

載荷状態を考慮したせん断耐力式の水道施設への適用事例

(株) NJS ○小野 敏幸、大嶽 公康

1. はじめに

水道施設の耐震化率は、年々向上しつつあるがいまだに低水準であり、その要因としては、莫大な補強費用の確保や、工事期間中の水運用、補強による施設機能への影響などが挙げられる。また、このような様々な課題が、耐震化事業の実施に支障となっていると考えられる。

1997年の水道施設耐震工法指針・解説制定以前に設計された施設は、せん断補強筋の鉄筋量が少ないため、耐震診断の結果、せん断耐力不足と判定される場合が多くみられる。しかしながら、過去の大規模地震の被害では、せん断破壊による被害が限定的な場所で発生していることから、従来手法による評価と実際の被害状況には乖離があると指摘されている¹⁾。このような背景から、本稿では、せん断耐力の合理的な評価手法に着目して、載荷状態を考慮したせん断耐力式の水道施設への適用事例を示す。

2. 評価手法の概要

2.1 せん断耐力式に関する各種基準の整理

せん断耐力式に関する各種基準の規定内容を表-1に示す。水道施設耐震工法指針・解説 2009年版（以下、水耐指針）では、池状構造物の耐震計算例において、コンクリート標準示方書 2012年制定（以下、コ示方書）の棒部材式が適用されている。コ示方書では、複数の分布荷重が作用する場合は、せん断スパンを設定し、せん断スパン比に応じて棒部材式またはディープビーム式を用いるとされている。原子力発電所耐震設計技術規定平成21年（以下、原子力規定）では、コ示方書と同様に棒部材式またはディープビーム式を適用するが、原子力規定の棒部材式では、等価せん断スパンが考慮されている。

表-1 各種基準のせん断耐力

基準	せん断耐力式に関する記述
水道施設耐震工法指針・解説 ²⁾	・設計事例集の耐震計算例（池状構造物）において、 コンクリート標準示方書の棒部材式が適用 されている。
コンクリート標準示方書 ³⁾	・作用の載荷状態に応じて両端支持条件における耐荷機構を考慮してせん断耐力を算定することを原則とする。 ・非線形有限要素解析等の数値解析や、実験的検討に基づいた手法を用いるのがよいが、安全側となるため棒部材式を便宜的に用いてよい。 ・複数の分布荷重が同時に作用してせん断スパンを明確に定めることができない部材では、作用の組み合わせ毎の曲げモーメント分布より等価せん断スパンを設定し、 せん断スパン比に応じて棒部材またはディープビームとしてせん断耐力を算定 する。
道路橋示方書・同解説 ⁴⁾	・せん断耐力は、コンクリートが負担するせん断耐力とせん断補強鉄筋が負担するせん断耐力の和とする。
原子力発電所耐震設計技術規定 ⁵⁾	・せん断耐力式は、棒部材式とディープビーム式の適用性を考慮の上算出する。※ここでの 棒部材式は、コンクリート標準示方書の式と異なり、せん断スパン比が考慮 されている。
下水道施設耐震計算例 ⁶⁾	・棒部材に関する支持部付近の設計法をそのまま適用するとせん断耐力不足となる場合がある。 ・分布荷重を受ける面部材あるいは部材の隅角部では、等価せん断スパンを用いたディープビーム式を適用してもよい。

2.2 せん断耐力式

水道施設の設計では、水耐指針の耐震計算例でコ示方書のせん断耐力を用いていることから、コ示方書に準拠することが一般的である。

(1) コ示方書におけるせん断耐力の算定

コ示方書におけるせん断耐力の算定には、次のⅠ～Ⅲの3つがあり、Ⅱ、Ⅲによる算定が原則であるが、便宜的にⅠを用いても良いとされている。水道施設においても、せん断耐力の算定は、従来からⅠの棒部材式が用いられている。本稿では、「Ⅱ 荷状態を考慮したせん断耐力式」を用いることで、せん断耐力を合理的に評価し、水道施設の耐震性を照査する。

- Ⅰ 一般的な耐力式「棒部材式」による算定
- Ⅱ 荷状態を考慮したせん断耐力式による算定**
- Ⅲ 非線形有限要素解析を用いた算定

(2) 荷状態を考慮したせん断耐力式 ($V_{yd}=V_{cd}+V_{sd}$)

荷状態を考慮したせん断耐力式には、「ディープビーム式」のほかに原子力規定の「せん断スパン比 a/d (a : せん断スパン d : 部材有効高さ) を考慮した棒部材式(図-1 参照)」があり、両者とも a/d の関数である βa が考慮されており、せん断スパン比が小さいほど、せん断耐力は大きく評価される。

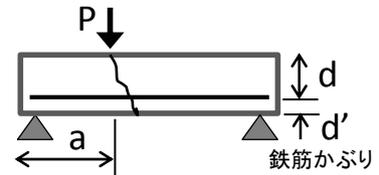
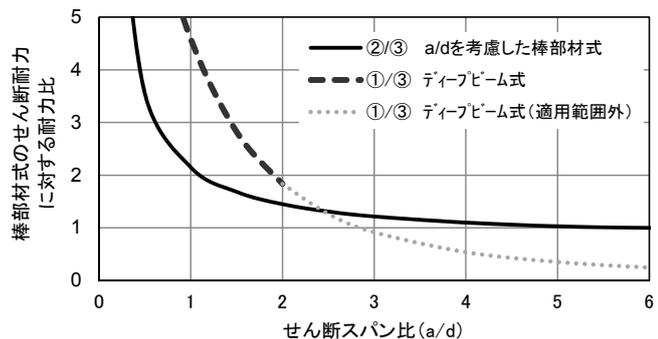


図-1 せん断スパンと部材有効高さ

- Ⅱ-①ディープビーム式 : $V_{cd} = \beta d \cdot \beta p \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \cdot \beta a$
① $\beta a = 5 / (1 + (a/d)^2)$
- Ⅱ-② a/d を考慮した棒部材式 : $V_{cd} = \beta d \cdot \beta p \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \cdot \beta n \cdot \beta a$
② $\beta a = 0.75 + 1.4 / (a/d)$
- (Ⅰ 棒部材式) : $V_{cd} = \beta d \cdot \beta p \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \cdot \beta n$

(3) 各せん断耐力式の比較

図-2 は、コ示方書の棒部材式によるせん断耐力(標準的な式)と荷状態を考慮したせん断耐力式との耐力比を示している。ディープビーム式は、その適用範囲 ($a/d \leq 2.0$) において、棒部材式の2倍以上の耐力となる。また、ディープビーム式の適用範囲外では、 a/d を考慮した棒部材式によるせん断耐力が大きくなり、せん断スパン比が4以下の範囲では、棒部材式よりも10~50%程度大きくせん断耐力を評価することができる。



せん断耐力 $V_{yd}=V_{cd}+V_{sd}$

- ①ディープビーム式 $V_{cd} = \beta d \cdot \beta p \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \cdot \beta a$
- ② a/d を考慮した棒部材式 $V_{cd} = \beta d \cdot \beta p \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \cdot \beta n \cdot \beta a$
- ③ 棒部材式(示方書) $V_{cd} = \beta d \cdot \beta p \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \cdot \beta n$
- ※① $\beta a = 5 / (1 + (a/d)^2)$ 、② $\beta a = 0.75 + 1.4 / (a/d)$

図-2 せん断耐力の比

2.3 等価せん断スパンの設定

載荷状態を考慮したせん断耐力式では、せん断スパン比 a/d を適切に設定する必要がある。 d は部材有効高さであり、鉄筋断面の構造条件で決定される。一方、 a はせん断スパンであり載荷条件から決定される。せん断スパンは、集中荷重が作用する単純梁では、せん断力が一定となる区間を示す（図-3-a）。それに対して等価せん断スパンは、等分布荷重などが作用する場合に、曲げモーメント分布図から設定される。具体的には、図-3-b に示すとおり、部材前面から曲げモーメントの反曲点や最大点までの各距離が等価せん断スパンであり、これは各せん断スパンで独立したせん断ひび割れが進行し、破壊に至るといふ実験結果に基づいている⁷⁾。なお、等価せん断スパンは、分布荷重が作用していることが前提であるため、水道施設では、水圧や土圧を受けている部材が適用可能となる。

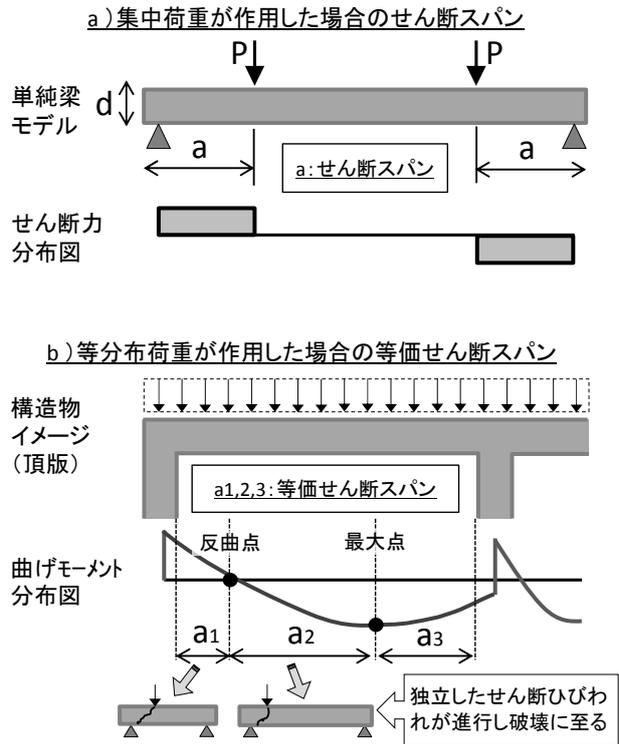


図-3 等価せん断スパンのイメージ

2.4 等価せん断スパンを用いたせん断耐力の評価手順の提案

等価せん断スパンを用いたせん断照査手順を図-4のように提案する。等価せん断スパンの設定は、曲げモーメント図から読み取る必要があるため、対象施設の全ての部材を対象とする作業は煩雑である。そのため、図-4に示すとおり棒部材式での照査でNGとなり、等価せん断スパンの耐力式を適用できる部材に対して再照査することが実務的となる。等価せん断スパンは、再照査の対象部材において最大せん断力が発生した状態の曲げモーメント分布図により設定を行う必要がある。また、せん断耐力式は、より大きいせん断耐力を評価するために、せん断スパン比が2以下の場合にはディープビーム式、それ以外の場合は a/d を考慮した棒部材式を適用する。

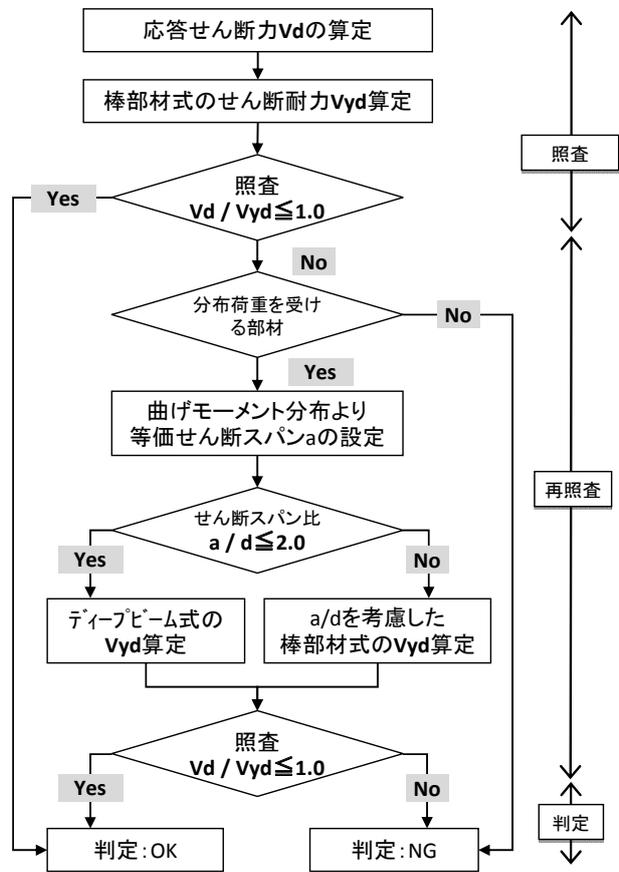


図-4 せん断照査手順

3. 耐震性照査への適用事例

載荷状態を考慮したせん断耐力式の水道施設への適用事例として、以下に2事例を示す。いずれもレベル2地震動に対する耐震性照査への適用事例である。

3.1 適用事例-1（静的解析）

対象施設は、ポンプ室であり解析断面位置を図-5に示す。解析手法は2次元フレームモデルによる静的解析であり、棒部材式による照査では、図-6に示すとおり側壁付近の底版でせん断耐力が不足する結果となった。NG部材の再照査として、最大せん断力が発生する解析ケースの曲げモーメント図より、等価せん断スパンをそれぞれ設定する。底版左側（部材①）では、等価せん断スパンが $a=0.38\text{m}$ であり、せん断スパン比 a/d が 0.72 であるため、ディープビーム式を適用して再照査を行った。再照査の結果、せん断耐力が棒部材式に対して5倍以上と評価され補強対策が不要と判断された（表-2、図-7参照）。部材②の再照査でも同様の結果となり、本適用事例では補強対策が不要と判断された。

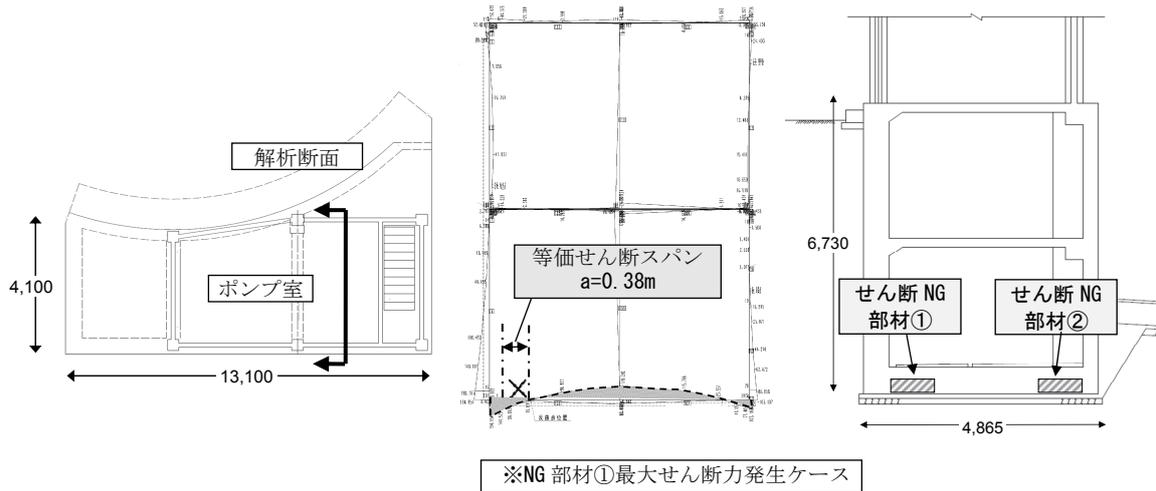


図-5 解析断面位置図

図-6 左図：曲げモーメント分布、右図：せん断 NG 位置

表-2 せん断照査表（NG部材①）

項目（NG部材①）	当初照査	再照査
せん断耐力算定式	棒部材式	ディープビーム式
有効高 d m	0.53	0.53
せん断スパン a m	—	0.38
発生せん断力 Vd kN	246	246
せん断スパン比 a/d	—	0.72
$\beta a = 5.0 / (1 + (a/d)^2)$	—	3.28
せん断耐力 Vyd kN	169	923
Vd/Vyd	1.46	0.27
耐震性照査判定	NG	OK

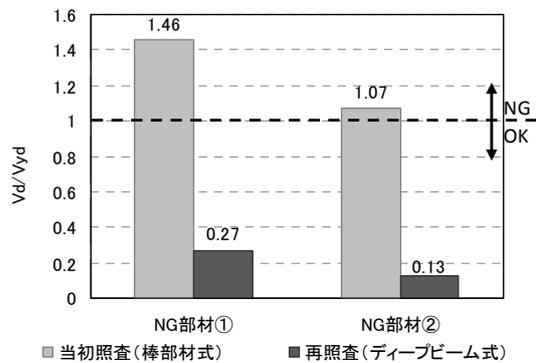


図-7 せん断照査結果

3.2 適用事例-2（動的解析）

対象施設は、浄水能力 $Q=75,600\text{m}^3/\text{日}$ の薬品沈澱池であり、ブロック形成池の横断方向断面の照査事例を示す（図-8 参照）。解析手法は地盤・構造物連成モデルによる動的非線形解析である（図-9 参照）。棒部材式による照査では、図-10 に示すとおり底版の杭頭部周辺でせん断耐力が不足する結果となる。そのため、各部材の最大せん断力発生時刻の曲げモーメント図より、等価せん断スパンをそれぞれ設定した。

部材①では、等価せん断スパンが $a=1.08\text{m}$ となり、せん断スパン比 $a/d=3.09 (>2.0)$ であるため、 a/d を考慮した棒部材式を適用して再照査を行った。再照査の結果、超過率が10～15%程度であった各NG部材は、全て発生せん断力を上回るせん断耐力が確保されて、補強対策が不要と判断された（表-3、図-11 参照）。

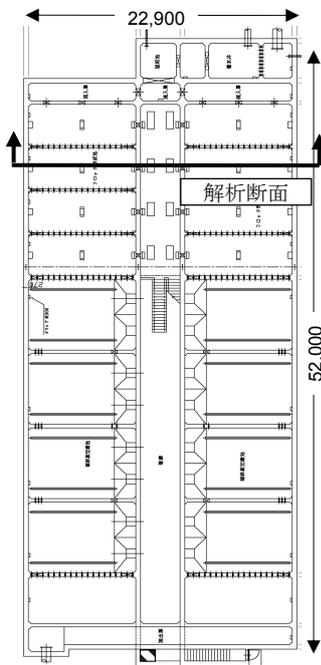


図-8 解析断面位置図

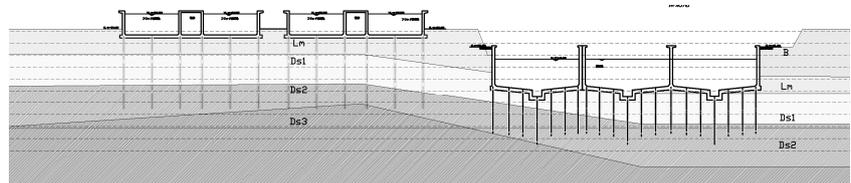


図-9 上図：解析断面位置図、下図：解析モデル

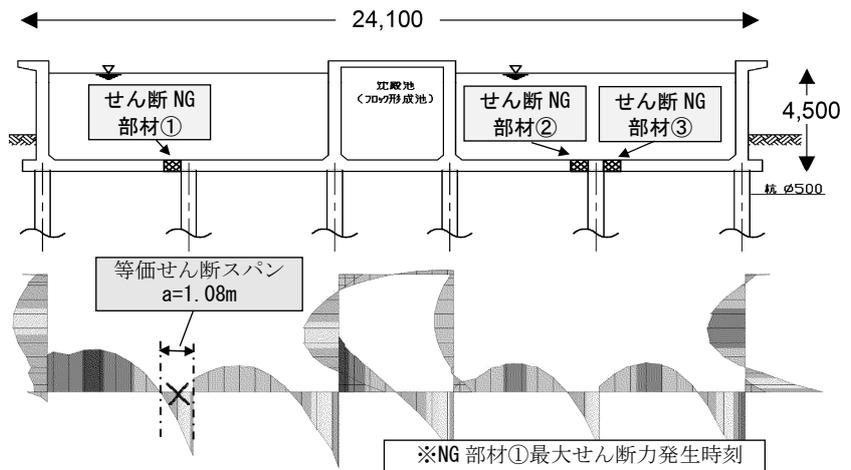


図-10 上図：せん断 NG 位、下図：曲げモーメント分布

表-3 せん断照査表（NG部材①）

項目（NG部材①）	当初照査	再照査
せん断耐力算定式	棒部材式	棒部材式 (a/d を考慮)
有効高 d m	0.35	0.35
せん断スパン a m	—	1.08
発生せん断力 V_d kN	117	117
せん断スパン a/d -	—	3.09
$\beta a = 0.75 + 1.4 / (a/d)$	—	1.20
せん断耐力 V_yd kN	102	122
V_d/V_yd -	1.15	0.96
耐震性判定結果	NG	OK

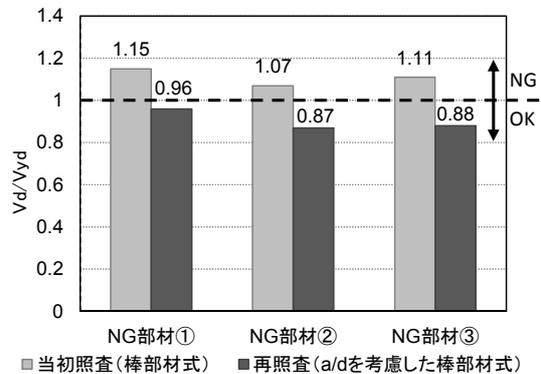


図-11 せん断照査結果

4. おわりに

(1) 設計における適用性

- ・ 等価せん断スパンを用いたせん断耐力を算出し、再照査を行うことで適用例の沈澱池では、せん断破壊に対する補強費用が全体で約 40%削減できた。
- ・ 東日本大震災の配水池の検証解析などにおいて同手法を用いた結果¹⁾は、被害実態に概ね即しており、また、東京都耐震設計ガイドラインにおいても同手法によるせん断耐力評価が例示されていることから設計における適用性は高いと考えられる。
- ・ 水道施設は、土圧・水圧など分布荷重を受ける部材が多いことから、本手法を広く適用することができる。
- ・ 本手法は、適用事例で示したとおり、いずれの解析手法（静的解析/動的解析）でも適用可能である。

(2) 実務における留意点

- ・ 等価せん断スパンは、曲げモーメント図から読み取り設定する必要があるため、対象施設の全部材を対象とする作業は非常に煩雑である。
- ・ 本稿で提案したせん断照査手順を適用し、本評価手法を再照査で用いることで作業量は軽減されるが、通常のせん断照査と比べて労力は大きい。
- ・ 本評価手法は、既存施設の耐震対策を効率的かつ経済的に実施するためには有効な評価手法であるが、新設の耐震設計では最小鉄筋量以上のせん断補強筋を最低限配置するなど、設計に余裕を見込むことも重要である。

以上

【参考文献】

- 1) 成田ほか：東日本大震災による配水池の被害検証を踏まえた合理的な地震対策の検討、第 23 回技術研究発表会、全国上下水道コンサルタント協会
- 2) 水道施設耐震工法指針・解説 設計事例集（2009）、日本水道協会 p117, 118
- 3) コンクリート標準示方書 設計編（2012）、土木学会 p177～187
- 4) 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（2012）、日本道路協会 p186～189
- 5) 原子力発電所耐震設計技術規定（2008）、日本電気協会 p989、990
- 6) 下水道施設耐震計算例-処理場・ポンプ場編-（2015）、（公社）日本下水道協会 p8-82～8-84
- 7) 原子力発電所・鉄筋コンクリート製屋外重要土木構造物への限界状態設計法の適用、原子力土木委員会・限界状態設計部会、土木学会論文集 No442/V-16, pp23-33. 1992. 2