

下水道施設の耐震診断について

—破壊モード判定に関する一考察—

エンジニアリング本部 防災情報部

金井 眞

瀬戸 孝欣

1. はじめに

近年、全国各地で大規模地震が発生し、下水道施設に多大な被害をもたらしているが、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 年以前に施工された下水道施設の耐震化は十分進んでいないのが現状である。

以上を踏まえて、重要な下水道施設の耐震化を図る「防災」、被災を想定して被害の最小化を図る「減災」を組み合わせた総合的な地震対策として「下水道総合地震対策事業」が平成 21 年から実施されている。本事業は、下水道施設の地震対策を重点的に推進するものとし、5 年後に、事業効果を検証する事としている。

2. 耐震計画

2.1 構造設計の基本方針

構造設計の基本方針として、以下の 7 つの項目が示されている。(参考文献 1))

- 1) 構造物の設計にあたっては、地域特性、地盤特性及び構造形の分類に応じた設計を行う。
- 2) 周辺地盤が地震時に液状化等の変状を起こす可能性がある場合には、適切な対策を考慮する。
- 3) 想定地震動に対してあらかじめ定められた耐震性能目標を満足するよう設計する。
- 4) 構造物の断面算定は、土木・建築構造物の区

分及び想定地震動または設計区分に応じて定められた方法を用いて行う。

- 5) 構造物に作用する荷重の組合せは、最も不利な状態の応力で部材の検討を行う。
- 6) 土木構造物においては地上高 15m を超える特殊構造物等または地震時の挙動が複雑なものは、動的解析等も考慮する。建築構造物は基本的には建築基準法等に従う。
- 7) 法的規制や行政指導等を受ける構造物については、それらの構造規定も満足しなければならない。

2.2 想定地震動及び耐震性能目標

耐震設計において想定する地震動及び耐震性能目標または耐震設計区分は、土木構造物と建築構造物の区分に応じて定めるが、一般的に表 1～4(参考文献 1)より引用)に示す通りである。

2.3 構造形の分類と耐震計算法

下水道施設は、構造、機能を元に土木構造物として 3 種類、複合構造物、建築構造物としてそれぞれ 1 種類の合計 5 種類に分類されている。表 5(参考文献 1,2)より引用)に分類を示す。

表 1 土木構造物耐震設計上の想定地震動

地震動区分	地震動区分別の地震動の内容
レベル1地震動	施設の供用期間内に1～2度程度発生する確率を有する地震動
レベル2地震動	施設の供用期間内に発生する確率は低いが大きな強度を有する地震動

表 2 土木構造物に適用する耐震性能目標

地震動区分	耐震性能目標
レベル1地震動	地震動が作用しても、構造物が損傷を受けないものとする耐震性能
レベル2地震動	構造物が損傷を受けたり塑性変形が残留しても比較的早期の復旧を可能にする耐震性能

表 3 建築構造物耐震設計上の想定地震動

想定地震動区分	想定地震動区分別の地震動の内容
中地震動	耐用年限中に数度は遭遇する程度の地震動
大地震動	耐用年限中に一度遭遇するかも知れない程度の地震動

表 4 耐震安全性の目標及び設計方法

想定地震動区分	設計区分	設計区分別の耐震設計の内容
中地震動	一次設計	$C_0=0.2$ 程度の入力地震動に対して損傷を生じず建築物の機能を保持することを目標とし、建築基準法、同法施工令及び建築構造設計基準にしたがった許容応力度設計を行う。
大地震動	二次設計	$C_0=1.0$ 程度の入力地震動に対して、建築物の架構に部分的なひび割れ等の損傷が生じて、最終的に崩壊から人命の保護を図ることに加え、地震後大きな補修をすることなく建築物を使用できることを目標とし、建築基準法・同法施行令及び建築構造設計基準にしたがった層間変形角、剛性率及び偏心率を確認を行うとともに、重要度係数を考慮した耐震安全性の確保を図る。

表 5 構造形の分類と耐震計算法

構造形の分類			主な構造物	耐震設計法
大分類	小分類			
土木構造物	Ⅰ類 [水槽構造物]	Ⅰ-1類	沈殿池、反応タンク	震度法
		Ⅰ-2類	汚泥消化タンク	
	Ⅱ類 [地中埋設線状構造物]	Ⅱ類	地下管廊、導水渠、放流渠	応答変位法
	Ⅲ類 [版状構造物]	Ⅲ類	コンクリート基礎等	震度法
複合構造物	Ⅳ類 [複合構造物]	Ⅳ-1類	二重覆蓋のある水処理施設等	土木：震度法 建築：建築基準による
		Ⅳ-2類	上屋のあるポンプ棟等	
建築構造物	Ⅴ類 [建築構造物]	Ⅴ類	管理棟、地下式オイルタンク (消防法等による。)	建築基準による

3. レベル 2 地震動に対する照査

3. 1 じん性の考慮

応力解析にあたっては、構造物がじん性を有しているため、レベル 2 地震動に対する外力に対して外力が増加しても構造物の内部応力が大きく増大せずにひずみを許容する(地震に伴う外力による仕事量が構造物内部のひずみエネルギーに変換される。)ところから、レベル 2 地震動相当の本来の外力に構造物特性補正係数(以下:Cs)を乗じた等価水平震度を用いて外力の設定を行う必要がある。詳細については文献 3)に委ねる。

3. 2 断面力に対する照査方法

レベル 2 地震動に対しては、曲げ耐力、せん断耐力、破壊モードの判定の 3 項目について照査を行う。以下に照査の手順を示す。

- Md: 曲げモーメント(作用断面力)
- Vd: せん断力(作用断面力)
- Mu: 曲げ耐力
- Mud: 設計曲げ耐力(=Mu/γb)
- Vyd: 設計せん断耐力
- γi: 構造物係数(=1.0)
- γb: 部材係数(=1.0)
- L: せん断スパン比(=Md/Vd)
- Vmu: Mu に達する時のせん断力(=Mu/L)

<曲げ耐力の照査>

下式を満たせば曲げ耐力に対する照査は安全となる。

$$\gamma i \cdot Md / Mud = \gamma i \cdot Md \cdot \gamma b / Mu < 1.0$$

<せん断力耐力の照査>

下式を満たせばせん断耐力に対する照査は安

全となる。

$$\gamma i \cdot Vd / Vyd = 1.0$$

<破壊モードの判定>

判定の結果、「曲げ破壊モード」となれば破壊モード判定に対する照査は安全となり、「せん断破壊モード」となれば危険となるが、「せん断破壊モード」となった場合でも、余裕度判定を実施し余裕度があると見なされた場合は「せん断破壊モード」でも安全となる。Cs はこの余裕度に対する指標である。

下式を満たせば「曲げ破壊モード」と判定され安全となりこの時点で照査は終了となる。

$$\gamma i \cdot Vmu / Vyd < 1.0$$

上式を満たさず、「せん断破壊モード」と判定された場合に下式を満たせば、破壊する時はせん断破壊となるがせん断耐力に十分余裕があると見なされ照査結果は安全となる。

$$\gamma i \cdot Vd / Vyd < Cs$$

ここで、RC 構造物では一般的に Cs の値を 0.45 としている。

3. 3 Cs の定め方による考察

Cs=0.45 とした場合、破壊モードの判定を実施し、「せん断破壊モード」となった場合、せん断破壊モードだが安全とするために、設計せん断耐力(Vyd)はせん断力(Vd)の 2.22 倍必要になる。特に、補強設計を実施する際などは、この数値をクリアするために、コンクリートの増打が既存の断面高さ以上になったり、ポストヘッドバーを相当数挿入する事になったりして、やや現実離れた、過剰な対策が必要となるケースがある。

しかし、 $C_s=0.75$ とした場合は、設計せん断耐力(V_{yd})がせん断力(V_d)の 1.33 倍で良い事になり $C_s=0.45$ の時に比べ、現実離れた対策が必要となるケースが格段に少なくなる。

A 市では、地盤種別に応じて C_s の値を設定しており、第Ⅲ種地盤の場合は $C_s=0.75$ (第Ⅰ、Ⅱ種地盤の場合は 0.50)としている。

B 市では、補強設計においては、レベル 1 地震動に対する補強に留め、レベル 2 地震動に対してはレベル 1 地震動に対する補強後に照査を実施し、補強によりどの程度、部材耐力が改善されるかの確認に留めている。但し、この場合は、レベル 1 地震動で危険となった部材だけが対象となってしまう。

また、破壊モード判定で危険と判定された場合、曲げ耐力、せん断耐力は十分有するにもかかわらず、部材として危険と判定される事がある。ここで、曲げ耐力、せん断耐力を十分有する場合、想定している外力(地震力)に対して十分安全であると思われる方法もあり、近年の補強設計の業務では、あえてモード判定は実施しない事例も見受けられる。

4. まとめ

既設の施設に対する補強設計の難しさは、施設が供用されている事にある。その為、基本的には施設内の水の流れを止める事が出来ないので工事できる箇所が制約される。また、水の流れに関係しない部位においても、機器が設置されており補強工事が困難な場合が多々ある。

土木部の補強方法は基本的に断面を大きくする(部材を追加する)方法が取られるため、スペースが確保できない箇所においては補強を実施できな

い場合が多々ある。

更に、レベル 2 地震動の照査項目の 1 つである「破壊モードの判定」までを安全にするためには、せん断耐力の大幅な向上が必要となり、より一層、補強の実施を難しくしている。

上記をふまえると、先に紹介した A 市、B 市等と同じ補強設計でも、他市よりも現実的な内容になっていると思われる。比較的古い施設は、建物自体の供用年数も 10 年前後のものが多く、現段階では、立替の時期まで大きな被害を受けなければ良いとする考えに基づいて導かれた方法だと思われる。

同様に、杭についても耐震診断を実施すると殆どの施設で危険と判定される。したがって、施設本体と同様に、杭の補強設計は実施しないとする仕様書を見受ける機会が増えたように思う。

今までの耐震診断業務の成果が整ってきたため補強設計の方針に、少し変化が見受けられるようになってきたように思われる。実際に行われる補強工事がより有意義なものとなるよう、弊社も日々の業務に取り組んでゆきたい。

<参考文献>

- 1) 「下水道施設耐震計算例—処理場・ポンプ場編—」(社団法人 日本下水道協会,H14.8)
- 2) 「下水道施設の耐震対策指針と解説」(社団法人 日本下水道協会,H18.8)
- 3) 「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,H14.3)
- 4) 「建築物の構造関係技術基準解説書」(全国官報販売協同組合,H19.8)