

# 実際に使用されてきた地中構造物の 地震時耐力・変形性能に関する研究 -その2 非線形解析による載荷実験のシミュレーション-

秋山伸一<sup>1</sup>・荒添正棋<sup>2</sup>・仲村治朗<sup>3</sup>・橋 泰久<sup>4</sup>・恒川和久<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 佐藤工業株式会社 中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

<sup>2</sup>正会員 佐藤工業株式会社 中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

<sup>3</sup>正会員 工修 中部電力株式会社 土木建築部 (〒461-8680 名古屋市東区東新町1番地)

<sup>4</sup>正会員 中部電力株式会社 土木建築部 (〒461-8680 名古屋市東区東新町1番地)

<sup>5</sup>正会員 工修 株式会社シーテック 土木建築本部 (〒455-0054 名古屋市港区遠若町3-7-1)

鉄筋コンクリート地中構造物の耐震性能を評価する上で、鉄筋降伏の確認は重要な項目である。ところが、著者らが行った既設地中構造物の載荷実験では、試験体への損傷の懸念から鉄筋ひずみの計測が困難であり、鉄筋降伏が確認されていない。そこで、既設構造物の鉄筋降伏を推定するために、非線形特性を考慮したFEM解析および骨組み解析による載荷実験のシミュレーションを行う。シミュレーション結果によると、これらの解析は既設構造物の挙動を良好に再現する。特に、非線形FEM解析は構造物の挙動を詳細に再現できるため、実験結果を補う上でも有用である。また、非線形骨組み解析はこれからの性能照査型設計に対する実用上の有力な手段のひとつになると考えられる。

**Key Words :** non-linear behavior, loading test, existing underground structure, earthquake resistant design, numerical analysis

## 1. はじめに

著者らは、既設地中構造物の耐震安全性照査手法の向上を目的として、実際に使用されてきた鉄筋コンクリート製地中ボックスカルバートを用いて、載荷実験を行ってきた<sup>1)</sup>。この載荷実験では、試験体への損傷の懸念から鉄筋ひずみの測定は困難であると判断され、構造物の耐震性能を評価する上で重要になる鉄筋の降伏が確認されなかった。そこで、既設構造物を模擬した試験体を新たに製作し、鉄筋ひずみを計測するための載荷実験も行った<sup>2)</sup>。ただし、既設構造物と新設試験体では材料特性が若干異なるため、新設試験体の載荷実験結果から、既設構造物の鉄筋降伏を直接推定することは難しい。そこで、本論文では非線形解析を用いて既設構造物と新設試験体による載荷実験のシミュレーションを行い、既設構造物で計測されなかった鉄筋降伏の推定を試みる。

載荷実験のシミュレーションは、鉄筋コンクリートの非線形FEM解析と部材の復元力特性を考慮した非線形骨組み解析の2通りで行う。このうち、非線形FEM解析は鉄筋コンクリート構造物の挙動をかなり忠実に再現できると言われており<sup>3)</sup>、ここでは既設構造物の鉄筋降伏を精度良く推定することを目的とする。一方、骨組み解析は今後も実務設計で多用されると考えられるため、載荷

実験のシミュレーションを通して、構造物の非線形挙動予測に用いる際の基礎的な知見を得ること目標とする。

## 2. 非線形解析の概要

載荷実験に用いた試験体の構造と物性値を図-1と表-1に示す。既設構造物と新設試験体は、図-1に示すように同一の構造であるが、物性値は表-1に示すように両者で若干異なる。載荷実験では図-2に示すように、頂版に40kNのインゴットを並べ鉛直荷重を与え、アクチュエーター2台から水平方向に圧縮力を交互に加えた。これらの条件に基づいて作成した解析モデルを図-3に示す。

FEM解析モデルでは分散ひび割れモデルによる鉄筋コンクリート要素によって試験体をモデル化する。一方、骨組み解析モデルでは底版を固定し、側壁および頂版をビーム要素でモデル化する。また、ハンチ部については部材幅の1.25倍となる位置までを剛域とする。ビーム要素の非線形復元力特性には軸力変動型トリリニアモデルを用いる。このトリリニアモデルの骨格は部材断面の曲げモーメントと曲率の関係(M- $\phi$ 曲線)および曲げモーメントと軸力との関係(M-N曲線)から設定する。

M- $\phi$ 曲線の算出方法は様々考えられる。ここでは、

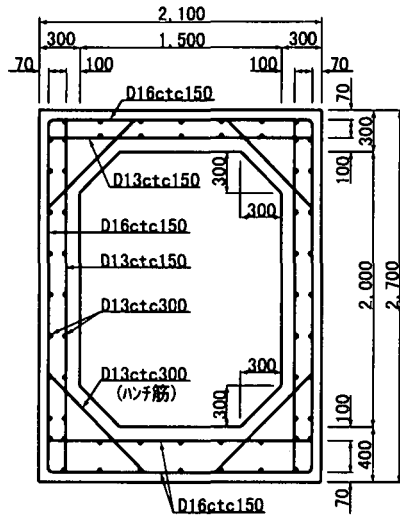


図-1 試験体の構造

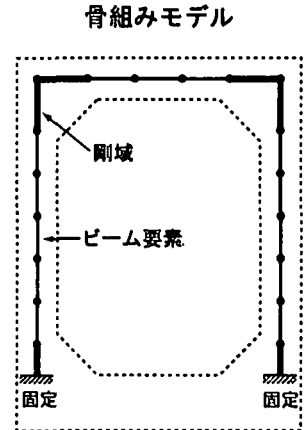
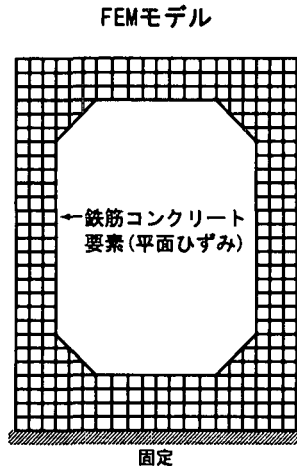


図-3 解析モデル

表-1 試験体の物性値

コンクリート	既設構造物			新設試験体
	頂版	側壁	底板	
圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	26.4	36.4	27.0	28.1
引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	2.57	3.02	2.33	2.36
最大圧縮ひずみ(%)	0.175			0.200
ポアソン比	0.2			
単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )	23.4			21.9
鉄筋	D13	D16	D13	D16
弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )	187.3	168.9	166.0	170.2
降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	381.9	379.3	384.8	353.2

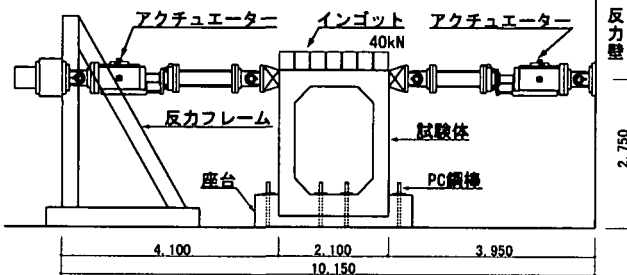
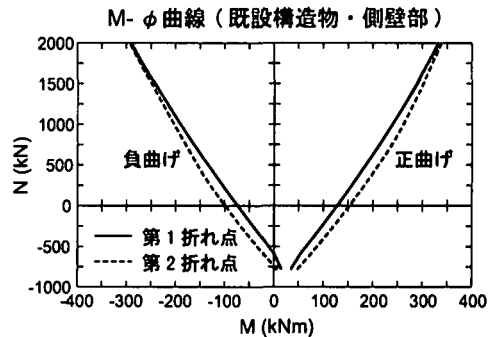
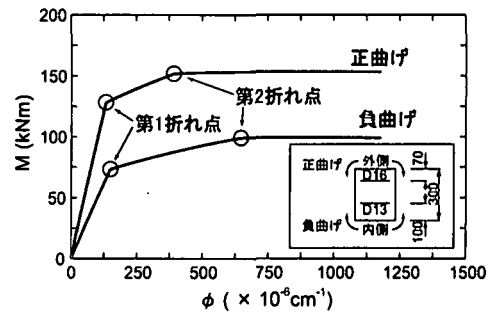


図-2 荷装置置



M-N 曲線 (既設構造物・側壁部)

図-4 骨組み解析に用いる部材非線形特性

コンクリートの圧縮応力と圧縮ひずみの関係を $\epsilon$ 関数型<sup>4)</sup>に設定し、引張を無視する。また、鉄筋は降伏強度を折れ点とする完全バイリニアとしてモデル化する。

このようにして算出されるM- $\phi$ 曲線のうち、軸力が作用しない時の既設構造物側壁部の結果を図-4上段に示す。ここで、正曲げは外側引張を、負曲げは内側引張を表す。また、第1折れ点は引張鉄筋の降伏点を示す。一方、曲げモーメントが増大すると、断面の中立軸は圧縮側に深く入り込むようになる。その結果、圧縮側の鉄筋は引張降伏に至り、この点が第2折れ点となる。これらの折れ点は部材軸力によって変動する。この様子をM-N曲線として図-4の下段に示す。この図から、軸力が増大すると折れ点が発生する曲げモーメントも増大する。以上より、図-4に示す部材の非線形特性を用いて軸力変動トリリニアモデルを設定し、骨組み解析を行う。

### 3. 荷重実験のシミュレーション

非線形FEM解析による新設試験体と既設構造物の荷重実験のシミュレーション結果を図-5に示す。荷重・変位曲線図で、A~Hは解析によって算出される鉄筋の降伏位置を、a~hは実験で計測された鉄筋の降伏位置を表す。

新設試験体による荷重実験のシミュレーション結果のうち、頂版中央における荷重と変位の関係を見る。水平変位27.8mm(部材変形角1/67rad)のサイクルまでの解析結果は、各サイクルのピーク、さらには、履歴曲線の形状に至るまで実験結果に良く一致している。また、解析で得られる鉄筋の降伏位置と降伏変位は全体的に実験結果に良く対応している。

つぎに、水平変位18.5mm(1/100rad)での変位分布によると、水平変位と鉛直変位の双方とも解析結果は実験結果

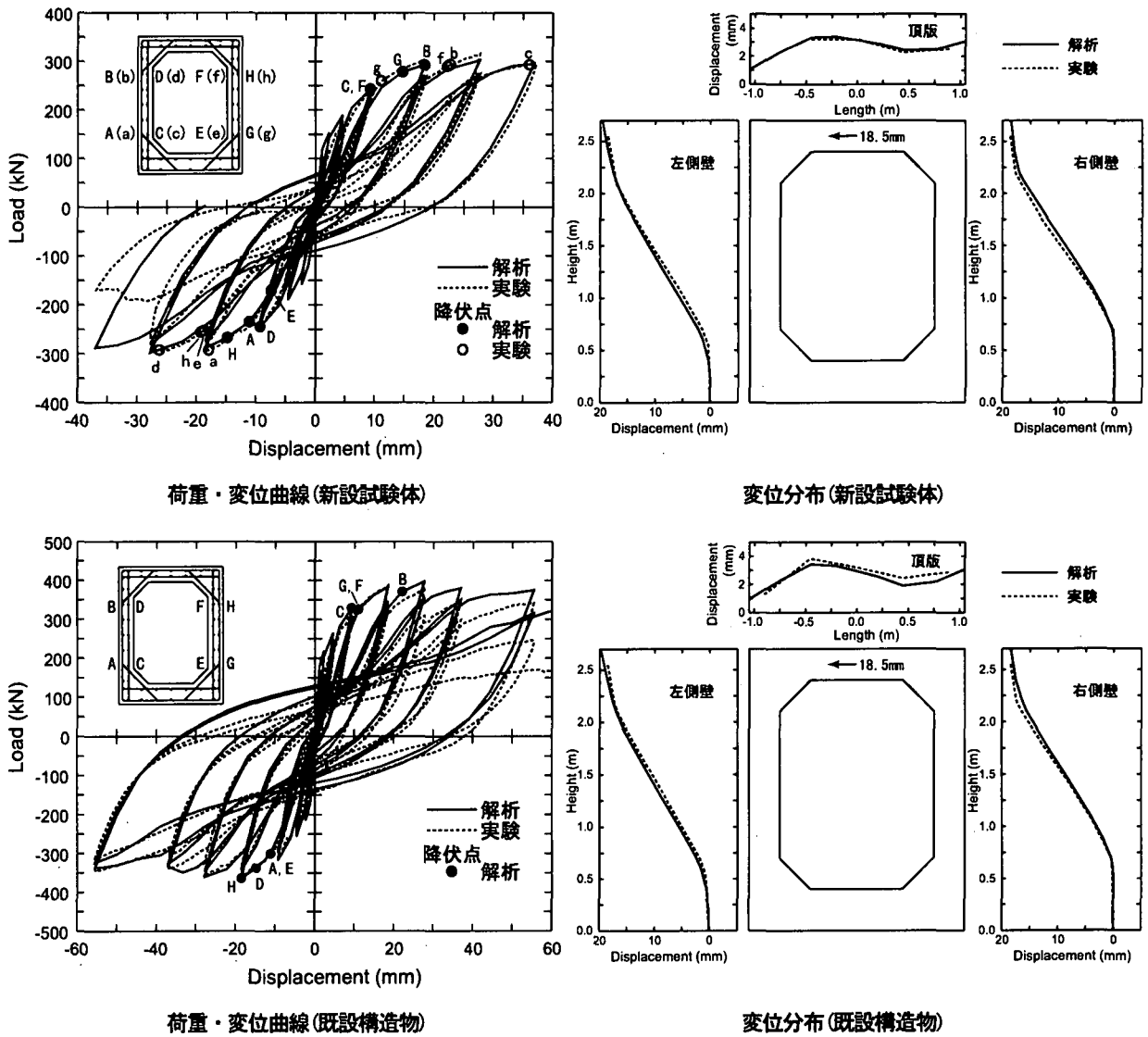


図-5 非線形FEM解析によるシミュレーション結果

に良く一致している。特に、載荷実験では側壁下部で始まる部材変形の基点位置が左右で異なるが、解析ではこれを忠実に再現している点に注目したい。以上により、非線形FEM解析は載荷実験による新設試験体の挙動を精度良く再現していると言える。

同様に既設構造物による結果に移ると、荷重・変位曲線では、曲線のピークおよび形状について、水平変位37mm(1/50rad)のサイクル付近まで、解析結果は実験結果に良く一致している。また、水平変位18.5mm(1/100rad)での変位分布も解析結果は実験結果に一致している。したがって、非線形FEM解析は既設構造物の載荷実験も良好に再現している。さらに、ここで推定される既設構造物の鉄筋降伏変位は10~20mmである。上述したように、本解析結果は実験結果を良く再現していることから、この推定結果は信頼性が高いと考えられる。

つぎに、非線形骨組み解析による新設試験体と既設構造物の載荷実験のシミュレーション結果を図-6に示す。まず、新設試験体と既設構造物の頂版中央における荷

重・変位曲線を見ると、載荷実験では逆S字型の細長い履歴曲線を示すのに対し、解析では膨らんだ形状の曲線を描く。また、実験では水平変位が20mm付近から次第に耐力が低下するのに対し、解析ではこのような耐力の低下が見られない。

しかしながら、履歴サイクル毎のピークについては水平変位18.5mm(1/100rad)~27.8mm(1/67rad)付近まで解析結果は実験結果に良く一致している。また、骨組み解析による水平変位18.5mm(1/100rad)での変位分布は実験結果に近い。さらに、解析から求められる新設試験体の鉄筋の降伏点は水平変位が10mm以下で発生するものの、概ね実験結果に近い結果を示している。

上述の骨組み解析の結果を図-5に示したFEM解析の結果と比較すると、荷重・変位曲線および変位分布ともにFEM解析の方が載荷実験に近い結果を示している。ただし、骨組み解析では載荷実験で最大耐力を示す付近まで履歴サイクル毎のピークが実験結果に良く一致しており、鉄筋の降伏点も実験結果に近い。これらの結果から判断

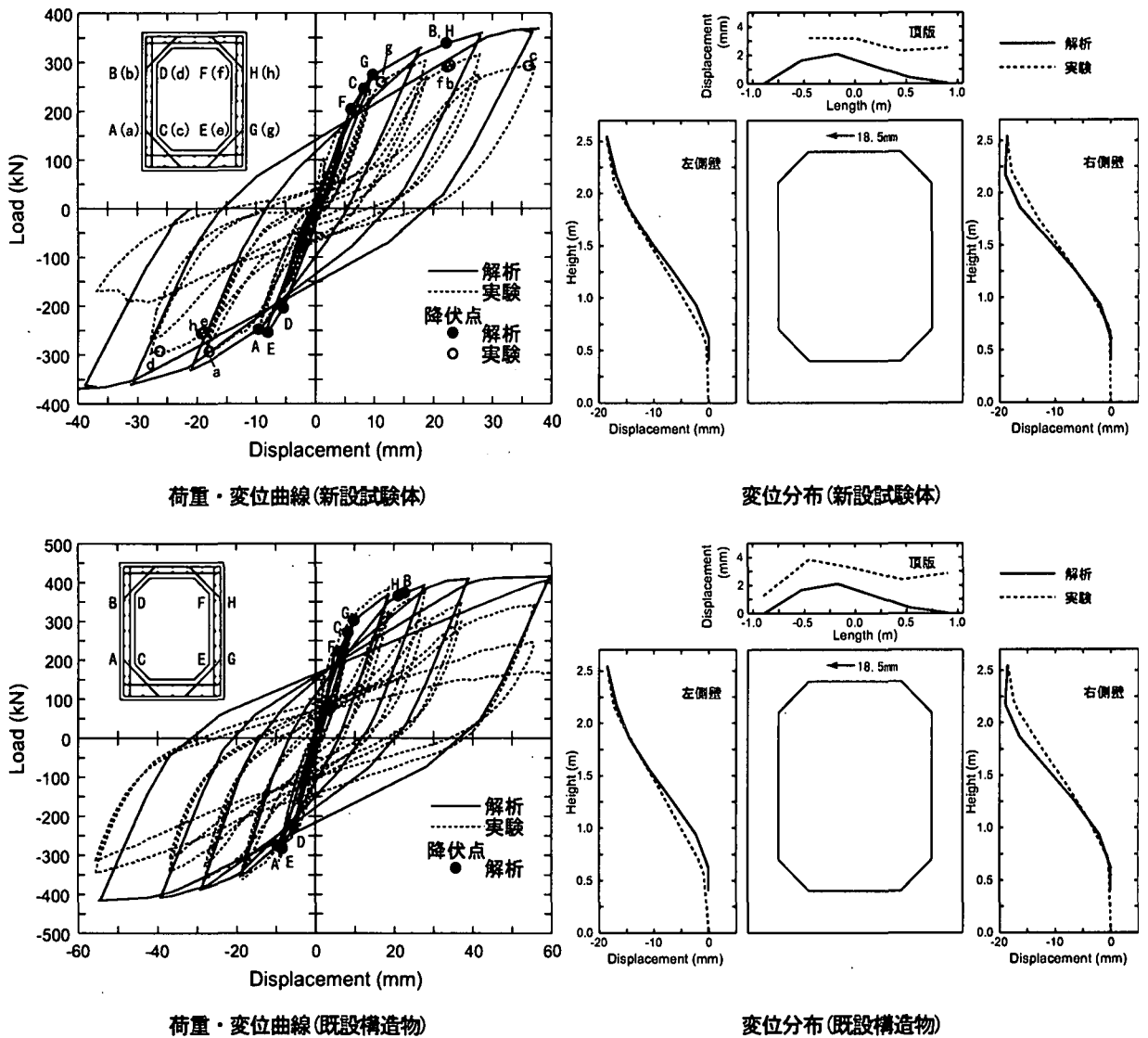


図-6 非線形骨組み解析によるシミュレーション結果

して、骨組み解析では少なくとも鉄筋の降伏点付近まで構造物の非線形挙動を再現していると考えられる。本解析では $1/100\text{rad} \sim 1/67\text{rad}$ 付近で降伏点が現れる。

さて、以上に示した解析結果から、載荷実験で確認されなかった既設構造物の鉄筋降伏は、水平変位 $10\text{mm}$ 付近で発生したと推察される。一方、この構造物の最大変位は $60\text{mm}$ 以上<sup>1)</sup>であるから、この構造物は十分な靱性を有している。さらに、この構造物が埋設されていた地点における構造物頂底版間の地盤の最大応答相対変位はレベル2地震動クラスでも $1.7\text{mm}$ 程度である<sup>2)</sup>。したがって、この構造物は耐震性能も十分に確保している。

#### 4. まとめ

ここで行った非線形FEM解析および非線形骨組み解析は実験用に製作された試験体のみならず実構造物の挙動を再現している点に意義がある。非線形FEM解析は載荷

実験を良好に再現することから、実験結果を補う上でも有用であると考えられる。一方、非線形骨組み解析は鉄筋の降伏点付近まで、構造物非線形挙動の解析に適用できる。この結果から、FEM解析よりも簡便である骨組み解析は、今後の性能照査型設計に対して実用上有力な解析手法のひとつになると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 橘泰久, 平松住雄, 秋山伸一, 荒添正棋: 実際に使用されてきた地中構造物の載荷実験, 第55回土木学会年次学術講演会概要集, I-B141, 2000.
- 2) 荒添正棋, 平松住雄, 秋山伸一, 橘泰久: 実際に使用されてきた地中構造物の変形性能に関する検討, 第55回土木学会年次学術講演会概要集, I-B144, 2000.
- 3) 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.
- 4) 武藤清: 鉄筋コンクリート構造物の塑性設計, 耐震設計シリーズ2, 丸善, 1976.