

静的非線形解析を用いた 下水道施設の耐震診断に関する考察

(株)日水コン 柴田 峻太郎

下水道施設設計は、1995 年兵庫県南部地震後の 1997 年「下水道施設の耐震対策指針と解説」改定に伴い、大地震を想定したレベル 2 地震動に対してじん性に配慮した設計が追記され、耐震診断においても、レベル 2 地震に対する照査が義務付けられることとなった。一方で、1997 年以前設計の構造物についてはレベル 2 地震動を想定した設計となっていないため、膨大な量の耐震補強が必要となり、耐震化の実現が困難となることが、耐震診断事例の増加に伴い、課題として顕在化してきた。そのため、現行基準では従来診断結果を見直し、段階的に耐震化を図ることが推進されている。本稿では、広島県 A 市 A 浄化センターにおける静的非線形解析の導入による耐震診断結果の見直し業務について情報整理、考察した結果を報告する。

Key Words : 耐震診断、静的非線形解析、耐震化

1. はじめに

本業務の対象である A 浄化センターでは、平成 29 年度に管理棟および汚泥処理棟の耐震診断を実施した結果、物理的、経済的に耐震化（耐震性能 2 の確保）が困難であることが明らかとなった。

一方、平成 26 年度(2014)改訂「下水道施設の耐震対策指針と解説」においては、耐震補強費用の削減と現実に即した施工箇所の耐震補強実施に向け、耐震性能 2' を設定可能であることとして位置づけられている。

耐震性能 2' は、部材を損傷度に基づき照査する手法であり、非線形解析を導入することで照査が可能となる。

本業務では、平成 29 年度実施の従来診断に対し、静的非線形解析の導入による診断の見直しを実施した。

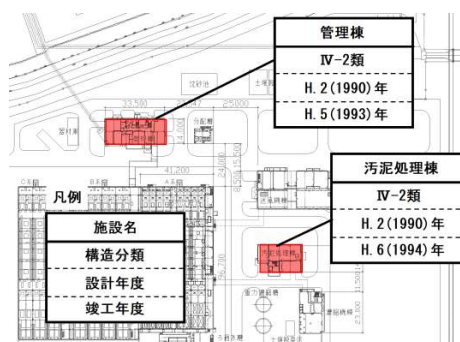


図 1 対象施設概要

2. 耐震設計の変遷

下水道施設における耐震設計基準の変遷を表 1 に整理する。

耐震設計基準の変遷として、兵庫南部地震（1995 年）および東日本大震災（2011 年）の発生による「下水道施設の耐震対策指針と解説」の改定を中心に整理する。

1997 年における改定では、1995 年の兵庫南部地震発生による被害から 2 段階の地震動の設定（レベル 1・2）、側方流動の判定等の項目が追加された。

2014 年における改定では、2011 年の東日本大震災発生による被害から耐津波設計、耐震診断における耐震性能 2' 等の項目が追加された。

表 1 耐震設計基準等の変遷

年度	事象	設計への影響
1992	「土木設計基準（案）」（下水道事業団）発刊	・ 構造分類の制定（管理棟、汚泥処理棟はⅤ類に分類） ・ 地下部の設計水平震度は建築基準を踏襲
1995	兵庫県南部地震	
1997	「下水道施設の耐震対策指針と解説」改定	・ 2 段階の地震動を設定（レベル 1、2）
	「施設耐震化」義務付け（国交省事務連絡）	・ H10 年以降の工事発注施設は所定の耐震化を図る事
2001	「構造物分類」改定（国交省事務連絡）	・ 10m ³ 以上の水槽を有するものはⅣ類に分類
2011	東日本大震災	
2014	「下水道施設の耐震対策指針と解説」改定	・ 耐津波対策の追加、耐震性能 2' の追加
2015	「下水道施設耐震計算例」改訂	・ ディープビーム式等の追記

3. 現行基準の耐震性能（耐震性能 2' と損傷度）

耐震性能 2' とは、施設更新までの間、最低限の耐震性能（図 2 損傷度Ⅲ参照）を確保し、段階的に耐震性能の向上を図ることを前提とした耐震性能を指す。具体的には、曲げ応力に対し、一部の部材で最大耐荷力点を超える損傷度Ⅲを許容するものである。

耐震性能 2' では、構造部材を重要構造部材^{※1}と非重要構造部材^{※1}に分類し評価することとし、重要構造部材では従来通り耐震性能 2（部材損傷度Ⅱ以内）を確保する必要があるが、非重要構造部材では耐震性能 2'（部材損傷度Ⅲ以内）を許容できることとなっている（表 2 参照）。

なお、部材損傷度を把握するためには、部材に対し段階的に荷重を加え、変位を把握できるプッシュオーバー解析が必要^{※2}となり、非線形解析を実施することで可能となる（図 2 参照）。

表 2 現行基準における耐震性能

対象地震動	新設	既設	備考
レベル1地震動	耐震性能1	耐震性能1	
レベル2地震動	耐震性能2	耐震性能2 耐震性能2'※)	※) 重要構造物は耐震性能2、 非重要構造部材は耐震性能2'

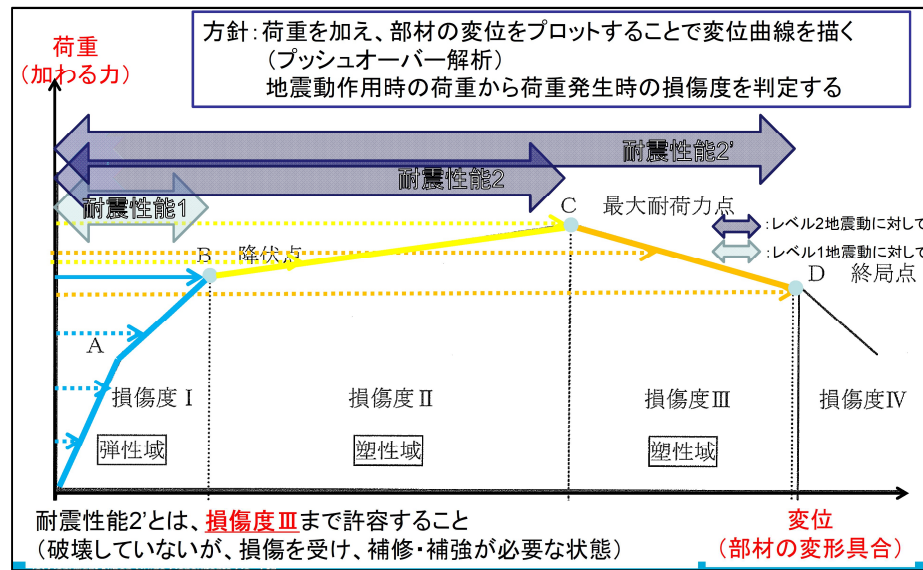


図 2 部材の損傷度と耐震性能及びプッシュオーバー解析の概要

- ※1) 重要構造部材と非重要構造部材は、バックアップ機能等の状況を踏まえ、施設の機能を確保する観点から下水道管理者が設定する。
- ※2) 従来の解析手法では、発生応力と部材の耐力を比較する形で耐震性能を照査しており、これは部材の損傷度を把握できない。
- プッシュオーバー解析では、部材に徐々に荷重を加えた際の部材の断面力、変形を把握できることから部材の損傷度を用いた照査が可能であり、塑性ヒンジの発生位置の特定も可能となる。

4. 耐震診断見直し方針

対象施設の管理棟、汚泥処理棟における耐震診断見直し方針を以下に示す。

本業務では以下の観点で耐震診断見直しを実施した結果、耐震箇所が現実にもつものとなった（表 3 参照）。

静的非線形解析による照査では、プッシュオーバー解析による部材損傷度の把握、塑性ヒンジ位置の特定を実施した。

また、等価せん断スパンを考慮したせん断圧縮破壊耐力による照査を実施した。

表 3 従来診断と静的非線形解析の比較表

従来診断	静的非線形解析
○線形解析、疑似非線形解析	○静的非線形の導入
○通常のフレーム部材として解く	○等価せん断スパンによるディープビーム式の適用
○発生応力と部材の耐力を比較し、許容範囲内か判断する	○塑性ヒンジの発生箇所について、部材の損傷度をもとに判断する
○耐震性能1、耐震性能2	○耐震性能1、耐震性能2、耐震性能2'

5. 耐震診断見直し結果

本浄化センターにおける耐震診断見直し結果について以下に示す。

5-1. NG 部材の減少

管理棟の NG 部材は 57 箇所から 9 箇所まで削減され、汚泥処理棟の NG 部材はすべて解消された（表 4 参照）。

診断見直しによる NG 部材数の縮減結果例を表 5 に示す。

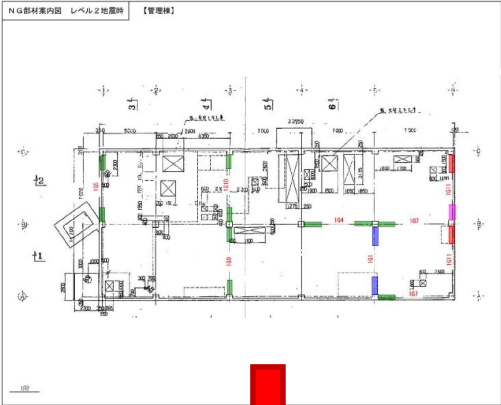
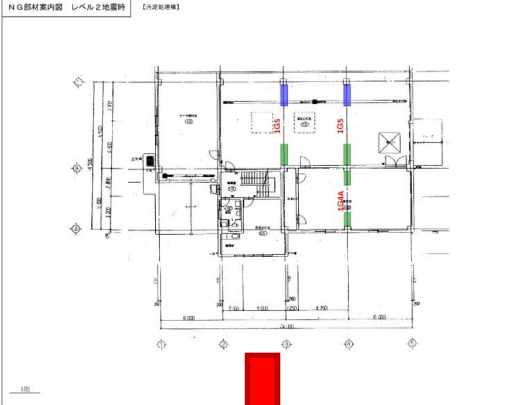
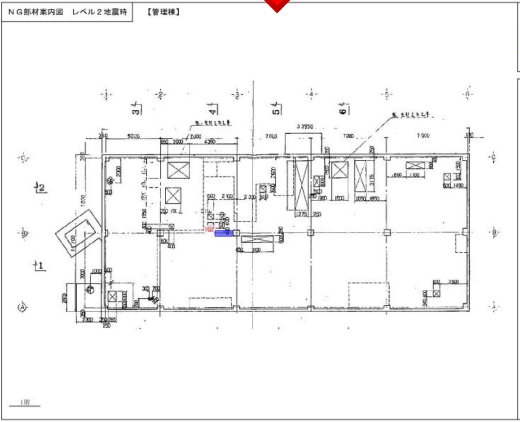
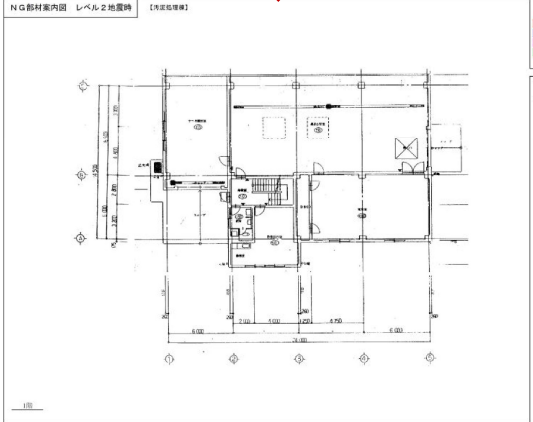
従来診断においてレベル 2 地震動で曲げ NG が発生していた梁部材については、非線形解析を実施した結果、塑性率が 1.0 以下、損傷度 I であることが確認された。

非線形解析を導入し、塑性率による判定を実施することで、部材の現実的な挙動に則した診断結果を得られることが分かった。

表 4 NG 部材数比較表

	部材数 H29 → H30		解消率
管理棟	57	9	84%
汚泥処理棟	12	0	100%

表 5 管理棟 1F 及び汚泥処理棟 B1F の NG 部材数の縮減と部位

	管理棟 1F レベル 2 地震動	汚泥処理棟 B1F レベル 2 地震動
H29 年度 診断結果		
H30 年度 診断見直し結果		

5-2. 耐震化対策費の縮減

耐震診断見直しによる補強費を表 6 に比較、整理した。H29 年度診断結果による補強費は約 130 百万円であったのに対し、H30 年度見直し診断による補強費は約 5 百万円と大幅に減少した。一方、追加設計費は約 40 百万円必要となるが、見直しを実施することで総額として約 85 百万のコスト縮減（65%縮減）につながる結果となった。

表 6 耐震化対策費

単位：百万円

	設計費		補強費 (概算費)	コスト 比較	備考
	診断	見直し			
H29 年度	20		130	130	躯体が耐震性能 2' を許容する場合、杭も耐震性能 2' とみなせる。(H29 年度は、躯体の補強費のみを計上)
H30 年度		40	5	45	

6. 本浄化センターにおける耐震診断の見直しおよび静的非線形解析の導入に対する考察

今回実施した耐震診断の見直しの結果を NG 部材別に表 7 に整理し、以下に説明する。

最初に、曲げ NG 部材、モード判定 NG 部材は 100%解消された。

曲げ NG 部材の解消は静的非線形解析の導入による部材損傷度に基づく判定により、モード判定 NG 部材の解消は部材の塑性ヒンジ発生箇所の特定制に基づく判定が寄与する。

次に、せん断 NG 部材は概ね解消された。

これは、部材にディープビーム式等を適用したことによる耐震診断時のせん断耐力の向上が寄与する。

一方、NG 未解消となった部材は、せん断耐力不足を示しているが、対象施設は 1990 年度設計であり、建築構造物として設計されていた可能性が高く（表 1 参照）、土木構造物と建築構造物の許容せん断応力の差（土木：0.425N/mm、建築：0.700N/mm）による影響が推測される。

表 7 NG 理由別耐震診断結果

NG理由	部材数		解消率	
	H29	→ H30		
曲げ	5	0	100%	・部材損傷度を用いた判定 ・発生応力の見直し
せん断	35	9	74%	・ディープビーム式の適用
モード判定	29	0	100%	・部材の塑性ヒンジ発生箇所を特定できるため、判定箇所数を縮減できる

7. おわりに

本浄化センターにおける静的非線形解析の導入事例を紹介した。従来診断を見直す際、非線形解析を導入することで耐震補強必要箇所が解消され、補強費は 65%縮減された。一方、本浄化センター内には、耐震診断未実施の施設が多数存在し、今後、計画的に耐震化を図る必要がある。

一般的に、下水道施設の耐震性能を評価するにあたり、以下の点を整理した上で実施することが望ましい。

一方で今回の業務のように、非線形解析を導入しても NG 解消されない部材が発生するケースも存在するが、構造物の設計指針や耐震診断の考え方変遷を整理することで合理的に説明することが重要である。

- ・ 1997 年以前設計の構造物は、レベル 2 地震動を想定していない設計基準に基づき設計されているため、従来診断では NG 判定となり得ることが想定されるが、静的非線形解析を導入することで部材損傷度を判定することができ、結果として NG 部材を大幅に削減することができる。
- ・ 1990 年以前設計のⅣ類構造物は、当時の構造分類上Ⅴ類として位置付けられ、建築基準に基づき設計されているものが多数存在する。このような設計では、部材耐力を現況設計基準より多く見込んでいることから、見直しを実施しても部材の NG は残る可能性がある。
- ・ 1997 年以前設計の構造物は、レベル 2 地震動を想定していないことから、新たに耐震診断を実施する場合には、基本的に見直し業務を見込んだ 2 ヶ年業務として提案することが望ましい。

【参考文献】

- 1) 下水道施設の耐震対策指針と解説（2014 年版）-平成 26 年 6 月 公益社団法人 日本下水道協会
- 2) 下水道施設耐震計算例 -処理場・ポンプ場編-平成 27 年 6 月 公益社団法人 日本下水道協会
- 3) コンクリート標準示方書（設計編）-平成 30 年 3 月-公益社団法人 土木学会