

# 地中RC構造物の剛性と地震荷重の関係について

河井正<sup>1</sup>, 大友敬三<sup>2</sup>, 金谷守<sup>2</sup>, 末広俊夫<sup>1</sup>, 岡市明大<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修(財)電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

<sup>2</sup>正会員 工博(財)電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

<sup>3</sup>正会員 工修 関西電力(株) 土木建築室 (〒530-8270 大阪府大阪市北区中之島3-3-22)

地震時の地中構造物の機能維持検討では、構造物の変形量予測が重要であり、そのためには地盤が構造物に与える荷重を適切に評価する必要がある。ここでは二種類の地盤のモデル化手法と三種類の剛性の異なる二連ダクト構造物を組み合わせて動的相互作用解析を実施し、構造物の変形を支配する荷重を整理した。その結果、剛性の小さな構造物を用いた振動台実験において、地盤変形が大きい場合に計測された両側壁に同時に作用する圧縮側の動土圧は、地盤のダイレイタンス特性に起因するものの構造物の変形にほとんど寄与しないため、構造物変形量の評価はダイレイタンスを考慮しないR-0モデルでも可能なこと、構造物の変形量は構造物/地盤剛性比と地盤変位によって整理できることなどを確認した。

**Key Words:** *in-ground RC structure, dynamic soil-structure interaction, earth pressure, dilatancy*

## 1. はじめに

本報告では、著者らの一部によって実施された鉄筋コンクリート製地中構造物の振動台実験において計測された構造物側壁に作用する動土圧<sup>1)</sup>の発生メカニズムの解明、および数%に達する地盤ひずみが発生する著しい非線形性を示す領域での地中構造物に作用する荷重について検討した。

## 2. 実験において計測された動土圧の解釈

地震時の地中構造物の機能維持検討では、構造物の変形量予測が重要であり、そのためには地盤が構造物に与える荷重を適切に評価する必要がある。地中構造物に作用する荷重については、例えば当麻ら<sup>2)</sup>、渡辺ら<sup>3)</sup>などが、実験的・解析的に検討しており、それらの知見にしたがえば、振動台実験で用いた模型の場合図-1に模式的に示すような動土圧の分布となることが予想された。しかしながら、実際に計測された動土圧は、加振加速度が小さい場合は図-1のような分布となるものの、構造物の部材断面が降伏に至るような大変形領域に至ると、図-2に示すように両側壁に圧縮土圧が同時に作用する分布形上となることが確認された。その原因として、ダイレイタンスにより地盤が膨張し側壁に作用する圧縮力が增大することが予想されたため、まずは実験結果の詳細な検討により地盤のダイレイタンスの発現が顕著であることを確認するものとし

て、構造物の変形量が大きくなる図-3に示す区間の変位及び動土圧の応答記録を抽出し、図-4に示すフーリエスペクトルを求めた。この区間で構造物の層間変形は最大値を記録し、構造物と同深度の平均的な地盤のひずみは最大3%程度に達する。この区間で鉛直変位の主な振動の周波数は水平変位のそれよりも大きくなっており、フーリエスペクトルで確認すると、水平変位の卓越振動数が1.5Hz程度までとなっているのに対し、鉛直変位のそれは3.0Hz程度までとなっている。また動土圧についても同様に3.0Hzまでフーリエスペクトルが卓越している。これらのことから、せん断ひずみの1サイクル中に体積ひずみの圧縮・膨張のサイクルを2回繰り返す地盤のダイレイタンス特性の影響が明瞭に認められ、上記の動土圧が地盤のダイレイタンス特性と密接に関係していることが裏付けられた。

## 3. 振動台実験の数値解析による再現

実験データの整理により図-2に示す動土圧は地盤のダイレイタンス特性と密接に関係していることが明らかにされたため、地盤のダイレイタンス特性が構造物の変形に与える影響について検討すべく、図-5および表-1に概要を示すFEM解析 [NAFSS<sup>4)</sup>]を実施した。ここでの解析は、構造物は梁要素としてトリリニアで非線形性を表現し、地盤要素はRamberg-Osgoodモデルまたは弾塑性モデルを用いた。紙面の都合上各モデルのパラメータ設定値は割愛するが、いずれの地盤モデルを用いた場合についても、

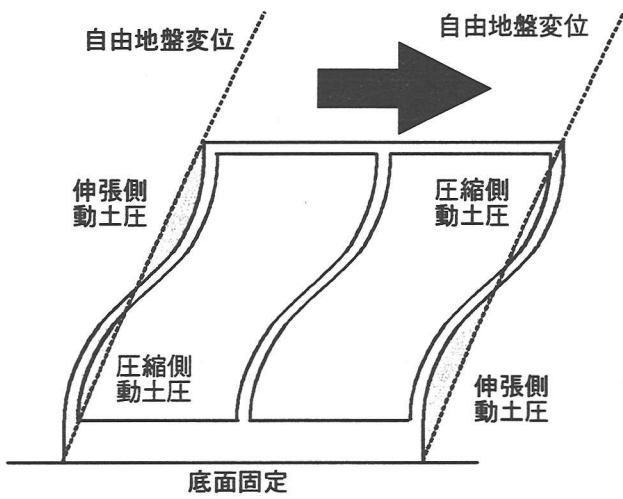


図-1 変形が小さい場合の動土圧の分布

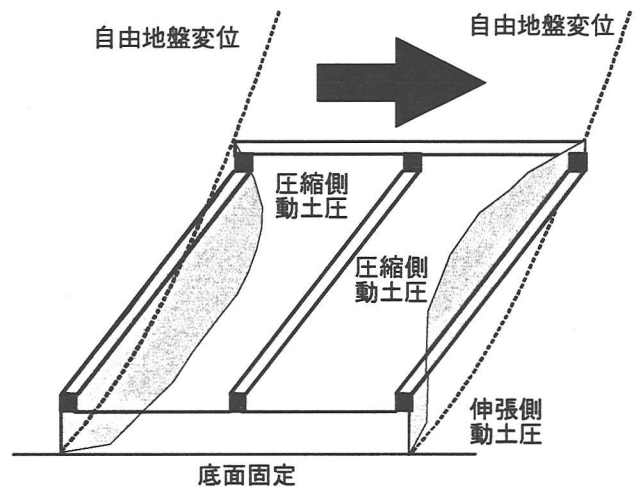


図-2 変形が大きな場合の動土圧の分布

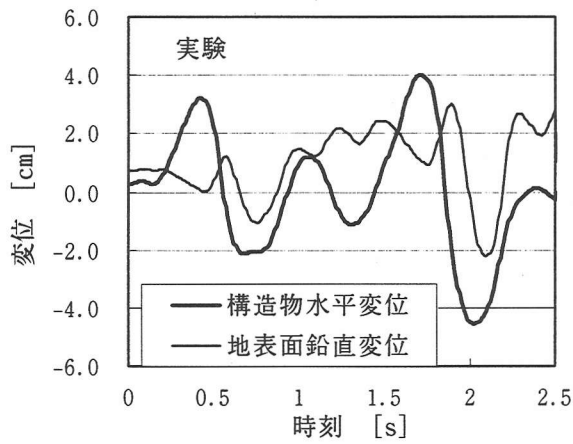


図-3 地盤せん断変形が大きな時刻の変位波形

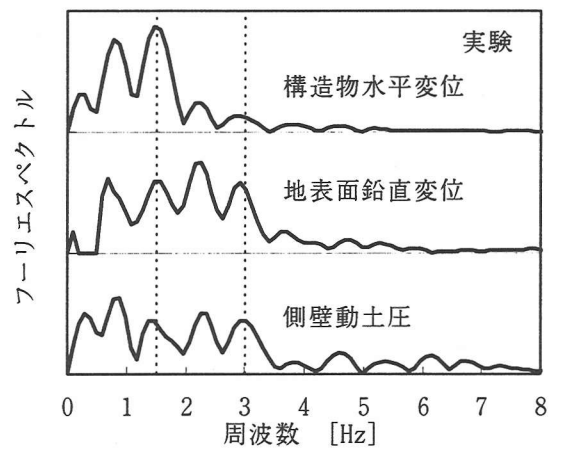


図-4 実験における変位・動土圧の周波数特性

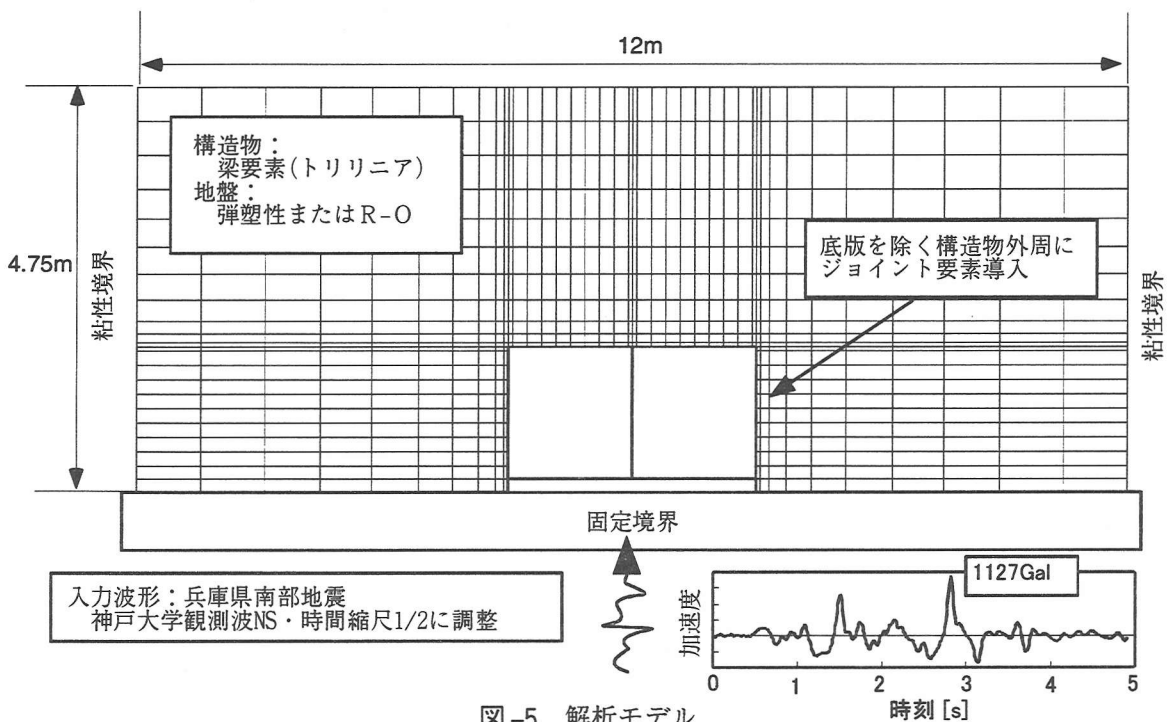


図-5 解析モデル

表-1 解析ケース一覧

解析ケース	構造物	地盤
case Z31	(A) 断面厚10cm	R-0
case Z311	(B) 断面厚18cm	
case Z312	(C) 断面厚26cm	
case N31	(A) 断面厚10cm	弾塑性
case N311	(B) 断面厚18cm	
case N312	(C) 断面厚26cm	

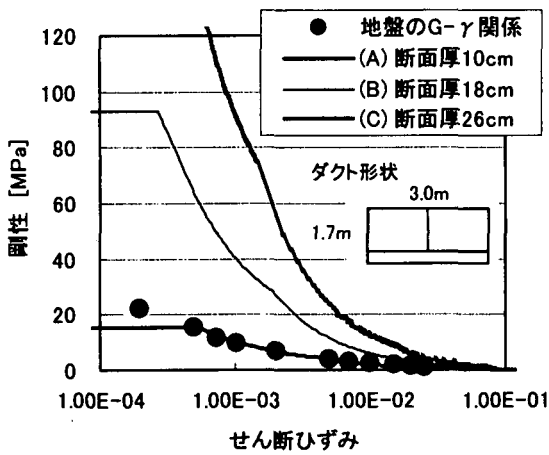


図-6 地盤と構造物の割線剛性の比較

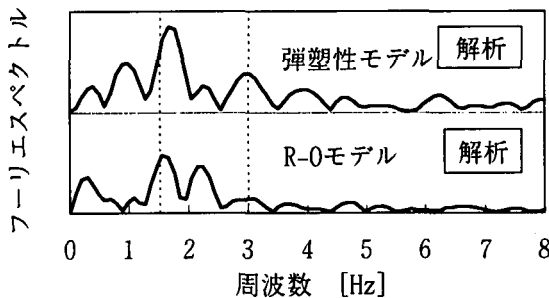


図-7 側壁に作用する動土圧の周波数特性

構造物中央高さの地盤要素に関するせん断ひずみ-せん断応力関係（以下、G- $\gamma$ 関係）は図-6に示す地盤のG- $\gamma$ 関係を目標として設定している。ただし、弾塑性モデルの場合は、地盤のダイレイタンスによる体積変化ならびに振動中の拘束圧の変動に依存した地盤物性の変化を考慮している。なお、図-6には地盤のG- $\gamma$ 関係に加えて、構造物の頂版変位を高さで除した見かけのせん断ひずみと、その変形を生じるために必要な水平荷重を頂版に作用するせん断応力に置き換えたものとの関係から、構造物の見かけのせん断剛性（割線剛性）を算出して示している。構造物の荷重と変形の関係は、宮川ら<sup>5)</sup>の考え方を参考に、さらにコンクリートの引張強度を考慮した断面力の釣り合いから計算した。なお、振動台実験では、ここに示した三種類の構造物の内、断面厚さ10cmの構造物を使用している（解析：caseZ31[R-0]、caseN31[弾塑性]）。図-7、図-8には構

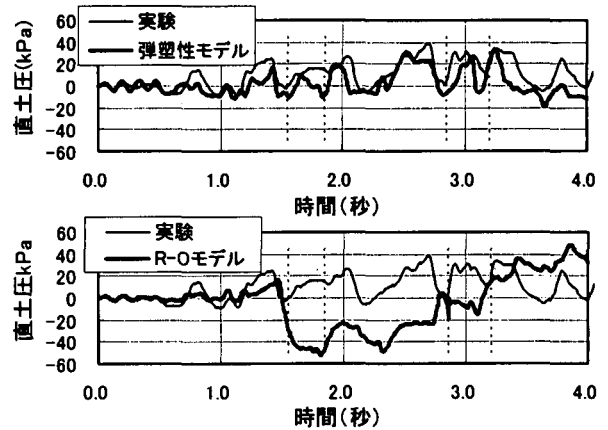


図-8 側壁に作用する動土圧時刻歴の比較

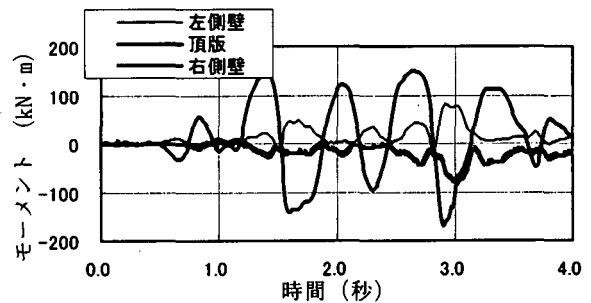


図-9 各部材に作用するモーメントの比較(実験)

造物の右側壁上部に作用する動土圧のフーリエスペクトルおよび時刻歴波形を示しているが、ダイレイタンス特性を考慮した弾塑性モデルを用いた場合の方が、フーリエスペクトル・時刻歴のいずれにおいてもより実験結果と整合している。特に時刻歴の点線で示す区間は、既往の知見によると変形の方に対応して伸張側の動土圧が作用する区間であるが、弾塑性モデルを用いた場合には実験と同様に圧縮側の動土圧が作用しており、図-2に示す特徴的な動土圧は地盤のダイレイタンスによって生じていることが数値解析によっても確認された。

#### 4. 地盤のダイレイタンス特性が構造物の変形に及ぼす影響について

ここでは、地盤のダイレイタンスまたはそれによって側壁に作用する動土圧が構造物の変形に及ぼす影響について検討する。そこで図-9に一例（振動台実験結果）を示すように、各部材に作用する荷重を底版に対するモーメントに換算し、その相対的な大きさから構造物の変形に寄与する荷重の分担を評価した。その結果、構造物(A)を用いた解析結果については、弾塑性モデル・R-0モデルのいずれにおいても、側壁荷重によるモーメントは小さく、構造物の変形はほぼ頂版に作用する荷重によって生じることが判明した。ところで、末広ら<sup>6)</sup>によると、構造物が剛な場合は、頂版に作用する荷重よりもむしろ側壁上部に作用

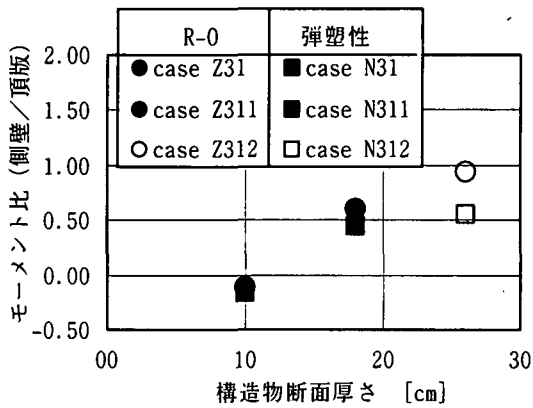


図-10 断面厚さとモーメント比の関係

する荷重によって構造物が変形すると報告されている。そこで、①地盤のダイレイタンスー特性が構造物の変形に及ぼす影響、②構造物の特性と変形に寄与する荷重の関係について検討するため、表-1、図-6に示す構造物が剛な場合のケースを実施した。図-10は構造物に最大層間変形が生じた時点のモーメント比（側壁に作用する荷重/頂版に作用する荷重）を構造物の断面厚さに対して示している。この図によれば剛性比が大きく構造物が剛になるほど地盤との相対変位のため、側壁に作用する荷重の比率が大きくなるものの、当初の予想に反して地盤のダイレイタンスー特性を考慮したcaseN311、caseN312の方が側壁荷重によるモーメントの比率が小さくなっている。その理由は弾塑性モデルを用いた場合はダイレイタンスーの影響により上下方向の加速度が大きく、それに伴って頂版と地盤との間に導入したジョイント要素に作用する垂直応力の振幅も増大し、頂版に作用する荷重の上限値が大きくなったために相対的に側壁に作用する荷重の影響が小さくなったものと考えられる。なお、ここでの解析においては、R-0モデル、弾塑性モデルとも同じ地盤のG-γ関係を目標としてパラメータを設定したにも係わらず、各解析ケースで構造物と同じ高さの地盤相対変位が異なっており、ダイレイタンスーや荷重分担率が構造物の変形量に及ぼす影響を検討する際に、構造物の変形量を直接比較することができない。そこで図-11中の点線で示すように、地盤変位と構造物変位の比を比較したところ、ほぼ構造物の特性ごとにその比が一定になっており、地盤のダイレイタンスー特性は頂版と側壁の荷重が構造物の変形に寄与する分担率に影響を及ぼすものの、今回検討した範囲では構造物の変形は、地盤変位および地盤/構造物剛性比によって決まるものと考えられる。

## 5. まとめ

振動台実験結果の詳細な整理および数値解析的検討によ

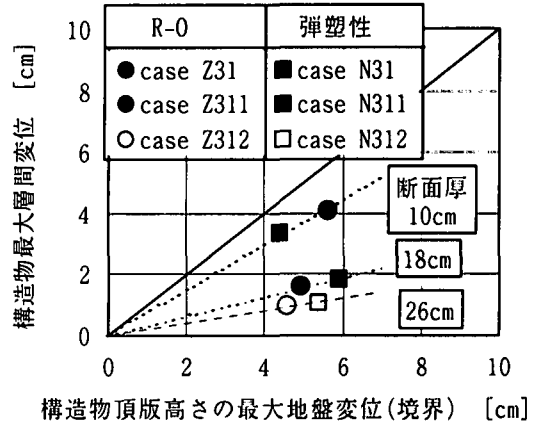


図-11 構造物層間変位と地盤変位の関係

り以下の点を明らかにした。

- ・振動台実験における特徴的な動土圧は地盤のダイレイタンスー特性と密接に関係している。
- ・構造物が相対的に剛になるほど側壁に作用する荷重が構造物の変形に寄与する割合は増大する。
- ・構造物に作用する荷重の分担率は地盤のダイレイタンスー特性に影響されるが構造物の変形量は地盤変位および地盤/構造物剛性比によって決まる。

謝辞：本研究は電力9社と日本原子力発電（株）による電力共通研究の一部として実施した。本研究の関係各位に謝意を表す次第である。

## 参考文献

- 1) 末広俊夫、大友敬三、金津努、岡市明大、福本彦吉：RC地中構造物の耐震性能に関する大型振動台実験とその解析（その2）RC試験体の塑性変形時における動土圧特性、第55回土木学会年次学術講演会講演概要集、I-B131、2000
- 2) 当麻純一、大友敬三、岩橋敬広、片平冬樹：鉄筋コンクリート製の地中構造物への限界状態設計法の適用に関する研究、第21回地震工学研究発表会講演論文集、PP. 449-452、1991
- 3) 渡辺啓口、末広俊夫：地中ダクト側壁動土圧に関する実験的検討、土木学会論文集No. 432/I-16、pp. 155-163、1991
- 4) 金谷守、西好一、当麻純一、大波正行：有効応力に基づく地盤の非線形解析手法の開発とその検証、土木学会論文集、No. 505、III -29、pp. 49-58、1994
- 5) 宮川義範、松本敏克、金津努：RCボックスカルバート構造物の変形性能評価法に関する提案、電力中央研究所報告U00015、2000
- 6) 末広俊夫、大友敬三、河井 正、宮川義範、金谷賢生、福本彦吉：せん断壁を有する地中RCボックス構造物の振動台実験、構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向