

下水道施設の静的非線形解析による耐震診断事例

(株)極東技工コンサルタント 北村 利夫

近年、全国各地で大規模地震が発生し、下水道施設に甚大な被害をもたらしているが、下水道施設の耐震化は十分に進んでいない。下水道施設は事業継続性の観点から稼働停止することができず耐震診断結果で耐震性能が不足しても、補強箇所が水槽部であったり設備が支障になるなどにより耐震補強が困難で耐震化が進まない状況となっている。土木構造物の非線形解析は、耐震性能不足部材が少なくなる傾向があるため、耐震化を確保するのに有効な手法である。

Key Words : 静的非線形解析、下水道施設の耐震診断

1. 検討背景・業務目的

「下水道施設の耐震対策指針と解説-2014年版-」では、既存処理場・ポンプ場施設の耐震性能においては、新設と同等の性能の確保を基本とするが、施設を更新するまでの当面の間、段階的な耐震性能の向上として耐震性能 2' を設定できること、その照査手法として非線形解析を用いることが示されている。

対象施設においては、静的線形解析による耐震診断の結果で、地下水槽部分にて耐震性能が不足する部材があった。稼働中の施設で運転を止めることができないことから、補強を行うには仮設による代替え施設が必要となり費用が高額になることから、非線形解析による耐震性能 2' の照査を提案した。

2. 業務概要、施設概要

本業務はA市の同じ敷地内にある合流式ポンプ場（第1ポンプ場）と汚水ポンプ場（第2ポンプ場）の2施設を対象とした地下土木部の静的非線形解析業務である。施設概要を表1.に示す。また、図1.に対象施設の施設平面図を示す。

表 1. 施設概要

| | 第1ポンプ場 | 第2ポンプ場 |
|-------------------|--------------------------------------|---|
| 下水排除方式 | 合流式 | 分流式 |
| ポンプ場種類 | 合流式ポンプ場 | 汚水ポンプ場 |
| 能力 | 9.63 m ³ /秒 (雨天時計画下水量) | 1.36 m ³ /秒 (計画時間最大汚水量) |
| 供用開始年度 | 汚水 昭和41年 雨水 昭和38年 | 昭和 48年 |
| 設計対象施設 (工種：土木) | ・ポンプ棟地下構造物 (ポンプ棟基礎・ポンプ井) | ・ポンプ棟地下構造物 (B1F機械室・ポンプ室) (B2F冷却水槽・ポンプ井) |

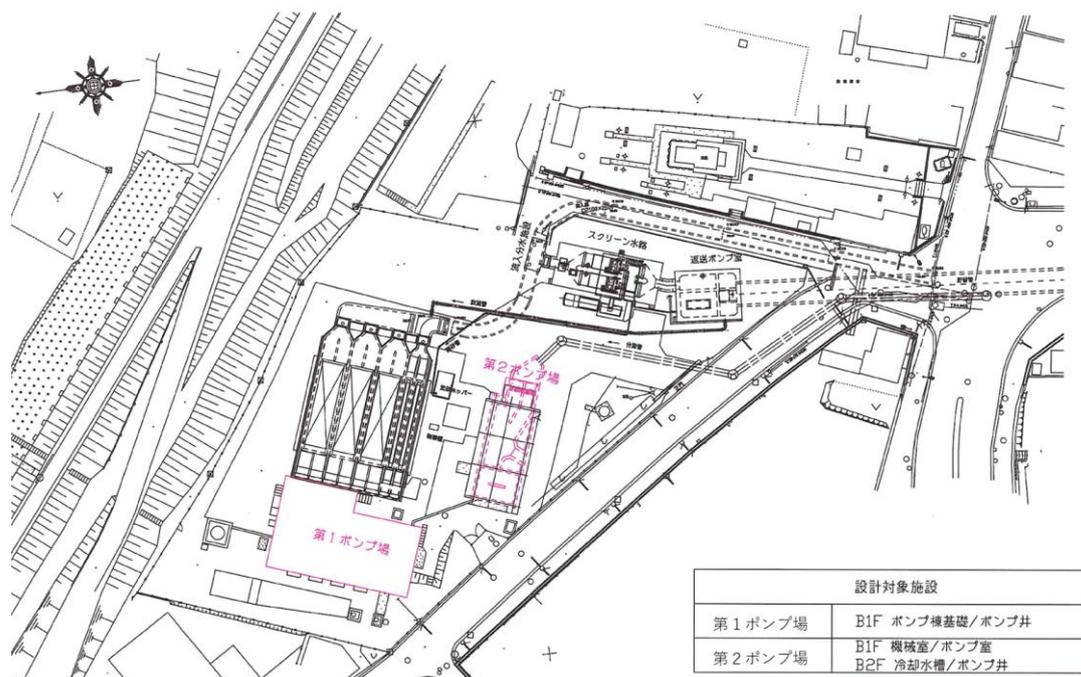


図 1. 対象施設の施設平面図

3. 耐震計算法

対象施設は、下水道施設のポンプ場で土木構造物、複合構造物、建築構造物により構成され、上屋に建築物を有しているため、構造分類は一般的には複合構造物に該当する。

図 2. に静的解析の耐震計算法の体系を示す。

当初診断時は震度法の疑似非線形解析を採用している。これは構造物特性係数を $C_s=0.45$ として、構造物のじん性を考慮した静的線形解析である。この解析では塑性ヒンジ箇所の特定ができないため、全ての部材の隅角部に塑性ヒンジが発生するものとして照査を行う必要があり、せん断破壊先行モードでの耐震性能不足となる部材が発生する可能性が高い。

これに対し、静的非線形解析を用いた場合、塑性ヒンジの発生箇所を特定することができ破壊モードの検討箇所は限定的となり、せん断破壊先行モードでの耐震性能不足となる部材が発生する可能性は低くなる。また損傷度の確認ができるため、弾性域部材は許容応力度での照査が行える。

【慣性力が支配的な耐震計算法】

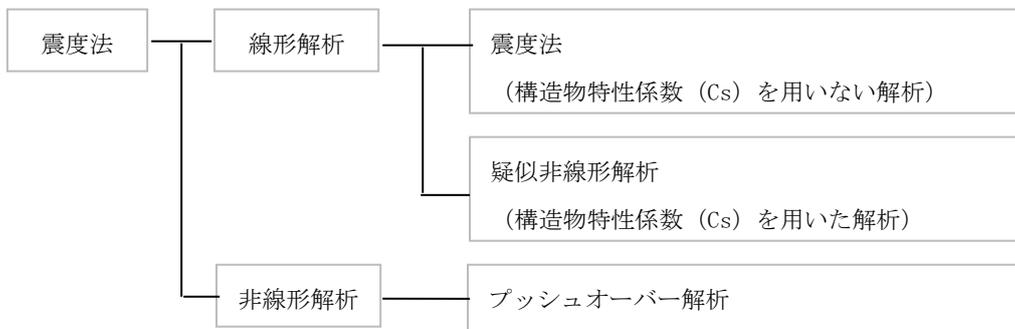


図 2. 静的解析の耐震計算法の体系

4. 第 1 ポンプ場

4-1. 解析モデル

当初耐震診断の線形解析時では、地下に水槽構造物を有する建築物として構造分類は複合構造物IV類としていた。構造を精査した結果、建築物は独立基礎で支持されており、水槽は別構造であったため、ポンプ棟基礎は建築物のV類とし、ポンプ井は水槽構造物のI類として、図3.のように構造分類を見直して解析を行うことにした。

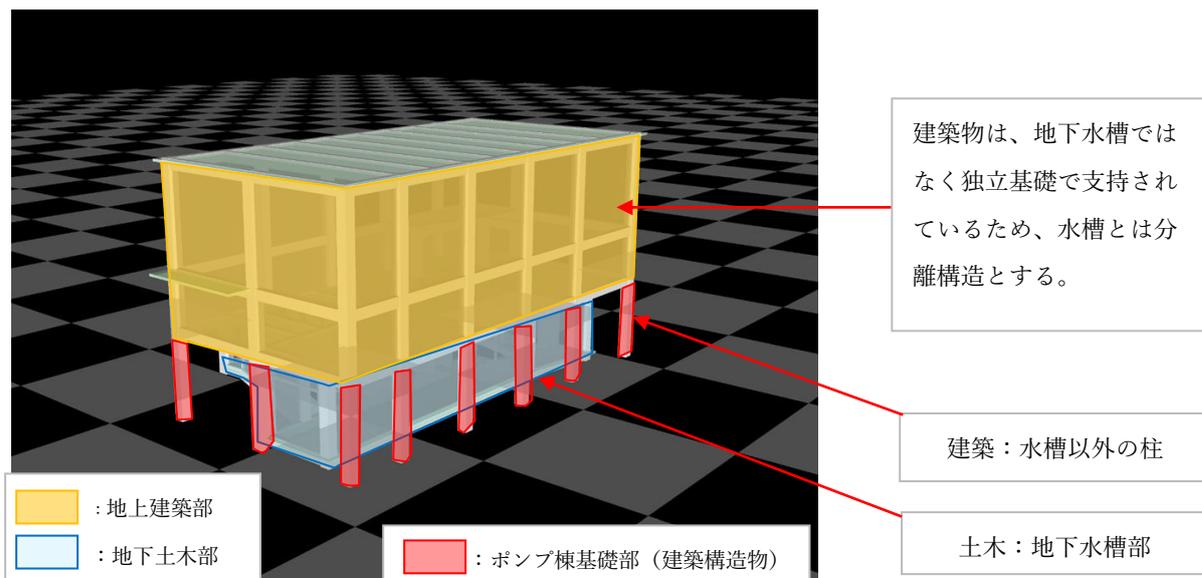


図 3. 第 1 ポンプ場梁柱解析モデル

4-2. 線形解析による診断結果

図 4. に地下 1 階部分の線形解析における診断結果を示す。ポンプ棟基礎でせん断破壊先行モードがあり、地下水槽部でせん断主体の耐震性能を満足しない結果であった。

線形解析においては、限界状態設計法のためせん断補強筋が入っていない場合はせん断耐力が過少に評価される。

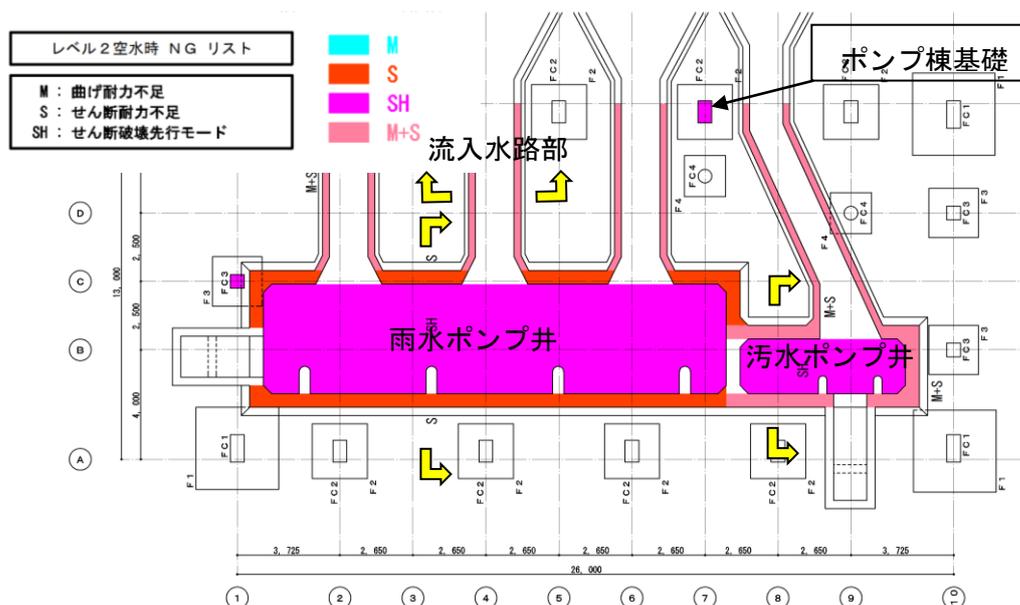


図 4. 地下 1 階 (ポンプ井) 伏せ図/診断結果

4-3. 構造物特性係数の算出

図 5. は、荷重変位曲線である。地下水槽部と建築物と分けて検討しているため、地下水槽の土木部のみで、非線形解析によりエネルギーが一定となる点を算出している。構造物特性係数は、 $C_s = Kh_0 / K_{he} = 0.564 / 0.60 = 0.940$ であった。

なお、RC 構造物では、比較の変位が少なく線形解析時に用いた $C_s = 0.45$ よりも高くなることが多い。

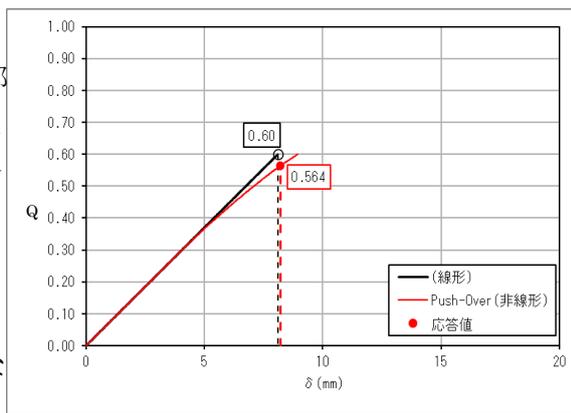


図 5. エネルギー一定則による荷重変位曲線

4-4. 主架構の非線形解析結果

線形解析の結果でせん断破壊先行モードとなるポンプ棟基礎の柱部材があった。建物は地下水槽構造物と一体ではなく建物基礎で支えられている構造のため、耐震性能を満足しない柱に対しては、地下建築物の耐震性能指標 (BGIs) で照査を行うことにした。建築物として見直しを行った結果、耐震照査はフロア単位の照査となり、地下階は土木基準より有利に判定されやすいことから耐震性能を満足する結果となった。

4-5. 主要断面 (壁底版) の非線形解析結果

図 6. に代表断面として雨水ポンプ井部の非線形解析での診断結果を示す。

曲げに対しては、塑性ヒンジの発生箇所がないため、損傷度 I であり、施設評価は耐震性能 2 を有する結果となった。

せん断に対しては、表 2. に示すように耐震性能を満足しない部材はあるが、面部材のためせん断圧縮破壊耐力式 (ディープビーム式) で再照査した結果、耐震性能を満足する結果となった。よってせん断に対しても損傷度 I、施設評価は耐震性能 2 を有する結果となった。

汚水ポンプ井および流入水路部においても同様に耐震性能を満足する結果となった。

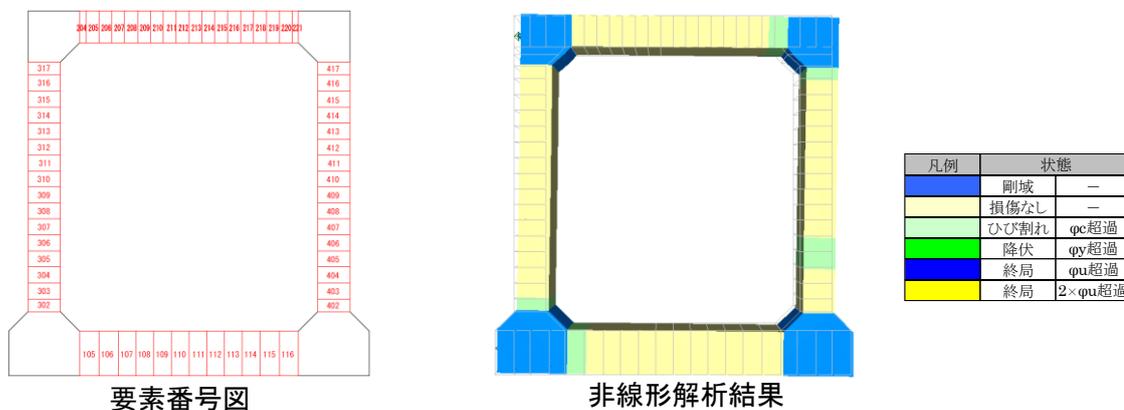


図 6. 曲げの照査結果

表 2. せん断照査結果（壁・底版）

| 部材番号 | 着目位置 | 構造解析結果 | | | | | | 総合判定 | 検討ケース | |
|------|------|-----------------------------|----|--------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|------|-------|------|
| | | $\gamma i \cdot V_d$ Vyd | 判定 | $\gamma i \cdot V_{mu}$ Vyd | 破壊 モード | $\gamma i \cdot V_d$ Vyd | 余裕度 判定 | | | |
| 105 | 左端 | 0.66 | OK | 1.01 | S | 0.55 | OK | OK | 底版 | |
| 114 | 右端 | 0.08 | OK | 1.13 | S | 0.06 | OK | OK | 底版 | Mmax |
| 116 | 右端 | 0.19 | OK | 2.16 | S | 0.16 | OK | OK | 底版 | |
| 204 | 左端 | 0.04 | OK | 0.14 | M | - | - | OK | 頂版 | |
| 205 | 左端 | 0.02 | OK | 0.07 | M | - | - | OK | 頂版 | Mmax |
| 221 | 右端 | 0.63 | OK | 0.84 | M | - | - | OK | 頂版 | |
| 302 | 下端 | 1.20 | NG | 1.99 | S | 1.00 | NG | NG | 側壁左 | |
| 312 | 上端 | 0.01 | OK | 0.01 | M | - | - | OK | 側壁左 | Mmax |
| 317 | 上端 | 0.30 | OK | 0.71 | M | - | - | OK | 側壁左 | |
| 402 | 下端 | 0.45 | OK | 1.10 | S | 0.38 | OK | OK | 側壁右 | |
| 402 | 上端 | 0.35 | OK | 0.70 | M | - | - | OK | 側壁右 | |
| 405 | 上端 | 0.01 | OK | 0.03 | M | - | - | OK | 側壁右 | Mmax |
| 417 | 上端 | 0.70 | OK | 0.98 | M | - | - | OK | 側壁右 | |

以上より、主架構で耐震性能を満足しないポンプ棟基礎は建築物として照査することで耐震性能を満足する結果となり、地下水槽部は主要断面による非線形解析を行うことで、耐震性能を満足する結果となったため、第 1 ポンプ棟の地下構造物は、全ての部材で耐震性能を有している結果となった。

5. 第 2 ポンプ場

5-1. 解析モデル

地上建築物と地下水槽部が一体構造のため、構造分類としては複合構造物IV類として検討を行った。図 7. に示すように、梁柱は建築一貫計算プログラムによりモデル化し、地下土木部の梁柱は、その応力により土木基準で照査を行っている。壁底版は主要断面を 2 次元モデルとして、モデル化を行った。

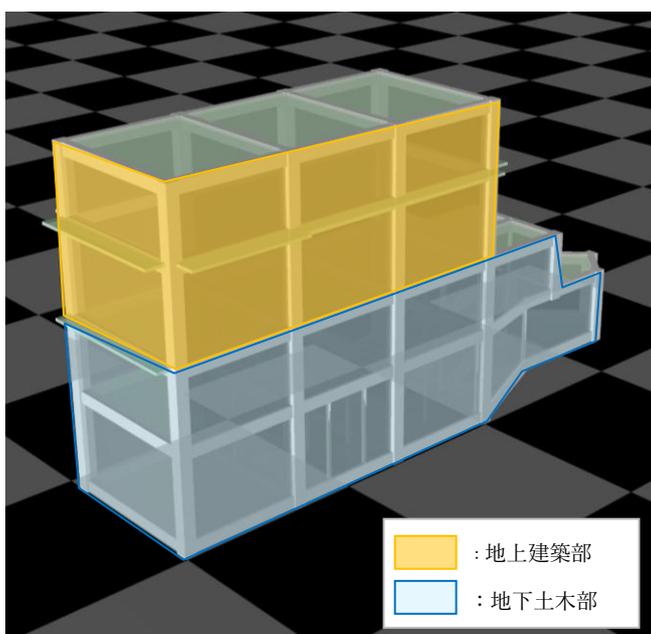


図 7. 第 1 ポンプ場梁柱解析モデル

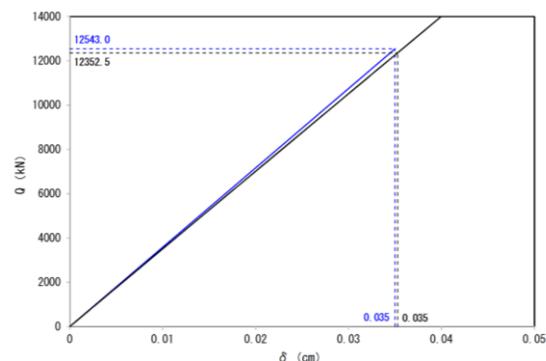


図 8. エネルギー一定則による荷重変位曲線

図 8. に示すように構造物特性係数 C_s は、梁柱解析モデルの変位を用いて算出した結果 $C_s=0.98$ であった。主要断面計算についてもこの値を適用している。

5-2. 線形解析による診断結果

線形解析の結果では、図 9. に示すように沈砂池部の壁・底版およびポンプ井の梁・柱において、せん断破壊先行モードの耐震性能を満足しない結果であった。

| | | |
|-----------------|-------------|---|
| レベル2空水時 NG リスト | | ■ M |
| M : 曲げ耐力不足 | S : せん断耐力不足 | ■ S |
| SH : せん断破壊先行モード | | ■ SH |
| | | ■ M+S |

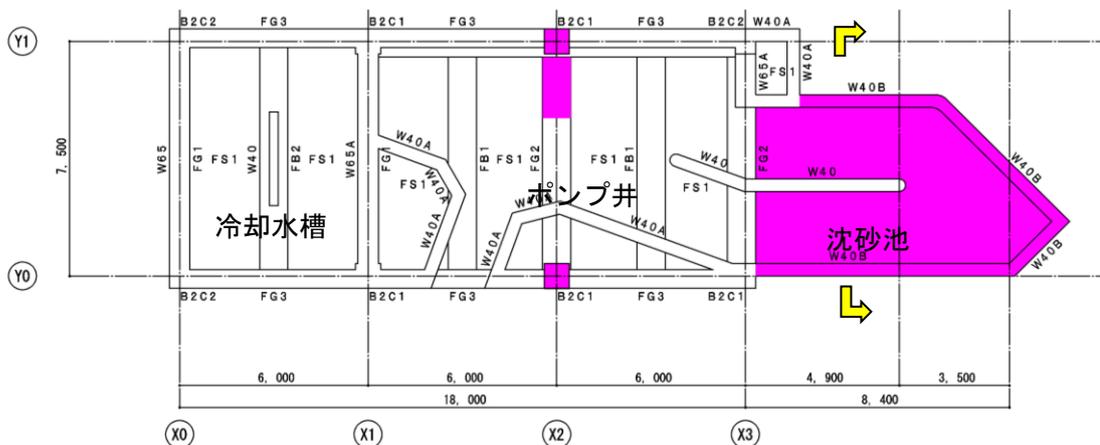


図 9. 地下 2 階 (ポンプ井) 伏せ図

5-3. 主架構の非線形解析結果

塑性ヒンジの発生が無かったため、せん断破壊先行モードの照査が不要となり、全体的に耐震性能を満足しない部材は減少した。しかし荷重は大きくなったため、破壊モードの判定が耐力不足になった部材があり、柱梁で耐震性能を満足しない結果となった。

5-4. 主要断面 (壁底版) の非線形解析結果

沈砂池部の壁底版でせん断破壊先行モードとなり耐震性能を満足しない部材があったため、主要断面の非線形解析を行った。解析モデルは、当初 2 次元モデルとしていたが 2 次元解析すると耐震性能を満足しなかったため、施設形状を考慮して、3 次元効果を考慮した 2 次元モデルとした。

(図 10.) 結果、損傷度 I となり施設評価は耐震性能 2 を有する結果となった。

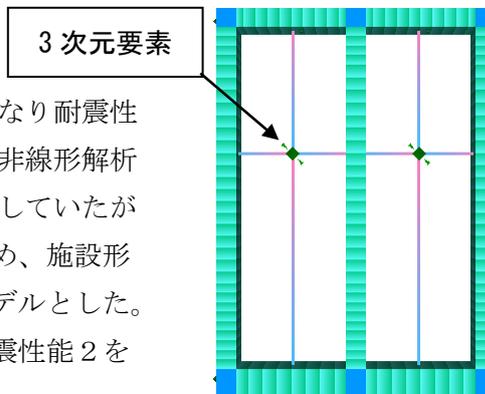


図 10. 主要断面の解析モデル

6. 非線形解析について

2つの形状が違うポンプ場を非線形解析した結果、両方のポンプ場ともに壁・底版については耐震性能を満足する結果となった。これはディープビーム式の適用や、3次元性を考慮したモデルなどを採用することで有利な判定を得ることができた。また今回の事例では使っていないが、弾性域内では許容応力度の適用も可能となっていることから、壁底版部材のせん断に対する耐震性能を満足しない結果は非線形解析を用いることで減少が見込めるものと考えられる。柱梁の主架構は、せん断破壊先行モードの耐震性能を満足しない結果では解消はされることはあるが、壁底版ほどの改善は見込めないものと思われる。