

論文 面外力を受ける下水道施設に非線形有限要素解析を適用する場合の限界値の設定に関する一考察

福江 清久^{*1}・本多 顕治郎^{*2}・安井 達喜^{*3}

要旨：本研究は、構造設計者が非線形有限要素解析を活用して簡易な指標で鉄筋コンクリート構造物の性能照査を行えるようにすることを目指し、土圧や水圧などの面外力を受ける下水道施設の地中構造物を対象に、局所ひずみを指標とした限界値を提案するものである。既往の静的載荷実験結果を基に、汎用の3次元有限要素解析プログラムを使用して、地中構造物であるボックスカルバートの応答を解析的に評価できることを再検証するとともに、積層レイヤ構造のレイヤ分割や要素分割がひずみの算定値に与える影響を検証し、実用的な分割数および限界値を提示した。さらに、実構造物を対象にひずみと塑性率の関係について検討した。

キーワード：下水道施設、地中構造物、非線形有限要素解析、プッシュオーバー解析、ひずみ、限界値

1. はじめに

近年、土木構造物の設計が性能照査型に移行するとともに、動的解析や非線形解析が導入されるようになった。下水道施設の設計分野においても、既存施設の耐震診断や耐震補強設計に非線形解析を導入し、耐震性能を評価している。一般に、構造物の耐震性能の照査においては、構造物の要求性能を考慮して耐震性能1～3の限界状態を定義し、各限界状態の限界値を定める必要がある。

下水道施設の非線形解析においては、例えば柱・梁の棒部材(はり要素)であれば、図-1に示すように、各耐震性能の限界値に相当する許容塑性率を定めている。

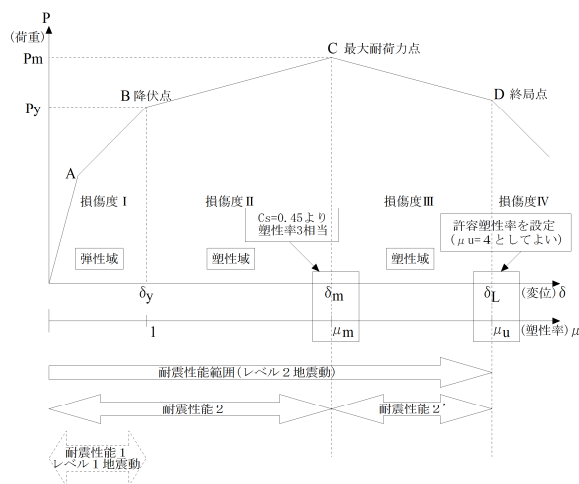


図-1 下水道施設における許容塑性率

一方、地下壁等の土圧・水圧などの面外力を受ける面部材の非線形解析は、非線形材料構成則(応力-ひずみ

関係)を取り入れた有限要素解析で行われる。その場合、耐震性能の照査には、コンクリートや鉄筋の材料損傷に基づく指標として材料ひずみを用いることになるが、下水道施設の技術基準類には、材料ひずみを照査指標に用いる場合の各耐震性能の具体的な限界値が定められていない。本研究の主目的は、構造設計者が非線形有限要素解析を適用して面外力を受ける地中構造物の耐震性能を照査することを念頭に置き、簡易な指標である局所ひずみに着目して、各耐震性能の限界値を定量的に設定することを試みることである。

2. 下水道分野における非線形解析の現状

下水道指針¹⁾は2014年に改訂され、既存施設の耐震診断と耐震補強設計に静的非線形解析が導入された。

下水道施設において、IV類の複合構造物は、一般に柱・梁からなる主架構と土圧壁から構成され、大型かつ複雑な形状を有することが多い。この構造物を汎用の3次元有限要素解析プログラムでモデル化すると、数万節点を超える事例も少なくない。この数万節点の非線形解析は、実際には時間的・経済的な制約があり、事業としての実施は困難といわざるを得ない。この対応策として、大型構造物の柱・梁の主架構に対しては、非線形解析の際に建築の構造設計で利用される一貫構造計算プログラムが適用されている。

一方、面外の土圧荷重等を受ける地下壁や、壁で構成されるI類の水槽構造物に対しては、汎用の構造解析プログラムによる非線形の有限要素解析が行われる。ところが、特に面部材(シェル要素)の耐震性能の照査において、材料ひずみを照査指標に用いる場合の各耐震性能の

*1 (株) エーバイシー 設計部 主任 (正会員)

*2 (株) エーバイシー 取締役設計部長 (正会員)

*3 (株) エーバイシー 設計部

具体的な限界値が定められておらず、現状、これを設計者の判断に委ねている。

本論では、既往の静的載荷実験結果を基に、汎用の3次元有限要素解析プログラムを使用して、ボックスカルバートの応答を解析的に評価できることを再検証するとともに、積層レイヤ構造を用いた場合のレイヤ分割や要素分割がひずみの算定値に与える影響を検証し、実用的な分割数および限界値を提示する。さらに、実構造物を対象にひずみと塑性率の関係について検討する。

3. 解析対象構造物と解析モデル

3.1 解析対象構造物

解析対象とした2連ボックスカルバートの諸元概要を図-2に、配筋図を図-3に示す。これは、土木学会原子力土木委員会・原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針＜技術資料＞(以下、原子力マニュアルという)の地中構造物の限界状態の設定に関する検討において示されている水平載荷実験Cの試験体^{2),3),4),5)}である。

本試験体の破壊モードは、曲げ破壊型である。この試験体を選定した理由は、鉄筋コンクリート構造物の終局状態に至るまでの非線形挙動を把握するには、曲げ破壊型の実験結果を検証するのが望ましく、また原著^{3),4),5)}において各荷重段階での試験体の損傷状況について詳細な観察が行われているからである。

3.2 解析モデル

(1) 使用プログラム

本解析には、汎用の3次元非線形有限要素解析プログラム“Engineer’s Studio Ver.5(以下、ESという)”を使用した。ESの特徴は、鉄筋コンクリートの構成則に東京大学で開発された前川モデル^{6),7),8),9)}を採用していることと、平板要素が厚さ方向に複数の層(レイヤ)を持つ積層構造(レイヤ構造)に対応していることである。

ESは、アクティブクラックの概念を適用した4方向固

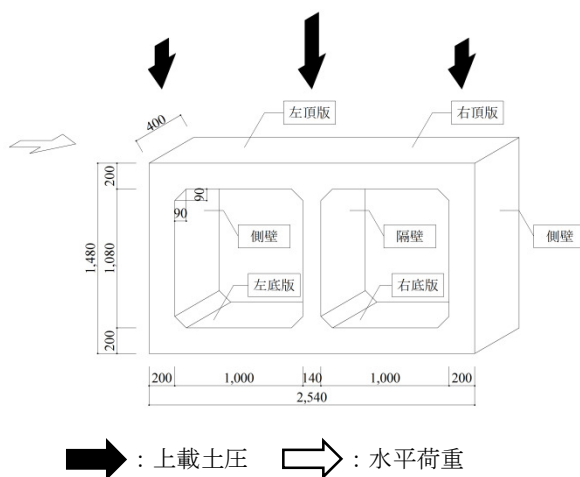


図-2 諸元概要^{2),3),4),5)}

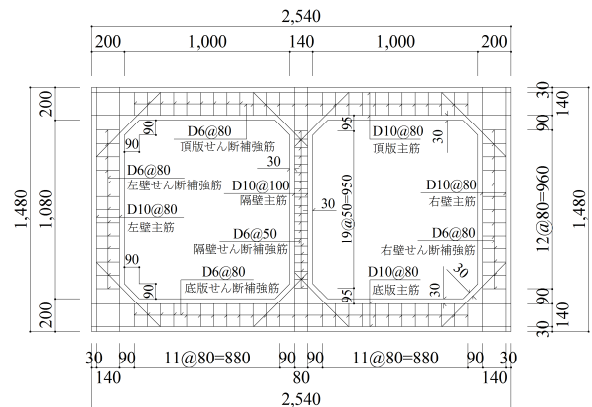


図-3 配筋図^{2),3),4),5)}

定の分散ひび割れモデルによりひび割れを表現している。

コンクリートの圧縮モデルには圧縮軟化則を適用し、引張モデルの軟化勾配は、鉄筋との付着が影響する領域(RC領域)と影響しない領域(無筋領域)に分けて設定する。引張モデルにはテンションスティフニングを考慮し、これに対応する鉄筋の塑性局所化挙動は、付着の影響を考慮した平均応力-平均ひずみの関係を用いている。さらに、接触面密度関数モデルをひび割れ面に沿った応力伝達モデル(せん断伝達モデル)として採用している。

(2) 3次元有限要素モデルおよび境界条件

本解析の3次元有限要素モデル(メッシュ分割)を図-4に示す。構造物はすべて8節点アイソパラメトリック平板要素を用いてモデル化した。3次元有限要素モデルとしたのは、積層レイヤ構造でモデル化した構造物の面外力に対する挙動を把握するためである。

境界条件は、隔壁下部の隅角部をピン支持とし、側壁下部の隅角部を水平ローラ支持とした。

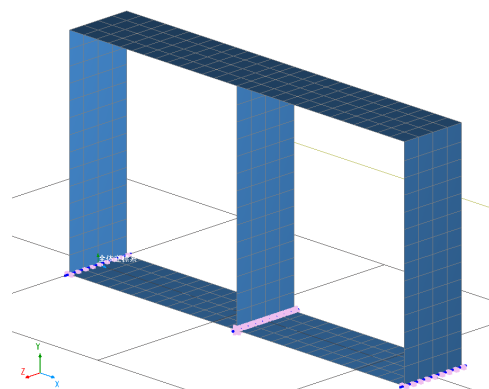


図-4 3次元有限要素モデル

(3) 解析用物性値

本解析に用いた物性値を表-1および表-2に示す。これらの物性値は、武田らが行った解析⁴⁾に用いられた物性値を参考に設定した。具体的には、コンクリートに

表－1 解析用物性値(コンクリート)⁴⁾

単位体積重量 (kN/m ³)	弾性係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ポアソン比
21.0	1.76×10^4	22.0	1.44	0.173

表－2 解析用物性値(鉄筋)⁴⁾

鉄筋種類 (SD345)	単位体積重量 (kN/m ³)	弾性係数 (N/mm ²)	降伏点応力 (N/mm ²)	ポアソン比
D10(主筋)	77.0	1.88×10^5	348	0.284
D6(せん断補強筋)	77.0	1.77×10^5	368	0.284

については、単位体積重量およびポアソン比は材料試験値を用いたが、圧縮強度はシリンドー強度の 0.85 倍、引張強度はシリンドー強度の 0.70 倍に補正した。鉄筋については、材料試験値をそのまま用いた。

(4) 軟化係数

コンクリートの引張モデルの軟化勾配を表す軟化係数 C は、RC 領域には 0.4、無筋領域には 2.0 を設定した。

(5) 荷重条件

上載圧として、頂版にかかる上載土圧分を側壁・隔壁上端に集中荷重として作用させた。載荷は、側壁上端・頂版中央に水平荷重を加力することによる荷重制御でプッシュオーバー解析を実施した。水平荷重は、側壁上端と頂版中央に集中荷重として与えた。

4. 解析結果

4.1 概要

既往の研究によると、ボックスラーメン形状の鉄筋コンクリート構造物については、せん断破壊型のモードでなければ、かぶりコンクリートの剥落に対応した圧縮縁コンクリートひずみ 10000μ を限界値とすれば、構造物全体変位に対して概ね最大耐力相当の領域に限界状態を設定することが可能であるとの報告がある²⁾。したがって、非線形有限要素解析によって最大耐力相当のひずみの限界値を検証する際は、圧縮縁のコンクリートひずみに着目すべきであるといえる。

しかし、ES では、レイヤ中心位置でひずみが算出されるため、レイヤ分割がひずみの算出結果に与える影響が大きい。ここでレイヤ分割とは、積層レイヤ構造における平板要素の厚さ方向の分割のことである。レイヤ分割の概念図を図－5 に示す。これはレイヤ分割数が 5 分割の例である。また、局所ひずみによる評価では、要素分割もひずみの算出結果に影響すると考えられる。鉄筋コンクリートの非線形有限要素解析の場合、軟化構成則や分散ひび割れモデルを採用するため、ひずみの局所化等を生じさせるからである。ここで要素分割とは、有限要素モデルにおけるメッシュ分割のことである。要素分割

の概念図を図－6 に示す。これは側壁における壁高方向の要素分割数が 10 分割の例である。

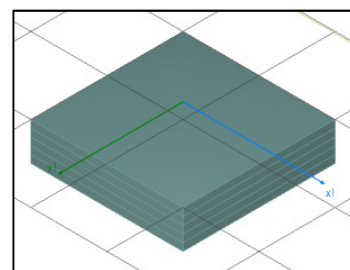
そこで、レイヤ分割や要素分割がひずみの算定値に与える影響を確認した上で、実験挙動の再現性を検証する。

4.2 レイヤ分割の影響

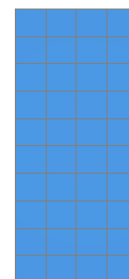
積層レイヤ構造のレイヤ分割を変化させた場合の、隔壁頭部における荷重-変位関係(荷重制御)を図－7 に、層間変形角 1/100 時の隔壁脚部における圧縮縁のコンクリートひずみを図－8 に示す。図－7 より、レイヤ分割数が 5 分割以上で荷重-変位関係が収束する傾向を示しているが、図－8 より、圧縮縁のコンクリートひずみは 10 分割以上で収束傾向を示している。これより、レイヤ分割は 10 分割程度以上にすることが望ましいといえる。

4.3 要素分割の影響

有限要素の要素分割を変化させた場合の、隔壁頭部における荷重-変位関係(荷重制御)を図－9 に、層間変形角 1/100 時の隔壁脚部における圧縮縁のコンクリートひずみを図－10 に示す。



図－5 レイヤ分割の概念図



図－6 要素分割の概念図(側壁)

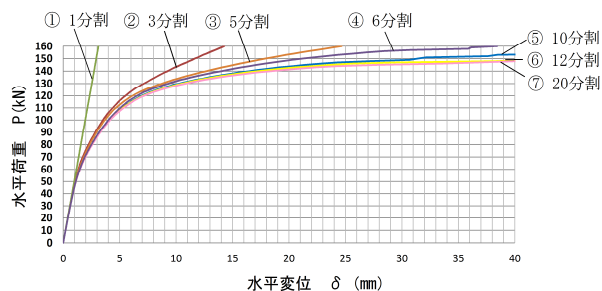


図-7 隔壁頭部における荷重-変位関係

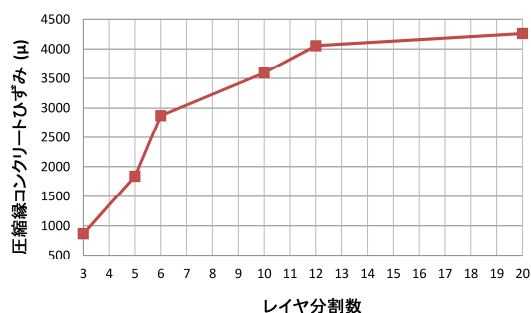


図-8 隔壁脚部における圧縮縁コンクリートひずみ

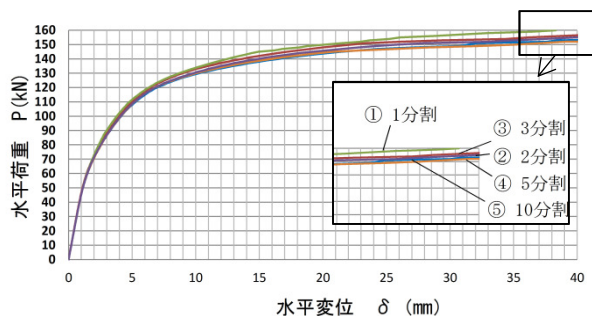


図-9 隔壁頭部における荷重-変位関係

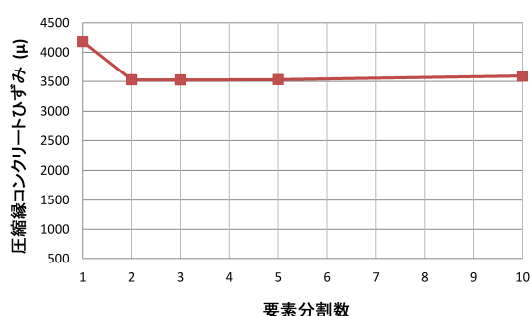


図-10 隔壁脚部における圧縮縁コンクリートひずみ

図-9 より、要素分割は荷重-変位関係にほとんど影響しないといえる。図-10 より、圧縮縁のコンクリートひずみも要素分割による影響は少ないといえるが、1 分割など極端なモデル化は避けるべきである。

4.4 鉄筋の降伏過程

武田らが行った実験⁴⁾における鉄筋の降伏過程を図-11 に、本解析における鉄筋の降伏過程を図-12 に示す。本解析では、まず隔壁の脚部と頭部が降伏する。次に右

底版が降伏し、右頂版、左底版の順に降伏している。それ以降の降伏過程も、降伏する順番は多少前後するものの、武田らの実験結果とほぼ同じ過程である。このことから、本解析は、実挙動を良く再現できているといえる。

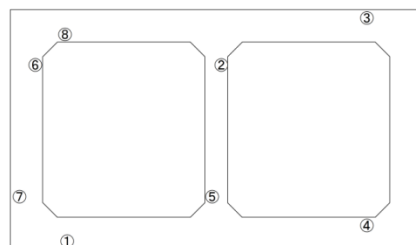


図-11 実験における鉄筋降伏過程

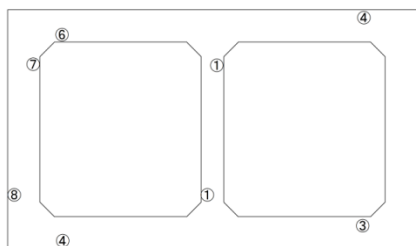


図-12 本解析における鉄筋降伏過程

5. 限界値の設定に関する考察

5.1 概要

下水道施設のボックスカルバートがその機能を維持するためには、構造物内の空間を確保することが必要であるため、構造物が崩壊しないことを限界状態に想定する。具体的には、頂版が崩落しないこと、側壁・隔壁が倒壊しないことと定義できる。このような考えは、原子力マニュアルに示されているものと同じである²⁾。この限界状態は、2012 年制定コンクリート標準示方書設計編¹⁰⁾に規定されている耐震性能 3 に相当するものであり、下水道指針の規定では耐震性能 2' に相当するものである。鉄筋コンクリート構造物の崩壊過程の概念図を図-13 に示す。既往の実験研究²⁾などによると、かぶりコンクリートが剥落しなければ、鉄筋コンクリート構造物としての靱性が保持され、急激な軟化現象を回避できるとされていること、ボックスカルバートは高次の不静定構造で

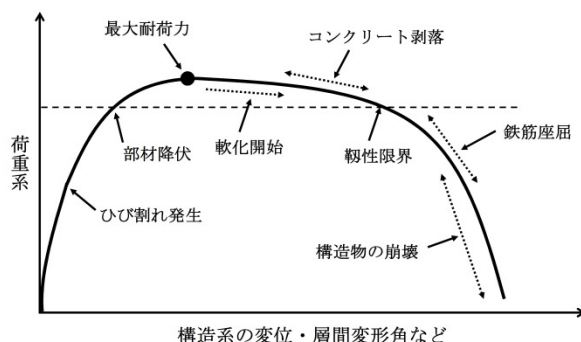


図-13 鉄筋コンクリート構造物の崩壊過程の概念図

あること等から、本論では図-13におけるかぶりコンクリートの剥落の領域を限界状態と定める。原子力マニュアルでは、プッシュオーバー解析により地中構造物の地震時の限界値を推定することの妥当性が示されている²⁾。そこで、前述の図-2 および図-3 に示す試験体の地震時挙動に関する解析的検討を行い、下水道指針に規定されている各耐震性能の局所ひずみを指標とした限界値の設定を試みる。

5.2 変位制御によるプッシュオーバー解析

前述の図-4 に示す解析モデルに対し、変位制御によるプッシュオーバー解析を実施した。変位制御は隔壁上端・頂版中央に強制変位を作用させることとした。隔壁頭部における荷重-変位関係を図-14 に示す。図-14 より、最大耐荷力以降の軟化域をある程度表現できているのが分かる。水平変位が 26mm を超えたあたりで水平荷重が急激に低下し、水平変位が 50mm となる手前で解析が収束しなくなった。水平荷重の急激な低下の付近では隔壁の頭部と脚部に座屈が生じている。水平変位が 23mm を超えたあたりで隔壁の頭部・脚部の圧縮縁コン

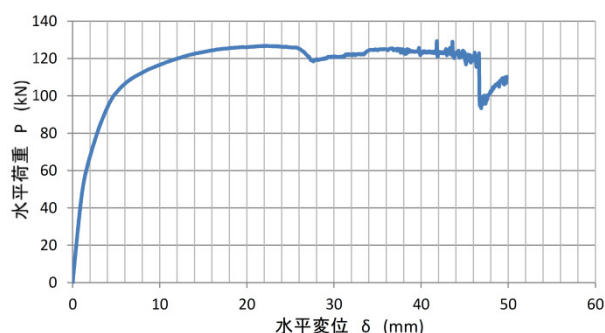


図-14 変位制御による荷重-変位関係

クリートひずみが 10000 μ を超えていること等を考慮すると、水平変位が 26mm 以降の挙動の評価は、微小変位理論による解析では担保できない範囲であり、解析手法の適用限界であるといえる。

5.3 耐震性能 1 の限界値

曲げ破壊型の鉄筋コンクリートの耐震性能 1 の限界状態は、部材が降伏しないことである。したがって、限界値は鉄筋の降伏ひずみとすることができる。本解析結果では、最初に隔壁脚部が降伏するが、その時の層間変形角(隔壁上下端間の水平相対変位を試験体の高さ 1280mm で除した値、以下同じ)は 0.23% である。原子力マニュアルにおいて、1%/程度の層間変形角であれば構造物が崩壊しないことを安全側に保証できると規定されていることを考慮すると、本試験体では、部材が降伏する時点では、構造系全体としては十分耐荷力を有しているといえる。

5.4 耐震性能 2 および耐震性能 2' の限界値

前述のとおり、耐震性能 2' の限界状態は、構造物が崩壊しないことである。原子力マニュアルでは、同様のボックスカルバートに対してこのような限界状態を想定した場合、圧縮縁コンクリートひずみ 1%(10000 μ) を限界値としている²⁾。図-14 に示す解析結果では、最大耐荷力付近で隔壁の頭部・脚部の圧縮縁コンクリートひずみが 10000 μ を超えている(約 11900 μ) こと等も考慮すると、局所ひずみを指標とした場合、耐震性能 2' の限界値としては 10000 μ とするのが実用的と考える。なお、最大耐荷力付近ではコンクリートはピークひずみを超え、軟化領域に入っている。

耐震性能 2 の限界状態は、損傷の修復を容易に行える状態である。この状態の限界値は、構造物の条件を考慮して、図-13 における部材降伏から最大耐荷力までの間で設定することとなる。原子力マニュアルでは、構造物が崩壊しない限界状態に対する限界値の 1 つとして層間変形角が 1/100(1.0%) としている²⁾。本解析結果によると、層間変形角が 1/100 の時点のひずみは 3612 μ である。したがって、安全側にこの値より小さい 2000 μ を提案する。これはコンクリート標準示方書に示されているコンクリートの応力-ひずみ曲線における圧縮ひずみ(ピークひずみ)に相当するものである¹⁰⁾。本解析結果によると、隔壁脚部における圧縮縁のコンクリートひずみが 2000 μ のときの層間変形角は 0.5% である。初降伏時(隔壁脚部の降伏時)の層間変形角が 0.23%、構造物が崩壊しない限界状態に対する層間変形角が 1.0% とされていること等を考慮すると、この程度の限界値を設定すれば、損傷の修復を容易に行える状態にできると考えられる。

6. 実構造物によるひずみと塑性率の関係の検証

6.1 概要

下水道指針の許容塑性率は、耐震性能 2 が 3、耐震性能 2' が 4 と規定されている¹⁾。実構造物を対象に、塑性率 3 または 4 がどのひずみレベルに相当するか検討する。

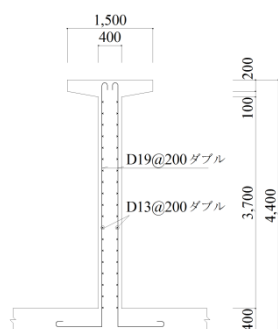
6.2 対象構造物

検討対象構造物は、下水道処理場内にある水処理施設の片持ち形式の壁である。構造物の諸元概要を図-15 に示す。本構造物の引張鉄筋比は約 0.4%、破壊モードは曲げ破壊型である。なお、コンクリートの設計基準強度は 24N/mm²、鉄筋の降伏強度は 295N/mm² である。

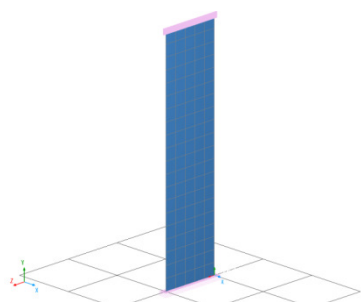
6.3 解析モデルおよび解析手法

解析モデルを図-16 に示す。解析モデルは単位幅あたりの版とし、積層レイヤ構造の有限要素モデルとした。レイヤ分割は 20 分割、要素分割は要素長が壁厚の 1/2 となるように設定した。その他の解析条件は、3 章と同様である。解析手法としては、壁頭部に強制変位を与える

変位制御によるプッシュオーバー解析を実施した。



図－15 検討対象構造物



図－16 解析モデル

6.4 解析結果

プッシュオーバー解析の結果、本構造物の降伏変位は10.5mmであった。したがって、塑性率3に相当する変位は31.5mm、塑性率4に相当する変位は42.0mmである。耐震性能・許容値および解析結果の関係を表－3に示す。ここで、変位は壁頭部の変位、ひずみは壁脚部の圧縮縁コンクリートひずみである。表－3より、許容塑性率3(耐震性能2)に相当する壁脚部の圧縮縁コンクリートひずみは870 μ 、許容塑性率4(耐震性能2')に相当する壁脚部の圧縮縁コンクリートひずみは1030 μ であった。前章で提示した耐震性能2のひずみの限界値が2000 μ 、耐震性能2'のひずみの限界値が10000 μ であることを考慮すると、片持ち形式の壁の場合、前章で提示した限界値は安全側の評価といえる。

表－3 耐震性能・許容値および解析結果の関係

耐震性能	許容塑性率	変位 (mm)	ひずみ (μ)	限界値* (μ)
耐震性能2	3	31.5	870	2000
耐震性能2'	4	42.0	1030	10000

*前章で提示したひずみの限界値

7. 結論

本研究では、下水道施設の地中構造物を対象に、プッシュオーバー解析に基づき耐震性能の限界値の設定を試

みた。以下に、本研究で得られた結論を列挙する。

- 1) 面外力を受けるボックスカルバートに対し積層レイヤ構造による非線形有限要素解析を行う場合、レイヤ分割は10分割以上が実用的である。
- 2) 面外力を受けるボックスカルバートに対し積層レイヤ構造による非線形有限要素解析を行う場合、要素分割の影響はほとんどない。
- 3) ESによる鉄筋コンクリート製ボックスカルバートの非線形有限要素解析結果は、既往の実験結果を良く再現している。
- 4) 耐震性能2の限界値として、圧縮縁コンクリートひずみ2000 μ を提案する。
- 5) 耐震性能2'の限界値として、圧縮縁コンクリートひずみ10000 μ を提案する。
- 6) 片持ち形式の壁においては、上記4)、5)の限界値は安全側の評価といえる。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説-2014年版-，2014.5
- 2) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針＜技術資料＞，pp.295-326，2005.6
- 3) 石川博之，末広俊夫，金津努，遠藤達巳，松本敏克：鉄筋コンクリート製地中構造物の変形性状と損傷状態に関わる実験的考察，第26回地震工学研究発表会講演論文集，pp.885-888，2001.8
- 4) 武田智吉，石川博之，足立正信：鉄筋コンクリート製ボックスカルバートの非線形挙動の定量的評価，電力土木，No.279，pp.72-76，1999.1
- 5) 本田国保，足立正信，石川博之，長谷川俊昭：水平載荷によるボックスカルバートの変形性能の実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.1261-1266，1999.6
- 6) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991
- 7) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003
- 8) 前川宏一，福浦尚之：疑似直交2方向ひび割れを有する平面RC要素の空間平均化構成モデルの再構築，土木学会論文集，No.634/V-45，pp.157-176，1999.11
- 9) 福浦尚之，前川宏一：非直交する独立4方向ひび割れ群を有する平面RC要素の空間平均化構成則，土木学会論文集，No.634/V-45，pp.177-195，1999.11
- 10) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書設計編，2013