論文 材料の損傷に基づく下水道施設の耐震性能照査に関する基礎的研究

福江 清久*1·伊津野 和行*2

要旨:本研究は,鉄筋コンクリート構造物中の材料の各種破壊を限界状態とする損傷指標を,下水道施設の 崩壊といった構造全体系としての限界状態の限界値に適用しようと試みたものである。ボックスカルバート の静的載荷実験を対象に,従来のはりモデルによる評価と損傷指標を用いた FEM モデルによる評価および層 間変形角との関係を検討した。その結果,曲げ破壊型,せん断破壊型いずれの試験体に対しても損傷指標が 有用であることを確認し,下水道施設としての実用的な限界値を提案した。さらに,下水道施設の地下壁を 対象に,損傷指標の適用性を検討し,せん断耐力式による評価よりも合理的に評価できることを示した。 キーワード:損傷指標,耐震性能照査,非線形解析,下水道施設

1. 研究の背景と目的

筆者らは、下水道施設の鉄筋コンクリート製(以下, RC という) 土木構造物の合理的な耐震性能照査手法の 確立を目指して、原子力分野の技術資料¹⁾を基に、解析 的な面から研究を進めている²⁾。性能照査型設計の枠組 みのなかで構造物の耐震性能照査を行う場合、各耐震性 能の限界状態を定義し、解析技術のレベルに応じた照査 指標を選択してその限界値を設定する必要がある。土木 構造物の限界状態や限界値の設定に関しては、「2002 年 制定コンクリート標準示方書 [耐震性能照査編]³」や

「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>¹⁾(以下, 文献 1) という)」等に示されて いるが、これらは非線形解析から直接得られる局所ひず みを照査指標としている。下水道施設の技術基準4)には, 照査指標にひずみを用いて非線形解析による耐震性能照 査を行う場合の限界値が規定されておらず、このような 局所ひずみによる限界値を参考に設計者が判断している のが現状である。しかし、局所ひずみは要素寸法に依存 するため、局所ひずみによる限界値の定義は困難である。 一方,「2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編] 5)(以下, 文献 5)という)」には, 要素寸法や材料の力 学モデルによらない汎用的な損傷指標(以下,損傷指標 という)が規定されており、具体的な限界値も示されて いる。このような汎用的な照査指標を下水道施設の耐震 性能照査にも適用できれば,構造物の損傷状態をより定 量的に評価でき, 耐震診断や耐震補強設計を合理化でき ると考えられる。現在のところ、この損傷指標は、部材 レベルや数種の構造物レベルで適用性が確認されている ^{6),7),8)}が、下水道施設の土木構造物に適用した例はない。

そこで,この損傷指標を下水道施設の耐震診断や耐震 補強設計に用いることを念頭に置き,土木構造物である ボックスカルバートの静的載荷実験を対象に,下水道施 設の設計実務で用いられている照査指標である局所ひず みによる評価と損傷指標による評価および層間変形角と の関係を比較検討し,下水道施設としての限界値につい て考察した。さらに,損傷指標の下水道施設への適用性 を確認するために,地下壁を対象に検討を行った。

2. 損傷指標の概要

斉藤らのは、解析より得られた局所ひずみをある領域 で平均化することによる、要素寸法に依存しない指標を 提案している。RC 部材の損傷を、引張損傷と圧縮損傷 に分け、引張損傷は偏差ひずみ第2不変量 $\sqrt{J'_{..}}$ により、 圧縮損傷は正規化した累化ひずみエネルギー $W_{..}$ により 定義している。

提案されている 2 つの損傷指標は、半径 L(平均化長 さ)に含まれるガウス点における指標を距離により重み つき平均をとることにより、平均化した損傷指標とする としている。文献 5)によると、要素の寸法を 200mm 程度 とするのがよいとし、平均化長さ L = 150mm として、 200mm 程度の要素を含むような直径 300mm の円で囲ま れる領域で平均化する場合の限界値が示されている。具 体的には、材料の損傷に基づく破壊の限界値として、 $\sqrt{J'_2}$ =1000µ、 $\overline{W_a}$ =1500µ と規定されている。

3. ボックスカルバートの検討

3.1 検討対象試験体

検討対象試験体は、図-1 に示すとおり、本田らの実 験⁹⁾で用いられた高さ 1.48m,幅 2.54m,奥行き 0.4m, 部材厚 0.2m (隔壁のみ 0.14m)の RC2 連ボックスカルバ ートの試験体 (模型縮尺:約1/3.5)である。

*1 ナレッジフュージョン(株) 代表取締役 工修 (正会員) *2 立命館大学 理工学部都市システム工学科教授 工博



本検討では、曲げ破壊型およびせん断破壊型の2種類 の試験体を対象とした。曲げ破壊型試験体は、実構造物 の代表的な配筋量(引張鉄筋比約0.5%、せん断補強筋比 約0.2~0.3%)であり、せん断破壊型試験体は、隔壁が せん断破壊するように配筋が調整されている⁹。

3.2 解析モデル

(1) はり要素によるモデル

局所ひずみによる評価は,はり要素によるファイバー モデルで行った。はり要素による解析モデルを図-2 に 示す。解析プログラムは, "Engineer's Studio"を使用し た。要素分割は,断面高さの 1/2 程度を目安に要素長を 設定した。隅角部には,文献 5)に規定されている剛域の 設定に則って剛域長を設定した。部材の非線形特性は, ファイバーモデルで与えた。支持条件は,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。コンクリートの応力-ひずみ曲線は,文献 5) に規定されている圧縮軟化を考慮しないモデルを用いた。



図-2 解析モデル(はり要素によるモデル)

(2) FEM モデル

損傷指標による評価は, FEM モデルで行った。FEM による解析モデルを図-3 に示す。解析プログラムは,

"WCOMD Studio"を使用した。構造物はすべて2次元 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。断面方向の要素分割は、部材に配置されている内 外の軸方向鉄筋とその間のコア部を考慮して3分割とし た。RC 要素には、曲げ破壊型試験体およびせん断破壊 型試験体それぞれの鉄筋比 %を設定した。隅角部は弾性 要素とし、ハンチ始点位置には、局所的な不連続変形挙 動が表現できる離散ひび割れモデルに基づく接合要素を 配置した。支持条件は、はり要素によるモデルと同様で ある。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 設定した¹⁰⁾。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 た¹¹⁾。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 た10)。



図-3 解析モデル(FEM モデル)

3.3 材料定数

コンクリートおよび鉄筋の材料定数は、本田らの実験 ⁹に示されているものを用いた。なお、上迫田らが行っ た実験検討¹²および飯塚らが行った解析検討¹³を参考 に、圧縮強度は0.85倍、引張強度は0.70倍とした。

3.4 載荷方法

初期荷重として頂版両端部および中央部に土被り厚 20mに相当する上載荷重を荷重制御で与えた後,隔壁上 部より水平方向に強制変位を載荷する方法で行った。

3.5 曲げ破壊型試験体の解析結果

(1) 荷重-変位関係

本解析による隔壁頭部の荷重-変位関係を図-4 に示 す(次項局所ひずみによる限界値の検討における議論の ため, 層間変形角および隔壁脚部の圧縮縁ひずみを併記 する)。ファイバーモデルの荷重-変位関係は、本田らの 実験 %とかなり違ったものとなっている。これは、ファ イバーモデルにおけるコンクリートの応力--ひずみ曲線 に圧縮軟化を考慮していないため、また、隅角部近傍に おける鉄筋の抜け出しやコンクリートの乾燥収縮の影響 等を非線形特性モデルに考慮できていないためと考えら れる。一方, FEM モデルの結果を見ると, 変位 15mm 付 近で最大荷重に達し,最大荷重以降は軟化する傾向を示 している。これは本田らの実験⁹と同様の傾向である。 最大荷重の値も本解析は147kN,本田らの実験⁹は142kN でありほぼ同じ値である。構造物の耐震性能照査は実挙 動に近い応答を再現できるモデルで行うのが望ましく, また、本研究で検討する損傷指標は FEM でモデル化す ることで利用できる指標であることから、今後下水道施 設の合理的な耐震性能照査を行うには, FEM を活用して いく必要があると考える。



図-4 荷重-変位関係(曲げ破壊型)

(2) 局所ひずみによる限界値の検討

原子力分野では、限界状態を「構造物が崩壊しない」 ことと想定した場合、局所ひずみの限界値は圧縮縁コン クリートひずみ10000µとしている¹⁾。これは、かぶりコ ンクリートの剥落点にあたり、この限界値は耐震性能 3 (下水道分野でいう耐震性能 2')に相当するものである。 また構造全体系の変形に着目した場合は、原子力分野で は限界値が層間変形角 1/100 である¹⁾が、下水道分野で は層間変形角 1/200 である⁴⁾。本田らの実験⁹⁾によると、 曲げ破壊型の試験体は、最大荷重に達した後、隔壁上下 のコンクリートが剥落することにより荷重低下が生じた と報告されている。そこで,層間変形角 1/200 時,層間 変形角 1/100 時および局所ひずみ 10000µ時の隔壁脚部の 圧縮縁ひずみに着目して,限界値の考察を行った。なお, 本解析モデルの層高は 1280mm であり,「層間変形角= 変位/層高」で算出した。層間変形角 1/200 時,層間変形 角 1/100 時および局所ひずみ 10000µ時の層間変形角およ び隔壁脚部の圧縮縁ひずみを**表-1**に示す。

表-1 層間変形角と隔壁脚部の圧縮縁ひずみ

	層間変形角	層間変形角	局所ひずみ
	1/200 時	1/100 時	10000μ時
層間変形角	1/200	1/100	1/71
圧縮縁ひずみ	3000μ	6883µ	10000μ

層間変形角 1/200 時の圧縮縁ひずみは 3000μ であった。 これは、 文献 5)に規定されている終局ひずみ(3500 µ) より小さい値である。層間変形角 1/100 時の圧縮縁ひず みは6883µであり10000µより小さい。局所ひずみ10000µ 時は層間変形角が 1/100 を超えている。限界層間変形角 1/100の根拠は実験結果に基づくものである1)。また、下 水道施設の限界層間変形角は 1/200 であるが、これは建 築基準である「官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説 14) において人命の安全に影響を与える著しい損傷を生 じないことが求められているためと考えられ、土木構造 物に対する妥当性は定かではない。下水道施設のボック スカルバートは、流入・放流渠など水を通す機能を有す るものと、管廊など人が立ち入る機能を有するものがあ る。水を通す機能を有する構造物を対象とした場合、限 界状態を「構造物が崩壊しない」ことと想定するなら, かぶりコンクリート剥落点を実務上解析的に特定するの は困難なことも考慮すると, 安全側かつ簡易的に層間変 形角 1/100 を限界値とするのが実用的と考える。人が立 ち入る機能を有する構造物に対しては、別途検討が必要 である。

(3) 損傷指標による限界値の検討

本解析による隔壁の損傷指標一変位関係を図-5 に示 す。コンクリートの引張損傷を表す $\sqrt{f_2}$ は、変位 11mm 付近で限界値 1000µを超えているが、本試験体は曲げ破 壊型であるため、これは曲げひび割れによる損傷と考え られる。圧縮損傷を表す $\overline{W_n}$ は、荷重が低下し始める変 位 17mm 付近で限界値 1500µ を超えている。本試験体は 最大荷重に達した後、隔壁脚部でコンクリートの剥落が 生じていることから、本解析において、損傷指標 $\overline{W_n}$ の 限界値 1500µ 付近で隔壁が圧縮損傷する現象が再現され たといえる。



変位17mm時の損傷指標のコンター図を図-6に示す。 $\overline{W_n}$ のコンター図を見ると、圧縮損傷を表す $\overline{W_n}$ は隔壁 の頭部および脚部で1500µを超えており、最大荷重に達 した後、隔壁上下のコンクリートが剥落することにより 荷重低下が生じたという実際の圧縮損傷をよく表現でき ているのが分かる。

 $\sqrt{J'_2} = 1000\mu$ 時, $\overline{W_n} = 1500\mu$ 時の層間変形角を表-2 に示す。 $\overline{W_n} = 1500\mu$ 時では層間変形角が 1/100 を超えて いる。したがって, 層間変形角 1/100 を限界値とすると, 局所ひずみおよび損傷指標の限界値を満足することとな り安全側の評価になるといえる。



図-6 損傷指標のコンター図(曲げ破壊型)



	$\sqrt{j'_2}$	
	1000µ時	1500µ 時
層間変形角	1/116	1/78

3.6 せん断破壊型試験体の解析結果

(1) 荷重-変位関係

本解析による隔壁頭部の荷重-変位関係を図-7 に示 す。図-7を見ると、変位 7mm(最大荷重 178kN)付近 で急激に荷重が低下している。本田らの実験⁹によると、 せん断破壊型の試験体は、1 サイクル目で隔壁上部に斜 めひび割れが発生し,正側の最大荷重 167kN となり,2 サイクル目で斜めひび割れが部材軸方向に沿って大きく 開いて急激な荷重低下を起こしたと報告されている。こ のことから,本解析は,せん断破壊型の試験体に対して も,構造系のマクロ的な挙動は概ね再現できているとい える。また,本解析の急激な荷重低下は,隔壁の斜めひ び割れが進展し,せん断破壊を起こしたことによるもの と推察される。

(2) 損傷指標による限界値の検討

本解析による損傷指標一変位関係を**図**-8 に示す。変 位 6mm 以降は $\sqrt{f'_2}$ が急激に増加しているのが分かる。 また $\sqrt{f'_2}$ の限界値である 1000µ 付近で急激な増加がみ られる。本試験体は斜めひび割れが部材軸方向に沿って 大きく開いて急激な荷重低下を起こしたことから、本解 析において、損傷指標 $\sqrt{f'_2}$ の限界値 1000µ 付近で隔壁 がせん断損傷する現象が再現されたといえる。

変位 7mm 時の損傷指標のコンター図を図-9 に示す。 $\sqrt{J'_2}$ のコンター図を見ると,引張損傷を表す $\sqrt{J'_2}$ は隔壁 の広い範囲で 1000µを超えており,隔壁で斜めひび割れ が部材軸方向に沿って大きく開いて急激な荷重低下を起 こしたという実際の斜めひび割れ損傷をよく表現できて いるのが分かる。本検討では,部材厚が14cmおよび20cm の試験体に対し約 20cm 程度の領域で損傷指標を平均化 しているが,今後は部材厚が大きい場合や応力集中箇所 がある場合など,さらに様々な条件下で損傷指標の適用 性を検討していく必要がある。



4. 下水道施設に対する損傷指標の適用性の検討

4.1 検討対象構造物

検討対象構造物は、図-10に示すとおり、下水道施設 IV類(複合構造物)に分類される RC の沈砂池ポンプ棟 の地下壁¹⁵⁾である。本構造物は、構造上一方向版と見な せる。コンクリート強度は 21 N/mm²,鉄筋の降伏強度は 295 N/mm² である。鉄筋は、DW40 壁が縦筋 D19@200 ダ ブル、横筋 D13@200 ダブル、DW60 壁が縦筋 D22@200 ダブル、横筋 D16@200 ダブルで配筋されている。せん 断補強筋は、DW60 壁には 2.5-D13@200 で配筋されてい るが、DW40 壁には配筋されていない。

4.2 解析モデル

解析モデルを図-11 に示す。構造物はすべて 2 次元 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。壁とスラブの接合部は弾性要素とした。支持条件は, DW60 壁脚部を固定支持とし, DW40 壁頭部と DW60 壁 頭部を鉛直ローラ支持とした。解析プログラムおよび構 成則は,3章の FEM モデルと同様のものを用いた。



4.3 荷重条件

荷重条件を図-12に示す(以下,設計荷重という)。



図-12 荷重条件

初期荷重として自重と常時土圧を載荷し、その後レベ ル2地震時の慣性力と土圧を荷重制御で漸増載荷した。 なお、漸増載荷する土圧は、レベル2地震時土圧と常時 土圧の差分とした。設計水平震度は0.6とし、レベル2 地震時土圧は修正物部・岡部式により算出した。

4.4 せん断耐力式による照査結果

下水道施設の設計実務では,本構造物のような一方向 版の地下壁に対しては、棒部材のせん断耐力式 5により せん断力を照査している。非線形解析では積層プレート モデルを用いた解析も行われている 4が, 面外せん断は 断面内の斜めひび割れやすべりを考慮する必要があるた め,この場合も面外せん断は扱えず,非線形有限要素解 析により求まる断面力を用いて棒部材のせん断耐力式に より照査しているのが現状である。棒部材のせん断耐力 式は、集中荷重を受ける単純ばりを対象とした実験結果 などに基づいて構築されたものをベースとして、多種多 様な荷重条件、支持条件においても安全側に近似できる ように規定されたものであり、土圧などの面外の分布荷 重を受ける地下壁に適用すると,過大な評価となる場合 がある。そこで、せん断照査の合理化を図るため、棒部 材のせん断耐力式による照査を行った上で、損傷指標を 用いて検討を行った。棒部材のせん断耐力式による照査 結果を表-3 に示す。せん断耐力式による照査では、 DW40 壁脚部でせん断耐力不足となった。これは、DW40 壁にはせん断補強筋がないことによるところが大きい。

表-3 せん断耐力式による照査結果

照査箇所	V_d (kN)	$V_{yd}~(kN)$	$\gamma_i \boldsymbol{\cdot} V_d\!/\!V_{yd}$
DW40(脚部)	201.9	134.7	1.50 (NG)

4.5 損傷指標による検討結果

(1) 設計荷重時のコンター図

解析対象構造物をDW40壁とDW60壁にグループ化して、それぞれの壁ごとに損傷指標の最大値を算出した。 設計荷重時のコンター図を図-13に示す。



図-13 損傷指標のコンター図

DW40 壁および DW60 壁ともに, $\sqrt{J'_2}$ の限界値である 1000µおよび $\overline{W_n}$ の限界値である 1500µを大きく下回っ ており,損傷指標による評価では,本構造物は設計荷重 に対してかなり安全であるといえる。 $\sqrt{J'_2}$ のコンター図 を見ると,局所的ではあるが DW40 壁脚部で引張損傷が 進展しているのが分かる。これは,棒部材のせん断耐力 式による照査で DW40 壁脚部の耐力が小さかったことと 対応している。本構造物は,現行の技術基準⁴⁾では DW40 壁が耐力不足と判定されていたことから過大な評価であ り,損傷指標を用いれば,下水道施設地下壁のより合理 的な耐震診断や耐震補強設計が行えるものと考えられる。

(2) 損傷指標によるせん断耐力の検討

本構造物のせん断耐力を検討するため、設計荷重を 2 倍3倍と増分させるプッシュオーバー解析を行い、損傷 過程を追った。筆者らは、本構造物のような地下壁は、 プッシュオーバー解析を行うと押抜きせん断のような破 壊を示すことを、解析的に確認している¹⁶⁾。損傷指標-変位関係を図-14に示す。図-14を見ると、DW40壁、 DW60壁とも変位 4mm 付近で $\sqrt{f_2}$ が 1000µを超えて いる。この時点は設計地震時荷重の約2倍の時点であっ た。損傷指標による評価では、設計地震時荷重のおよそ 2倍程度のせん断耐力は有しているものと推察される。



5. 結論

- (1) 曲げ破壊型試験体の荷重-変位関係は、ファイバー モデルよりも FEM モデルのほうが実挙動に近い。今 後下水道施設の合理的な耐震性能照査を行うには、 FEM を活用していく必要があると考える。
- (2) 層間変形角 1/100 を限界値とすれば、局所ひずみおよ び損傷指標両方の限界値を満足し、実用的である。
- (3) 曲げ破壊型, せん断破壊型いずれの試験体に対して も損傷指標は有用である。
- (4) 下水道施設の地下壁を対象に,損傷指標を用いて合理的なせん断力の評価ができることを示した。

参考文献

 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>,2005

- 2) 福江清久,本多顕治郎,安井達喜: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,コンクリート工学 年次論文集, Vol.38, No.2, pp.97-102, 2016.7
- 3) 土木学会:2002年制定コンクリート標準示方書耐震 性能照査編,2002
- 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) 土木学会:2012 年制定コンクリート標準示方書設計 編,2013
- 斉藤成彦,牧剛史,土屋智史,渡邊忠朋:非線形有
 限要素解析による RC はり部材の損傷評価,土木学
 会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.67,
 No.2, pp. 166-180, 2011
- 土屋智史,牧剛史,斉藤成彦,渡邊忠朋,前川宏一: 非線形有限要素解析による RC 面部材の損傷指標と 耐力評価,土木学会論文集 E2(材料・コンクリート 構造), Vol.68, No.3, pp. 209-224, 2012
- 牧剛史,斉藤成彦,土屋智史,渡邊忠朋,島弘:正 負交番載荷を受けるRC骨組み構造物の非線形有 限要素解析による損傷評価,土木学会論文集 E2(材 料・コンクリート構造), Vol.69, No.1, pp. 33-52, 2013
- 9) 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
- 10) 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
- Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003
- 12) 上迫田和人,前川宏一,岡村甫:コンクリートの一 軸圧縮強度,第4回コンクリート工学年次講演会講 演論文集,1982
- 13) 飯塚敬一,足立正信,本田国保,武田智吉:FEMによるボックスカルバートの非線形挙動の分析,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.21,No.3, pp.1267-1272,1999
- 14) 公共建築協会:官庁施設の総合耐震計画基準及び同 解説,1996
- 15) 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・ポンプ場編-, 2015
- 16) 福江清久,植松祐亮,本多顕治郎:非線形有限要素 解析による RC 壁のせん断耐力の検討(下水道施設 の地下外壁の例),第19回 DIANA ユーザ会議,2016