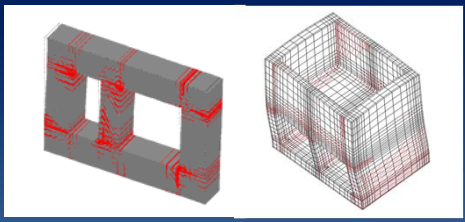
「地中構造物の耐震性能照査高度化」に関する公開講演会

地中構造物の変形性能に着目した耐震評価



大林組　永井 秀樹

地中構造物の変形性能に着目した耐震評価　目次

1. 研究の背景
2. 2次元モデルの変形照査
   - 2.1 評価事例1 （6連ﾎﾞｯｸｽｶﾙﾊﾞｰﾄ）
   - 2.2 評価事例2 （2連ﾎﾞｯｸｽｶﾙﾊﾞｰﾄ）
3. 3次元モデルの変形照査
   - 3.1 評価事例3 （開口のある箱型構造物）
   - 3.2 評価事例4 （箱型構造物～立坑）
4. まとめ

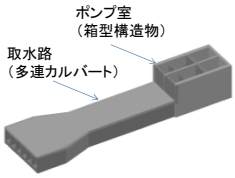
1. 研究の背景

- 原子力発電所の屋外重要土木構造物
  - ・想定を超える過酷な状況（大規模地震）に対する安全確保
  - ・設計用入力地震動の大幅な増加

⇕

- 地中構造物の地震時損傷事例は少ない。
- 地中構造物が有する鈍感性

入力増に対して「地盤の塑性化」、「構造物の剛性低下」、「地盤と構造物の相互作用」により、応答が線形に増加しない特性

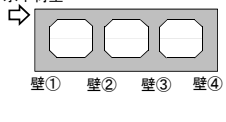


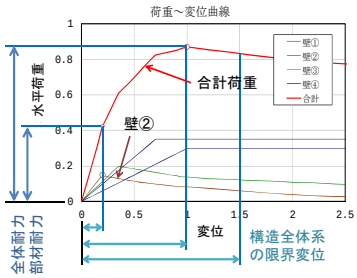
- **研究の目的**：設計照査技術の向上を図り、地中構造物が持っている耐震性能を適切に評価し、合理的な構造物の設計手法を提案する。

地中構造物を対象に
変形性能に着目した評価手法、評価事例を紹介

2. 2次元モデルによる変位照査

- **地中構造物の荷重～変位関係（取水路：多連カルバート）**
  - ・部材⇒全体系の照査
  - ・構造全体系の限界変位
  - ・壁部材の軸力保持性能

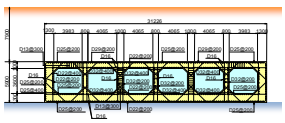




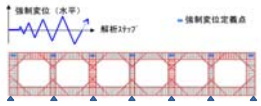
- ・縦軸（水平荷重）ではなく、横軸（変位）での照査

2.1 評価事例1 （6連ﾎﾞｯｸｽｶﾙﾊﾞｰﾄ）

- 対象構造物

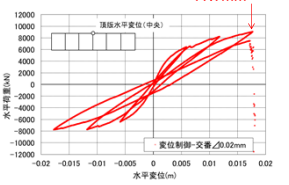


- 変位制御交番載荷解析



常時荷重を与えた後、交番載荷を行う。
コンクリート部・・・平面歪要素
（fck=24N/mm²、修正Ahmad-長沼モデル）
鉄筋・・・・トラス要素　解析ソフト・・・FINAL
（SD345,バイリニア）

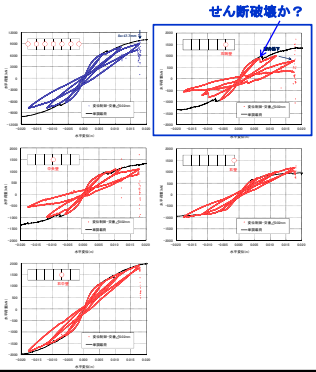
- 荷重～変位の関係



- ひび割れ図（δ＝17.7mm時）

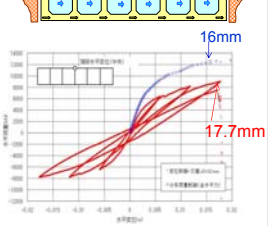
2.1 評価事例1 （6連ﾎﾞｯｸｽｶﾙﾊﾞｰﾄ）

- 各部材の荷重～変位関係



- 荷重制御単調載荷解析

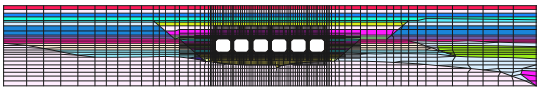
層間変位最大時刻の作用荷重を載荷



- ひび割れ図（δ＝16.0mm時）

2.1 評価事例1 （6連ﾎﾞｯｸｽｶﾙﾊﾞｰﾄ）

➢ 時刻歴動的解析

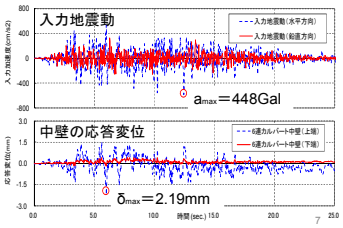


2次元モデル（構造物・・・交番載荷解析と同モデル）

➢ 地盤（平面歪要素）
表土、盛土・・・修正GHEモデル
岩盤・・・弾性

➢ 基本地震波
最大水平加速度・・・約450Gal
最大鉛直加速度・・・約300Gal

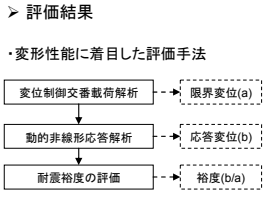
➢ 水平・上下同時加震

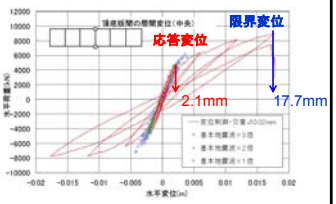


2.1 評価事例1 （6連ﾎﾞｯｸｽｶﾙﾊﾞｰﾄ）

➢ 評価結果

・変形性能に着目した評価手法





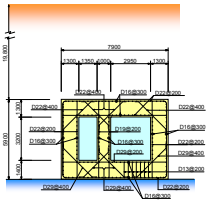
照査手法	限界値 (a)	応答 (b)	裕度 (a/b)
部材の耐力照査	653kN (耐力)	675kN	0.97
構造全体系の耐力照査	9,039kN (耐力)	4,570kN	2.0
構造全体系の変形照査	17.7mm (限界変位)	2.1mm	8.4

➢ 変形照査では、大きな裕度となる。

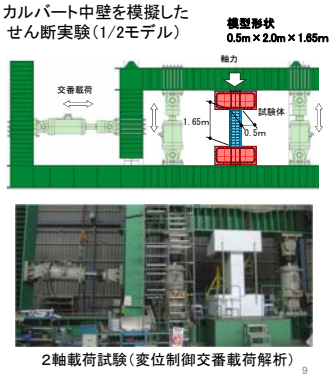
➢ 動的解析で地震波×3倍で破壊に至らず、実構造物も大きな裕度を持っていると考えられる。

2.2 評価事例2 （2連ﾎﾞｯｸｽｶﾙﾊﾞｰﾄ）

➢ 対象構造物



➢ カルバート中壁を模擬したせん断実験（1/2モデル）



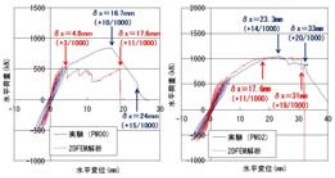
2軸載荷試験（変位制御交番載荷解析）

➢ 載荷方法：
①一定軸力(軸応力σ_N = 0.05f'ck)
② (破壊直前まで)交番載荷
③2%変位まで単調載荷
④軸力漸増載荷

2.2 評価事例2 （2連ﾎﾞｯｸｽｶﾙﾊﾞｰﾄ）

➢ 実験結果

せん断筋なし　　せん断筋比Pw=0.2%



➢ 要求性能との関係

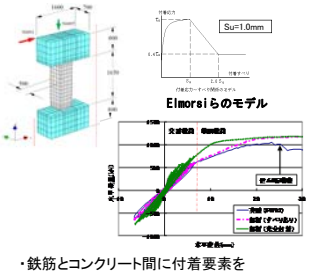
①配管支持性能（配管カルバート）
⇒かぶり確保
・・・せん断破壊直後に機能喪失

②通水性能（取放水カルバート）
⇒空間確保
・・・軸力保持ができなくなる時点で機能喪失

		限界変位	
		かぶり確保	空間確保
せん断筋なし	解析	4.8mm	17.6mm
	実験	16.7mm	24mm
Pw=0.2%	解析	31mm	
	実験	33mm	

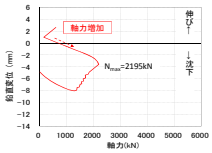
2.2 評価事例2 （2連ﾎﾞｯｸｽｶﾙﾊﾞｰﾄ）

➢ 3次元モデル、付着要素の導入



・鉄筋とコンクリート間に付着要素を入れた結果、荷重~変位関係が一致。
・付着要素を入れない場合は、変位が小さくなり、設計として安全側と判断できる。

➢ 壁部材のせん断破壊後の軸力保持機能



実験ケース	せん断筋比	最大軸力	最大応力/圧縮強度
PW00	0.0%	2195kN	0.15
PW02	0.23%	4091kN	0.28

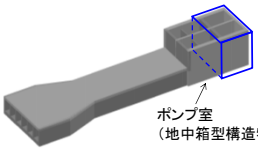
・せん断破壊後も、0.15·f'ck（コンクリート強度）の軸力を保持する。

以上、出典：雑誌「電力土木　2014年7月号」掲載
論文「変形性能に着目した屋外重要土木構造物の耐震性能評価に関する一考察」

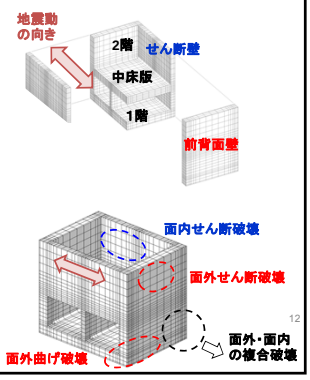
3. 3次元モデルの変形照査

➢ 開口のある箱型構造物の作用荷重～変形・破壊モード

対象構造物：
ポンプ室のような地中箱型構造物

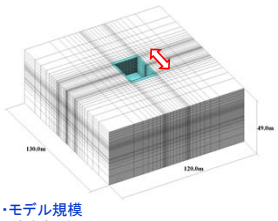


・作用荷重の評価
・変形（破壊）モードの把握
・せん断壁の変形角照査

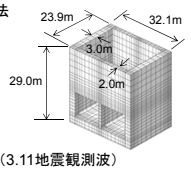


3.1 評価事例3（開口のある箱型構造物）

➢ 時刻歴動的解析

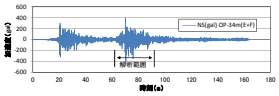


構造寸法

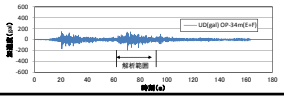


地震波（3.11地震観測波）

水平方向地震波　最大値：464Gal（70.5s）



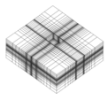
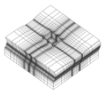
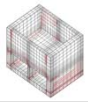
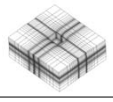
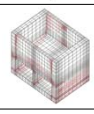
鉛直方向地震波　最大値：195Gal（70.3s）



・モデル規模
節点数：約60000
六面体要素数：約37000
・コンクリート部・・・ソリッド要素
（fck=24N/mm², 修正Ahmad-長沼モデル）
・鉄筋・・・埋込鉄筋(SD345)
・地盤構成則：修正GHEモデル
・構造物の地盤間：すべり、剥離を考慮
・解析ソフト：FIANL-GEO

3.1 評価事例3（開口のある箱型構造物）

➢ 解析結果－変形／ひび割れ図

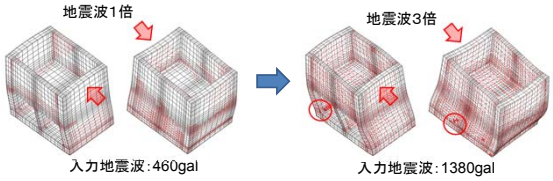
	全体変形図（変位倍率：100）	ひび割れ図
5.0s		
8.4s 最大層間変形時		
15.0s		

継続時間30sにおいて収束性に問題はなかった。

構造物に有害なひび割れの発生はなかった。

3.1 評価事例3（開口のある箱型構造物）

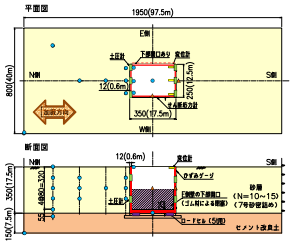
➢ 連成解析の結果（層間変形最大時）



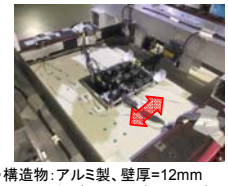
・開口側の面外変形による損傷
・1階せん断壁の面内変形による損傷

3.1 評価事例3（開口のある箱型構造物）

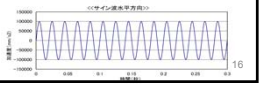
➢ 遠心模型実験の概要　（1/50モデル）



計測器	計測項目	計測位置
加速度計	構造物・地盤	構造物・振動台
変位計	構造物変位・土槽変位	側壁変位・土槽変位
ロードセル	作用荷重(2 方向)	支持地盤
ひずみゲージ	側壁のひずみ	側壁
土圧計	作用土圧	側壁
せん断応力計	せん断応力	側壁

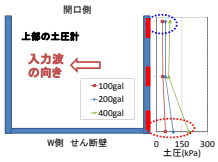


・構造物：アルミ製、壁厚=12mm
側壁の1面下部に開口部
・地盤
上層：7号硅砂（相対密度60～70%）
下層：セメント改良土
・入力波
サイン波：100Gal、200Gal、400Gal



3.1 評価事例3（開口のある箱型構造物）

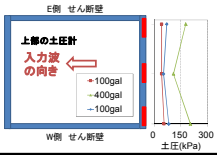
➢ 前背面土圧の分布状況



上部の土圧計

	100Gal	400Gal
開口側	34 Kpa	78 Kpa
せん断壁側	53 Kpa	190 Kpa

<参考>変形なし構造

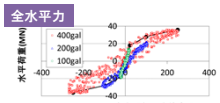


・構造物が変形するため、
開口側と中央部の土圧が小さくなる。
・周辺地盤からの影響より、
せん断壁側の土圧が大きくなる。
・これらの特徴は、入力波が増加するほど顕著になる。

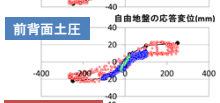
3.1 評価事例3（開口のある箱型構造物）

➢ 作用荷重の評価

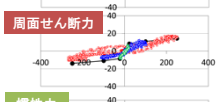
全水平力



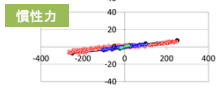
前背面土圧

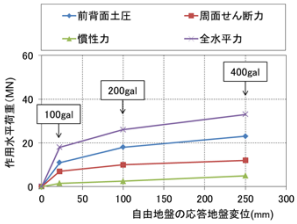


周面せん断力



慣性力



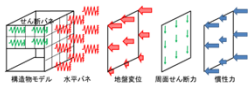


・全水平力（全荷重）は収束傾向にある。
・前背面土圧と慣性力の増加傾向は変わらない。
・周面せん断力は、200Galで概ね収束している。

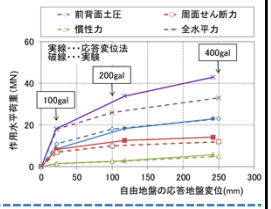
出典：H28年度　年次学術講演会「遠心載荷実験による箱型構造物への地震時作用荷重の評価」発表予定

3.1 評価事例3（開口のある箱型構造物）

➢ 応答変位法の適用性の検証



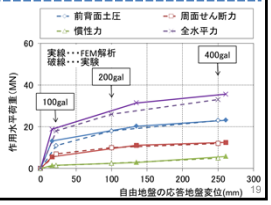
・地盤反力係数は、一次元応答解析より地盤の収束剛性、最大応答変位より算定。



➢ 時刻歴動的解析による再現性の確認

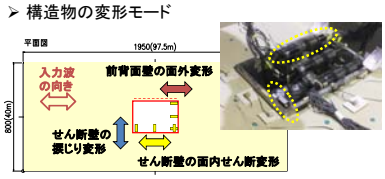
全体変形図
（最大層間変形時）

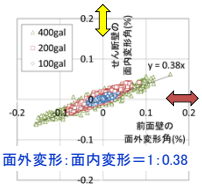
・構造物：弾性（アルミ材）
・地盤：修正GHEモデル



3.1 評価事例3（開口のある箱型構造物）

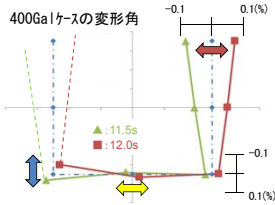
➢ 構造物の変形モード

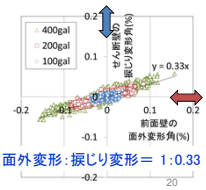




面外変形：面内変形＝1：0.38

400Gaｌケースの変形角



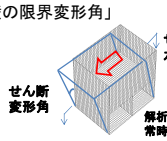


面外変形：捩じり変形＝ 1：0.33

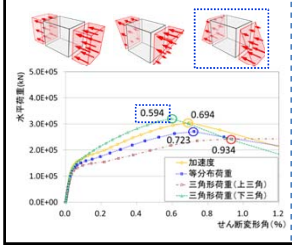
3.1 評価事例3（開口のある箱型構造物）

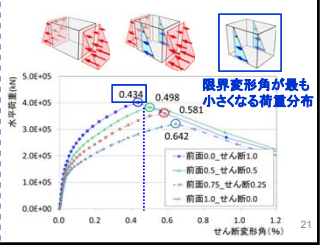
➢ 荷重制御漸増載荷による「せん断壁の限界変形角」

・建築の耐力壁の面内せん断破壊に対する限界変形角は、一般に0.4%程度。
・限界変形角が最小となる載荷方法（荷重分布）を求めるため、パラメータ解析を実施。



解析モデル：積層シェルモデル
常時荷重を与えた後、下図を載荷





限界変形角が最も小さくなる荷重分布

3.1 評価事例3（開口のある箱型構造物）

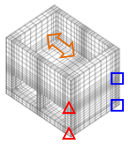
➢ 評価結果

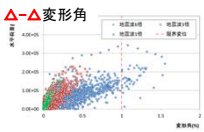
地震波	開口側 限界変形角(%)	開口側 最大変形角(%)	開口側 裕度	せん断壁側 限界変形角(%)	せん断壁側 最大変形角(%)	せん断壁側 裕度
1倍	1.00	0.26	3.8	0.36	0.19	1.9
3倍		0.55	1.8		0.38	0.95
6倍		1.62	0.61		1.26	0.29

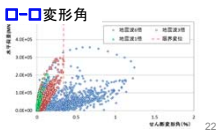
➢ せん断壁の照査に下三角形分布の荷重を漸増載荷する手法により求めた限界変形角を適用した。

➢ せん断壁の1階部分が面内せん断による先行破壊することを確認した。

周面せん断力を、下三角形分布で漸増載荷





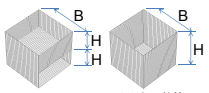


参考：H27年度 年次学術講演会 「3次元解析による地中構造物の変位照査手法の検討」

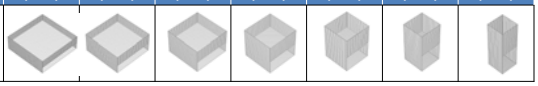
3.2 評価事例4（箱型構造物～立坑）

➢ 様々な形状の地中箱型構造物の評価

・パラメータ：B/H （ 開口あり、なし / 中床版あり、なし）
・構造物：積層シェルモデル、地盤：バイリニアバネ（周辺地盤：正層の密な埋戻土、支持層：岩盤）
・限界変形角：面外変形を1.0%、面内変形を0.4%



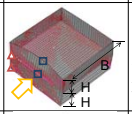
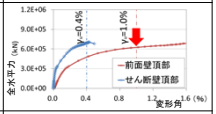
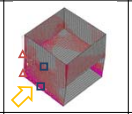
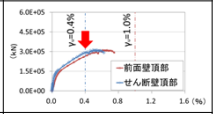
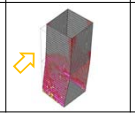
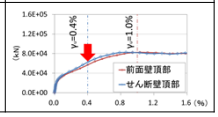
（ ）内の数値

B/H	5.71 (2.86)	4.00 (2.00)	2.86 (1.43)	2.00 (1.00)	1.43 (0.71)	1.00 (0.50)	0.71 (0.36)
モデル図							

・応答変位法を用いた漸増解析

3.2 評価事例4（箱型構造物～立坑）

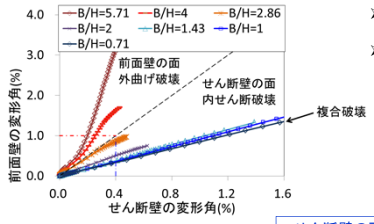
➢ 箱型～立坑（開口あり、中床版あり）

B/H	ひび割れ変形図	全水平荷重～部材変位関係
4.00		
2.00		
0.71		

➢ 構造寸法の違いにより
前面壁の面外破壊
⇒面内せん断破壊
⇒複合破壊に変化した。

3.2 評価事例4（箱型構造物～立坑）

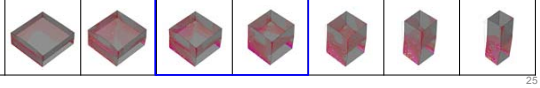
➢ 破壊モードの区分



➢ 変形角を指標とすることで、変形（破壊）モードが分かる。

➢ 「せん断壁の面内せん断破壊に注意が必要な範囲（B/H）」を見分けることができるのでは？と考える。

せん断壁の面内せん断破壊

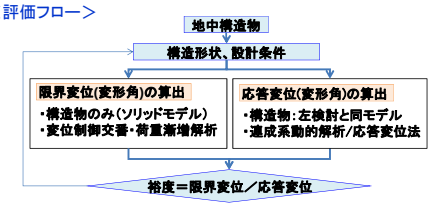
B/H	5.71	4.00	2.86	2.00	1.43	1.00	0.71
ひび割れ変形図							

25

4. まとめ

➢ 限界変位と応答変位によって地中構造物の耐震性能を評価する手法について検討事例を紹介した。

＜評価フロー＞



➢ 今後も、構造物の限界状態を精度よく表現できる解析・評価手法の構築に継続的に取り組みたい。

＜今後の取組み＞

・二方向変位に対する照査手法の検討

・二方向入力地震に対する解析的検討（弾塑性モデルの地盤構成則）

26

ご清聴ありがとうございました。