

I-7 トンネル中柱端部の境界条件が中柱の破壊形態に及ぼす影響

○徳島大学大学院 学生会員 森西由記
 徳島大学工学部 正会員 三神 厚
 徳島大学工学部 正会員 澤田 勉

1. はじめに

開削トンネルの地震被害を防ぐために、中柱に免震装置を設置する方法がある^{例えは 1) 2) 3)}。免震装置は中柱の地震時増分断面力を低減させる効果や、中柱の破壊形態を改善させる効果があるが、それらの効果について定量的な検討はされていない。そこで、本研究では免震装置が中柱の破壊形態の変化に及ぼす影響を検討し、それを通して破壊形態の変化を簡便な図を用いて表現することを試みる。その際、免震装置そのものを組み込んだ解析を行うと計算が煩雑となるため、本研究では免震装置の効果を中柱の境界条件として理想化して検討を行い、免震装置の性能に反映させることとした。

2. 解析条件

まず、中柱の境界条件の設定について述べる。図-1のように、中柱上端と頂版を、長さ0の回転ばね K_θ および水平ばね K_v で接続する。これらのばねと、中柱端部の回転剛性 $K_{\theta 0}$ および水平剛性 K_{v0} との比を次式のように表す。これらの無次元パラメータ α および β が、中柱の破壊形態に及ぼす影響を検討する。

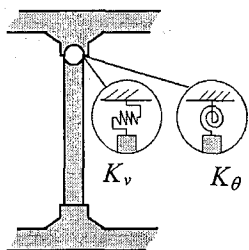
$$\alpha = \frac{K_v}{K_{v0}} \quad \beta = \frac{K_\theta}{K_{\theta 0}} \quad \dots (1)$$

トンネル中柱の破壊形態を解析するにあたっては、単位奥行きを梁要素にモデル化し、躯体を図-2のように支持し、頂版に集中荷重を作用させてプッシュオーバー解析を行った。鉄筋コンクリート部材の非線形性は、ひび割れ、降伏および終局点を有するトリリニア型でモデル化した。ただし、曲げ終局後は断面を塑性ヒンジとして扱った。破壊形態を判定する際は、Priestley⁴⁾の提案するせん断耐力を用いた。

3. 破壊形態の判定図

ここでは多くのトンネルの破壊形態を解析し、整理することで、破壊形態を簡易に予測するための図を作成する。解析対象として、表-1のようなトンネルを仮定した。中柱の断面形状は、それぞれの条件における常時軸応力がコンクリートの設計曲げ圧縮強度の40%程度となるように設定した。帯鉄筋については解析のバリエーションを持たせるため、各中柱に4ケース $\phi 9@350\text{mm}$, $D13@250\text{mm}$, $D13@150\text{mm}$, $D13@100\text{mm}$ の帯鉄筋配置を仮定し、それぞれのケースで破壊の判定を行った。また、コンクリートおよび鉄筋の強度について、コンクリートの設計基準強度は 21N/mm^2 、鉄筋の降伏強度は 295N/mm^2 とした。

解析の結果を、せん断スパン比 c 、軸方向鉄筋比 ρ_{sl} および帯鉄筋比 ρ_h を用いて図-3のように整理した。曲げ破壊領域とせん断破壊領域の境界式は $(c \cdot \rho_h) = 4.03\rho_{sl} + 2.90$ であると予測される。



$$K_{v0} = \frac{P_0}{\delta_0} \approx \frac{12EI}{L^3}$$

$$K_{\theta 0} = \frac{M_0}{\theta_0} \approx \frac{4EI}{L}$$

図-1 境界条件の設定

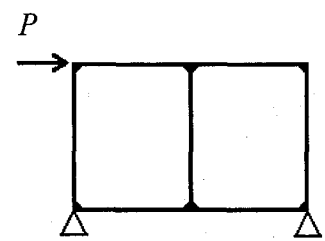


図-2 荷重モデル

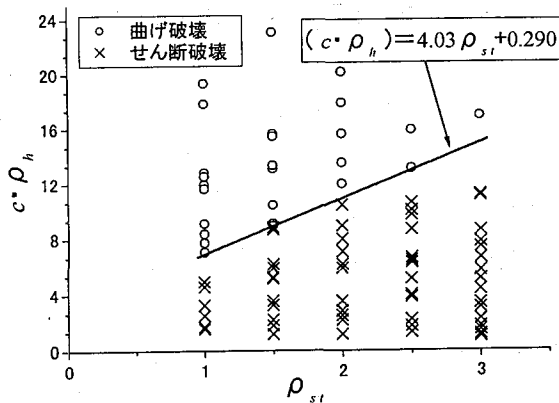


図-3 破壊形態の判定図

表-1 解析に用いたトンネルの諸元

CASE	土かぶり (mm)	高さ (mm)	幅 (mm)	頂版厚 (mm)	床版厚 (mm)	側壁厚 (mm)	中柱形状 および間隔	ρ_{st} (%)
1	1250	4750	9000	350	400	350	350 × 500@2500	1.0
2	2250	4900	9200	400	500	450	400 × 500@2500	1.5
3	3250	4950	9200	450	500	450	400 × 500@2500	2.0
4	4000	5050	9200	500	550	450	400 × 600@2500	2.5
5	1250	5800	9100	350	450	400	350 × 500@2500	1.0
6	2250	6000	9300	450	550	500	350 × 500@2500	1.5
7	3250	6000	9300	450	550	500	400 × 500@2500	2.0
8	4500	6100	9400	500	600	550	400 × 600@2500	3.0
9	2250	5050	11100	500	550	400	400 × 600@2500	1.5
10	3750	5250	11300	600	650	500	400 × 800@2500	2.5
11	4500	5350	11400	650	700	550	450 × 800@2500	3.0
12	1750	5550	12200	500	550	450	400 × 1000@3500	1.5
13	3000	5750	12400	600	650	550	400 × 1000@3500	2.0
14	4000	6150	10400	550	600	550	400 × 1000@3500	2.5
15	3250	5500	9300	450	550	500	400 × 500@2500	2.0
16	1500	5450	11200	450	500	450	400 × 600@2500	1.5
17	1000	5050	12100	500	550	400	400 × 600@2500	1.0
18	1250	6050	13200	500	550	450	400 × 800@2500	1.0
19	3500	5550	9300	500	550	500	400 × 500@2500	2.5
20	4250	5450	12400	700	750	550	400 × 1000@2500	3.0
21	4250	5850	11400	650	700	550	400 × 800@2500	3.0

4. 境界条件による影響

ここではまず、中柱端部の境界条件の変化が中柱の断面力分布に及ぼす影響について考察する。中柱境界のばねは式(2)のように書けるため、これを利用して中柱の断面力分布が図-4(a)のように得られる。

$$K_{\theta} = \frac{4EI}{L} \alpha \quad K_v = \frac{12EI}{L^3} \beta \quad \dots(2)$$

図-4(a)を利用すれば、中柱の基部断面降伏するときの断面力図は降伏曲げモーメント M_y を用いて図-4(b)のように書ける。この図を見ると、中柱のせん断スパン長が α によって変化し、断面降伏時に作用するせん断力が変化することがわかる。せん断スパン長の変化率 Δ を次式(3)のようにおく。

$$\Delta = \frac{(4\alpha + 2)}{(4\alpha + 1)} \quad \dots(3)$$

このせん断スパン長の変化率 Δ は、図-3と関連付けができる。図-3では、破壊形態の判定にせん断スパン比が用いられた。したがって、境界条件を変化させたときの座標は、原位置の縦軸の値を Δ 倍シフトさせることで得られる。シフトさせたことにより原位置でせん断破壊領域にある点が、曲げ破壊領域に移行すれば、破壊形態は改善される。すなわち、剛性比 α を減少させることにより、中柱の破壊形態がせん断破壊型から曲げ破壊型へ移行する。

5. まとめ

本研究では多くのトンネルを解析することにより、中柱のせん断スパン比、軸方向鉄筋比および帯鉄筋量を用いて中柱の破壊形態を予測する指標を作成し、その指標を境界条件と関連付けることによって、破壊形態の変化を簡易に予測する方法を提案した。

参考文献

- 金子, 鈴木他: 高軸力をうける地下構造物中柱用の免震装置, 第2回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.319-324, 2000.
- 中村, 栗本他: ボックスカルパートの中柱上端スライダ化の効果, 第2回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.325-330, 2000.
- 三神, 小長井他: トンネル中柱の免震装置形状と各自由度における剛性の関係, 土木学会論文集No.682/I-56, pp.415-420, 2001.
- M.J.Nigel Priestley, Ravindra Verma and Yan Xiao: Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Columns, ASCE Journal of Structural Engineering, vol.120, No.8, August, pp.2310-2329, 1994.

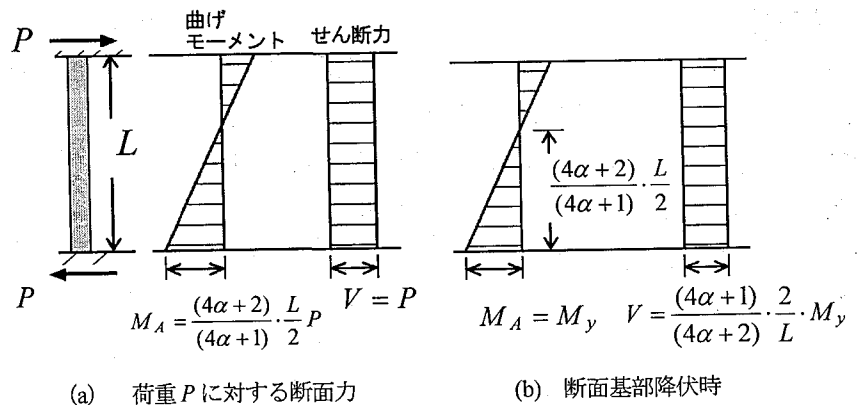


図-4 境界条件と断面力図