

地下鉄構造物の3次元解析における縦梁のモデル化に関する一考察

日建設計シビル 正会員 ○道谷 梓, 田辺 篤史, 西山 誠治

1. はじめに

地下鉄等の一般的な地下構造物は中柱と縦梁が接続されてスラブ、側壁とラーメン構造となっている(図-1参照)。上床版に作用する荷重は側壁や縦梁に伝達され、縦梁からはさらに中柱に流れていく。この為、荷重の中柱と側壁の分配の割合は縦梁の曲げ剛性による影響を受ける。さらに構造が非対称な場合や、地震力等の水平力が作用する場合には、荷重分配は曲げ剛性だけでなく、梁のねじり剛性の影響も受けることとなる。

近年、複雑な構造物の応答算出に3次元FEM解析が用いられる事例¹⁾²⁾が増えてきている。しかし、曲げ剛性等に比べてねじり剛性の取り扱いについてはさほど明確となっておらず、その影響についてあまり知られていない様である。前述した荷重分配に及ぼすねじり剛性の影響は、構造が複雑になればなるほど影響が大きくなりうるため、解析において梁のねじり剛性を適切に取り扱う必要がある。このほか、地下構造物の縦梁とスラブはその上端位置を一致させるため中立軸位置が異なる。この中立軸のずれ(オフセット)を剛梁等で考慮する方法はあるものの、取扱いが煩雑となり、実務上は考慮が困難である。そのため、オフセットの影響はしばしば無視されている。しかし、水平力が作用したり、荷重が偏心して作用したりする場合は、オフセットの影響が大きくなる可能性がある為、より精度よく構造物の応答算出を行う為にはオフセットを考慮するべきであると考えられる。

本報告では、FEM解析において縦梁のねじり剛性と中立軸オフセットを適切に取り扱う方法の把握を目的に、検討を実施した結果について述べる。

2. 各解析ソルバーの縦梁ねじり剛性の評価

縦梁のねじり剛性の解析検討においては単純な矩形断面梁をモデル化して検討した。パラメータは、梁断面のアスペクト比、解析コードと要素の定式化とした。アスペクト比は1:1と1:2の2種類とした。モデル化した梁の両端にミラー条件を設定して連続構造となる様にし、そのうちの一端は回転を固定した。回転を固定しなかった端部にモーメントを偶力として作用させて、載荷点の変位差からねじり剛性を逆算し相互比較を行った。

解析コードはCTC Soilplus/Dynamic, MSC Nastran, Simulia Abaqus/Standardの3種類とした。また、シェルの定式化はAbaqus/Standardにおいて完全積分要素(S4)、低減積分要素(S4R)、薄肉低減積分要素(S4R5)の3種類を用いた。また、比較にあたって、ソリッドモデルの他、梁の理論解と、薄板理論の理論解を用いた。なお、実構造を3次元でモデル化した場合、解析容量の関係から必ずしも細かい要素分割ができないことから、シェル要素では比較的簡易な要素分割として幅方向に2分割、軸方向に10分割とした。ソリッド要素は精度を確保できるように立方体となる様に幅方向に4分割、高さ方向に4分割または8分割、軸方向に20分割とした。

解析結果よりSt.Venantのねじり剛性 J を逆算し、梁の理論解で正規化したものを図-2に示す。解析コードによりいくらかばらつきがあるものの、シェルのねじり剛性は大体のFEM解析コードにおいて、梁のアスペクト比に寄らず十分適切に評価可能な精度であった。ただし、Abaqus/Standardはややズレが大きく、特にS4R5

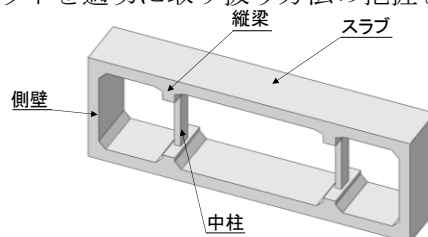


図-1 中柱構造による地下構造物の例

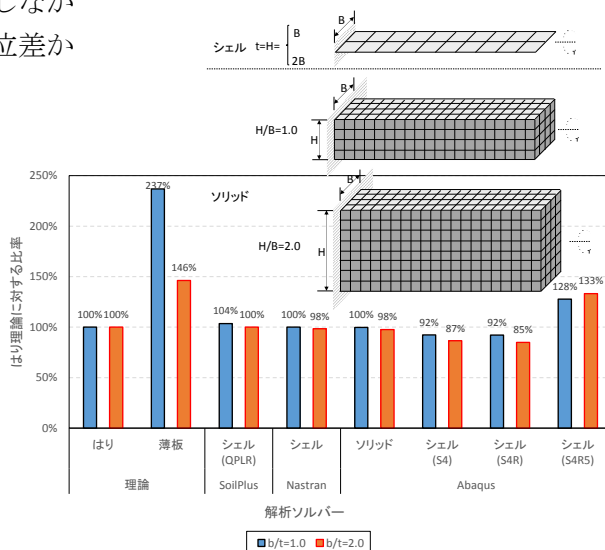


図-2 各解析ソルバーのねじり剛性の評価

キーワード 地下鉄構造物, ねじり剛性, 3次元解析, 要素定式化

連絡先 〒541-0054 大阪府大阪市中央区南本町3-6-14 (株)日建設計シビル TEL 06-6229-6372

(薄肉低減積分要素)ではねじり剛性を3割程度過大評価する結果となった。これは、ドリリング自由度を持たない薄肉要素により、要素の変形が正常に行われなかったと考えられる。なお、薄板の理論解にズレが大きく生じることも同様に薄肉要素の定式化による原因である。よってねじり剛性を適切に評価できない可能性があり、事前の確認が必要であることが分かった。

3. 縦梁の中立軸のモデル化の影響

中立軸オフセットについては、図-3に示す部材のモデルにより検討を行った。中立軸オフセットの概要については図-4に示す。検討においては、構造を忠実に再現できるソリッド要素によるモデルと、通常のシェル要素によるモデル、中立軸のオフセットによる剛性の増分を面外曲げ剛性に係数倍(本ケースでは $\alpha=1.75$ 倍)して考慮したモデルで相互比較を行った。死荷重による線形解析とし、対称載荷(図-3(a))と非対称載荷(図-3(b))の2種類の条件で実施した。境界条件については連続性を考慮する為、全辺にミラー条件を設定した。なお、ソリッドの分割は変形が忠実に表現できるように板厚方向に4分割としてアスペクト比が1:1になるように分割している為、比較的精度の高いモデル化としている。

各モデルの評価点A~Fでの鉛直変位を求め、それをもっとも現実に近いと考えられるソリッド要素での結果で正規化した結果を図-5に示す。対称載荷では比率が100%に近く、シェルとソリッドの結果がほとんど変わらない結果となった。一方で非対称載荷の場合は評価点C及びDでのたわみ比率が92.5%と他のケースに比べて若干差異が大き目となった。ここでオフセットを考慮すると比率は97%となり、差異が小さくなった。以上より、4%程度の誤差はあるものの対称載荷でも非対称載荷でもソリッドの結果と良く一致し、実用上は面外曲げ剛性を係数倍割増することでオフセットの影響を考慮できると考えられる。

また、各モデルの評価点E,Fの鉛直変位を求め、柱間帯を柱列帯で除することで、奥行き方向の3次元的效果(縦梁剛性の評価)の比較を行った。結果を図-6に示す。その結果、ソリッド要素では非対称載荷、対称載荷ともに8%となり、今回のような形状では8%程度の3次元的效果が発生することが分かる。シェル要素では若干たわみが小さめに評価されており、精度を高めたオフセット考慮ケースがさらに差異が大きくなっている。この原因については、今後検討する予定である。

4. まとめ

本報告では偏心荷重が作用する地下鉄構造物の3次元FEM解析における縦梁のねじり剛性と中立軸オフセットの考慮方法について検討した。その結果、縦梁部は適切なシェル要素を選定した上で、板厚を縦梁高さとし、かつ、中立軸オフセットを曲げ剛性への係数として考慮することで実用上十分な精度で解析可能であることを示した。

【参考文献】

- 1) 新井泰, 野城一栄, 村田修: 三次元解析による開削トンネル中柱の配置間隔に対する検討, 鉄道総研報告, Vol.12, No.9, 1998
- 2) 西山誠治, 新井泰, 村田修: 三次元解析による開削トンネルの常時および地震時断面力と二次元解析の適用に関する一考察, 第9回トンネル工学研究論文・報告集, 1999

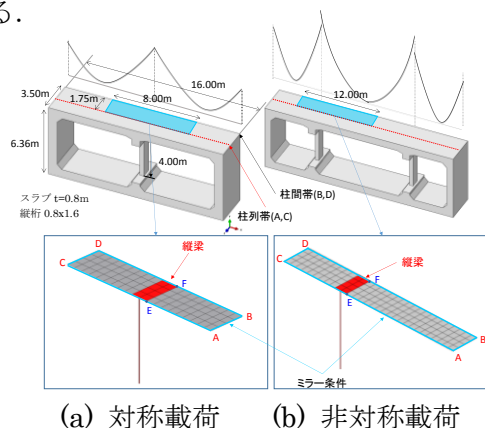


図-3 縦梁のモデル化の影響検討概要

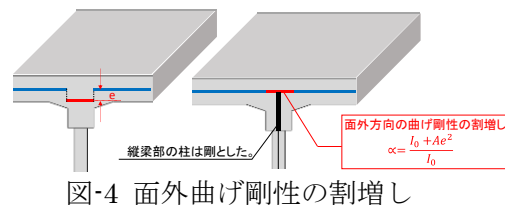


図-4 面外曲げ剛性の割増し

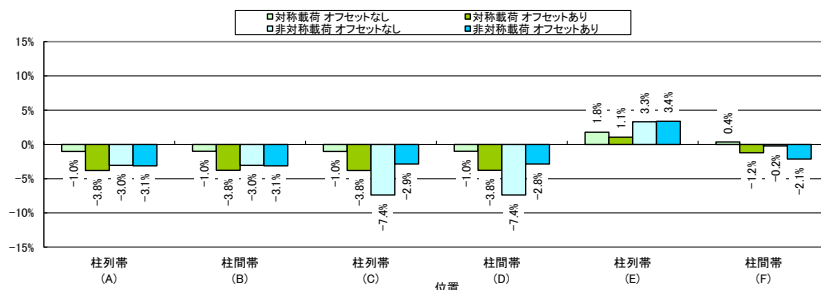


図-5 ソリッドモデルに対するシェルモデルのたわみの比率

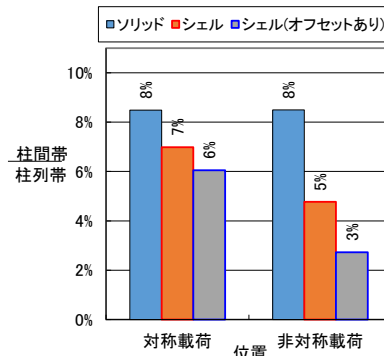


図-6 3次元的效果の比較