずみは、断層線近傍で圧縮ピークひずみを僅かに超える程度である。

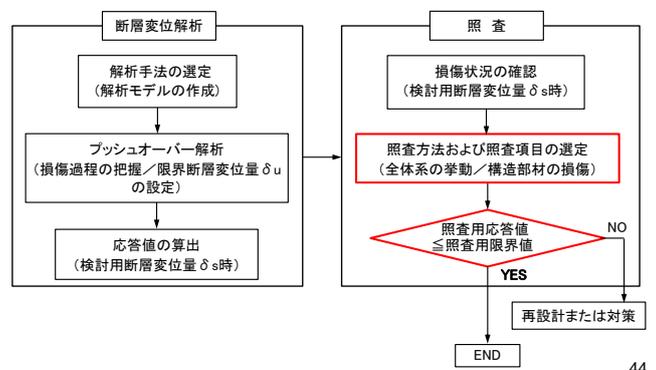
- ・ 耐力性能を維持している。
- ・ 断層位置を支持点とする構造物全体系の曲げ損傷モード。

照査では、曲げ損傷モードに対応する損傷指標を選定する必要がある。 43

1.4.1 照査の手順

p.19~20

◆ 照査フロー (図1.4-1)



44

2.5.2 通水機能に対する照査

p.45~47

◆ 全体系の挙動に対する照査 (2.5.2(1): 表2.5-1)

	検討用断層変位量 $\delta s=200\text{mm}$	全体系
照査用断層変位量	検討用断層変位量 δs [mm]	200
	応答係数 γ 。←表1.4-1参照	1.2
	照査用断層変位量 δsd [mm]	240
照査用限界断層変位量	限界断層変位量 δu [mm]	500
	解析結果の精度などに関する限界係数 γ_c	1.3
	材料強度に関する γ_c の割り増し ←表1.4-1参照	1.1
照査	照査用限界変位量 δud [mm]	350
	構造物係数 γ_i 。←表1.4-1参照	1.0
	照査値 $\gamma_i \cdot \delta sd / \delta ud$	0.69
安全性の判定		OK

⇒ 所要の安全係数 (表1.4-1) を考慮したうえで、照査値を満足しており、通水機能が確保されている。

45

2.5.2 通水機能に対する照査

p.45~47

◆ 構造部材の損傷に対する照査 (2.5.2(2): 表2.5-2)

検討用断層変位量 $\delta s=200\text{mm}$	通水機能		
	コンクリート主圧縮ひずみ	鉄筋ひずみ	部材厚増分
各指標の応答値 I_s	2445 [μ]	3575 [μ]	2.06 [mm]
応答係数 γ_c	1.2	1.2	1.2
照査用応答値 I_{sd}	2934 [μ]	4290 [μ]	2.47 [mm]
各指標の限界値 I_u	14033 [μ]	80000 [μ]	5.0 [mm]
照査用限界値 I_{ud}	14033 [μ]	80000 [μ]	5.0 [mm]
構造物係数 γ_i	1.0	1.0	1.0
照査値 $\gamma_i \cdot I_{sd} / I_{ud}$	0.21	0.06	0.50
安全性の判定	OK	OK	OK

⇒ 所要の安全係数 (表1.4-1) を考慮したうえで、照査値を満足しており、通水機能が確保されている。

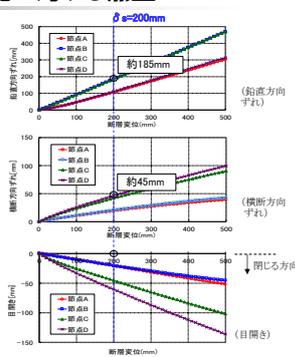
46

2.5.2 通水機能に対する照査

p.45~47

◆ 接続部の照査 (2.5.2(3))

-
- 断面変位: 高角80°
- ⇒ 下盤側の隣接ブロックとの界面にあたる構造物表面の4点での変位を用いてずれ量を評価する。
- ⇒ 接続部における傾斜は1.85%であり、通水を阻害する傾斜ではない。
- ⇒ 目地は閉じる方向であること、最大185mmの段差が生じるものの部材厚100mm以内であることから漏水および土砂注入は生じない。
- ⇒ 通水機能が確保されている。



※ 目開き変位も参考として記載するが、逆断層に対しては閉じる方向の変位である。
接続部の相対変位量
 $= \sqrt{(185^2 + 45^2)} \approx 191\text{mm}$

47

2.5.3 間接支持機能に対する照査

p.47~49

◆ 照査位置および照査方法

-
- ⇒ 底版および隔壁の配管支持部材位置を設定し、支持部材位置における各損傷指標を参照して照査を実施する。
- ⇒ 目地部の相対変位量と配管の許容変位量との比較により、配管の健全性を確認する。
- ※図2.5-4に加筆

48

2.5.3 間接支持機能に対する照査

p.47~49

◆ 支持位置の照査 (表2.5-3)

検射用断層変位量 $\delta_s=200\text{mm}$	損傷指標 W_n		鉄筋ひずみ	
	(隔壁)	(底板)	(隔壁)	(底板)
各指標の応答値 I_s	274 [μ]	25 [μ]	944 [μ]	684 [μ]
応答値				
応答値係数 γ_s	1.2	1.2	1.2	1.2
照査用応答値 I_{sd}	329 [μ]	30 [μ]	1133 [μ]	821 [μ]
限界値				
各指標の限界値 I_u	1500 [μ]	1500 [μ]	1725 [μ]	1725 [μ]
照査用限界値 I_{ud}	1500 [μ]	1500 [μ]	1725 [μ]	1725 [μ]
構造物係数 γ_i	1.0	1.0	1.0	1.0
照査				
照査値 $\gamma_i \cdot I_{sd}/I_{ud}$	0.22	0.02	0.66	0.48
安全性の判定	OK	OK	OK	OK

⇒ 配管支持部の位置の応答値に所要の安全係数 (表1.4-1) を考慮したうえで照査値を満足する。また、接続部の相対変位量は191mmであり、配管の許容変位量200mmを満足する。よって、配管の機能は確保される。

49

まとめ

- 本書は、屋外重要土木構造物を対象として、断層変位に対する定量的な安全性を評価する手法を提案したものである。
- 第1章では、断層変位に対する影響評価技術の基本事項、照査手法の概要を示している。
- 第2章では、原子力発電所の取水路などの地中ボックスカルバートを対象として、断層変位に対する評価手法の一例を示している。
- 屋外重要土木構造物以外の一般の構造物にも適用可能である。
- 本書の適用に関しては、以下に留意する必要がある。
 - 地震、隣接構造物の影響が大きいと判断される場合には、その影響を適切に考慮する必要がある (第3章3.3, 3.4を参照)。
 - 本書は、評価対象構造物が、断層変位を受けて全体曲げ変形、剛体変位する場合を対象としており、岩盤中に設置されるなど、せん断変形が卓越する場合には、適用性を確認する必要がある。

50

ご清聴ありがとうございました。

謝辞：本書は、主に電力9社と日本原子力発電(株)、電源開発(株)、日本原燃(株)による原子力リスク研究センター共通研究の成果を取り纏めたものである。研究を推進するにあたり、地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会メンバーはじめ多くの方々からご指導、ご協力を賜りました。関係各位に謝意を表す次第です。

51