

地震力を考慮した浅い地下空洞の安定性評価に関する研究

九州大学工学部 正会員 江崎哲郎 蔣 宇静

学生員○秋山直樹 阿部浩二 末松史朗

1. はじめに

大都市では土地の有効利用という観点から、地下の利用が積極的に行われている。その例に地下鉄や地下街などがある。地下構造物は地表構造物に比して地震に対する安全性が高いと言われてきた。しかし、先年の阪神大震災において浅い地下空洞の一つである地下鉄トンネルが損壊し地表陥没を引き起こしたことから、地震時の地下空洞の安全が問われている。特に大都市を中心にして地下空間の利用がますます進められることを考えると、地下空洞における耐震性を考える必要がある。したがって、本研究では、浅い地下空洞を対象に地盤条件や空洞形状、深さを含めて地震力による安定性の変化及び支保工の設計を検討する。

2. 浅い地下空洞の安定性の検討

2.1 検討モデルの設定及び検討条件

浅い空洞の力学的挙動と安定性を数値解析を用いて検討する。解析の対象は、直径が10mの円形空洞とした。左右対称のため、解析は右半分について行った (Fig.1)。

地表まで浅所陥没を生じるような場合、大きな変形が伴うため、従来の微小変形理論に基づく有限要素解析法では表現できなくなる。そこで、本研究では大変形を表現しうる大変形差分解析法¹⁾(FLACコード)を用いることにする。地山は、Mohr-Coulombの破壊規準に従う完全弾塑性体で、また均質かつ連続体であるとし、その物性値は、ヤング率 E は 1.0×10^3 MPa、ポアソン比 ν は 0.3、内部摩擦角 ϕ は 30° 、単位体積重量 γ は 25 kN/m^3 とした。

空洞上方の塑性領域が地表に到達しない最小の粘着力を限界粘着力と定義し、土被り (H)、空洞直径 (D)、 ϕ と限界粘着力の関係を求めた上で、浅い地下空洞の安定性を検討する。 D による影響の検討では、 $H=5\text{m}$ で一定とし、 ϕ による影響の検討では、 $H=4\text{m}$ で一定とした。他の物性値は

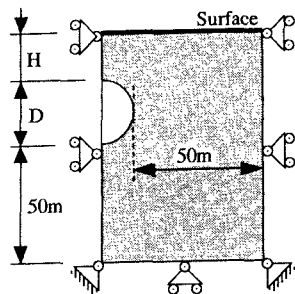


Fig. 1 Outline of the analysis area.

前述の物性値を用いた。

2.2 解析結果と考察

Fig.2に土被りと限界粘着力の関係を示す。土被りの増加に伴って限界粘着力は増加していくが、土被りが7m以上になるとその増加は緩やかになる。このこと

は、空洞天盤にかかる土圧が深さに比例して大きくなる一方、塑性領域が地表に到達しにくくなるためと考えられる。

Fig.3に空洞直径と限界粘着力の関係を、Fig.4に内部摩擦角と限界粘着力の関係を示す。二つの場合とも線形関係にあり、空洞直径が大きく、また内部摩擦角が低いほど浅い地下空洞の安定性は大きく低下することが分かる。

3. 地震時における浅い地下空洞の挙動

3.1 検討モデル

以上の数値解析の結果及び考察に基づき、地震力による地下空洞の安定性の変化を検討する。ここで地震時の限界粘着力と地震力を考慮しないときの限界粘着力の比を限界粘着力比と定義し検討に用いた。解析モデルと地盤の物性値は、2章と同じものを用いた。さらに、一般的な地下鉄の断面を対象とした幅9m、高さ6.36mの矩形空洞²⁾についても検討した。矩形断面では支保工を打設した解析も行った。その物性値は、厚さは40cm、圧縮強度は20MPa、ヤング率 E は 2.5×10^4 MPa、ポアソン比 ν は 0.167とした。地震力は直下型の地震を考慮鉛直下向きに作用させる。鉛直震度は、円形空洞の場合は0.4、矩形空洞の場合は0.2、0.4とした。

3.2 解析結果と考察

地震力を考慮した解析結果はFig.2～Fig.4に合わせて示す。土被りが3mと4mの限界粘着力比は1.7と1.5で土被りが5～10mの時と比べて30%程度大きくなる。一方、限界粘着力比は内部摩擦角と線形関係にあり、内部摩擦角が $20^\circ \sim 40^\circ$ で1.36～1.22と変化する。また、空洞直径が変化しても限界粘着力比は1.5前後で大きな変化は見られなかった。つまり、浅い空洞において土被りが小さいほど、また内部摩擦角が低いほど、空洞の地震時の安定性は大幅に低下することが分かる。

Fig.5に無支保矩形空洞において、地震力を考慮したことによる塑性領域の発達を示す。ここで入力データとして、粘着力は0.24MPa、 $H=5\text{m}$ 、 $\phi=30^\circ$ とした。浅い空洞において、まず空洞天盤において引張破壊が生じ、その後地表に向かって塑性領域が大きく発達していくことと、地震力により空洞天盤の最大沈下は1.1mから1.6m以上と大きくなる事が分かる。

Fig.6は支保工が打設された矩形空洞で、鉛直震度を0, 0.2, 0.4としたときの支保工に発生するモーメントの分布図を示す。隅部にモーメントの集中が起こることが分かり、鉛直震度0.4を加えると最大モーメントは1.64倍に増加する。Fig.7に各鉛直震度における空洞の中柱及び側壁にかかる最大軸応力を示す、ここで、中柱は断面及び奥行き方向

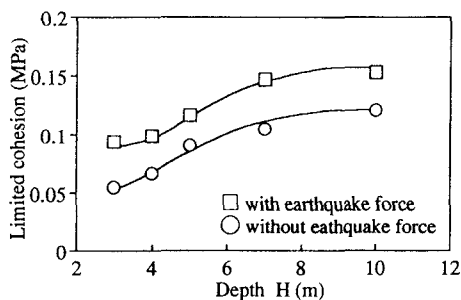


Fig. 2 Relation of depth and limited cohesion.

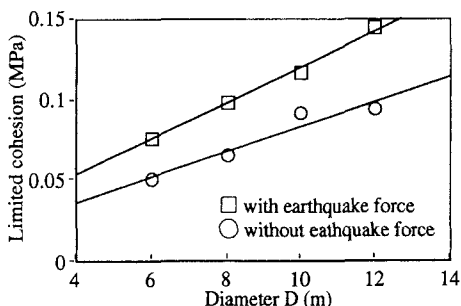


Fig. 3 Relation of diameter and limited cohesion.

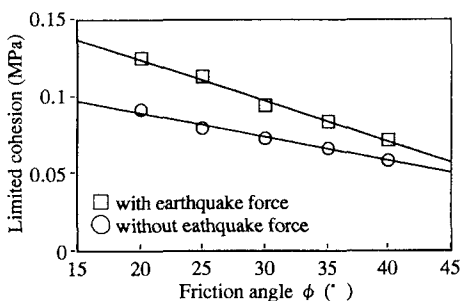


Fig. 4 Relation of friction angle and limited cohesion.

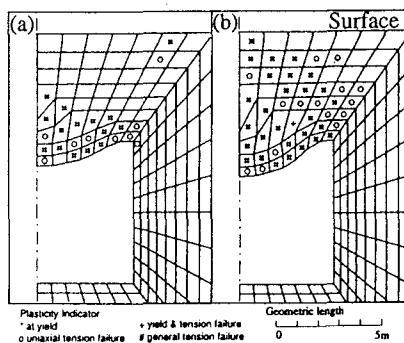


Fig. 5 Plastic zones around a rectangle opening, vertical seismic coefficient is (a) 0, (b) 0.4, respectively.

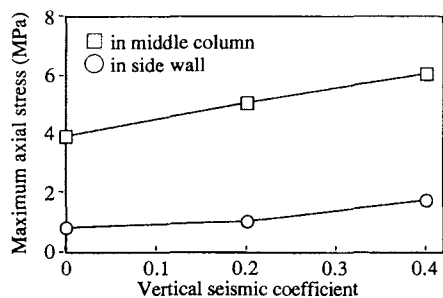


Fig. 7 Relation of vertical seismic coefficient and maximum axial stress in middle column and in side wall.

の厚さはそれぞれ40cmと60cmで2.5m間隔にあるものとして軸力を軸応力に換算した。中柱に大きな軸応力が作用し、また鉛直震度0.4を加えると、最大軸応力は中柱で1.5倍、側壁で2.1倍と急増し、特に中柱では圧縮強度に対する安全率は大きく低下することが分かる。

4. おわりに

本研究での解析結果から、浅い地下空洞の地震時の安定性は、土被りと内部摩擦角に大きく支配され、特に土被りが3m~4mと極めて小さい場合、著しく低下することが分かる。また、矩形断面においては、隅部に大きなモーメントが集中し、中柱に大きな軸応力が発生するため、支保工の設計においてこれらを考慮する必要があると考えられる。

今後は、地震力による影響を更に検討し、浅い地下空洞の耐震設計についての提案をしてゆきたい。

参考文献

- 1) 中川光雄・蔭宇静・江崎哲郎・阿部浩二：軟岩トンネルにおける大変形解析法の適用について、第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.515~519，1995。
- 2) 大西有三・田中誠・嶋村貞夫・中山学：阪神・淡路大震災における地下構造物の被害事例，地下空間利用シンポジウム1995，pp.71~76，1995。

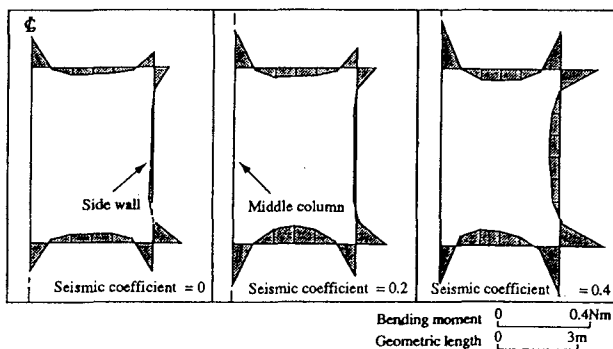


Fig. 6 Distribution of bending moment on lining of rectangle tunnels.