

論文 地中ボックスカルバート構造物の非線形地震応答解析におけるマクロ・マイクロモデルの比較検討

曾良岡宏^{*1}・足立正信^{*2}・松原勝己^{*2}・市川卓也^{*2}

要旨: 地中2連ボックスカルバートを対象に、地盤-構造物連成の2次元非線形動的FEM解析を実施し、材料の構成則に基づくモデル(マイクロモデル)と部材の復元力特性に基づくモデル(マクロモデル)の比較、マクロモデルの復元力特性の違いや軸力変動が応答に及ぼす影響について検討した。その結果、荷重-変位応答や断面力に関し、マクロモデルがマイクロモデルとほぼ同等の結果を示すこと、また本検討の対象構造物に対しては復元力特性の違いや軸力変動考慮の有無が応答に及ぼす影響は比較的小さいことが明らかとなった。

キーワード: 地中ボックスカルバート, 非線形解析, 復元力特性, 材料構成則, 耐震性

1. まえがき

コンクリート構造物の耐震設計は、耐用期間中に発生する地震の大きさや頻度と構造物の重要度や被災時の社会的影響度を勘案して、構造物の耐震性能を照査する設計体系になりつつある。特に、「コンクリート標準示方書 耐震設計編」¹⁾で示されたレベル2地震動に対しては、構造物の非線形性を考慮した耐震設計が必要となる。

非線形FEM解析には、RC部材のモデル化の方法として、マクロモデルに基づくものとマイクロモデルに基づくものがあるが、地中RC構造物において、上記マクロ・マイクロモデルの違いに着目した地震時応答の比較検討は少ない。

そこで本検討では、前者の解析コードとして土岐・三浦²⁾により提案された7S-II³⁾をベースに機能追加したものをを用い、後者として岡村・前川により開発されたWCOMD-SJ(Ver.7.2)⁴⁾を用いることにより、2連RC地中ボックスカルバートを対象として比較解析を実施した。それにより、梁部材によるモデル化および解析コードの妥当性を検討するとともに、復元力特性の違いによる応答への影響や軸力変動考慮の有無による応答への影響も合わせて検討した。

なお、筆者らは先にWCOMD-SJを用い、2連

RCボックスカルバートの水平載荷実験に対するシミュレーション解析⁵⁾を実施し、荷重-変位応答やひび割れ性状を精度良く再現できることを確認している。

2. 解析手法と解析条件

本解析の7S-IIにおけるRC梁部材のM- ϕ 復元力特性は、武田モデル⁶⁾とJEAGモデル⁷⁾を用いた。JEAGモデルで用いられる履歴ループを、図-1に示す。また、部材の軸力変動に応じてM- ϕ 関係の骨格を変動させる場合には、軸力Nの大きさにより曲げひび割れ時の曲げモーメント M_{cr} 、曲げ降伏時の曲げモーメント M_y および曲げ終局時の曲げモーメント M_u を変動させている。

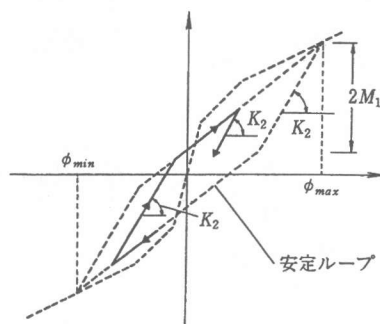


図-1 JEAGモデル(7S-II)

*1 東京電力(株)原子力技術部土木調査グループ(正会員)

*2 東電設計(株)技術開発本部土木技術部

一方、WCOMD-SJ のソリッド要素に用いられている材料構成則を、図-2 に示す。また、常時および地震時の応答解析は、地盤-構造物連成系により実施し、地盤の非線形性を考慮している。地盤の非線形性のモデル化は、7S-II では R-O (Ramberg-Osgood) モデル、WCOMD-SJ では大崎モデルとした。なお、本検討ではパラメータの設定により両者の骨格曲線を完全に一致させたが、7S-II ではせん断弾性係数を水平面上のせん断ひずみ γ_{xy} に、WCOMD-SJ では最大せん断ひずみ γ_{max} に依存させている。

検討対象とした2連地中RCボックスカルバートの断面図と配筋図を図-3 および 4 に示す。また、構造物の材料定数と地盤の物性値を表-1 に示す。さらに、地震応答解析に用いたモデル下端位置における入力波形を図-5 に示す。なお、本検討では地震動の上下動成分に関しても動的な地震力を考慮し、水平・上下同時加振による解析を実施した。

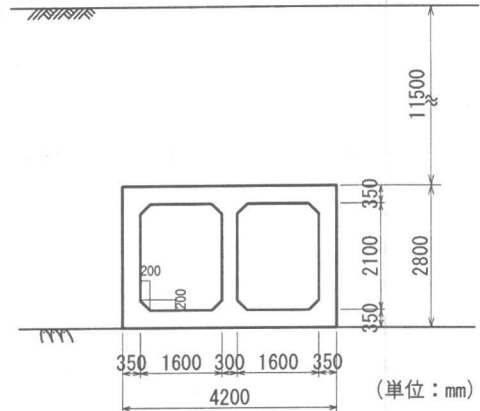


図-3 検討対象の断面図

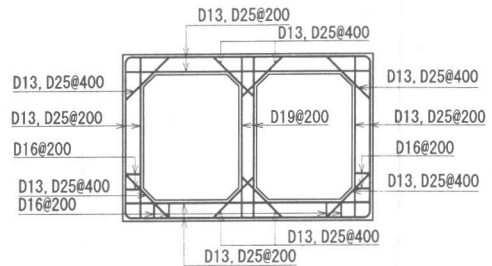


図-4 検討対象の配筋図

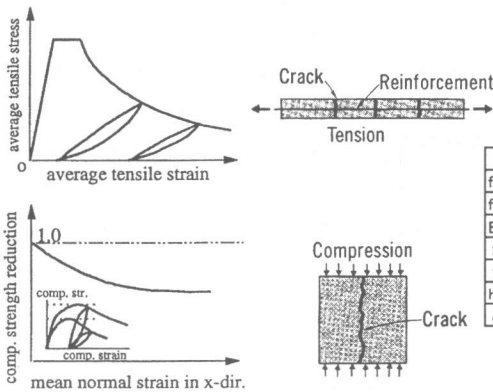


図-2 材料構成則 (WCOMD-SJ)
[文献 4) より引用したものを加筆]

表-1 構造物と地盤の物性値

コンクリート		鉄筋		地盤	
f_c	19.1 N/mm ²	規格	SD345	表層	
f_t	1.7 N/mm ²	f_y	343 N/mm ²	VS	200 m/s
E_c	22.3 kN/mm ²	E_s	206 kN/mm ²	γ_t	17.6 kN/m ³
ν	0.167	γ_s	77 kN/m ³	岩盤	
γ_c	23.5 kN/m ³			VS	470~750 m/s
h	5 %			γ_t	17.0~17.5 kN/m ³
ϵ_{cu}	0.0035				

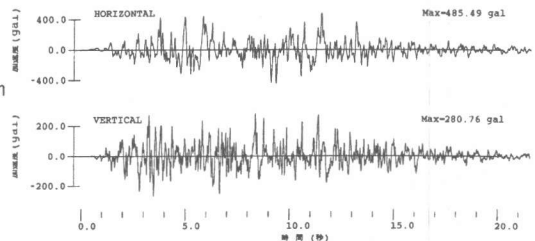


図-5 検討入力波形

3. 構造物単体に対する検討

地盤-構造物連成系での地震応答解析に先立ち、構造物単体に水平力を静的に作用させるプッシュオーバー解析を行った。7S-IIおよびWCOMDの解析モデルを図-6および7に示す。荷重条件としては、壁位置（3点）に上載荷重を、頂底板位置（左右2点ずつ）に静止土圧を載荷した状態で、頂版位置を水平方向に点載荷した。図-8に荷重-変位関係を示す。変位は頂版と隔壁の中心線が交わる位置で示した。7S-IIで水平荷重に伴う軸力変動を考慮する場合としない場合でほとんど差はみられず、一方7S-IIとWCOMDの比較では多少の差異は認められるものの、荷重600kN付近までの荷重-変位応答はほぼ一致している。なお、軸力変動の幅は部材位置により異なるが、左右側壁については静止土圧による初期軸力約250kNに対し1cm変位時で50kN程度である。また、図-9に曲げモーメントを示す。曲げモーメントの分布形状と大きさがほぼ一致していることがわかる。以上から、本モデルでは水平荷重に伴う軸力変動が荷重-変位応答に及ぼす影響は小さいと判断される。

4. 地盤-構造物連成系に対する検討

4.1 マクロ・ミクロモデルによる応答の比較

地盤-構造物連成系に対して地震応答解析を実施した。7S-IIで用いた解析モデルを図-10に示す。境界条件として、7S-IIでは底面および側方粘性境界を、WCOMDでは底面固定および側方混合境界を用いた。なお、7S-IIにおける梁要素の復元力特性は、武田モデルを用いた。

解析結果として、頂底板間の層間変形角（頂底板間相対変位を頂底板間の距離で除したもの）の時刻歴を図-11に示す。波形の位相や最大値の発生時刻および最大値は、7S-IIとWCOMDの両者ではほぼ一致していることがわかる。ただし、層間変位が最大となった12秒付近以降に見られる残留変位には違いが生じている。これは、地盤の非線形性の取り扱いに関し、7S-IIではせん断弾性係数を水平面上のせん断ひずみ γ_{xy} に、WCOMD

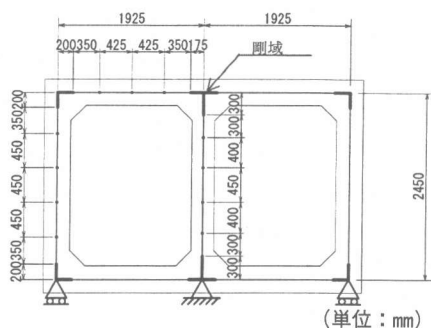


図-6 解析モデル（構造物単体・7S-II）

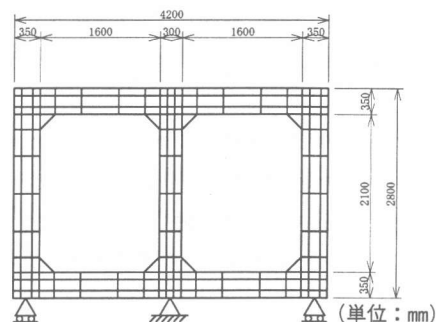


図-7 解析モデル（構造物単体・WCOMD）

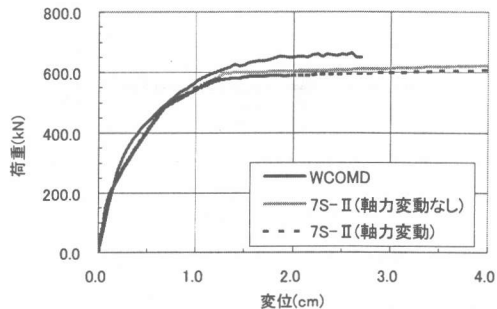


図-8 荷重-変位関係（構造物単体）

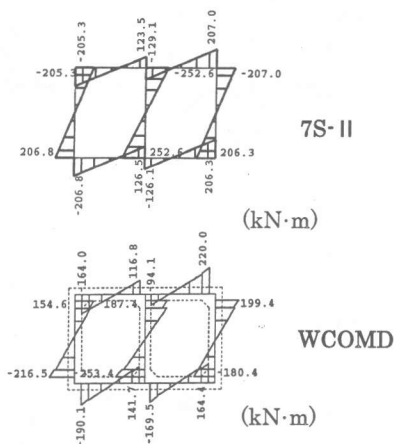


図-9 曲げモーメント（1cm変位時）

では最大せん断ひずみ γ_{max} に依存させるため、水平・上下同時加振時のせん断弾性係数の低下が異なることが関係するものと考えられる。図-12に層間変形角が最大時の断面力の比較を示す。曲げモーメントおよびせん断力に関しては、ほぼ一致していることがわかる。一方、軸力に関しては差異が見られる。この原因については、今後の検討が必要である。

以上、7S-IIと WCOMD との比較解析から、梁要素の復元力特性に武田モデルを用いた7S-IIは、WCOMD とほぼ同等の結果が得られることがわかる。

4.2 復元力特性の差異による比較

部材の復元力特性の差異による比較のため、ケース1: JEAGモデル(軸力変動考慮せず)、ケース2: 武田モデル(軸力変動考慮せず)および

ケース3: 武田モデル(軸力変動考慮)の3ケースの解析を実施した。

復元力特性の骨格を決める初期軸力の算定には、フレームモデルに上載荷重を作用させて求める方法と地盤-構造物連成系の FEM 自重解析により求める方法がある。ケース1および2はフレーム解析により、ケース3は FEM 自重解析によって初期軸力を算定した。さらに、比較のためケース2で初期軸力を FEM 自重解析によるもの(ケース4)も解析を実施した。(表-2 参照)

(1) 頂底版間相対変位

上記ケース1, 2および3の構造物変位モードはほぼ同じとなったが、頂底版間最大相対変位をみると、ケース1, 2 および 3 の順にそれぞれ 13.0mm, 13.5mm および 10.5mm となった。

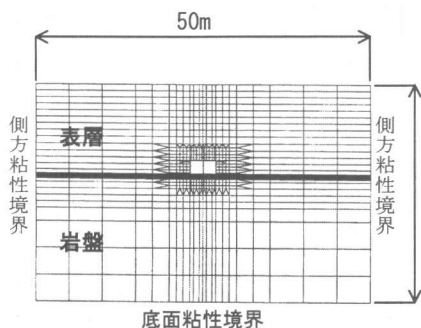


図-10 解析モデル(連成系・7S-II)

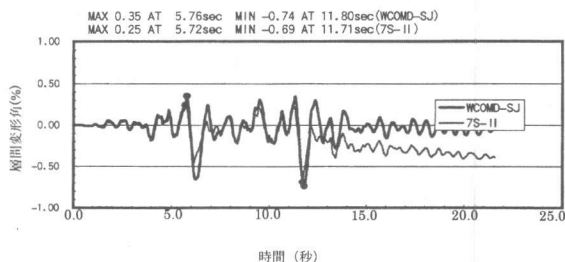


図-11 頂底版間層間変形角

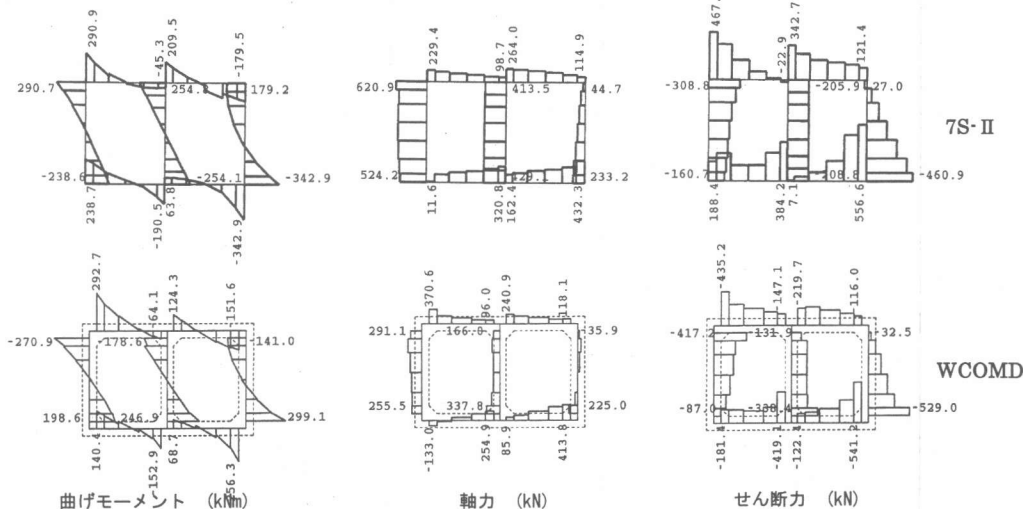


図-12 断面力(連成系)

すなわち、復元力モデルの違い(ケース1と2)による構造物変形への影響はさほどないが、軸力変動考慮の有無(ケース2と3)による影響がみられる。

前者の影響については、両モデルの骨格を一致させ履歴曲線のみが異なっており、履歴ループの違いは繰り返し載荷時の履歴減衰の差に現れるものと考えられるが、本検討の地中RC構造物ではこの履歴減衰の差が影響を与えなかったものと考えられる。

一方、後者の軸力変動考慮の有無に関しては、ケース4の頂底版間最大相対変位が11.1mmでケース3とほぼ等しいことから、軸力変動に伴う復元力特性の違いで差が生じたのではなく、復元力特性の骨格を定める初期軸力の設定によるものと考えられる。初期軸力は地中RC構造物に加わる土被り荷重に基づいており、土被り荷重による軸力はフレーム解析よりもFEM自重解析による方が大きく見積もる傾向がある。そのため、FEM自重解析で初期軸力を算定したケースの方が、構造全体の剛性が大きめに評価され、結果として構造物変形量が小さめに評価されたものと考えられる。

(2)断面力

図-13にボックスカルバートの頂底版間相対変位最大時における曲げモーメント分布の比較を示す。曲げモーメントは、4者のケースで分布形状と大きさがほぼ一致していることがわかる。このことから、JEAGモデルと武田モデルの復元力特性の違いが断面力に及ぼす影響は小さく、本ケースの場合は軸力変動考慮の有無が断面力に及ぼす影響も小さいことがわかる。

(3)M-φ 応答履歴

図-14に隔壁下端位置におけるM-φ応答履歴を示す。4つのケースのうち、ケース1(JEAGモデル)とケース2~4の間には、履歴曲線に違いがみられるが、ケース1(JEAGモデル)とケース2(武田モデル)の曲げモーメントおよび曲率の最大値はほぼ等しくなっている。すなわち、M-φ応答に関しても、復元力特性の違いによる差は小さい。

表-2 解析ケース

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
復元力特性	JEAG	武田	武田	武田
軸力変動	なし	なし	あり	なし
初期軸力の算定方法	フレーム	フレーム	FEM	FEM
頂底版間最大相対変位(mm)	13.0	13.5	10.5	11.1

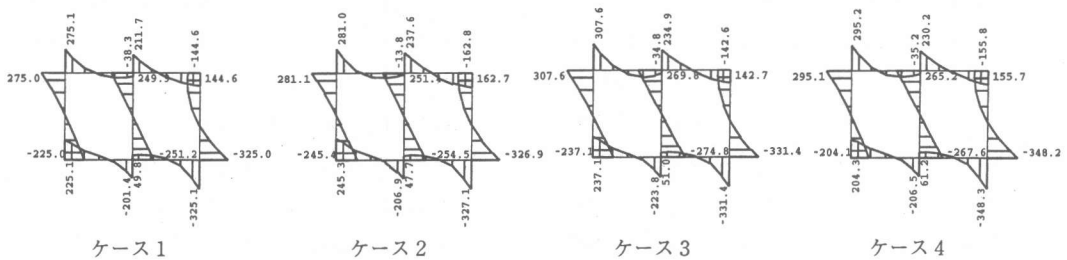


図-13 断面力 (曲げモーメント)

(単位: kN・m)

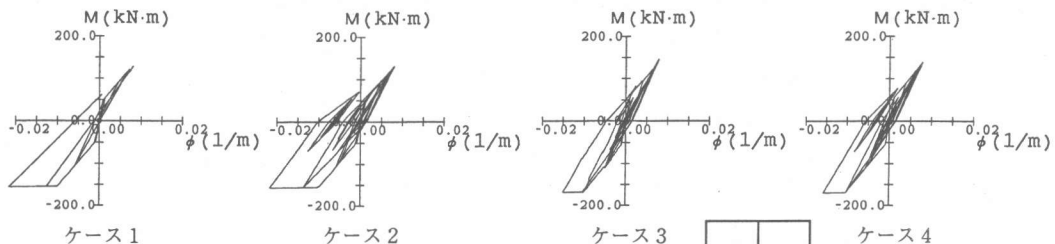
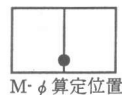


図-14 M-φ 応答履歴



次に、軸力変動考慮の有無による違いをみると、ケース3は、ケース2に比べて曲げ変形量(曲率)が小さい傾向が見られる。

また、ケース3とケース4は曲げモーメントおよび曲率がほぼ一致している。したがって、本ケースでは軸力変動考慮の有無による差は小さく、復元力特性の骨格を定める初期軸力の評価によってM- ϕ 履歴に差が生じたと考えられる。

5. まとめ

本検討での実施内容と得られた知見を要約すると、以下の通りである。

- (1)2 連ボックスカルバートを対象とし、7S-II および WCOMD-SJ を用いた構造物単体のプッシュオーバー解析を実施した。その結果、荷重-変位関係、断面力ともほぼ一致した。
- (2)2 連ボックスカルバートを対象とし、7S-II および WCOMD-SJ を用いた地盤-構造物連成系の地震応答解析を実施した。その結果、頂底板間の層間変形角の最大値発生時刻や最大値はほぼ一致がみられた。また、断面力も軸力を除いてほぼ一致した。
- (3)7S-II を用いた地盤-構造物連成系の地震応答解析により、復元力特性の違いが変位分布、断面力およびM- ϕ 応答履歴に及ぼす影響を検討した。その結果、JEAGモデルと武田モデルの差は小さく、軸力変動考慮の有無による差も本検討の対象構造物に対しては小さいことが判明した。ただし、軸力変動考慮の有無による影響は、構造物形状、配筋状況さらに土被り厚さや上下動の影響などが関係すると考えられ、本報の結果を一般化することはできないものと考えている。また、M- ϕ 骨格を定める初期軸力の評価方法の影響が大きいことが判明した。

6. あとがき

本報では、地中2連ボックスカルバートを対象に、マイクロモデルとマクロモデルによる応答の

比較およびマクロモデルの復元力特性の違いによる影響を、地盤-構造物連成系の地震応答解析を実施して検討した。その結果、マクロモデルを用いた解析コード7S-IIの解析結果はマイクロモデルを用いた解析コードWCOMDによる解析結果と整合していることが示されるとともに、復元力特性の影響に関する幾つかの知見が得られた。今後は、実験結果に対するシミュレーション計算を実施しマクロモデルによる地震応答解析法の解析精度をさらに高めてゆきたい。

【参考文献】

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 耐震設計編 [平成8年制定]
- 2) 土岐憲三、三浦房紀：地盤-構造物系の非線形地震応答解析，土木学会論文報告集，第317号，1982.1
- 3) (社)土木学会：「原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手法」報告書 第4編建屋基礎地盤の耐震安定性評価 例示編，1985.8
- 4) 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，1991.5
- 5) 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，1999.7
- 6) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N. : Reinforced concrete response to simulated earthquakes, Journal of the Structural Division, ST12, ASCE, pp.2557-2573, 1970.12
- 7) (社)日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針，JEAG4601-1987，1987.8