

論文の内容の要旨

論文題目 頂部の沈下と部材の厚さ方向の膨張に着目した
鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性評価

氏名 宮川 義範

本研究は、地震で損傷した鉄筋コンクリート構造物の耐荷性能を評価する手法の構築を目的としている。対象は、火力・原子力発電所を構成する取放水路、取放水ピット、海水管や排気のためのダクトといった管路状の地中構造物であり、大部分が面部材で構成される。管路断面はラーメン形式になっており、直通部では各部材の面外損傷が相対的に発生しやすいと考えられるが、漸拡・漸縮部、屈曲部、水路最奥部にあるポンプ室の妻壁など、面内抵抗が卓越する部分も存在する。軸力比（軸応力度／コンクリート圧縮強度比）と鉄筋比、特に面外方向のせん断補強筋比が小さいことも構造上の特徴である。

2007年の新潟県中越沖地震に際して、柏崎刈羽原子力発電所の放水路で層間変形角1%を超える残留変形が発生した。現在の分類では、放水路は重要土木構造物でないものの、重要土木構造物に関する耐震性能照査上の限界値の一つである地震時層間変形角1%を超える状態に達した構造物の残留性能を評価する方法は十分に整備されておらず、載荷実験を通して安全性が検証されるまで、多くの時間が費やされた。2011年の東北地方太平洋沖地震の経験もまた、耐震性能照査の想定を超えるリスクの認識を促した。

水平耐力維持限界を超えた構造物に焦点を当て、崩壊現象や鉛直方向の耐力、鉛直変位の挙動に着目した研究は、1990年代以降、比較的高軸力の部材を対象として行われてきた。しかし、本研究の対象構造物を構成する部材の軸力比は0.1でも大きい範疇に属し、これまで研究例が非常に少ない。一般的に言えば、軸力比が小さいことは、耐崩壊性の面で有利といえるが、対象構造物は、せん断補強筋比が小さいという不利な側面も抱えている。こうした背景を受けて、本研究では、特に軸力比とせん断補強筋比の小さな鉄筋コンクリート製地中構造物について、地震後の残留性能を評価できる方法を整備することを目

指した。

本論文は、2～4章で比較的単純な形状を有する部材、構造物の載荷実験に基づく基礎的な検討を行い、それらを通じて構築した評価法を5、6章でやや複雑な系に適用するという構成を採っている。

2～4の各章では、

- ・ 構造物全体としての耐荷性能
- ・ 部材の面外方向の耐力残留率（残留耐力／最大耐力比）
- ・ 部材の面内方向の耐力残留率

という3つの主題を取り上げ、それらを実験するために有効な変位指標の探索、および着目した変位と耐荷性能の関係の分析を行った。

2章では、構造物全体としての耐荷性能を実験するための変位として、頂部の鉛直変位に着目した。まず、鉄筋比と繰返しの有無をパラメータとして、軸力比0.05の1層1連ボックスカルバートの静的水平載荷実験を行い、頂部の平均水平変位－平均鉛直変位軌道を整理した。その結果、水平耐力が維持されている段階では、水平変位の絶対値が増大するにつれて、鉛直変位が線形的に伸長する傾向を示すこと、およびその勾配が鉄筋比によって異なることが分かった。水平耐力を低下させる損傷（主に曲げ降伏後のせん断破壊）は、処女載荷過程で発生する場合と、再載荷過程で発生する場合とがあったが、いずれの場合も、水平変位－鉛直変位軌道が上記の直線から下方（沈下方向）に逸れる挙動を伴うことを示した。また、繰返しに伴う沈下の進行も、水平耐力維持限界を超えた領域の特徴的挙動であることを示した。1シリーズ目の実験では、全試験体が最終段階まで鉛直荷重を支持したため、それを支持できなくなるまで載荷を継続する追加シリーズを設けた。そこでは、せん断破壊の発生と同時でなく、しばらく繰返し載荷を継続した後に主筋の座屈が発生すること、主筋座屈の瞬間的沈下量がせん断破壊時のそれより一桁程度大きいこと、軸力比が小さいほど鉛直変位が下方に進行するまで主筋座屈に至らないことなどの知見が得られた。

3章では、面部材の面外方向の耐力残留率を実験するための変位として、厚さ方向の膨張に着目した。ここでいう膨張とは、斜めひび割れや付着割裂ひび割れの拡幅による見かけ上のもので、コンクリートそのものの膨張ではない。軸力比や引張鉄筋比などをパラメータとしたせん断補強筋比の小さな柱（ここでは、面部材の幅方向を縮約した部材として柱を取り上げている。）の静的水平載荷実験を通して、厚さ方向の膨張を含む幾つかの変位指標と耐力残留率との関係を整理した。その結果、厚さ方向の膨張を初期の部材厚で除した平均引張ひずみを横軸、耐力残留率を縦軸に取った場合に、実験ケースに依存しない単調減少傾向を示すことが分かった。せん断補強筋比の小さい部材において、厚さ方向の膨張は一度発生すると減少しにくい性格を有し、載荷状態、除荷状態のいずれから平均引張ひずみを抽出しても上記の傾向はほとんど変わらなかった。

4章では、面部材の面内方向の耐力残留率を実験するための変位として、基部損傷区間幅の全幅に対する比に着目した。壁単体の静的載荷実験、およびそれを基本ケースとした有限要素解析による数値実験によって、面内曲げせん断を受ける壁体においては、基部の損傷が曲げ圧縮側から曲げ引張側に向かって拡大していく現象と水平耐力の低下が連動していることを示した。そして、水平耐力の低下が始まる時点は、最も曲げ圧縮側にある要

素の主圧縮ひずみが1%を超える時点と概ね対応しており、主圧縮ひずみが1%を超えている区間の幅を損傷区間幅とみなすのが適当であると判断した。

以上の検討に基づいて、

- ・ 頂部平均水平変位、平均鉛直変位の組合せから構造物全体としての耐荷性能を、
- ・ 厚さ方向の膨張／部材厚比から部材の面外方向の耐力残留率を、
- ・ 基部損傷区間幅／全幅比から部材の面内方向の耐力残留率を、

それぞれ評価する手続きを提案し、5、6章でそれを例示的に適用した。損傷した実構造物を対象とするのは現実的でないため、載荷実験を材料非線形有限要素解析でシミュレートし、解析的に得られた変位出力に対して提案法を適用するというアプローチを採った。

5章では、ハの字型平面を有する導流部、2層4連のスクリーン室、最奥部に妻壁を有するポンプ室というそれぞれ異なる構造的特徴を有する3つの部分から成る1/10スケールの取水ピット模型を対象とした。静的載荷実験の結果、(i)導流部では上層の妻壁とラーメン形式を有する下層の境界領域に損傷が集中する、(ii)スクリーン室では中段の梁の材端にせん断ひび割れが発生するも全体としてはほとんど耐力低下しない、(iii)ポンプ室では妻壁基部のせん断すべりが卓越するなど、各部分が特徴のある損傷モードを呈した。材料非線形解析によって実験のシミュレーションを行った後、提案した手続きに基づいて部材単位の耐力残留率を評価したところ、構造物全体の耐力が低下し始める時点と、最も損傷の著しい部材の評価値が低下し始める時点とが対応した。なおかつ、その時点以降、部材の耐力残留率評価値は、構造物全体の耐力残留率よりも大きく低下した。部材レベルと構造物レベルに関するこの大小関係は、不静定構造物の冗長性を反映していると考えられる。

6章では、妻壁付きの1層1連ボックスカルバートを乾燥砂地盤に埋設して加振した既往の振動台実験をシミュレーションの対象とした。実験で得られた頂部水平変位と鉛直変位の時刻歴を概ね追跡できる解析モデルを作成した後、振動台実験で実現できなかった地震波入力や上下動同時入力の数値実験を行った。兵庫県南部地震観測波の振幅を2倍にし、2回連続して入力したところ、解析終了時の頂部平均鉛直変位は、単調加速度漸増解析時の水平変位－鉛直変位軌道よりも上方（伸長側）に位置したが、1回目入力後の鉛直変位よりも2回目入力後のその方が下方（沈下側）にあった。こうした同レベルの入力に対して沈下が進行する傾向は、2章の知見に照らしたとき、水平耐力維持限界を超えている可能性を示すものと判断できる。

7章では、以上の結果をまとめている。耐力残留率等の評価値の現段階における精度は、2～4章の基礎検討に依拠している。よって、今後データを拡充し、評価式の高精度化を図る必要がある。本研究で耐荷性能を推定するために用いた変位情報は、これまでのような目視を主体とした地震後点検の枠組では、取得することが困難であるかもしれない。しかし、注視すべき近年の動向として、レーザーを用いた高密度の位置や変位の測量が急速に身近なものとなりつつある。本研究は、こうした変位情報取得技術と組み合わせられる時、より有効になると考えている。