

(116) 鉄筋コンクリート製地中構造物への限界状態設計法の適用に関する研究 —地盤と構造物との非線形連成実験とその解析—

(財) 電力中央研究所 遠藤達巳
(財) 電力中央研究所 青柳征夫
東京電力株式会社 片平冬樹

1. はじめに

地中構造物の耐震設計にあたっては、限界状態設計法を適用し、より実現象に近い条件を設定することにより合理的な設計が可能になる。原子力発電所において大地震時を想定するような場合、地中に埋設される構造物および周辺地盤が非線形領域に入り、それを考慮することで実現象に近い合理的な設計が可能になる。従来の設計では、構造物の非線形性は無視されている。また、既往の研究では、構造物と地盤の相互作用を考える際に、構造物の非線形性を厳密に考慮したものは少ない。そこで、地中に埋設される鉄筋コンクリート製ボックスラーメン構造物と地盤の非線形連成挙動の解明を目的として、原子力発電所・屋外重要土木構造物である海水管ダクトを対象とした静的な地盤・構造物連成実験を実施した。さらに、この実験を対象として、構造物と地盤の両者の非線形性を考慮した数値シミュレーションを実施した。本報告では、これらの結果について概説する。

2. 実験の概要

実験装置は、図1に示すせん断土槽(4m×3m×1m)であり、下方をピン支持されている載荷版をアクチュエーターで制御することにより、一様なせん断変形を砂地盤に与えることが可能である。本実験の特徴としては、①従来、弾性体としてアクリル等の材料を試験体に用いていたが、本実験では、実物の1/4縮尺の鉄筋コンクリート製のモデル(2m×1m、厚さ10cm、鉄筋比0.2%)を用いて実験を行っており、そのため、コンクリートに発生するひびわれなどの非線形性も考慮した実験が可能

であること、②従来、ジャッキ等で直接モデルに加力する方法ではなく、この実験では、地盤にせん断変形を加えて、構造物には間接的に力を加えるため、より実際の状態に近い実験が可能なことである。

実際の土被りの条件を模擬するため、土槽

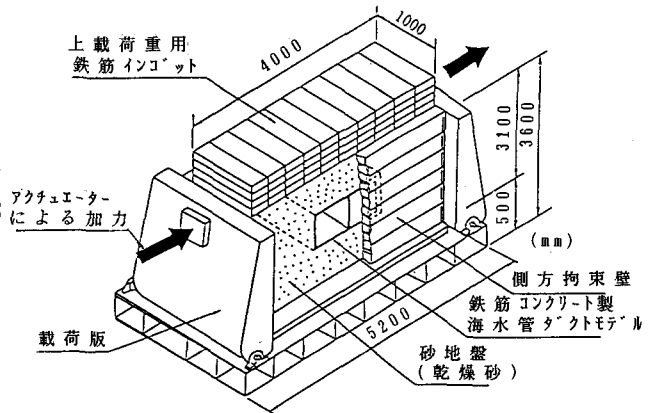


図1 実験装置の説明図

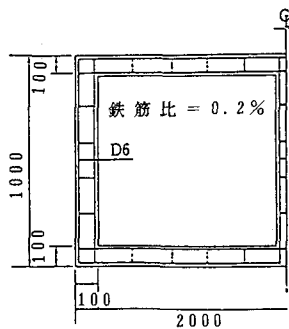


図2 試験体配筋図

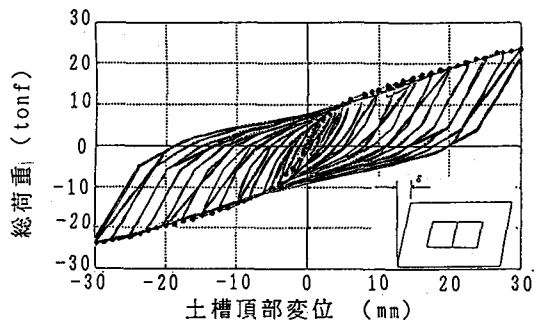


図3 荷重と土槽頂部変位の関係

の上部に鉄製インゴット(約12tonf)を設置した。また、砂地盤には、地震荷重を模擬した静的な繰り返しせん断

変位を与え、その最大振幅を徐々に増加させた（図3）。計測項目は、ダクトに加わる荷重である直土圧（構造物壁面に垂直方向に作用する土圧）とせん断土圧（壁面に平行に作用する土圧）、構造物の変位分布および鉄筋とコンクリートひずみである。

3. 実験結果

①ダクトの相対変位：図4に土槽平均ひずみとダクト側壁部材角の関係を示す。図中の実線は、ダクトと地盤がまったく同じ動きをした場合の関係を示している。この線と実験値を比べると、初期の段階（土槽頂部変位=5mm）までは、地盤のひずみの半分の部材角しか生じていないことが判る。しかし、地盤ひずみの増加に伴って、構造物の非線形化により、地盤と構造物が同等の動きをするようになる。

②ダクトの非線形性状：ひびわれは図5に示す順序で発生しており、ひびわれ発生変位は約5mm程度である。また、鉄筋降伏は、隔壁で土槽頂部変位8mm時点で生じている（図5）。その後、ひびわれ発生順序とはほぼ同じ順序で降伏している。土槽頂部変位30mmまでに、すべての隅角部で鉄筋降伏する結果となった。

③土圧作用：直土圧については、土圧の増加傾向は、ある程度の土槽頂部変位になると鈍化し、変曲点がひびわれ発生時の5mm程度の時と、側壁等の部材全体で鉄筋降伏が起こる10mmから15mm程度の2カ所で現れる。これは、構造物の非線形化により土圧の増分が鈍化したことを裏付ける結果と考える（図6）。せん断土圧についても、直土圧と同様の傾向である（図7）。

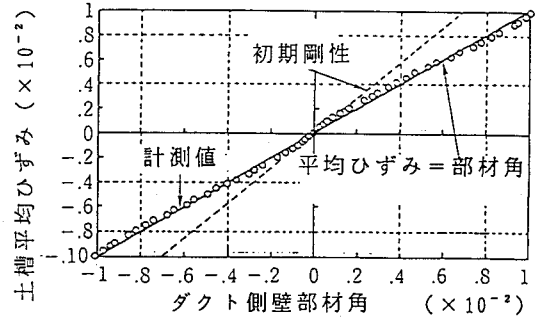


図4 土槽平均ひずみとダクト側壁部材角の関係

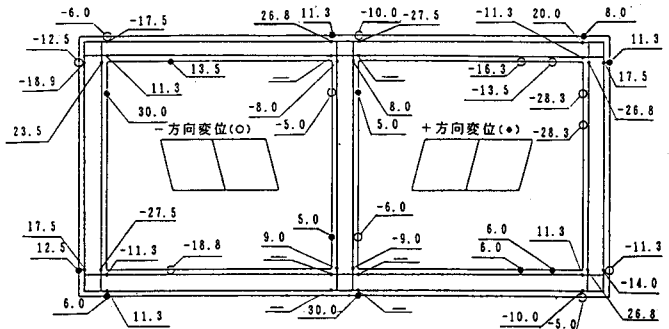


図5 ひびわれ発生、鉄筋降伏時の土槽頂部変位 ●：ひびわれ発生 ○：鉄筋降伏時

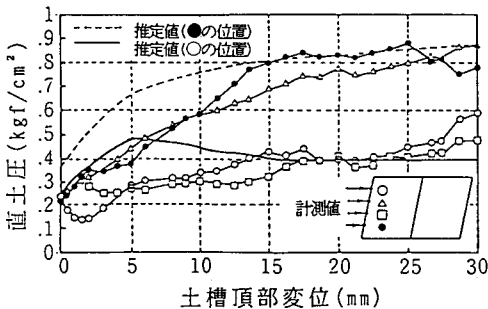


図6 解析により推定した土圧と測定値の比較

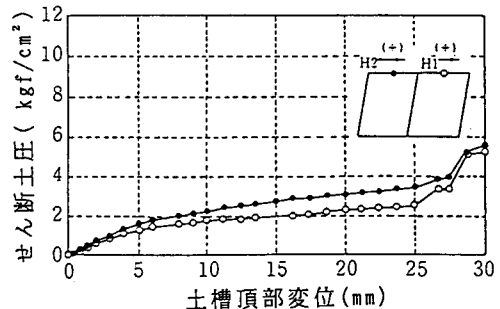


図7 ダクトに加わるせん断土圧

④終局状態：大きなせん断変形を土槽に与えていった場合でも、構造物及び地盤の非線形化による荷重増分の鈍化などにより、断面の破壊には至らなかった。

⑤設計との対応：従来は、設計において構造物の非線形化を無視しているが、単純に一律な剛性低下を考慮することにより、より実現象（実験結果）に近い設計が可能になる（表1参照）。

表1 設計変位と実験結果の比較

設計における剛性の仮定	全断面有効剛性	一律50%剛性低下	実験結果
土槽頂部変位(mm)	3.6	5.5	8.0(初鉄筋降伏時)

4. 解析の概要

(1) 解析手法：解析には、鉄筋コンクリートの非線形性に加え、地盤の非線形性をも考慮できるように改良したFEM連成解析手法を用いている。コンクリートのひびわれは分散ひびわれによりモデル化し、コンクリートの構成則および破壊基準はKupfer等の実験に基づいて定めている。砂地盤の構成則は、弾塑性理論と実験から誘導した硬化関数と降伏条件を用いている〔文献3〕。

(2) 解析の種類：解析は大別すると以下の2種類である。

〔ケース1〕：実験においては、コンクリート中に埋め込んだ土圧計により、壁面に垂直方向に作用する直土圧および平行に作用するせん断土圧を計測しているが、一般にその精度は十分に高いとはいえない。そのため、図9に示すように、より正確な土圧性状を把握する目的で、計測された構造物の変位分布から構造物に作用している土圧を推定する解析を行った。

〔ケース2〕：実験を忠実に模擬した数値シミュレーションであり、構造物および砂地盤の非線形性を考慮している。その際、地盤と構造物の境界面の物性、すなわち、境界面のすべり・剥離の考慮の有無（接合要素の有無）をパラメータとして解析を行った（図8参照）。

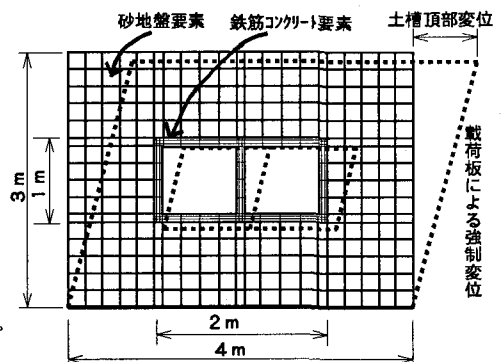


図8 解析条件（要素分割，変位賦与条件）

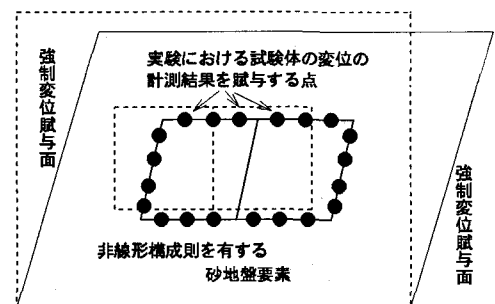


図9 実験結果から土圧を推定するための解析条件

5. 実験結果から推定した構造物に作用する土圧〔ケース1〕

図6には、側壁に作用する土圧について、実験の計測結果と解析から推定した土圧の比較を示す。土槽頂部変位が大きい場合には計測値と推定値はある程度一致しているが、初期段階では異なる傾向を示している。この相違は、推定値がある程度平均的な土圧を算定していること、小さなひずみ段階では計測値は誤差を含んでいることなどに起因して生じたと思われる。この推定値(解析値)から判るように、実験でひびわれが発生する土槽頂部変位5mm時点から、土圧の増加傾向が鈍化しており、構造物の非線形化が作用荷重に与える影響が顕著であることが明らかとなった。

6. 実験の数値シミュレーション結果〔ケース2〕

解析においてパラメータとしたのは、①地盤の非線形性の考慮、②構造物の非線形性の考慮、③構造物と

砂地盤の境界面のすべり剥離の考慮（接合要素の有無）である。図10には、土槽頂部変位30mmでの直土圧とせん断土圧分布の解析値の比較を示した。実現象に近いと思われる実験結果からの推定値(図中a)〔ケース1〕の結果)と比べると、従来設計のように地盤のみの非線形性を考慮しただけでは(図中のb))、直土圧およびせん断土圧の分布形ならびに土圧の大きさとも実験と一致しない。地盤とRC構造の非線形性を考慮した上で、図中c)で示すように接合要素を用いてすべり・剥離現象を考慮することにより、局所的な相違はあるものの概ね実験結果を精度良くシミュレートできることが明らかとなった。また、表2には、各解析ケースについて鉄筋降伏時の土槽頂部変位の一覧を示した。地盤および構造物の非線形性を考慮すること、および境界面のすべり剥離現象を考慮することで、実験を精度良くシミュレートできる。

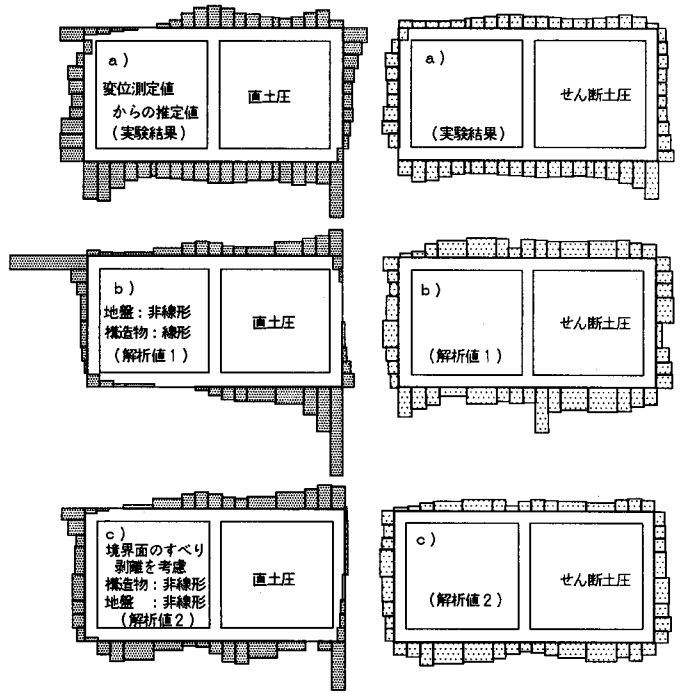


図10 解析条件をパラメータとした土圧(直土圧, せん断土圧)分布の比較

7. まとめ

実験結果より、地盤と構造物の連成挙動、構造物のひびわれと鉄筋降伏による非線形化が確認できた。設計においてこの非線形化を考慮することにより設計荷重を低減でき合理的な設計が可能になると思われる。

また、本検討で用いた解析手法は、RC構造物と地盤の非線形性を考慮した連成挙動を把握するための有力な手段となり得ることを示し、実験の数値シミュレーションを行った結果、地中構造物において、従来無視していた構造物の非線形性を考慮することにより、合理的な設計が可能になることを示した。

【謝辞】本研究は、電力共通研究「限界状態を考慮したAクラス土木構造物の耐震設計に関する研究」の一部として実施したものであることを付記し、関連電力会社および土木学会・原子力土木委員会・限界状態設計部会(主査:東京大学 岡村 甫教授)に対し謝意を表するものである。

【参考文献】〔文献1〕遠藤, 青柳, 興野, 松村「地中に埋設されたRCボックスラーメン構造の地盤との非線形連成解析」第46回年次学術講演会講演概要集 1991年

〔文献2〕岩崎, 遠藤, 片平「地中に埋設されたRCボックスラーメン構造の地盤との連成実験」第46回年次学術講演会講演概要集 1991年

〔文献3〕西「地盤材料の弾塑性挙動と構造物基礎の設計への応用に関する研究」電力中央研究所 研究報告 1982.9

表2 解析条件による鉄筋降伏変位の相違

No.	地盤物性	RC物性	接合要素	鉄筋降伏・土槽頂部変位(mm)
1	線形	線形	無	10.1
2	非線形	線形	無	13.2
3	非線形	非線形	無	18.3
4	非線形	非線形	有	15.8
実験結果				17.5~18.9