

既存施設の耐震化技術に関する 調査研究

1. 研究目的

平成7年の兵庫県南部地震を契機として、下水道施設の耐震化は計画的に推進されてきているが、既設の処理場・ポンプ場施設については、供用中施工の必要性や施工スペースの制約等の技術的な課題も多く、兵庫県南部地震の被害を踏まえ、耐震基準を強化した平成9年度以前に施工された下水道施設の耐震化は十分に進んでいない状況にある。

こうした背景の中、本研究では近年における耐震設計手法の動向や耐震化工法について調査し、下水道施設への適用性について検討することを目的とする。

研究フローを図-1に示し、研究内容の概要を以下に整理する。

(1) 耐震化技術（設計・工法）の調査

下水道分野以外のインフラ施設の耐震設計では、高度化設計に移行してきているため、高度化設計へ移行した分野における耐震設計の考え方を調査した。

また、工法面においては、下水道施設に適用可能な工法を調査した。

(2) 下水道に適用した際の効果と課題

他分野で採用されている高度化設計の考え方を踏まえ、高度化設計を下水道施設に適用した場合の効果を整理するとともに、高度化設計を適用するにあたり今後検討すべき課題を整理した。

(3) 本研究で扱う高度化設計の範囲

「下水道施設の耐震対策指針と解説(2006年版)」

(以下、「現行基準」)で示されている適用可能な耐震設計手法と整合を図りながら、本研究で扱う高度化設計の対象範囲を検討した。

(4) 試算による効果の検証

高度化設計を下水道施設へ適用した際の効果を検証することを目的として、今年度は仮想構造物を対象に従来設計と高度化設計を実施し、補強量の低減効果を検証した。

(5) 耐震化工法の体系的整理

管路施設や処理場・ポンプ場施設に適用可能な耐震化工法(約180工法)について、躯体・基礎・液状化対策別に整理した。

(6) 工法一覧の作成

(5)で整理した工法を基に補強部位や補強目的別の工法一覧及び各工法の個表を作成した。

(7) 実構造物による効果の検証

平成22年度に検討を行う予定である。

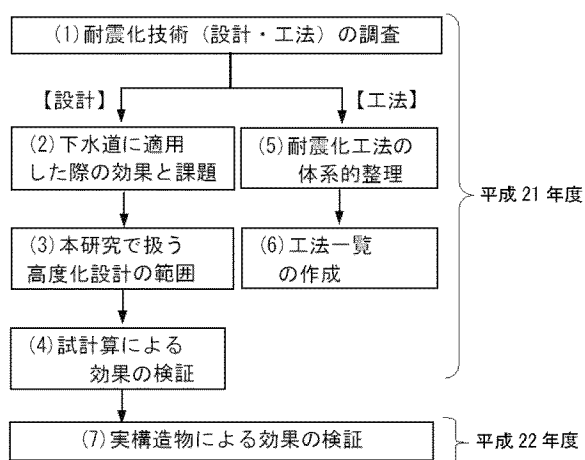


図-1 調査研究フロー

2. 研究体制

本研究は、下水道技術開発連絡会議における「下水道に関する新技術開発の共同研究」として、札幌市、仙台市、さいたま市、千葉市、東京都、川崎市、横浜市、新潟市、静岡市、浜松市、名古屋市、京都市、大阪市、堺市、神戸市、岡山市、広島市、北九州市、福岡市、(財)下水道新技術推進機構で共同実施した。

3. 研究内容

3.1 耐震化技術（設計・工法）の調査

3.1.1 設計

(1) 調査先

高度化設計へ移行している以下の土木分野を対象に調査を実施した。

- ・水道：(社)日本水道協会
- ・土木：(社)土木学会
- ・鉄道：(財)鉄道総合技術研究所
- ・道路橋：(社)日本道路協会
- ・港湾：(社)日本港湾協会

(2) 調査結果

他分野の高度化設計では、地震動の設定は下水道における耐震設計と同様であるものの、施設の重要度や部材の重要度を設定し、多少の損傷を許容する耐震性能の考え方となっている。表-1 に調査結果を示す。

表-1 調査結果（設計）

	下水道	水道	土木学会	鉄道	道路	港湾
地震動	・レベル1地震動：構造物の設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有するもの。 ・レベル2地震動：想定される地震動のうち最大規模のもの。					
耐震設計の方法	仕様書規定型設計であり、静的解析を用いる。		性能照査型設計であり、原則は、動的解析を用いる。			
構造物の耐震性能	・レベル1地震動：健全な機能の確保 ・レベル2地震動：機能に重大な影響を及ぼさないこと。		施設に重要度を設定し、重要度の低い施設について、機能の障害があっても多少の損傷を許す耐震性能を追加している。			
施設の重要度設定	施設の重要度は設定していない。(管渠施設は重要な幹線的位置付けあり)		各施設の機能により重要度を設定している。			

表-4 調査結果（工法）

分類内訳	管路施設					処理場・ポンプ場施設		
	管本体	管渠の継手部	人孔・管渠の接続部	人孔浮上防止	地盤(液状化)	躯体	基礎(直接基礎・杭基礎)	地盤(液状化)
公的機関の審査取得	31	7	16	7	1	8	6	
特許取得	1	13	5		18	44	1	19
その他				4				
合計	32	20	21	11	19	52	7	19

3.1.2 工法

(1) 調査先と調査項目

工法として信頼出来る建設技術審査証明取得済み工法や、新技術情報提供システム (NETIS) に登録されている工法を基本として調査を実施した。

また、参考として特許工法経済産業省特許庁 (特許電子図書館) の調査も実施した。

① 調査先

調査を実施した機関を表-2 に示す。

表-2 調査先

調査先	
建設技術審査証明機関	(財)国土技術研究センター
	(財)土木研究センター
	(財)日本建設情報総合センター
	(社)日本建設機械化協会
	(財)日本建築センター
	(財)建築保全センター
	(財)道路保全技術センター
(財)先端建設技術センター	
(財)下水道新技術推進機構	
(社)土木学会	
特許庁 (電子図書館)	

② 調査項目

管路施設、処理場・ポンプ場施設 (土木) に適用可能な耐震化工法 (約 180 工法) について、表-3 に示す項目にて調査を実施した。

表-3 耐震化工法の調査項目

1	工法名	6	施工時の留意点
2	補強の目的	7	施工実績
3	技術的概要・特徴	8	施工単価
4	適用範囲 (口径等)	9	第三者評価
5	施工条件	10	問合せ先

(3) 調査結果

調査結果を表-4 に示す。

3.2 下水道に適用する際の効果と課題

(1) 効果

高度化設計における構造計算は、従来法に比べ以下の事項が明確になる。

- ・地盤と構造物の相互作用を適切に評価することが可能。
- ・各部材を非線形でモデル化することにより、地震時の構造物の状態を把握することが可能。
- ・複雑な構造を3次元でモデル化することにより、奥行き方向の力の流れを評価できるため、立体的な力学特性を正確に評価することが可能。

上記により、下水道施設に適用した場合の効果は以下である。

- ◆施設の重要度に応じた残留変形などの損傷度合いが明確になるため、耐震対策の実施優先度が明確になる。
- ◆損傷をある程度許容する考えにより、耐震化対策量を減らすことが可能となる。

(2) 課題

高度化設計を下水道施設に適用した場合、性能照査型設計に必要な「施設の重要度の設定」、「損傷度合いの設定」が重要であるが、現行基準では、管路施設は重要度の区分があるものの、処理場・ポンプ場施設における重要度は一律設定であるため、それらを設定することが課題である。

3.3 本研究で扱う高度化設計の範囲

高度化設計には、地震時における力の流れを適切に評価できる動的解析や、構造の安全性を合理的に評価できる性能照査法・限界状態設計法がある。

本研究で扱う高度化設計においては、有限要素法を用いた動的解析を対象とし、解析のモデル化については、下水道施設の構造設計で多く用いられている二次元モデルを対象とした。

また、構造の安全性の評価については、現行基準との整合性を図り、許容応力度法と限界状態設計法を対象とした。

なお、現行基準における耐震計算は原則として、震度法・応答変位法としているが、構造の形状や設置状況により地震時の挙動が複雑となる場合には、それ以外の解析手法を用いても良いという記述がされている。

3.4 試算による効果の検証

(1) 動的解析の手法

動的解析は動力学モデルを用いて、動的な応答値（断面力）を算定するものである。動的な応答値を求める方法には時刻歴応答解析法と応答スペクトル法がある。このうち、時刻歴応答解析法には直接積分法、周波数応答解析法、モード解析法がある。

表-5に、これらの方法について扱える応答の種類、対象とする応答値の種類、固有値解析の必要性の有無などを示す。

本試算では、構造の非線形を扱える時刻歴応答解析法の直接積分法を採用した。

表-5 動的解析法

動的解析法	応答の種類		応答値の種類
	線形	非線形	
時刻歴応答解析法	●	●	時刻歴応答値
周波数応答解析法	●		時刻歴応答値
モード解析法	●		時刻歴応答値
応答スペクトル法	●		最大応答値

●：求めることができる応答の種類 出典：水道施設耐震工法指針・解説 2009(社)日本水道協会

(2) 計算フロー

図-2に試算フローを示す。

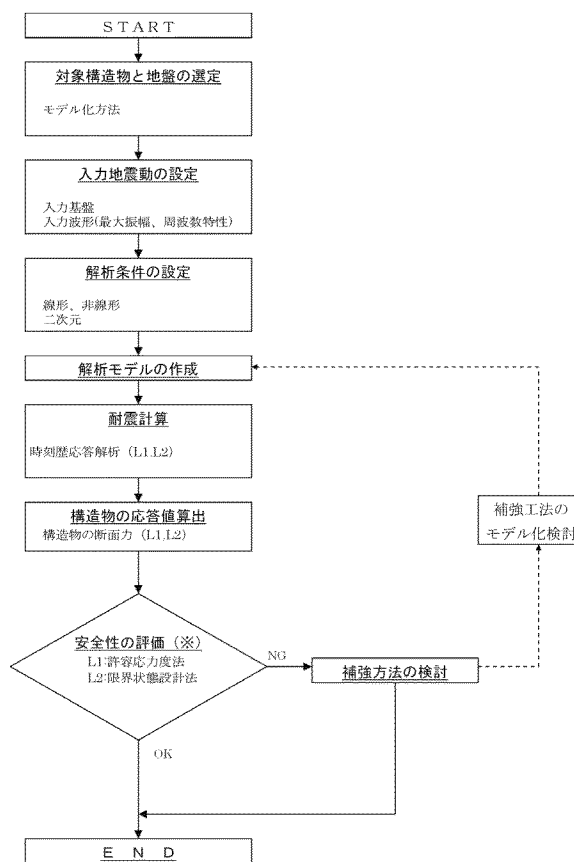


図-2 試算フロー

(3) 対象構造物と地盤の選定

土木構造物における試算を行うにあたっての課題の1つとして、土木設計以外の制約条件の有無が考えられる。各構造分類で土木設計以外の制約条

件が無い構造分類はⅠ類とⅡ類であるが、処理場やポンプ場の耐震設計で多く用いられている震度法との比較の方が理解を得やすいと考え、Ⅰ類を選定した。

なお、構造形状は矩形及び円形があるが、既設の下水道施設において多く設置されていると考えられる矩形を採用した。

また、試算に用いる構造物の寸法や対象地盤については、多くのケースが想定されるため、「下水道耐震設計計算例－処理場・ポンプ場編－2002年版」にある諸元を活用した。対象構造物の形状及び地盤を図-3、図-4に示す。

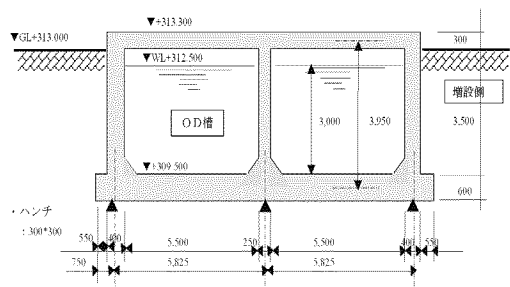


図-3 試算断面

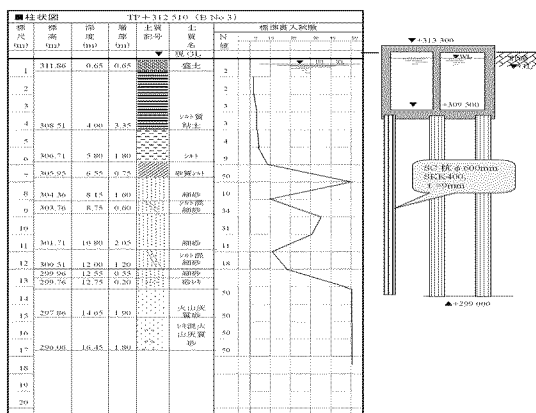


図-4 試算における基礎及び土質

(4) 入力地震動の設定

動的解析に用いるレベル1地震動及びレベル2地震動の地震波形が地域で設定されている場合には、それらを活用することが基本である。

一方、地域で設定されていない場合には、既往の代表的な強震波形を調整し、レベル1地震動相当及びレベル2地震動相当の地震波形を作成する方法等により動的解析を実施する必要がある。

本調査研究においては、従来法との違いを明確にするため、現行基準における地震外力のベースとなっている兵庫県南部地震における地震波形を基に、下水道設計で用いられている応答スペクトルに適合させた波形を作成した(図-5～図-8)。

① レベル1地震動の波形

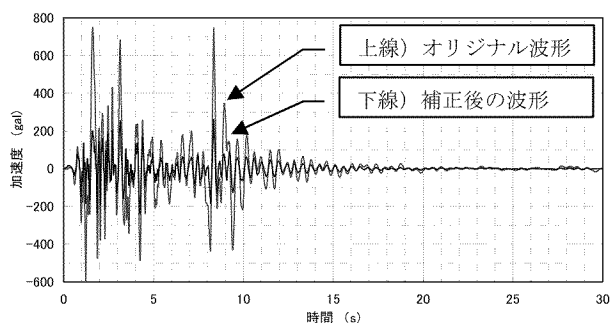


図-5 レベル1地震動の波形

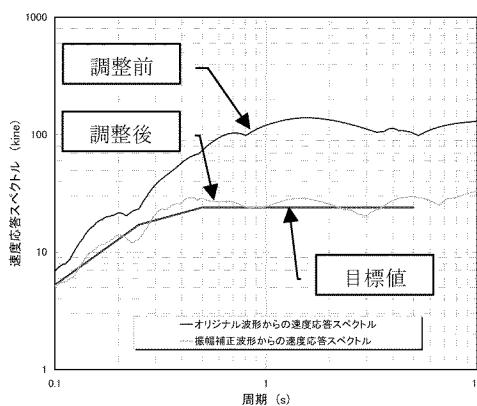


図-6 レベル1地震動の応答スペクトル

② レベル2地震動の波形

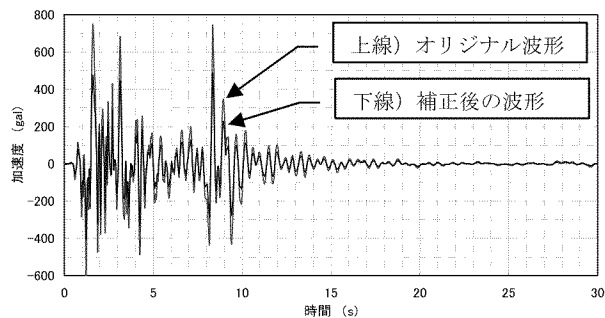


図-7 レベル2地震動の波形

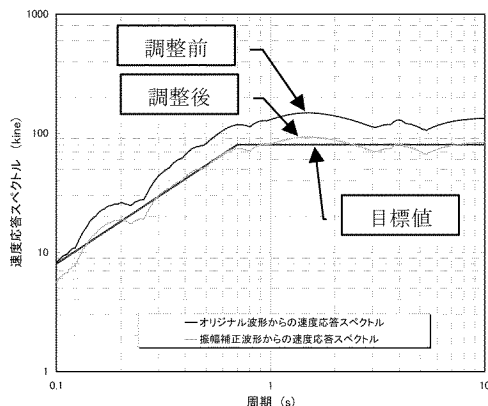


図-8 レベル2地震動の応答スペクトル

(5) 解析条件の設定

① 材料及び地盤の非線形特性

コンクリート構造物及び地盤の非線形特性は、適用範囲が広いM-φモデル(図-9)、修正R-0モデル(図-10)を採用した。

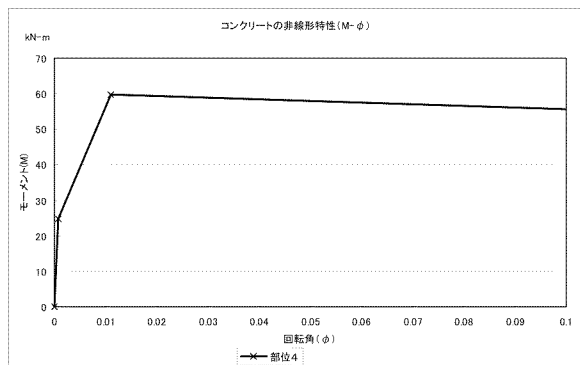


図-9 コンクリート構造物の非線形特性

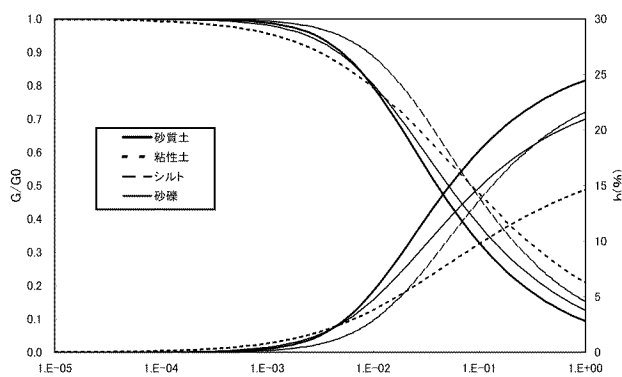


図-10 地盤の非線形特性

② 構造物のモデル化

仮想構造物のモデル化においては、二次元モデルとし、モデルを構成する要素については、梁要素及び四角形要素とした。

(6) 耐震計算の検討ケース

試算における検討ケースは、レベル1地震動とレベル2地震動にて従来法と動的解析にて行った。

比較検討のケースを表-6に示す。

表-6 比較検討ケース

解析条件	レベル1地震動		レベル2地震動	
	従来法	動的解析	従来法	動的解析
解析手法	静的	動的	静的	動的
材料特性	線形	非線形	線形	非線形
地盤特性	—	非線形	—	非線形
Csの考慮	なし	なし	考慮(0.45)	なし
計算結果の評価	許容応力度法	許容応力度法	限界状態	限界状態

(7) 計算結果

① レベル1地震動

図-11に解析結果を示す。

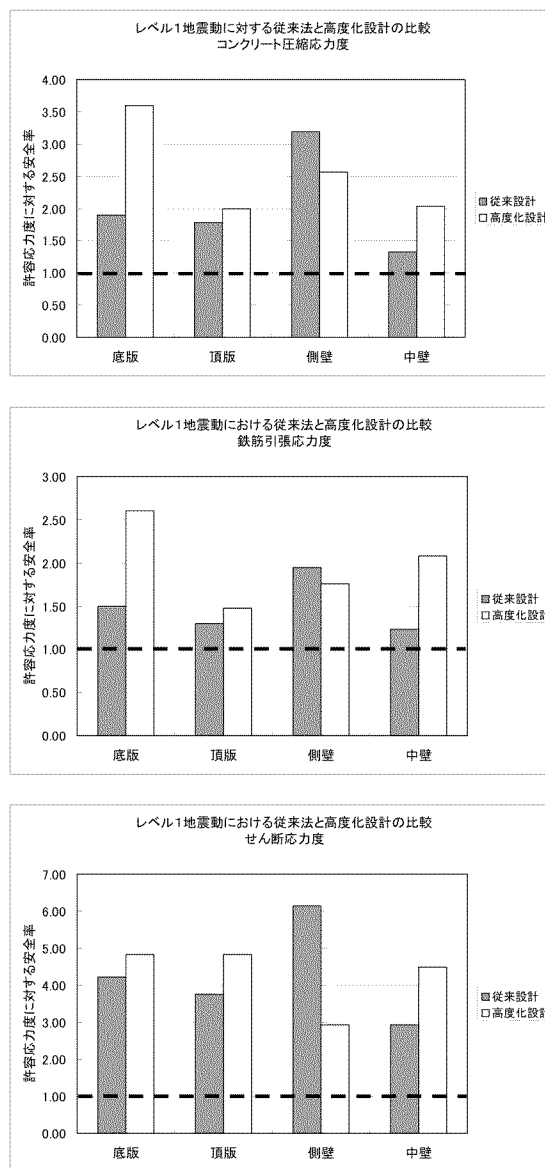


図-11 安全率の比較 (レベル1地震動)

②レベル2地震動

図-12 に解析結果を示す。

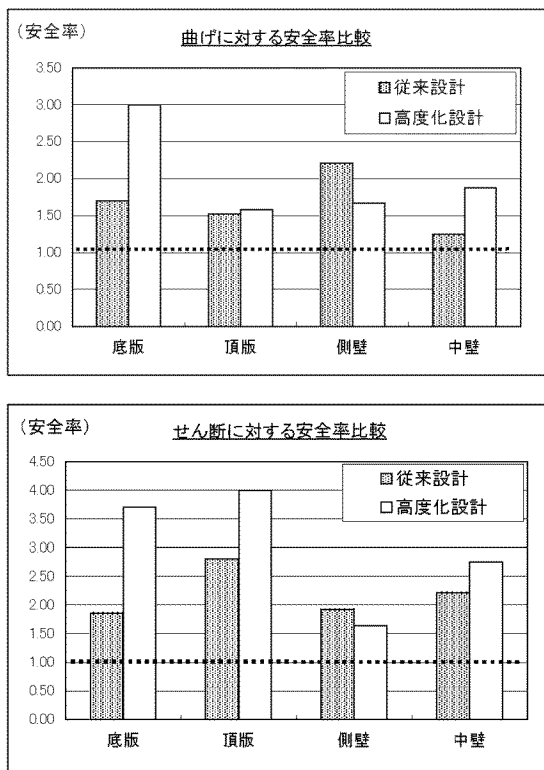


図-12 安全率の比較 (レベル2地震動)

3.5 耐震化工法の体系的整理

耐震化工法の体系的整理では、①管路施設、②処理場・ポンプ場施設に大別し整理する。

①管路施設については、管本体の対策、継手部の対策 (管と管・管と人孔)、マンホールの対策 (浮上防止・本体)、地盤 (液状化) に大別した。

また、②処理場・ポンプ場施設については、コンクリート躯体、基礎 (杭・直接基礎)、地盤 (液状化) に大別した。上記について体系的に整理した結果を表-7に示す。

表-7 耐震化工法の体系的整理

ランク 1		ランク 2	
1	管路施設	A	管本体
		B	管渠継手部
		C	マンホールと管渠接合部
		D	マンホール浮上防止
		E	地盤 (液状化)
2	処理場・ポンプ場施設	A	躯体
		B	基礎 (直接基礎・杭基礎)
		C	地盤 (液状化)

3.6 工法一覧の作成

補強部位や補強目的別に工法一覧及び各工法の個表を作成した。

管路施設で約 100 工法、処理場・ポンプ場施設で約 80 工法について整理した。

4. 本研究のまとめ

高度化設計は、従来法に比べて底版部、頂版部、中壁部に対する補強量の低減が見込まれる。特に底版部は補強施工が困難な部位であることから、底版補強の低減が図れるのは大きなメリットである。

そのため、実構造物においては、底版部の面積が広く、かつ中壁が多い構造物の方が高度化設計採用による効果が期待できる。

なお、次年度は補強対策量の減少効果をさらに明確にすることを目的として、規模の大きい処理場・ポンプ場を対象に高度化設計を実施した場合の効果を検証する。

●この研究を行ったのは

研究第一部長
研究第一部総括主任研究員
研究第一部主任研究員

森田 弘昭
江原 佳男
鈴木 利幸

●この研究に関するお問い合わせは

研究第一部長
研究第一部総括主任研究員
研究第一部主任研究員

森田 弘昭
江原 佳男
鈴木 利幸