

2-Arch 터널의 중앙벽체에 작용하는 하중산정

The Evaluation of the Loads Acting on the Pillar in Two-Arch Tunnel

도종남*
Do, Jong-Nam

오규철**
Oh, Gyoo-Chul

천병식***
Chun, Byung-Sik

ABSTRACT

In this study, Matsuda's formula, which has been used to evaluate the acting load on the concrete pillar in 2-Arch tunnels, is investigated and a load reduction factor (α), which has been estimated from numerical parametric studies, is proposed for a better design of 2-Arch tunnels in the future.

Numerical parametric studies show that the concrete pillar is subjected to a stress concentration on the excavation side during the first tunnel driving and when tunnel excavation is completed, the induced stress on the pillar in a poor quality of ground condition is 1.5 to 1.8 times the stress developed during the first tunnel driving. In addition, the numerical studies indicate that the acting load on the pillar is in the range of 14 ~ 83% of the load estimated by Matsuda's formula. From these results, a load reduction factor (α) is determined and it would make 2-Arch tunnel design more economically.

국문요약

본 연구에서는 2-Arch 터널의 중앙벽체에 작용하는 하중 산정에 사용되는 Matsuda의 제안식을 검토하고, 현장 지반조건에 적절히 적용될 수 있도록 수치해석을 통하여 제안식에 적절한 계수를 적용하여 작용하중을 재산정 함으로써 경제성 있는 설계가 되도록 하였다.

수치해석 결과, 중앙벽체 시공 후 선행터널 굴착에 의해 중앙벽체는 편측으로 응력이 집중되는 현상을 보였으며 선행터널굴착시/후행터널굴착시의 중앙벽체 응력을 비교한 결과 암반이 불량한 경우 최대 86.5%의 응력이 불균등하게 국부적으로 발현되었다. 주변지반의 특성에 따른 중앙벽체 작용하중을 수치해석으로 검토한 결과 제안식에 비해 14~83%의 하중이 감소되었으며, 이를 바탕으로 하중감소계수(α)를 산정하였다. 향후 2-Arch 터널 설계 시 하중감소계수(α)를 적용하면 2-Arch 터널 중앙벽체 구조물의 과다 설계를 피하고 안정성 및 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

* 한양대학교 대학원 토목공학과 석박사과정, 정회원

** 경남기업(주) 과장, 비회원

*** 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, 정회원

E-mail : hengdang@unitel.co.kr

TEL : (02)2220-0326 FAX : (02)2281-0378

1. 서론

최근 터널건설은 환경 친화적으로 지하공간 활용을 극대화하는 방향으로 발전해 가면서 교통의 편리성, 토지이용 효율의 극대화를 위한 복잡하고 다양한 형태로 추진되고 있다. 특히 2-Arch 터널은 개착공법 적용이 어려운 도심지 지하철 정거장 및 산악 지역의 환경훼손 저감과 선형이 분리되지 않고 용지폭이 제한된 도로터널에 시공되고 있으며 향후 환경 및 시공조건을 예상할 때 적용이 늘어날 전망이다. 2-Arch 터널은 이격거리가 매우 짧은 병렬터널로 볼 수 있으며 이로 인해 충분한 이격거리를 확보한 터널과 달리 굴착 시 터널상호간에 미치는 영향이 크다(왕이완, 2001). 터널형상에 있어서도 2-Arch 터널은 일반적인 병렬터널에 비해 중앙 상부의 안정성이 취약하므로 벽체를 설치하여 구조적 안정성을 확보하는 형태를 보인다. 특히 2-Arch 터널은 다른 터널과 달리 중앙벽체의 설계가 매우 중요함에도 불구하고 이에 대한 뚜렷한 설계 방법이 없으며 Matsuda가 제안한 식에 의존하여 작용하중을 산정하고 지보패턴을 결정하고 있다. Matsuda의 제안식은 불량한 지반에서는 매우 적합하지만 지반상태가 양호할 경우 2-Arch 터널 중앙벽체에 작용하는 하중이 지나치게 보수적으로 산정된다는 한계점을 가지고 있어 지반상태가 대체적으로 양호한 경우에는 적용이 불합리하다고 판단된다(박동욱, 2003).

본 연구의 목적은 2-Arch 터널의 중앙벽체 설계하중 산정에 사용되는 Matsuda의 제안식에 대하여 검토해 보고 Matsuda의 제안식이 가지는 문제점을 분석하여 보다 실용적으로 실제 설계에 반영할 수 있도록 수치해석을 통해 고찰하는 것이다.

2. 2-Arch 터널의 시공순서 고찰

2-Arch 터널은 시공중 발생하는 응력변화를 최대한 억제하고 이를 적절하게 분배하면서 시공하여야 안정성을 기할 수 있는 구조체이므로 터널시공은 그림 1과 같이 통상 응력이 집중되는 중앙부 터널을 시공한 후 좌·우측 터널을 시공하고 마지막으로 라이닝을 타설하게 된다. 굴착방법은 지반이 극히 불량할 경우를 제외하고는 중앙 터널은 전단면으로, 좌·우측 터널은 상하반단면 분할굴착으로 시공하도록 계획하였다.

따라서 본 연구에서는 터널의 시공순서에 맞춰 터널을 모델링하고 수치해석을 수행하였으며 터널 굴착에 따른 중앙벽체의 거동을 분석하고 중앙벽체에 작용하는 하중을 산정하고 Matsuda(1997)의 제안식과 비교하여 발생하는 응력의 차이를 통해 하중감소계수를 산정하고 이를 중앙벽체의 단면설계에 반영하였다.

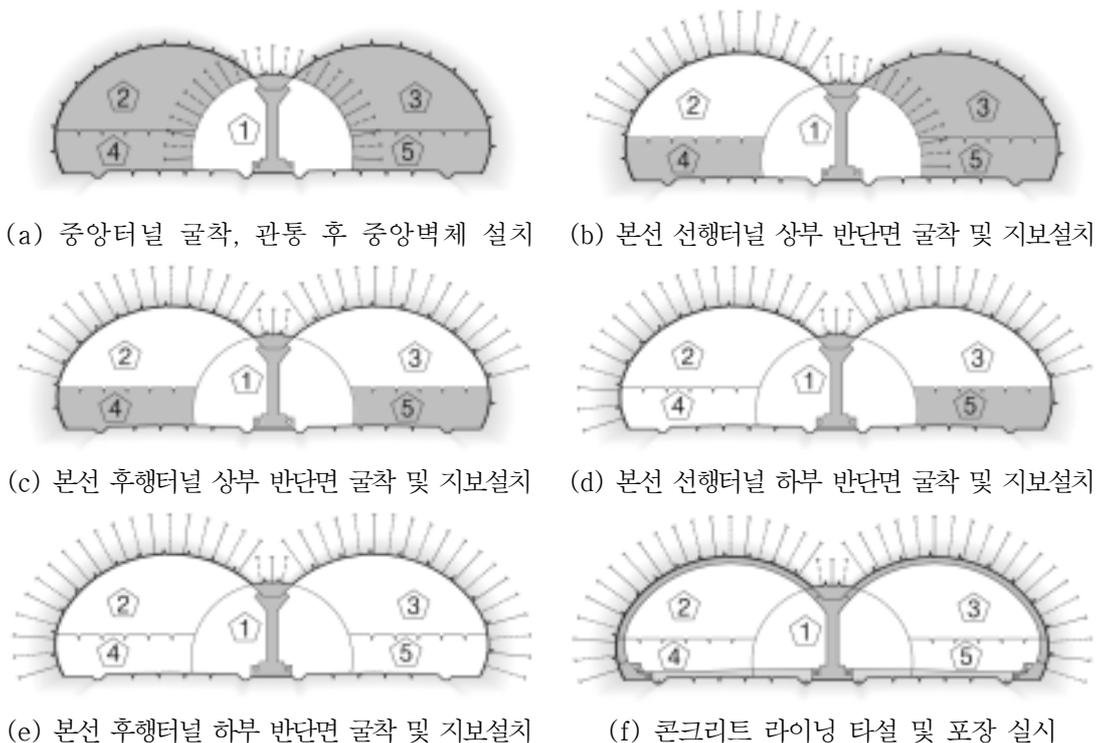


그림 1. 2-Arch 터널의 시공순서(경남기업, 2006)

3. Matsuda(1998)의 제안식 고찰

일본의 경우, 계측 및 해석자료를 바탕으로 그림 2와 같이 하중작용 폭과 높이를 기준으로 설계하중을 산정하여 벽체두께를 결정하고 하부지반의 지지력을 파악하여 기초폭을 결정함으로써 중앙벽체의 중요성을 감안한 설계를 시행하고 있다(M. Kamimura, 1997).

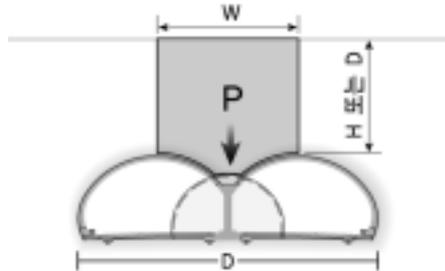


그림 2. 2-Arch 터널 중앙벽체에 작용하는 하중(T. Matsuda, 1998)

Matsuda(1998)는 중앙벽체에 작용하는 하중(P)는 토피(H)가 터널폭(D)보다 큰 경우 식(1), 토피(H)가 터널폭(D)보다 작은 경우는 식(2)와 같다.

$$P = \gamma \cdot D \cdot W \quad (1)$$

$$P = \gamma \cdot H \cdot W \quad (2)$$

여기서, W : 중앙벽체에 작용하는 하중의 폭은 양측 터널 중심선사이 거리(m)

γ : 지반의 단위중량(kN/m³)

Matsuda(1998)는 계측 및 해석자료를 바탕으로 중앙벽체에 작용하는 하중을 식 (1), (2)와 같이 제안하였으나 이는 불량한 지반에 국한된다. 지반 상태가 양호한 경우 중앙벽체의 설계가 과다하게 산정되는 결과를 초래하며 경제적으로도 불합리한 결과를 가져온다(E. Soliman 등, 1993). 따라서 본 연구에서는 암반등급별 연속체 해석을 통해 산정된 중앙벽체의 변위를 하중으로 변환하여 중앙벽체에 작용하는 단면력과 Matsuda(1998)의 제안식으로 산정된 하중에 의한 단면력을 비교하였다. 그리고 중앙터널의 벽체부분에 작용하는 하중을 합리적으로 평가하고 시공 시 경제성을 높이기 위해 지반등급에 적절한 하중감소계수 α 값을 산정한 후 Matsuda식에 적용하여 중앙벽체 구조검토 시 간편하게 활용할 수 있도록 하였다.

4. 수치해석 물성치

4.1 해석 적용지반 물성치

본 연구의 대상구간의 지질특성을 파악하기 위해 수평시추를 포함한 시추조사와 물리탐사(전기비저항, 탄성과 속도 등)를 수행하였다. 그 결과 기반암은 노출 시 풍화에 민감한 경향을 나타내는 흑운모 편마암 및 우백질 화강암편마암으로 이루어져 있으며 터널의 암반등급은 II, III, IV등급으로서 비교적 양호한 암반이 존재하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 터널구간의 암반등급에 국한된 해석을 하지 않고 추가적으로 I, V등급에 대한 중앙벽체의 거동특성도 파악하여 암반 특성치에 따른 해석결과를 도출하고자 하였다. 표 1은 본 연구에서 사용된 적용지반의 물성치를 나타낸 것이다.

표 1. 해석 적용지반의 물성치 (이상덕 등, 2003)

구 분	변형계수(MPa)	단위중량(kN/m ³)	접착력(kPa)	내부마찰각(°)	포아송비
GT-I	2.5×10 ⁴	26.2	3,500	45	0.21
GT-II	1.13×10 ⁴	25.5	1,100	42	0.23
GT-III	6.3×10 ³	24.5	650	37	0.25
GT-IV	1.5×10 ³	22.5	200	35	0.26
GT-V	9.0×10 ²	21.6	80	33	0.28

4.2 해석 적용 지보패턴 및 지보재

본 연구에서 적용된 지보재 물성치는 표 2와 같고 지보패턴별 슛크리트 적용 두께 및 단면적은 표 3과 같이 선행터널의 응력집중을 분산시키기 위해서 선행터널과 후행터널의 지보 패턴을 이원화하여 적용했다는 것이다.

표 2. 해석 적용 지보재 물성치

구 분	탄성계수(MPa)	단위중량(kN/m ³)	포아송비	단면적(m ²)
Shotcrete	연 성	5×10 ³	24	0.167
	강 성	1.5×10 ⁴	24	0.167
Rockbolt	2.1×10 ⁵	78	-	4.9×10 ⁻⁴
중앙벽체	2.3×10 ⁴	25	0.167	8.0×10 ⁻¹

표 3. 지보패턴별 슛크리트 적용 두께 및 단면적

구 분	두께(cm)			단면적(m ²)		
	선행터널	후행터널	중앙터널	선행터널	후행터널	중앙터널
Type-1	8	5	5	0.08	0.05	0.05
Type-2	12	8	5	0.12	0.08	0.05
Type-3	16	12	8	0.16	0.12	0.08
Type-4	20	16	12	0.20	0.16	0.12
Type-5	24	20	15	0.24	0.20	0.15

5. 해석결과 및 분석

5.1 Matsuda 제안식에 의한 하중산정

1998년 Matsuda는 2-Arch 터널의 중앙 벽체에 작용하는 하중을 그림 2와 같이 하중작용 폭과 높이를 기준으로 계측 및 해석결과를 바탕으로 제안하였다. 제안식을 사용하여 토피고와 암반등급에 따른 중앙벽체의 작용하중을 산정하고 중앙벽체 응력을 정리하면 표 4와 같다.

표 4. Matsuda 제안식에 의한 중앙벽체 작용하중 및 응력

구 분	중앙벽체 작용하중(MN)	중앙벽체 두께(m)	중앙벽체압축응력(MPa)	비 고
GT-I	H=10m	0.8	5.46	$\gamma=26.2\text{kn/m}^3$ W=14.34m D≒30m
	H=20m		10.71	
	H=30m		15.95	
GT-II	H=10m		5.33	$\gamma=25.5\text{kn/m}^3$ W=14.34m D≒30m
	H=20m		10.44	
	H=30m		15.56	
GT-III	H=10m		5.14	$\gamma=24.5\text{kn/m}^3$ W=14.34m D≒30m
	H=20m		10.06	
	H=30m		14.99	
GT-IV	H=10m	4.81	$\gamma=22.5\text{kn/m}^3$ W=14.34m D≒30m	
	H=20m	9.40		
	H=30m	13.98		
GT-V	H=10m	4.67	$\gamma=21.6\text{kn/m}^3$ W=14.34m D≒30m	
	H=20m	9.12		
	H=30m	13.57		

*H<D 일때 P= $\gamma \times H \times W$, H>D 일때 P= $\gamma \times D \times W$

5.2 터널굴착시 지반과 구조물의 상호작용에 의한 중앙벽체 거동 분석

Matsuda의 제안식으로 구한 중앙벽체에 작용하는 하중은 터널 시공에 따른 지반거동을 반영하지 못하며 암반등급이 양호한 지반에서 작용하중이 오히려 과다하게 산출되는 문제점이 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 연속체 해석을 통해 주변지반의 특성과 토피고에 따른 중앙벽체의 하중변화를 분석하고 이를 구조물 해석에 적용하여 중앙벽체에 작용하는 하중을 합리적으로 산정하였다.

5.2.1 토피고 및 암반등급에 따른 수치해석에 의한 중앙벽체 거동분석 결과

토피고 10m, 20m, 30m인 경우 암반등급에 따라 중앙벽체에 작용하는 응력은 그림 3, 5, 7과 같이 암반등급이 양호할수록 Matsuda의 제안식과 선행터널굴착시, 후행터널굴착시의 차이가 크며, Matsuda의 제안식 결과값을 적용할 시 과다설계가 될 수 있음을 알 수 있다. 그리고 중앙벽체에 작용하는 응력을 [선행터널굴착시/후행터널굴착시]로 산정하면 암반등급이 양호할수록 후행터널 굴착시 중앙벽체에 작용하는 응력이 커짐을 알 수 있다.

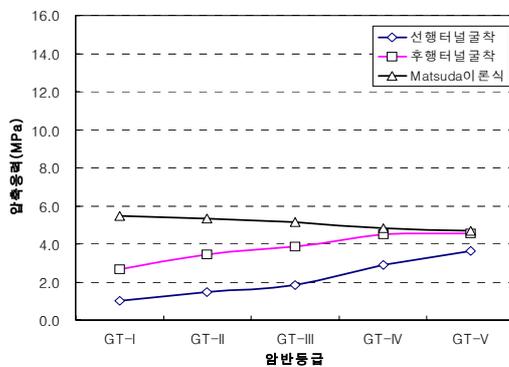


그림 3. 압축응력 비교(토피고 10m)

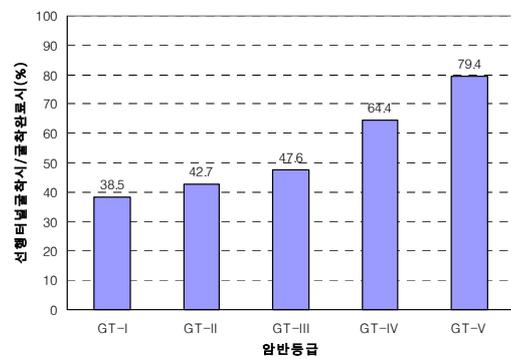


그림 4. 벽체응력 비교(토피고 10m)

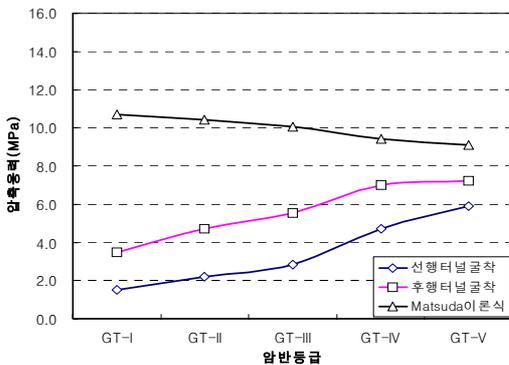


그림 5. 압축응력 비교(토피고 20m)

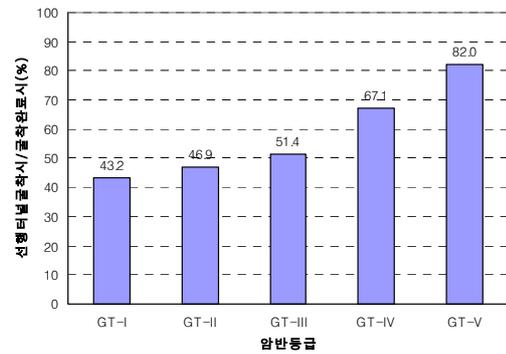


그림 6. 벽체응력 비교(토피고 20m)

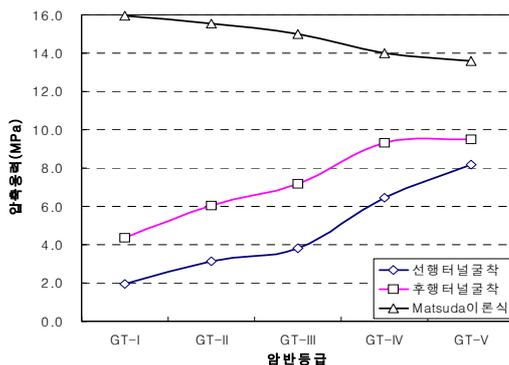


그림 7. 압축응력 비교(토피고 30m)



그림 8. 벽체응력 비교(토피고 30m)

5.3 구조 해석에 의한 중앙벽체의 거동분석

2-Arch터널 굴착 시 암반등급에 따른 중앙벽체 작용하중을 지반+ 구조물의 수치해석을 통해 검토하였으나, 지반과 구조물 모델링 시 구성 모델이 달라 인접하는 부분에서의 인터페이스에 따른 영향으로 국부적인 하중집중을 나타내어 객관적인 판단자료로서 부적합하게 된다. 이러한 영향을 최소화 하기위해 수치해석에서 구한 중앙벽체의 변위량을 구조해석에 적용하여 중앙벽체에 작용하는 응력을 분석하였다.

5.3.1 토피고 및 암반등급에 따른 구조해석 결과 중앙벽체 거동

토피고 10m, 20m, 30m인 경우 암반등급에 따라 중앙벽체에 작용하는 응력은 그림 9~11과 같이 암반등급이 양호할수록 Matsuda의 제안식과 선행터널굴착시, 후행터널굴착시의 차이가 크며, Matsuda의 제안식 결과값을 적용할 시 과다설계가 될 수 있음을 알 수 있다.

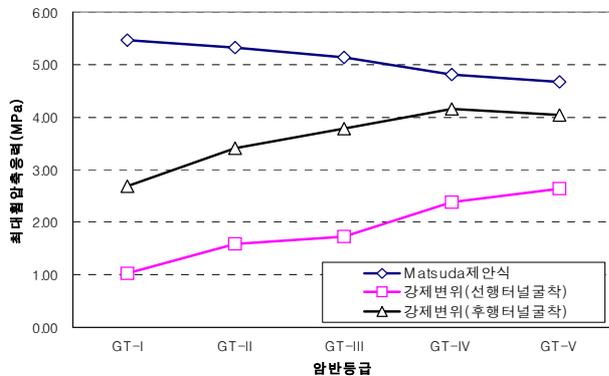


그림 9. 중앙벽체 최대압축응력(토피고 10m)

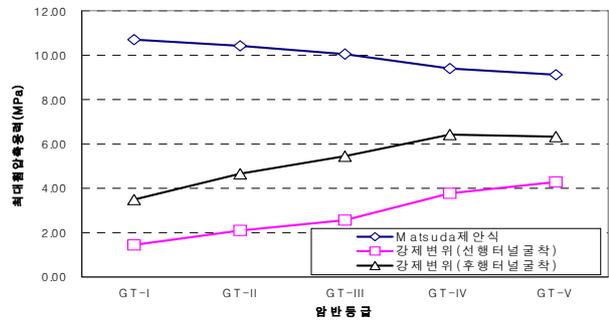


그림 10. 중앙벽체 최대압축응력(토피고 20m)

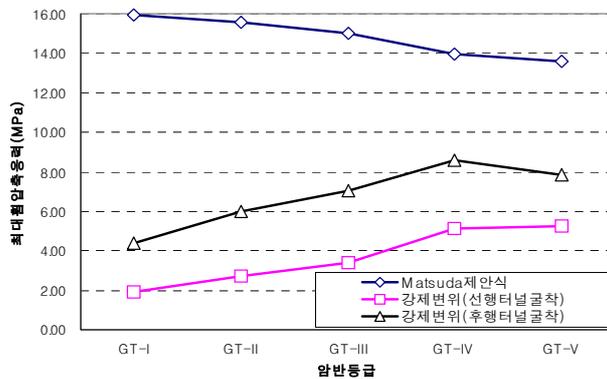


그림 11. 중앙벽체 최대압축응력 비교(토피고 30m)

5.4 하중감소계수의 산정

지반+ 구조물해석 결과는 구성 모델에 의한 국부적인 응력집중으로 인해 객관적인 근거로써 부족하다고 판단되어 배제하고 강제변위에 의한 결과와 제안식을 조합하여 하중감소계수(α)를 제안하였다. 이로써 암반등급별 토피고에 따른 하중감소계수(α)를 Matsuda의 제안식에 적용하여 지반+ 구조물의 상호거동을 과다하지 않고 지반의 특성을 잘 반영한 중앙벽체 작용하중을 간략한 식으로 구할 수 있도록 하였다. 토피고에 따른 하중감소계수(α)를 정리하면 표 5와 같다.

표 5. 하중감소계수(α)의 산정

암반등급	토피고	중앙벽체 압축응력(MPa)			감소계수(α)
		Matsuda 제안식	지반+ 구조물해석	강제변위법	
GT- I	10m	5.46	2.66	2.69	0.49
	20m	10.71	3.46	3.48	0.32
	30m	15.95	4.37	4.38	0.27
GT- II	10m	5.33	3.45	3.42	0.64
	20m	10.44	4.72	4.66	0.45
	30m	15.56	6.04	5.97	0.38
GT-III	10m	5.14	3.86	3.79	0.74
	20m	10.06	5.54	5.42	0.54
	30m	14.99	7.19	7.05	0.47
GT-IV	10m	4.81	4.52	4.15	0.86
	20m	9.40	7.00	6.40	0.68
	30m	13.98	9.34	8.56	0.61
GT- V	10m	4.67	4.57	4.03	0.86
	20m	9.12	7.21	6.33	0.69
	30m	13.57	9.49	7.84	0.58

5.5 암반등급에 따른 하중감소계수 제안

암반등급 및 토피고에 따른 하중감소계수는 그림 12와 같으며 토피고와 지반특성을 알면 추세선을 통해 하중감소계수를 찾고, 이를 제안식에 적용해 중앙벽체에 작용하는 하중을 간략히 산정할 수 있다.

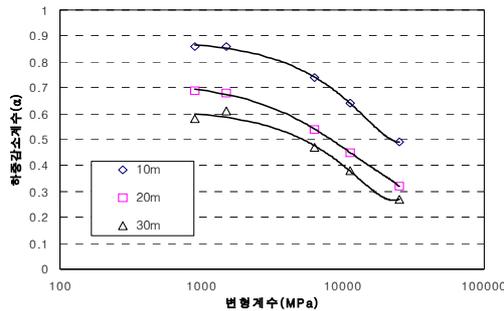


그림 12. 하중감소계수 변화 추이

6. 결론

본 연구에서는 불량한 지반에 국한된 Matsuda의 제안식을 양호한 지반에서도 적용이 가능하도록 연속체 해석을 수행하여 암반등급에 따른 하중감소계수(α)를 제안하였으며 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 토피고 및 암반등급에 따라 중앙벽체에 작용하는 하중을 선행터널굴착, 후행터널굴착 후의 경우와 Matsuda이론식으로 산정하여 비교 한 결과 암반등급이 양호할수록 Matsuda의 이론식과의 차이가 크게 나타났으며 중앙벽체작용 하중을 [선행터널굴착/후행터널굴착]으로 산정한 결과 암반등급이 불량할수록 그 값이 크게나타났다.
- (2) 수치해석으로 암반등급 및 토피고에 따른 중앙벽체 작용하중을 산정한결과 Matsuda의 제안식에 비해 14~83%의 감소된 하중이 작용됨을 알 수 있었으며, 이를 바탕으로 암반등급과 토피고에 따른 하중감소계수(α)를 산정하였다.
- (3) 향후 2-Arch터널 설계 시 하중감소계수(α)를 적용하면 2-Arch터널 중앙벽체구조물의 과다설계를 피하고 안정성 및 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 김상균, 김태혁, 이인모(2003), "2-Arch 도로터널 설계 및 시공 개선방안 고찰", 한국터널공학회지, pp. 29~38.
2. 박동욱(2003), 도로터널에서 2-Arch 터널의 적용성과 문제점 개선사항에 대한 연구, 한양대학교 석사 학위 논문, pp. 4~14.
3. 왕이완(2001), "도로에서 2-Arch 터널의 적용성", 대한터널협회 정기학술발표회, pp. 141~152.
4. 이상덕, 전은숙(2003), "사질토 지반에서 2-Arch 터널의 거동", 한국터널공학회 논문집, Vol. 6, No. 2, pp. 171~182.
5. E. Soliman, H. Duddeck and H. Ahrens(1993), "Two and Three-dimensional Analysis of Closely Spaced Double-tube Tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 13~18.
6. M. Kamimura(1997), "Discussion on the behaviors of parallel tunnel with a small clearance", 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, pp. 898~906.
7. T. Addenbrooke and D. Potts(2001), "Twin Tunnel Interaction : Surface and Subsurface Effects", The International Journal of Geomechanics, Vol. 1, No. 2, pp. 249~271.
8. T. Matsuda, K. Terada, M. Igarashi and K. Miura(1998), "Ground behavior and settlement control of twin tunnels in soil ground", Tunnels and Metropolises, pp. 1193~1198.