

터널해석에 있어서 Mohr-Coulomb 및 Duncan-Chang 모델의 비교 연구

김대규^{1*}

Study on Mohr-Coulomb and Duncan-Chang Models in Tunnel Analysis

Dae-Kyu Kim^{1*}

요 약 본 연구에서는 Mohr-Coulomb 선형 모델 및 Duncan-Chang 비선형 모델을 사용하여 개착하부 통신구 터널에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석결과, Mohr-Coulomb 모델이 Duncan-Chang 모델보다 큰 변위(통신구 터널에서 10~14%, 주변 지반에서 32%)를 산출하였다. 이는 터널부 토피의 영향으로 지반변위해석은 반드시 두 모델 결과의 종합평가가 필요하다. 지반응력은 Mohr-Coulomb 모델이 Duncan-Chang 모델보다 5~10% 큰 값을 산출하였다.

Abstract In this paper, the numerical results using the Mohr-Coulomb and the Duncan-Chang models, on the stresses and strains of a tunnel under a deep open-cut site and the surrounding ground, were compared with each other. The Mohr-Coulomb model produced larger values than the Duncan-Chang model in stress and displacement of tunnel and ground.

Key Words : Mohr-Coulomb, Duncan-Chang, 선형, 비선형, 터널해석

1. 서 론

최근 컴퓨터의 발달과 더불어 수치해석 기법이 토목 구조물의 주요 해석 수단으로 등장하였으며, 폭 넓은 적용성 및 다양한 결과의 유도로 지반공학 분야에서도 많이 활용되고 있다. 수치해석 결과의 정확성은 구조물 및 하중, 지반의 기하학적, 재료학적 묘사 방법에 크게 좌우되며, 특히 지반 모델링은 터널과 같은 지반구조물의 해석 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다[1][2][3][4].

지반모델은 탄성 또는 Mohr-Coulomb 모델로 대표되는 완성소성 이론을 이용한 선형모델이 간편성 및 편리성으로 인하여 주로 사용되고 있으나, 지반의 비선형 성질을 어느 정도 사실적으로 묘사할 수 있는 비교적 간편한 Duncan-Chang 모델 등의 비선형 모델도 많이 활용되고 있는 추세이다[1][5][6][7].

본 연구에서는 선형 및 비선형의 대표 모델인 Mohr-Coulomb 모델 및 Duncan-Chang 모델을 대규모 개착구간 하부 통신구 터널의 수치해석에 활용하여, 각 모

델의 적용성 및 장단점을 분석하였다.

2. 해석 대상 현장

해석 대상 현장은 서울지하철 일부 구간(총연장 476.8m, 시점 STA.18km114, 종점 STA.18km622) 중 대규모 개착 하부 통신구 터널 두 개 단면으로 선정하였다(그림 1, 그림 2). 지반은 매립층, 충적층, 풍화대, 기반암 순으로 구성되어 있으며, 풍화대 분포심도는 최대 25.3m로 시점부, 중앙부에 두껍게 존재하고 있다. 지하수위는 GL -3.9~12.6m에 위치하고 있으며 충적층의 N치는 5~16으로 느슨(Loose)~보통조밀(Medium Dense) 상태이고, 풍화토, 풍화암의 N치는 50 이상으로 매우조밀(Very Dense)한 상태이다. 연암~경암의 RQD는 0~70%이며, 터널 단면에서 풍화암, 연암, 보통암이 우세하게 분포하고 있다. STA.18km470~540 부근에 폭 5m, 경사 30°~70°의 단층이 존재한다. 단면 STA.18km920 및 STA.19km380에서 각각 폭 36.0m, 18.0m, 깊이 18.0m, 15.0m로 굴착하였으며, 가시설은 두 단면 모두 H-300×300×10×15를 사용하였다.

¹상명대학교 토목공학전공 조교수

*교신저자: 김대규(daekyu@smu.ac.kr)

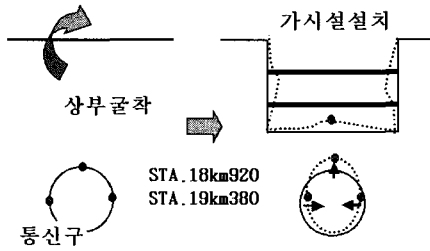
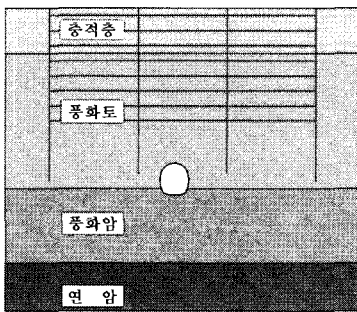
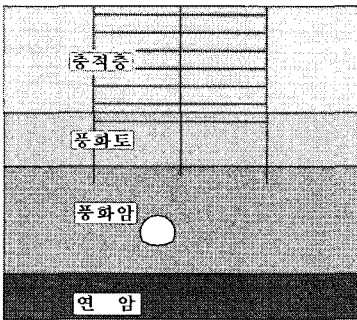


그림 1. 해석단면 개요



(a) STA.18km920



(b) STA.19km380

그림 2. 해석단면 지반 조건

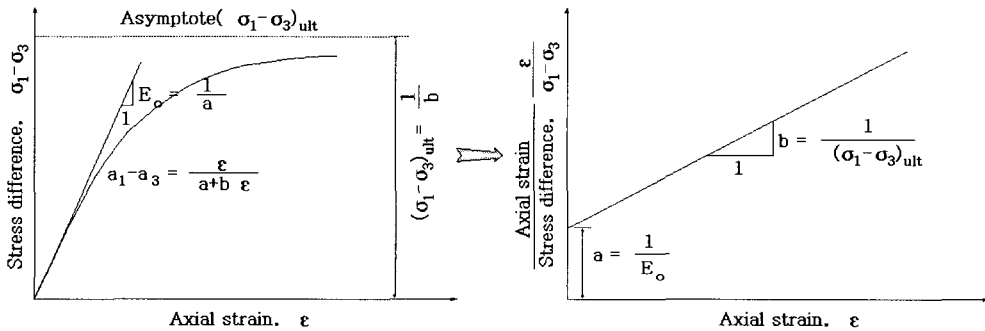


그림 3. Duncan-Chang 모델의 개요[1]

3. 모델개요 및 입력변수 값 결정

본 절에서는 Duncan-Chang 모델의 개요 및 입력변수 값 결정에 대하여 간단히 기술한다. 일반적으로 활용되고 있는 Mohr-Coulomb 모델의 설명은 생략한다. Duncan-Chang 모델은 지반의 재료학적 비선형성을 간단하지만 현실적으로 표현하는 모델 중의 하나로, 그림 3(a)와 같은 비선형 응력-변형을 관계의 응력부분(세로축)을 그림 3(b)와 같이 변형율로 정규화시켜 선형의 응력-변형을 관계로 변화시킴으로써, 비선형 관계의 초기 기울기 및 한계값을 간단히 산정할 수 있도록 하는 모델이다 [1][2][3].

Duncan-Chang 모델에 사용되는 매개변수는 변형계수 정수(K), 변형계수지수(n), 파괴비(Rf), 제하-재재하변형계수정수(Kur), 체적변형계수정수(Kb), 체적변형계수지수(m) 등이며, 이들 값의 산정과정은 그림 4와 같다.

수치해석의 수행을 위해서는 위의 모델 매개변수 이외에 지반특성치의 결정이 필요하다. 지반특성치의 결정은 현장 및 실내시험 결과, 지반분류에 따른 경험식, 참고문헌 및 유사지역 설계 적용사례 등을 활용하며 통계확률 기법을 적용하여 신뢰구간(95% 신뢰도)에서 적용 값을 결정한다. 축압계수는 심부 및 천부에서 다양한 값을 보이나[3][6][7], 일반적으로 지하철 같은 도심지 천층 터널은 터널 하부의 암반보다는 상부의 토사 및 연약한 암반층에 따라 거동 특성이 크게 지배되므로 시험에서 얻어진 축압계수(2.1~2.9)는 암반에 국한하여 적용하고 풍화암 이상의 지층에 대해서는 일반적 값인 0.5 및 1.0을 적용하였다. 또한 지반의 수리특성 파악을 위하여 주수식 수위강하법을 이용한 현장투수시험을 터널구간에서 총 8회 수행하였으며 암반층 투수특성 및 그라우팅 효과를 파악하기 위하여 터널구간 예상심도의 암반층에서 시추 조사와 병행하여 총 10회의 수압시험을 수행하였다. RPUM 보강공법이 적용되는 풍화토 지반의 강성은 풍화

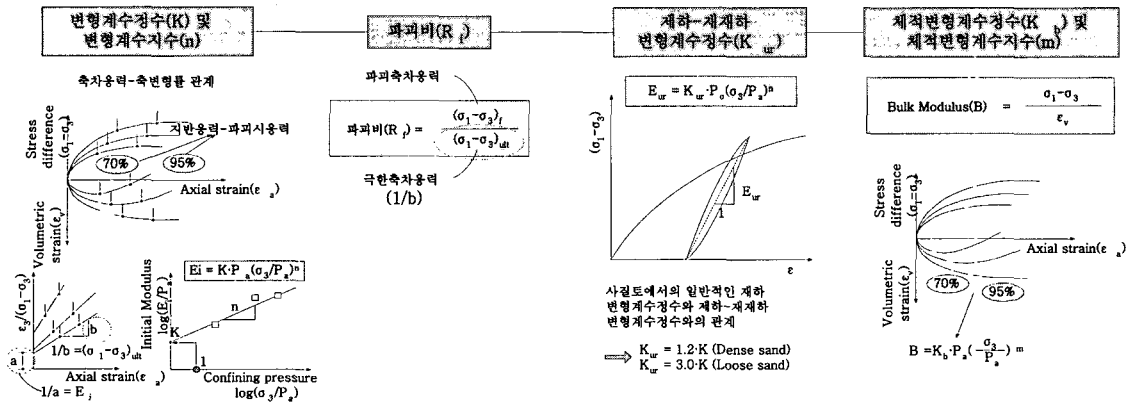


그림 4. Duncan-Chang 모델의 매개변수 값 산정

압으로 상향 조정하였다. 표 1, 2는 입력변수 값을 요약한 것이다.

표 1. Mohr-Coulomb 모델 입력변수 값

구분	탄성계수 (ton/m ²)	점착력 (ton/m ²)	내부마찰각 (°)	포아송비 (ν)	단위중량 (ton/m ³)
경 압	2,100,000	600	43	0.22	2.6
보통압	1,600,000	400	38	0.25	2.5
연 압	190,000	130	36	0.27	2.4
풍화암	10,000	3	35	0.30	2.0
풍화토	4,000	1	33	0.35	1.9
층적층	1,500~2,000	0.1	30~31	0.35	1.8~1.9
매립층	1,000	0.1	29	0.35	1.8

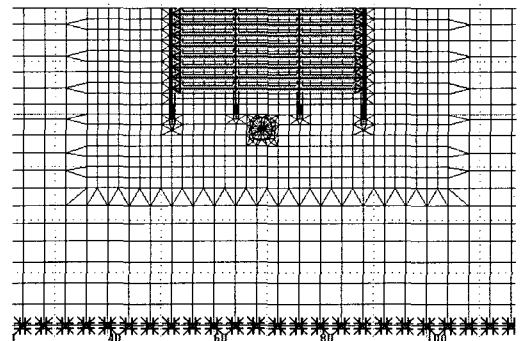
표 2. Duncan-Chang 모델 입력변수 값

구분	파괴비 Rf	Janbu 정수		절선 포아송비 변수			
		K	n	Kur	d	G	F
경 압	0.95	1200	0.41	3700	14.10	0.21	0.18
보통압	0.92	980	0.42	2500	11.78	0.26	0.15
연 압	0.88	750	0.43	2200	10.08	0.28	0.16
풍화암	0.84	580	0.45	1820	7.96	0.31	0.15
풍화토	0.82	450	0.44	1260	6.11	0.36	0.16
층적층	0.78	270	0.43	750	6.05	0.36	0.17
매립층	0.78	270	0.43	750	6.05	0.36	0.17

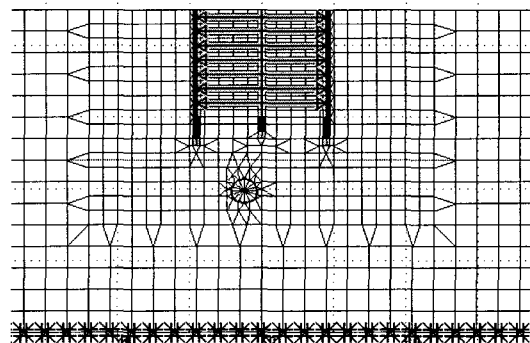
4. 해석 및 분석

본 연구에서는 신뢰도가 검증되어 지반공학에서 많이 활용되고 있는 AFIMEX를 수치해석 프로그램으로 사용

하였다. AFIMEX는 유한요소법으로 구성되어 있으며 2, 3차원 정적해석, 침투, 동적 안정성 평가, 굴착 등 다양한 문제에 적용이 가능하다. 그림 5는 해석단면 모델링을 보여준다.



(a) STA.18km920



(b) STA.19km380

그림 5. 해석단면 모델링

그림 6은 해석모델 및 해석단면별 변위 발생경향이며, 그림 7은 각 단면에서 천단, 내공, 인버트, 지표면 등 각 위치별 변위의 최대값을 정리한 것이다. 전반적으로 Mohr-Coulomb 모델이 단면 STA.19km360의 인버트 경우를 제외하고 Duncan-Chang 모델보다 통신구 터널에서 10~14%, 지반에서 32% 정도 상대적으로 큰 변위를 산출하였다. 이는 통신구 상단의 토피가 8.5m 확보된 상태에서 굴착이 진행되었기 때문이다. 터널부의 변형은 1cm 이내로 두 모델간의 차이가 거의 없지만 굴착지표면의 변위는 비선형 탄성모델 적용 시 최대 50% 차이가 발생하였다. 계측값과의 비교 결과, 천단, 내공, 인버트 등 터널부의 변위예측에는 Duncan-Chang 모델의 활용이 가능하나, 지반변위는 반드시 두 모델결과의 종합평가가 필요하다.

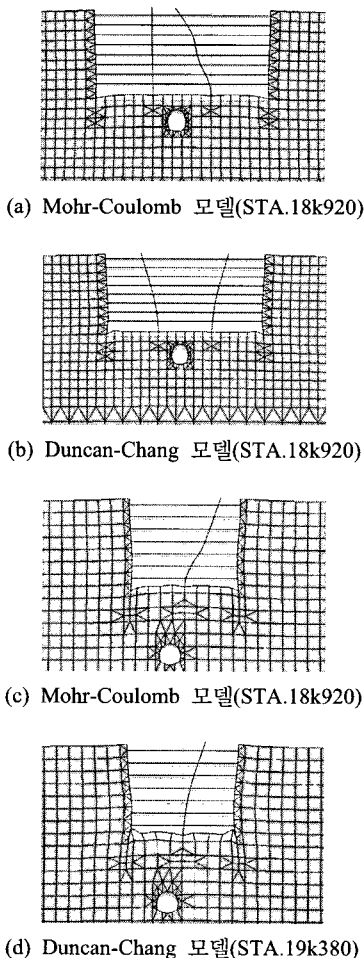
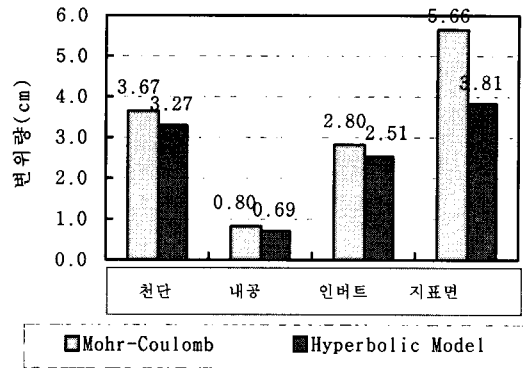
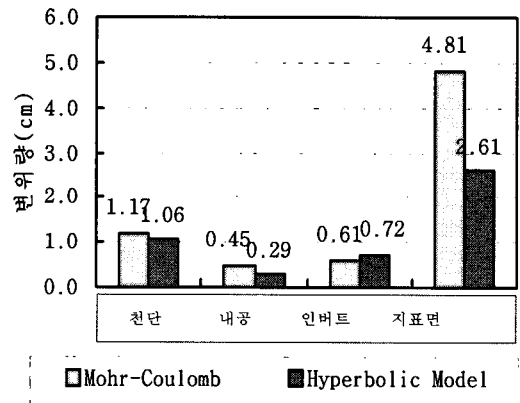


그림 6. 변위 발생 경향



(a) STA.18k920



(b) STA.19k380

그림 7. 위치별 최대변위

그림 8은 해석모델 및 해석단면별 지반응력 발생 경향이며, 그림 9는 각 단면에서 최대 압축 및 인장응력을 보여준다. 전반적으로 Mohr-Coulomb 모델이 Duncan-Chang 모델보다 5~10% 정도 미소하게 큰 응력을 산출하였다. 이는 변위해석 결과와의 일관성을 보여주는 것으로 선형모델 적용 시 입력변수 값의 선정에 특히 유의해야 함을 의미한다. 일반적으로 굴착에 따른 하중제거 효과가 발생하여 상향 변형이 예상되고 이에 따라 허용치 (6.09kg/cm²) 이상의 휨인장응력이 라이닝에 작용하게 되므로 충분한 유의와 함께 적절한 보강공법이 필요하다.

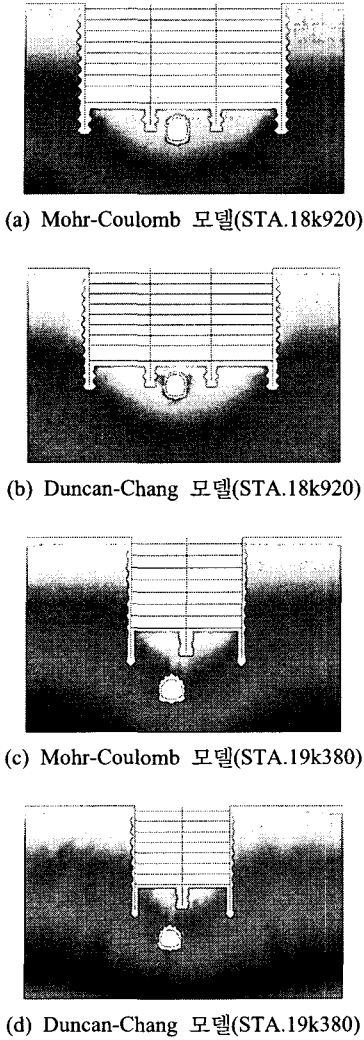
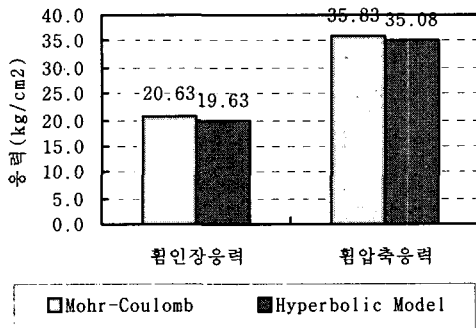
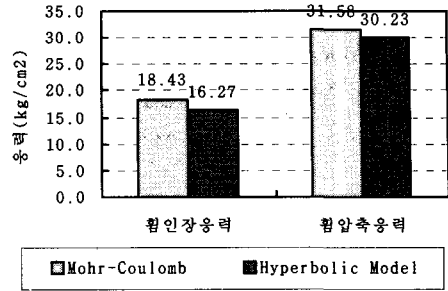


그림 8. 지반응력 발생 경향



(a) STA.18k920



(b) STA.19k380

그림 9. 최대 지반응력

5. 결론

본 연구에서는 Mohr-Coulomb 선형 모델 및 Duncan-Chang 비선형 모델을 개착하부 통신구 터널의 수치해석에 적용하여, 각 모델을 분석하고, 장단점을 분석하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Mohr-Coulomb 모델이 Duncan-Chang 모델보다 통신구 터널에서 10~14%, 지반에서 32%의 큰 변위를 산출하였다. 터널부의 적은 변위 차이는 토피가 확보된 상태에서 굴착이 진행되었기 때문으로 터널부의 변위예측에는 Duncan-Chang 모델의 활용이 가능하나, 지반변위는 반드시 두 모델 결과의 종합평가가 필요하다.
- (2) Mohr-Coulomb 모델이 Duncan-Chang 모델보다 5~10% 큰 지반응력을 산출하였다. 이는 변위해석 결과와 부합하며, 선형모델 적용 시 입력변수 값의 선정에 특히 유의해야 함을 의미한다.

참고문헌

- [1] Duncan, J. M. and Chang, Y-Y., "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils," J. of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM5, September, 1970
- [2] Duncan, J.M. and Chang, K. "Hyperbolic Stress-strain Parameters for Nonlinear Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Soil Masses," Report TE 74-3, Dept. of Civil Engineering University of California, Berkely, 1974
- [3] Duncan, J.M. and Chang, K. "Strength, Stress-strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element

Analysis of Stresses and Movements in Soil Mechanics," Report UCB/GT/80-01, Dept. of Civil Engineering University of California, Berkely, 1980

- [4] Kondner, R. L., "Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils," J. of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 89, No. SM1, February, p.115, 1963
- [5] Chen, E.F. and Mizuno, E., Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Elsevier, 1990
- [6] Desai, C.S. and Siriwardane, H.J., Constitutive Laws for Engineering Materials, Prentice Hall, 1984
- [7] Kondner, R. L. and Zelasko, J. S., "A Hyperbolic Stress-Strain Formulation of Sands," Proceedings of the 2nd PanAmerican Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Brazil, p. 289, 1963

김 대 규(Dae-Kyu Kim)

[정회원]



- 1999년 12월 : 루이지애나주립대학 토목환경공학과(공학박사)
- 2002년 ~ 현재 : 상명대학교 토목공학과 조교수

<관심분야>

토질 및 기초, 연약지반, 지반조사