

都市トンネルの非線形解析手法に関する検討

東京電力株式会社
東京電力株式会社
東京電力株式会社
東電設計株式会社
東電設計株式会社

正会員 ○高橋 晃
正会員 竹内 友章
正会員 斉藤 仁
正会員 久保 賀也
正会員 安部 明夫

1. 目的

都市トンネル覆工の合理化を図るために、都市トンネルへの性能照査型設計体系¹⁾の適用を検討している。本報告は、同設計体系に見合うように覆工の耐荷・変形性能を評価する非線形解析手法の実用化について検討したものである。都市トンネルにおける非線形構造解析モデルを図-1に示す。この非線形解析手法は、既存の載荷試験結果等をシミュレートすることでその適用性を評価する。ここでの非線形解析手法におけるセグメント部材のモデル化は軸力変動を考慮できる曲げモーメント M - 曲率 ϕ 関係を用いたモデル及び積層モデルを用いた。

2. 単体曲げ試験のシミュレーション解析

既往のセグメント単体を対象とした載荷試験をシミュレートし、試験における荷重 - 変位関係を比較し、非線形解析手法の適用性を検討した。単体曲げ試験における解析モデルを図-2に示す。非線形手法として、ひび割れの影響による部材剛性低下式²⁾を用いた場合、 M - ϕ 関係を用いた場合、図-3に示すように、積層モデル1としてコンクリートのひび割れ後の引張強度を無視した場合と積層モデル2としてコンクリート標準示方書³⁾にあるように、ひび割れ後の引張強度を考慮した場合の非線形モデルを設定した。コンクリートの圧縮強度としては試験値を用い、引張強度及び終局ひずみについてはコンクリート標準示方書⁴⁾を参考に設定した。そのシミュレーション解析結果の一例を図-4に示す。試験結果である鉛直変位 - 載荷重関係において M - ϕ 関係及び積層モデル1を用いた場合は良く一致している。積層モデル2はひび割れ後の引張強度を考慮しているため終局耐力が他の非線形モデルより大きく評価されている。

シミュレーション解析として25試験体について実施している。その試験体は、平均的にトンネル内径3~4m、セグメントの厚さ20cm、引張鉄筋比0.5~1.0%程度のものである。その25ケースの終局時の解析結果/試験結果の比率を整理したものを図に示す。 M - ϕ 関係を用いた場合と積層モデル1については、平均値ではほとんど同じで0.83程度であり、ひび割れ以降の引張強度を考慮した積層モデル2で0.90程度となっており、終局耐力については全体的に小さめに評価される結果となっている。

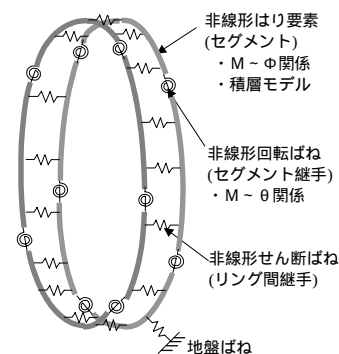


図-1 非線形構造解析モデル

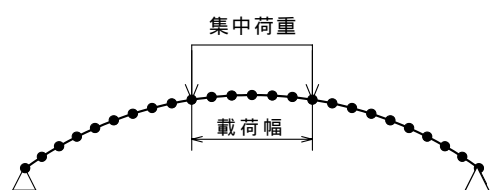
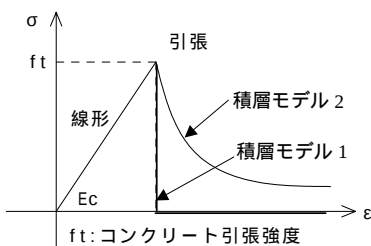
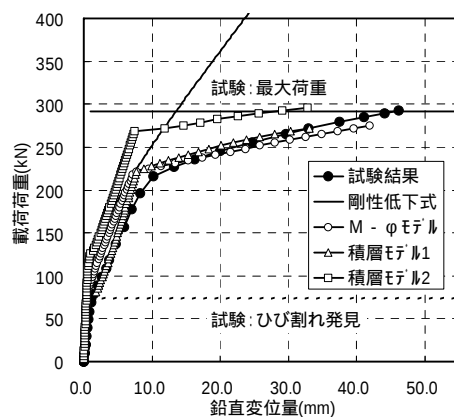


図-2 単体曲げ試験の解析モデル

図-3 積層モデルにおける引張領域の
応力 - ひずみ関係図-4 単体曲げ試験における荷重 - 変位
関係の比較

キーワード 都市トンネル、性能照査型設計、非線形解析手法

連絡先 〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3 東京電力株式会社 TEL: 03-4216-4204

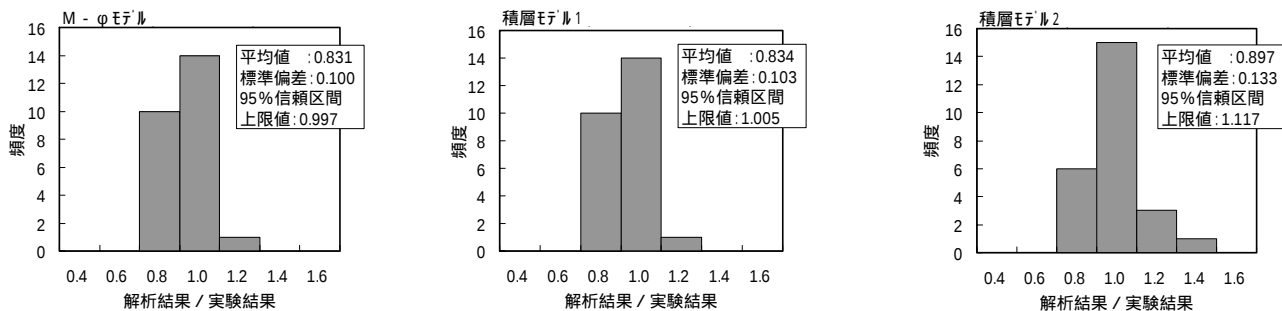


図-5 単体曲げ試験における終局耐力の比較(解析結果 / 試験結果)

3. 添接曲げ試験のシミュレーション解析

既往の添接曲げ試験をシミュレート解析し、試験における荷重 - 変位関係を比較し、非線形解析手法の適用性を検討した。試験体は中央セグメントに対して、その両側に幅 1/2 の添接セグメントを千鳥になるように配置した試験体であるが、解析モデルとして図-6 に示すような添接セグメントの剛性を 2 倍とし、リング継手のせん断ばね定数を 2 倍とした計算モデルを用いた。単体曲げ試験同様の非線形解析手法の比較検討を行った。このとき用いた軸力変動を考慮できる M - ϕ 関係の一例を図-7 に示す。解析時には任意の軸力に対して M - ϕ 関係を補間して用いた。また、セグメント継手の非線形回転ばねについては、村上・小泉により提案されている方法⁵⁾によるものを用いた。そのシミュレーション解析結果の一例を図-8 に示す。単体曲げ試験のシミュレーション解析結果同様、ひび割れ以降の引張強度を考慮した積層モデル 2 が試験結果を上回る傾向を示し、M - ϕ 関係を用いた場合及び積層モデル 1 の場合は、試験結果と良く一致する結果となった。

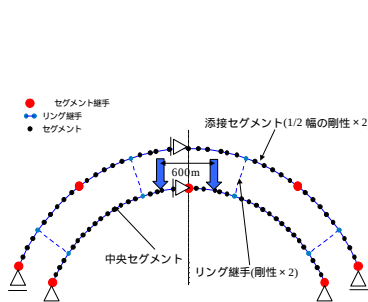


図-6 添接曲げ試験の解析モデル

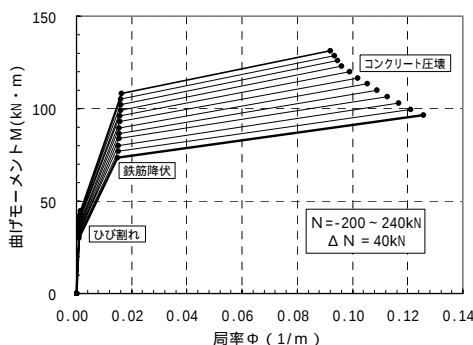
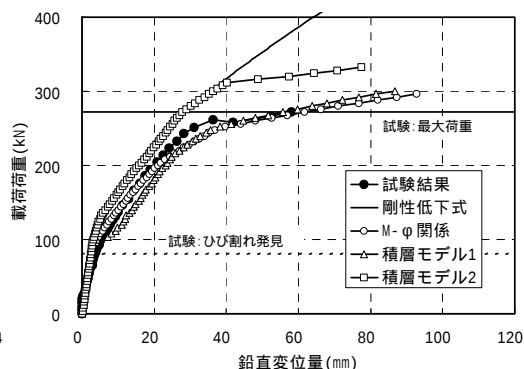
図-7 軸力変動を考慮できる M - ϕ 関係

図-8 単体曲げ試験における荷重 - 変位関係の比較

4. まとめ

既往の荷重試験のシミュレーション解析を行った結果、セグメント部材におけるひび割れ時、鉄筋降伏時及びコンクリート圧壊時の各状態を評価し、軸力変動を考慮できる M - ϕ 関係を用いた非線形解析手法は、性能照査型設計として十分適用可能な解析手法であることがわかった。しかし、積層モデルを用いた非線形手法では、コンクリートひび割れ後の引張強度を考慮しない場合はシミュレーション解析に見られるようにひび割れ後に引張応力の解放により変位が大きく現れる傾向があり、ひび割れ後のコンクリートの引張強度を考慮した場合では終局耐力を大きめに評価する傾向にある。そのため、セグメントような部材厚の小さい RC 構造物における引張領域でのひび割れ後の応力 - ひずみ関係の設定が今後の課題として残っている。

参考文献

- 1) 「シールドトンネルを対象とした性能照査型設計法のガイドライン」平成 15 年 6 月 社団法人 日本トンネル技術協会
- 2) 「コンクリート標準示方書 平成 8 年制定 耐震設計編」社団法人 土木学会、P 86
- 3) 「コンクリート標準示方書 2002 年制定 耐震性能照査編」社団法人 土木学会、p25
- 4) 「コンクリート標準示方書 2002 年制定 構造性能照査編」社団法人 土木学会
- 5) 村上・小泉：「セグメントの設計法に関する研究」昭和 54 年 2 月 早稲田大学学位論文