

## 地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会の活動状況

- 1. 研究の全体概要
- 2. 小委員会の活動
- 3. 各研究項目の実施状況

小委員会副幹事長  
松尾豊史(電力中央研究所)

1

## 小委員会の委員構成

(2016年7月時点)

委員長	前川宏一(東京大学)	幹事	中村大史(関西電力) 遠藤大輔(中部電力) 小川健太郎(東京電力) 松井 淳(電力中央研究所) 宮川義範(電力中央研究所) 永田聖二(電力中央研究所) 島端嗣浩(電力中央研究所)
顧問 3名	丸山久一(長岡技術科学大学) 宮川豊章(京都大学) 金津努(セレス)	7名	
委員 15名	島 弘(高知工科大学) 中村 光(名古屋大学) 下村 匠(長岡技術科学大学) 牧 剛史(埼玉大学) 山本貢士(京都大学) 河井 正(東北大学) 川村佳則(東京ガス) 三島徹也(前田建設) 福浦尚之(3Mインテグレーション) 永井秀樹(大林組) 大友敬三(電力中央研究所) 辨野 裕(東北電力) 末広俊夫(東京電力) 和仁雅明(中部電力) 大熊信之(九州電力)	常時参加者 (ワザ-ポ-) 18名	氏家祐男(北海道電力) 宮岸和信(北陸電力) 広兼修治(中国電力) 松嶋伸一(四国電力) 増田崇治(日本原子力発電) 中村洋一(電源開発) 梶原孝一(日本原燃) 西角浩典(関西電力) 大塚 拓(電力中央研究所) 柴山 淳(電力中央研究所) 渡辺和明(大成建設) 新美勝之(清水建設) 逸藤 史(鹿島建設) 松本敬克(ニューシエック) 山谷 敦(東電設計)
幹事長 副幹事長2名	松村卓郎(電力中央研究所) 番 浩年(関西電力) 松尾豊史(電力中央研究所)	事務局	小川祐司(土木学会)

※ 委員長+委員16名(うち電気事業者委員5名)

2

### 1-1 研究の背景と目的

#### 背景

- ・ 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw=9.0)の発生  
→基準地震動の増大  
→構造物では、設計上の保守性が確認
- ・ コン示方書[設計編](2012)の刊行, JEAC4601-2008の改訂
- ・ 耐震性能照査指針(2005)の刊行から10年が経過  
→解析手法や性能照査法の高度化が必要(水平二方向入力および三次元非線形挙動や変形指標を用いた評価など)

#### 目的

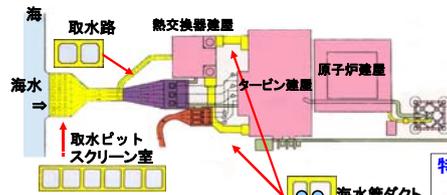
鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査手法を高度化するとともに、屋外重要土木構造物に対する標準的な方法を構築する。

⇒より実挙動に近い評価やせん断照査の合理化等が可能

3

### 1-2 本研究で扱う屋外重要土木構造物

- Sクラスの機器・配管(耐震安全性を直接的に担保する設備)を支持する構造物
- Sクラスの機器・配管を支持しないが、上記と同等の耐震安全性が要求される構造物(耐震安全性を担保する系統の一部を構成)



代表的な構造物の配置例(黄色)

- 特徴:
- ・ 地中
  - ・ ボックスカルパート
  - ・ 臨海部
  - ・ 岩盤に直接支持

4

### 1-3 これまでの取り組み(前史)

- 「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル」 1992年9月刊行<岡村甫主査>  
⇒限界状態設計法、地盤・構造物連成解析、分布荷重でのせん断耐力評価
- 「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針」 2002年5月刊行<岡村甫主査>  
⇒大型せん断土槽振動台実験、動的非線形解析、変形性能照査
- 「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針(改訂版)」 2005年6月刊行<丸山久一主査>  
⇒地盤モデルの適用性、上下動の取扱い、せん断照査の合理化
- 「原子力発電所屋外重要土木構造物の構造健全性評価に関するガイドライン」 2008年7月刊行<宮川豊章主査>  
⇒経年化した構造物の健全性
- 「原子力発電所屋外重要土木構造物の構造健全性評価に関するガイドライン(改訂版)」 2012年10月刊行<宮川豊章主査>  
⇒地震損傷の影響

### 1-4 屋外重要土木構造物に係る研究課題

#### 現状 耐震性能照査指針・マニュアル(2005)

特長: ①地盤と構造物の連成を考慮した動的非線形地震応答解析, ②塑性変形・限界状態を考慮した性能照査, ③耐久性性能照査の位置づけを明確化

⇒構造健全性評価ガイドライン(2012)の刊行

①構造物の横断面方向の評価のみ(二次元解析), ②せん断は耐力照査まで, ③耐久性性能照査では補修効果は未考慮, ④機器・配管への影響は別途考慮, ⑤既設構造物の材料物性に実測値の影響は未考慮

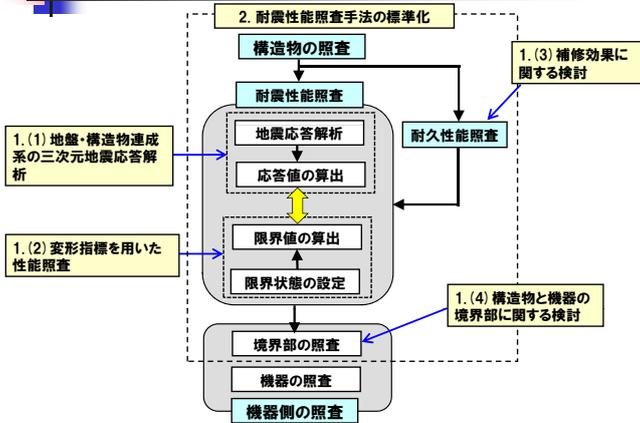
#### 目指す方向 耐震性能照査指針・マニュアル(2018)

①三次元応答解析と②変形指標を適用可能な耐震性能照査および③補修効果を考慮した耐久性照査, ④機器類との境界部の影響も考慮可能な照査, ⑤既設構造物も対象

⇒設計想定を超えた状態についても陽に表現

6

## 1-5 全体構成と各研究項目の関連



## 1-6 耐震性能照査指針の標準化

### 屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針[2005]



- 第1章 総則
- 第2章 屋外重要土木構造物の耐震性能
- 第3章 材料 ← (材料の実測値を用いる場合)
- 第4章 地震の影響および環境作用
- 第5章 解析手法 ← ①三次元解析手法の導入
- 第6章 性能照査
  - (1)耐震性能照査 ← ②変形指標を用いた照査の導入
  - 機器・配管を支持する場合 ← ③定着部に対する検討
  - (2)耐久性能照査 ← ④補修効果を考慮

8

## 2-1 活動計画と概略工程

9

- 研究期間は2015～2017年度の3ヶ年とする。
- 小委員会を主たる審議の場として年3回程度開催する。
- 小委員会前に、幹事会などを適宜開催して事前検討を行う。
- 2年目前半に公開講演会、終了後に講習会を開催する。

	5-8月	9-12月	1-4月
2015 (H27)	✓ 第1回委員会8/3 (活動方針, 3ヶ年計画案)	✓ 第2回委員会11/10 (H27計画&途中経過) ✓ 11/11現場見学 (女川原子力発電所)	✓ 第3回委員会3/31 (H27成果, H28計画)
2016 (H28)	✓ 7/27公開講演会 (小委員会メンバー) ✓ 第4回委員会 (H28計画&途中経過)	✓ 第5回委員会 (載荷実験見学, H28途中経過)	✓ 第6回委員会 (H28成果, H29計画)
2017 (H29)	✓ 第7回委員会 (H29計画&途中経過, 改定方針審議)	✓ 第8回委員会 (H29途中経過, 指針審議)	✓ 第9回委員会 (H29成果, 指針改定案審議)

◎2018年7月頃? 指針改訂に関する講習会(東京会場他)

## 2-2 各研究項目の主な実施内容

10

	(1)地盤・構造物連成系の三次元地震応答解析	(2)変形指標を用いた性能照査	(3)補修効果に関する検討	(4)構造物と機器の境界部に関する検討
2015 (H27)	①解析計画の立案 ②解析モデル作成(海水管ダクト) ③解析結果と考察(基本ケース)	①載荷実験の実施 ②実験結果および考察 ③実験の事前解析	①補修事例の調査 ②評価方針と実験計画の策定 ③試験体の製作と加工	①既往研究等の調査 ②実験計画の立案 ③試験体と実験治具の製作
2016 (H28)	①海水系ダクト解析結果(パラメータ解析) ②取水ビット解析モデル作成 ③取水ビット解析結果(基本ケース)	①検証実験の事後解析1 ②検証実験の実施 ③実験結果および考察	①環境負荷実験の実施 ②実験データの整理と考察	①静的載荷実験・振動台実験の実施 ②実験結果の整理・分析
2017 (H29)	①例示解析の実施(パラメータ解析) ②照査例, 技術資料の作成	①検証実験の事後解析2 ②変形指標を用いた照査基準の適用性検討	①各種の物理・化学特性の評価 ②評価手法の提案	①実験シミュレーションとパラメータ ②評価手法の提案

⇒1年目に種まき, 2年目は実作業, 3年目に収穫をして, 指針改訂に反映

## 2-3 平成27年度の活動実績

11

- 2015年度第1回小委員会 (2015/8/3) @土木学会(四ツ谷)
  - 話題提供: ①東日本大震災合同調査報告「原子力施設の被害とその影響」(電力中央研究所 大友委員), ②新規制基準適合性審査における土木構造物の耐震性評価について(九州電力 大熊委員)
  - 小委員会の活動方針, 研究の全体概要と標準化
  - 各研究項目の3力年および2015年度の研究計画
- 2015年度第2回小委員会 (2015/11/10) @東北電力本店
  - 話題提供: 地盤の地震時挙動評価の限界(東北大学 河井委員)
  - 小委員会の活動計画, 研究の全体概要と標準化
  - 各研究項目の2015年度の研究計画および進捗状況
  - 女川原子力発電所の現場見学(11/11)
- 2015年度第3回小委員会 (2016/3/30) @土木学会(四ツ谷)
  - 話題提供: 剛体バネモデルによる構造解析とせん断破壊メカニズム評価(名古屋大学 中村委員)
  - 小委員会の活動計画, 研究の全体概要と標準化
  - 各研究項目の2015年度成果および2016年度計画
  - 原子力学会「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会の活動

## 2-4 現場見学(11/11)の実施状況

12

研究活動の一環として、女川原子力発電所の被災状況および各種対策工事を見学



### ↑取水口～海水ポンプ室内

取水口ポンプ室などの耐震安全上重要な土木構造物には、耐震性に影響を及ぼすような顕著な損傷は認められなかった。ただし、耐震性能照査上筋力箇所では、あと施工せん断補強筋を設置する工事も行われていた。

### ↑防潮堤の見学

地震に伴って来襲した海抜約13.8mの巨大津波は敷地高さ約13.8mには到達しなかったものの、さらなる安全対策として、海抜約29mとなる高さ約15mの防潮堤(鋼管)のかさ上げ工事が行われていた。

### ↑非常時水源工事

地震後の復旧が終わり、各種の安全対策工事が実施されていた。

### 3. 各研究項目の実施状況

- (1) 地盤・構造物連成系の三次元地震応答解析
- (2) 変形指標を用いた性能照査に関する検討
- (3) 補修効果に関する検討
- (4) 構造物と機器の境界部に関する検討

背景と目的, 研究計画と実施状況, 今後の予定などを簡単に紹介する。

13

### 3-1-1 項目(1)の背景と目的

14

#### 背景

- ・地震動の入力方向  
水平一方向+鉛直方向→水平二方向+鉛直方向
- ・解析手法の高精度化(地盤・構造物)  
二次元→三次元
- ・耐震性能照査  
安全側→より実挙動に近い評価

#### 目的

地震動の入力方向や構造物の三次元形状が地震応答に及ぼす影響を解析的に評価するとともに, 屋外重要土木構造物の耐震性能照査に三次元地震応答解析手法の枠組みを導入する。

### 3-1-2 海水管ダクトの三次元地震応答解析

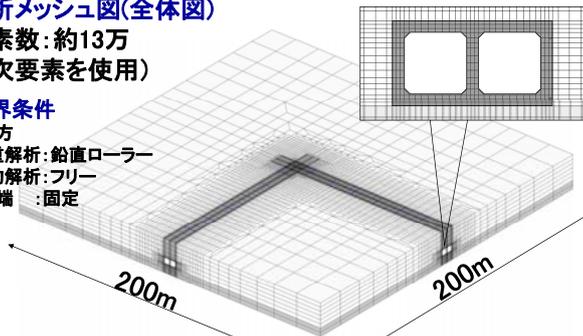
15

#### 解析メッシュ図(全体図)

要素数:約13万  
(1次要素を使用)

#### 境界条件

- ・側方  
自重解析:鉛直ローラー
- 動的解析:フリー
- ・下端:固定



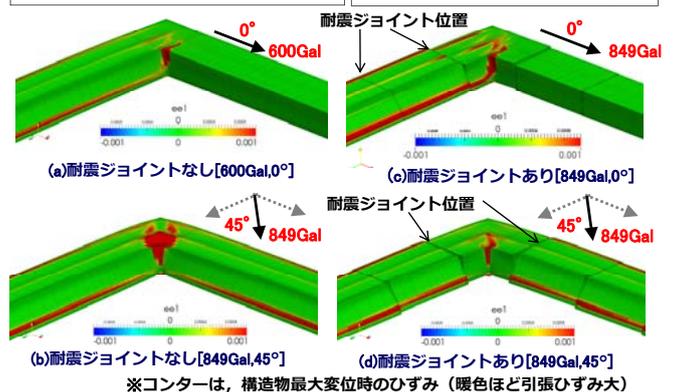
屈曲部の形状, 耐震ジョイントの位置はアンケート等に基づき決定

原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針(2005), 照査例II

### 3-1-4 屈曲部の応答結果速報(第一主ひずみ)

16

屈曲部で局所的に大きな引張りひずみが生じた 耐震ジョイントは, 屈曲箇所の影響を軽減



### 3-1-5 進捗状況と今後の予定

#### 主な実施内容(平成27年度)

- 屋外重要土木構造物である海水管ダクトを対象として, 屈曲構造(水平)に着目した解析計画を立案した。
- 屈曲部を有する海水管ダクトの解析モデルを作成した(解析コード:COM3)。
- 海水管ダクトの地震応答解析(基本ケース)を実施し, 解析結果のとりまとめおよび分析を行った。

#### 今後の予定

- ✓ 海水管ダクトのパラメータ解析
- ✓ 取水ピットの解析モデル作成および地震応答解析の実施
- ✓ 技術資料および照査例の作成

17

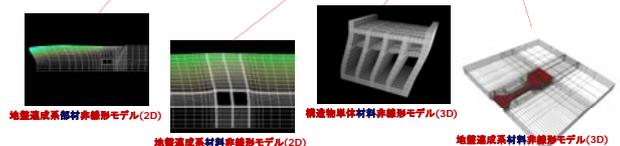
### 3-2-1 項目(2)の目的

18

目的:ソリッドモデルで地震応答解析を行った場合の照査指標と, それに対応する限界値を策定する。

<材料非線形解析ルートを三次元に拡張し, 指標と限界値を再考>

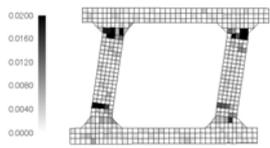
応答解析種類	部材非線形解析		材料非線形解析	
適用できる問題の次元	2D		2D, 3D	
曲げ	指標	層間変形角, 曲率	指標	圧縮ひずみ?
	限界値	1%など	限界値	0.01?
せん断	指標	せん断力	指標	?
	限界値	せん断耐力式	限界値	?



### 3-2-2 実験の目的

19

鉄筋コンクリート構造物が水平耐力を失い始める前後における「ひずみや変位の分布」のデータを取得し、ひずみや部分変位を指標とした限界値の根拠とする。



画像計測

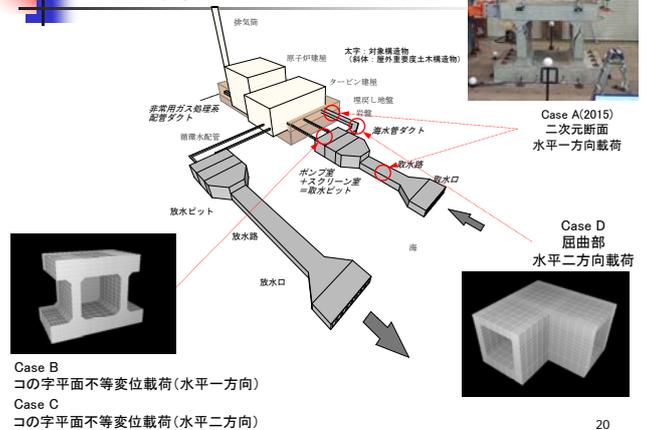


レーザースキャン

加えて、以下の項目に係るデータを取得し、解析手法(材料非線形FEM)の検証を行う。

- ①水平二方向荷重の影響, ②水路の屈曲部の破壊モード, ③三次元的な形状を有する構造物の鉛直荷重支持限界

### 3-2-3 実験ケースの着目箇所

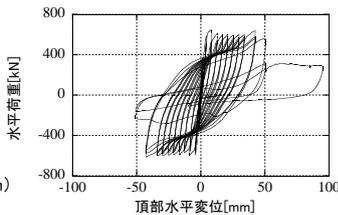


20

### 3-2-4 載荷実験結果の例 (CaseA)



<頂部水平変位-水平荷重関係>



<層間変形角-3.0%(水平変位-51.0mm) 時点の損傷状況>

- 北(左)側壁上部における曲げ降伏後のせん断破壊により水平耐力が低下
- 打継ぎを設けた下端付近では斜めひび割れが発生せず

21

### 3-2-5 進捗状況と今後の予定

#### 主な実施内容(平成27年度)

- (a) 鉄筋コンクリート製ボックスカルバートの静的正負交番繰返し載荷実験(A試験体)の実施した。
- (b) 実験結果(三次元画像計測, レーザースキャンによる詳細な変位・ひずみ分布など)のとりまとめおよび考察を行った。
- (c) 材料非線形性を考慮したソリッドモデルの正負交番繰返し解析などを用いた事前解析を実施した。

#### 今後の予定

- ✓ 三次元鉄筋コンクリート製ボックスカルバートの耐荷特性に関する検証実験の実施
- ✓ 検証実験のシミュレーション解析
- ✓ 変形指標を用いた照査基準の適用性検討

22

### 3-3-1 項目(3)の目的

#### 様々な補修材による被補修領域の遮塩性能の評価

電力共通研究「原子力発電所屋外重要土木構造物の構造健全性評価手法の高度化に関する研究」(2008-2010)では、エポキシ樹脂のみを対象

センター共研「屋外重要土木構造物の耐震性能照査手法の高度化に関する研究」での目標

- ・エポキシ樹脂以外の補修材による補修効果の検証
- ・補修材の補修効果の持続性の検証
- ・簡易評価方法の作成

原子力発電所屋外重要土木構造物の構造健全性評価に関するガイドライン2012

第9章 対策 9.3 対策の選定 から抜粋

本文 定期点検、地震後の点検、または詳細調査時における評価・判定結果に基づき、対策の種類とその効果を踏まえて、適切な対策を選定するものとする。

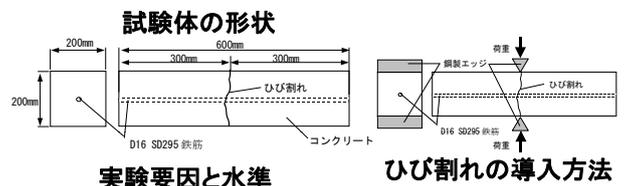
解説

なお、補修・補強による性能に回復の程度は、補修・補強工事中およびその後の再使用時の環境条件(温度、湿度、塩漬物の濃度、自乾率)によって、異なる場合がある。したがって、工法や材料の選定にあたっては、既往の実績を参照する等、十分な事前検討を実施することが必要である。

23

### 3-3-2 実験計画の策定

エポキシ樹脂でひび割れが補修されたコンクリート



#### 実験要因と水準

要因	水準
目標ひび割れ幅 (mm)	0.5mm程度
環境条件	20°C, 40°C, 60°C 塩水
実験期間 (年)	0.5, 1.0, 1.5

※電気抵抗率の推移でモニタリング (実験期間が変動する可能性)

24

### 3-3-4 環境負荷実験の実施状況

#### 40℃環境下での環境負荷実験

- ・温度:40℃ 塩水浸せき
- ・温度:40℃ 真水浸せき
- ・温度:40℃ 湿度80% 塩水噴霧



電中研 環境作用負荷装置

25

### 3-3-5 進捗状況と今後の予定

#### 主な実施内容(平成27年度)

- 評価方針の検討(補修事例の調査, 電気泳動法の適用性など)
- 実験計画の策定(補修材の種類, 実験パラメータの抽出など)
- 試験体の製作と加工

#### 今後の予定

- ✓ 環境負荷実験, 電気泳動実験に着手
- ✓ 各種の物理・化学特性の評価
- ✓ 評価手法の提案

26

### 3-4-1 項目(4)の背景

#### 構造物の耐震性能照査

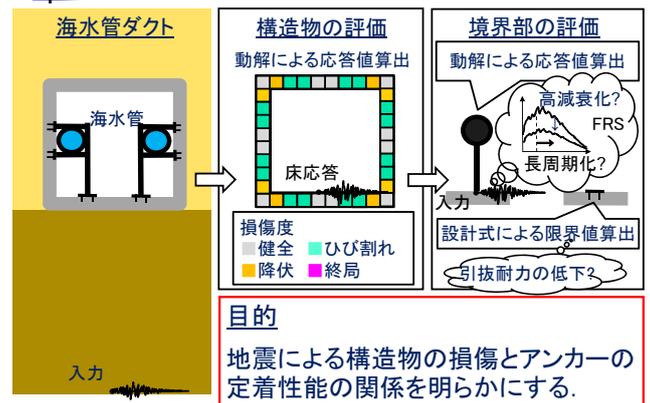
- 解析技術の高度化に伴って, RC部材の弾塑性挙動を考慮した耐震性能の評価が可能となった。
- 終局限界に達しなければ, 曲げひび割れや鉄筋の降伏などの損傷は, 性能照査上許容される。

#### 機器を支持する構造物

- 機器の機能維持が最重要の要求性能であり, 構造物の損傷によって機器の支持性能が損なわれないよう配慮が必要である。
- 支持性能の評価では, 構造物の損傷の影響を考慮するための知見や照査体系が必ずしも整備されていない。

27

### 3-4-2 概略と目的



28

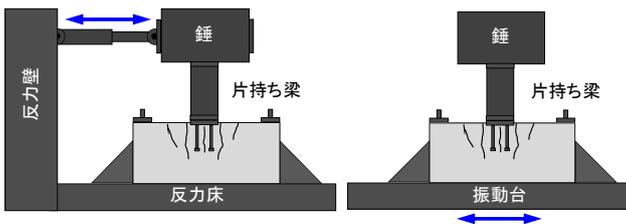
### 3-4-3 実験計画の立案

#### 基本方針

地震による損傷を受けたRC部材中の頭付きアンカーボルトの定着性能を, 水平荷重・垂直荷重による実験方法で検討する。

#### 静的な繰返し載荷実験

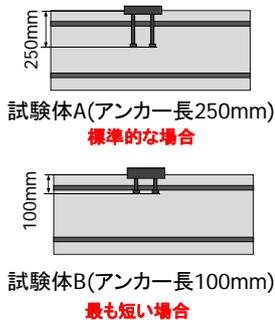
#### 動的な振動台実験



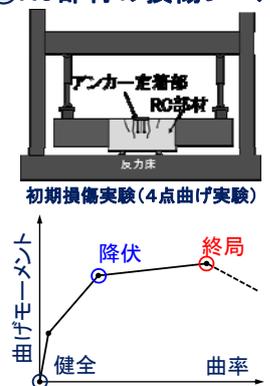
29

### 3-4-4 実験パラメータ

#### ①アンカー長



#### ②RC部材の損傷レベル



30

### 3-4-5 進捗状況と今後の予定

#### 主な実施内容(平成27年度)

- 文献調査とアンケート調査に基づいて、既往研究と実構造物の実態に関する知見を整理した。
- 上記を踏まえて、構造物の地震損傷とアンカーの定着性能の関係を把握するための実験計画を立案した。
- 実験準備として、試験体と実験治具の設計・製作を行った。

#### 今後の予定

- ✓ 静的・動的実験の実施および実験結果の整理・分析
- ✓ 解析方法の検討およびシミュレーション解析
- ✓ 上記の影響を考慮するための評価手法の提案

31

### 4. おわりに

地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会の活動状況について、①研究の全体概要、②小委員会の活動、③各研究項目の実施状況を報告した。

**本研究を進めるにあたり、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ある。**

32