

## 1-2-2 既存施設の耐震補強設計における非線形解析の

### 導入効果について

建設部 土木設計課 中西 拓己

#### 1. はじめに

下水道局では、震災対策として、首都直下地震などの想定される最大級の地震動に対し、必ず確保すべき機能（揚水、簡易処理及び消毒機能）（図1）に加え、導水機能（流入きよ、放流きよ等）・汚泥処理機能を新たな対象とし、水再生センター及びポンプ所の耐震化を推進している。

しかし、これらは、稼働中の施設や水位を有する施設であるため、耐震化を図るには、水処理設備、揚水設備等を含む運転管理上のさまざまな制約を受け、耐震補強が困難となる場合がある。

本稿では、水再生センター・ポンプ所の耐震化における課題を挙げながら、部材の持つ靱性等非線形特性を考慮した非線形解析の導入とその効果について報告する。

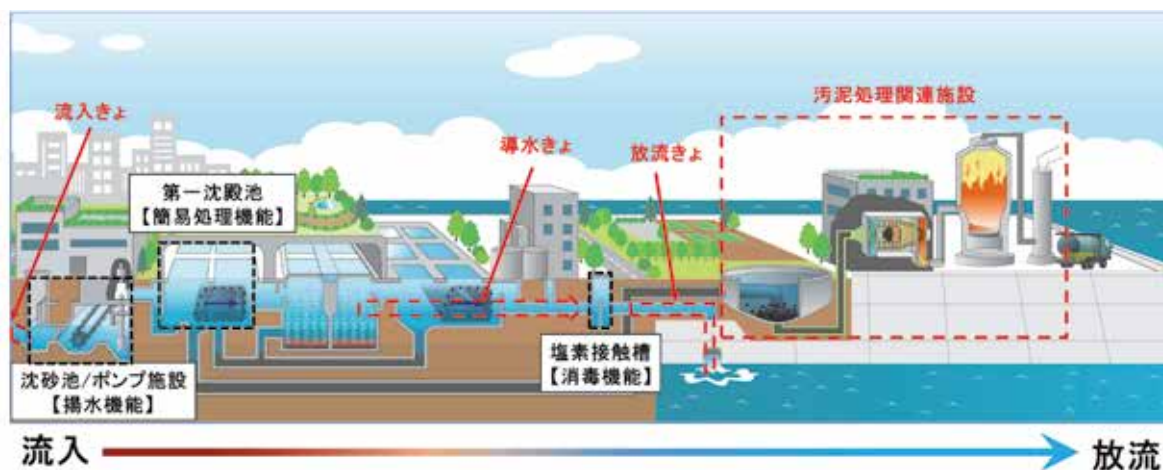


図1 水再生センター及びポンプ所の耐震対策対象施設

#### 2. 施設耐震化の現状と課題

水再生センター及びポンプ所における施設の耐震化は、稼働中の施設に対して耐震化を行う場合が多い。施設を稼働させながら実施する耐震補強工事は、以下の2つの課題を解決しつつ施工することが求められる。

第一に、施工箇所のドライ化である。沈砂池、第一沈殿池等の常時稼働している施設の槽内は、常に水で満たされている。そのため、耐震化を行うには、大規模な止水壁による締切、ゲートの新設、バイパス管及び切り回し水路の設置等によってドライ化し施工を行う必要があり、莫大な費用と工期の長期化を伴うことになる。

第二に、ポンプや配管類等の施工時に干渉する設備（図2）の移設である。補強箇所にポンプなどの稼働中設備が設置されている場合、機能の一時停止、もしくは設備の移設等が必要となる。しかし、このような設備の移設は実際には困難であることが多く、渇水期等の限定的な期間で機能停止し、施工することを余儀なくされ、事業の遅延に繋がっている。

### 3. 既存施設の耐震補強設計と非線形解析の導入

前述の課題を解決しつつ耐震化するため、非線形解析の導入を図った。

下水処理施設における耐震補強設計の解析手法は、線形解析と非線形解析に大別される。指針では、線形解析を実施し、耐震性能を確認することを基本としている。線形解析では、部材に荷重が作用した時の変形挙動を線形に置き換えてモデルを構築し(図3)、柱、梁等の主部材に対して、破壊モードの判定を行い、脆弱的な壊れ方をするせん断破壊ではなく、靱性のある壊れ方をする曲げ破壊を先行させる必要がある。このため、部材が降伏点に達しない場合でも、破壊モードの判定によりNGとなり、耐震性能を満足しない部材が非常に多く発生する傾向にあった。

これに対し、非線形解析では、各部材に荷重が作用した時の変形挙動を非線形としてもモデル化し、静的荷重を漸増载荷して解析することにより、各部材の損傷度(表1)を正確に特定することができる。その結果、破壊モードの判定箇所が限定的となり、耐震性能不足となる部材を減少させることができる。

非線形解析を行うことにより、各部材の耐震性能を精緻に判定することで補強量を削減させ、ドライ化や設備の移設費等のコストカット及び工期短縮が期待される。

ただし、非線形解析は、精緻な解析を行うため、線形解析に比べ、委託費が高額であり、解析を行うには、施工困難箇所であることと効果が十分に見込まれるかを見極める必要がある。そのため、非線形解析の採用にあたっては、線形解析による耐震診断結果(破壊モードの判定による部材NG箇所数、支障物の有無等)を確認し、高額な委託費に見合う十分な工事費削減効果が期待出来る案件を選別している。



図2 支障となる稼働中設備類

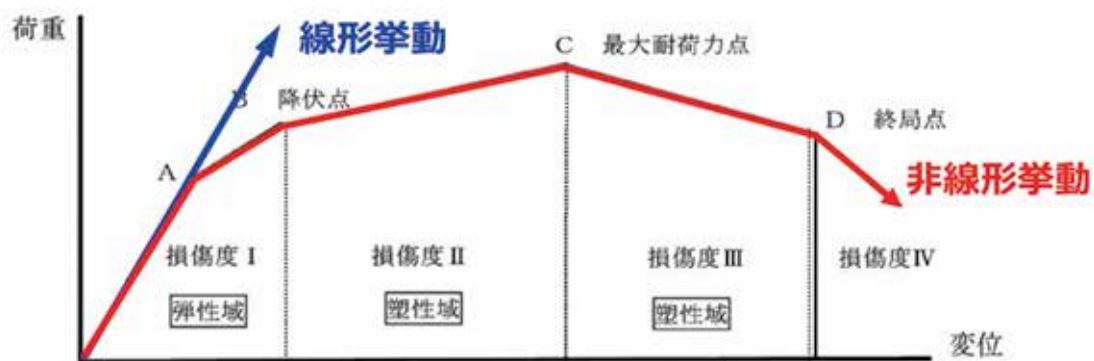


図3 線形挙動と非線形挙動

表 1 部材の損傷度

部材の損傷度	部材の状態
損傷度Ⅰ	損傷はほとんどなし
損傷度Ⅱ	損傷は軽微で補修は容易
損傷度Ⅲ	損傷を受け、補修・補強が必要
損傷度Ⅳ	破壊している

#### 4. 非線形解析の導入効果

##### 4.1 導入事例

当課における非線形解析の適用案件 60 件（令和 2 年 1 月時点）について、非線形解析の導入効果を検証した。その中の一事例について導入効果を報告する。

有明水再生センター（図 4）は、江東区有明二丁目に位置し、臨海副都心区域から発生する下水を処理し、東京湾に放流する施設である。

本事例は、当該施設の管理棟、第一沈殿池、反応槽、第二沈殿池、高度処理棟、管廊・車路において、線形解析による耐震診断を実施した結果、耐震性能不足となる箇所が多くが破壊モード判定によるものであった。そのため、非線形解析を用いて解析を行ったものである。

当該施設の線形解析での解析結果では、全体で約 1800 箇所の耐震性能不足となる箇所が確認された。その中でも、第一沈殿池、反応槽、第二沈殿池での耐震性能不足箇所が約 1600 箇所と特に多くの不足箇所を確認された。「2. 施設耐震化の現状と課題」で説明したとおり、第一沈殿池、反槽槽及び第二沈殿池等の常時稼働している施設で槽内が常に水で満たされているような施設では、耐震化のためのドライ化や設備等の移設が大規模となるため、解析の精緻化により、このような箇所での耐震性能不足箇所の減少を期待して、非線形解析による照査を実施した。

結果、非線形解析による当該施設全体の耐震性能不足箇所は約 80 箇所と大きく減少させることができた。同様に、第一沈殿池、反応槽、第二沈殿池においても破壊モード判定による、耐震性能不足箇所を解消することができ、ドライ化や設備等の移設等施工に際して副次的に発生する費用を抑えることができた。具体的な費用としては、当該施設全体での線形解析による概算直接工事費が約 50 億円に対して、非線形解析による概算直接工事費と非線形解析委託費の合計が約 5 億円であることから、約 45 億円の工事費削減効果が確認できた（図 5）。



図 4 有明水再生センター

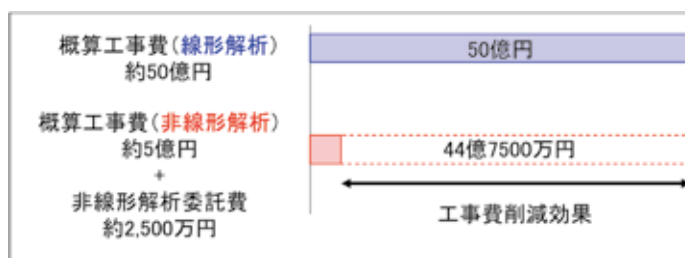


図 5 事例検証結果

## 4.2 検証結果

非線形解析では、より複雑な解析を行うため、設計業務に伴う費用と期間は、線形解析と比べ増大傾向にある。検証の結果、追加の解析等費用は適用案件全 60 件に対して、約 14 億円の増額であったが、耐震補強工事に伴う費用は約 300 億円の削減となり、結果として約 286 億円の削減効果が確認された。

なお、精緻な解析による耐震補強必要範囲の縮減に加えて、稼働中設備の移設や止水作業が不要となるケースが確認されており、耐震補強工事における施工性向上への寄与が確認された。

## 5. まとめ

施工困難箇所について、非線形解析により耐震補強範囲縮減による稼働中設備の移設や止水作業が不要となり、耐震補強費用の削減及び工期短縮が確認された。

ただし、非線形解析には線形解析と比べ高価な解析費用が追加で発生することから、採用には見極めが必要となるが、本稿検証により、耐震補強工事に係る費用を考慮した際は経済的であった。トータルの費用対効果として、適用案件全 60 件に対して約 286 億、1 件あたり約 5 億円の削減効果を確認した。

今後も施工困難箇所について、本手法の適用により施工性の向上を図り、耐震対策を効率的に実施していく。

## 参考文献

- ・「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」(社団法人日本道路協会)
- ・「下水道施設の耐震対策指針と解説－2014 年版－」(公益社団法人日本下水道協会)
- ・「下水道施設耐震計算例－処理場・ポンプ場-2015 年版」(公益社団法人日本下水道協会)