

쌍굴터널 굴진에 따른 간섭효과와 주변지반의 거동

Interference and Settlements Caused by Twin Tunnelling

정재우, Jae-Woo Jung*, 이봉열, Bong-Ryul Lee**, 김학문, Hak-Moon Kim***

* 단국대학교 토목공학과 연구조교, 공학석사, Master of Engineering, Dept. Civil Engineering, DanKook University

** 단국대학교 토목공학과 연구원, 박사수료, Graduate Student, Dept. Civil Engineering, DanKook University

*** 단국대학교 토목공학과 부교수, 공학박사, Associate Professor, Dept. Civil Engineering, DanKook University

SYNOPSIS : This research work investigate the behaviour of ground movement during the construction of two parallel tunnels. All the influencing factors for the behaviour of twin tunnel such as tunnel size, ground conditions, tunnel depth, pillar width and initial state of ground stresses are investigated. The results of FEM nonlinear analysis are compared with field data as well as some of model test results. It was found that minimum interference was obtained in the parallel construction case when the two tunnel distance (pillar width) is just over the twice of tunnel diameter. Design guide line has been established for the ground conditions of hard soil and soft rock cases.

1. 서론

지하공간개발이 활성화되면서 기존터널을 인접하여 지하공간을 가장 경제적으로 이용할 수 있는 쌍굴터널(Twin Tunnel)의 건설이 바람직하나, 이로 인한 주변지반 거동의 예측은 단일터널보다 복잡한 양상을 나타낸다. 단일터널 굴진에 의한 주변지반거동과의 차이점을 규명하고 도심지내 쌍굴터널 굴진에 따른 제반 문제점을 도출하여 상호간섭효과에 대한 연구의 필요성이 요구되고 있다.

본 연구에서는 국내·외 터널굴진에 대한 주변지반거동 자료를 분석하고 쌍굴터널굴진시 주변지반에 영향을 미칠수 있는 제반요소 즉, 기하학적요소인 토피고(H:height), 터널직경(D:diameter), 터널간 이격거리(PW:pillar width) 그리고 지반을 구성하는 지층의 재료학적 요소인 지반조건, 축압계수 등을 고려하여 2차원 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과를 1차터널 굴착후 2차 터널굴진에 따른 간섭체적비, 지표침하증가비, 천단침하증가비로 구분하여 비교,분석하였다.

2. 해석조건 및 방법

2.1 해석대상 지반조건

쌍굴터널의 굴진에 따른 간섭효과와 지반거동을 분석하기 위하여 시공순서에 준하여 해석단계를 1차터널 굴착후 2차터널이 굴착되는 것으로하여 수행되었다. 해석을 위한 지반경계범위는 터널굴착으로 인한 영향범위 이상까지 설정하여, 터널 천단부에서 지표면까지로 하였고, 터널 좌·우측 경계는 최소 5D(D는 터널직경)에서 8D까지 해석범위를 설정하였다. 또한 터널 Invert부에서 하부경계까지는 4D이상으로 설정하였다. 해석을 위한 경계조건은 좌·우측 경계부는 수평변위를 구속하였고, 하부경계부는 수직변위를 구속하였다. 해석에 적용된 지반물성치는 토사터널에 대한 적용을 위해 풍화토의 일반적인 물성치를 적용하였으며, 암반터널의 적용을 위해 연암에 대한 일반적인 물성치를 적용하였다. 지중응력상태에 따른 터널의 거동을 파악하기 위해 축압계수는 토사터널의 경우 0.5,1.0을 암반터널의 대하여서는 0.5,1.0,1.5를 사용하였으며, 해석에 적용된 지반물성치는 표 2.1 과 같다.

표 2.1 해석에 적용된 지반물성치

지반조건	단위중량 γ (t/m^3)	탄성계수 E (t/m^2)	점착력 C (t/m^2)	내부마찰각 ϕ (°)	측압계수 K_0	포아송비 ν
토사층	1.9	5,000	3	35	0.5, 1.0	0.3
암반층	2.1	100,000	10	38	0.5~1.5	0.25

쌍굴터널굴착에 대한 2차원해석 유한요소망과 경계조건을 그림 2.1에 나타내었다.

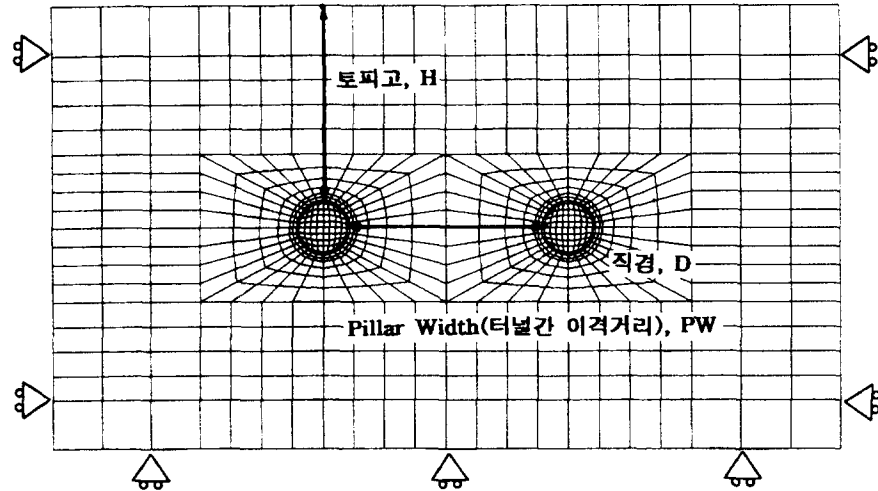


그림 2.1 쌍굴터널굴착에 의한 2차원해석 유한요소망과 경계조건

쌍굴터널굴진에 따른 지반거동을 분석하기 위하여 해석에 적용된 상수들은 터널의 기하학적 형상요소 변화로서 터널의 직경을 4m, 8m로 하였고, 지반조건을 고려한 영향분석을 위하여 터널에 대한 측압계수를 0.5~1.5로 변화하였으며, 상재토피하중에 대한 영향으로 토피고는 2D에서 4D까지 변화시켰다. 그리고 2차터널 굴착에 대한 영향으로 터널간 이격거리는 1D에서 4D까지 변화시켰으며 쌍굴터널 굴진에 따른 지반거동 분석을 위한 해석조건들은 표 2.2와 같다.

표 2.2 쌍굴터널 굴진에 따른 지반거동분석을 위한 유한요소 구성

터널직경 D (m)	Pillar폭 PW (m)	토피고 H (m)	절점수	요소수	터널직경 D (m)	Pillar폭 PW (m)	토피고 H (m)	절점수	요소수
4	1D (4m)	2D (8m)	928	879	8	1D (8m)	2D (16m)	1056	1007
4	1D (4m)	3D (12m)	996	945	8	1D (8m)	3D (24m)	1124	1073
4	1D (4m)	4D (16m)	1030	978	8	1D (8m)	4D (32m)	1158	1106
4	2D (8m)	2D (8m)	912	868	8	2D (16m)	2D (16m)	1040	996
4	2D (8m)	3D (12m)	970	924	8	2D (16m)	3D (24m)	1098	1052
4	2D (8m)	4D (16m)	999	952	8	2D (16m)	4D (32m)	1172	1080
4	3D (12m)	2D (8m)	864	823	8	3D (24m)	2D (16m)	992	951
4	3D (12m)	3D (12m)	916	873	8	3D (24m)	3D (24m)	1044	1001
4	3D (12m)	4D (16m)	942	898	8	3D (24m)	4D (32m)	1070	1026
4	4D (16m)	2D (8m)	816	778	8	4D (32m)	2D (16m)	944	906
4	4D (16m)	3D (12m)	862	822	8	4D (32m)	3D (24m)	990	950
4	4D (16m)	4D (16m)	885	844	8	4D (32m)	4D (32m)	1013	972

2.2 해석 프로그램 개요

2차원 터널해석에 사용된 SMAP-S2 프로그램은 4~8절점 요소의 2차원 평면변형, 평면응력 그리고 축대칭해석이 가능하며, 적용할 수 있는 유한요소의 종류는 지반을 모델화하는 연속체요소, 압축 또는 휨을 받는 Shotcrete나 Lining을 모델화하는 보요소, 인장과 압축을 받는 Rockbolt를 모델화하는 트러스요소가 있다.

해석에 적용된 재료모델은 Mohr-Coulomb재료모델이 적용되었으며, 해석에 사용된 프로그램의 개략적인 흐름도는 그림 2.2과 같다.

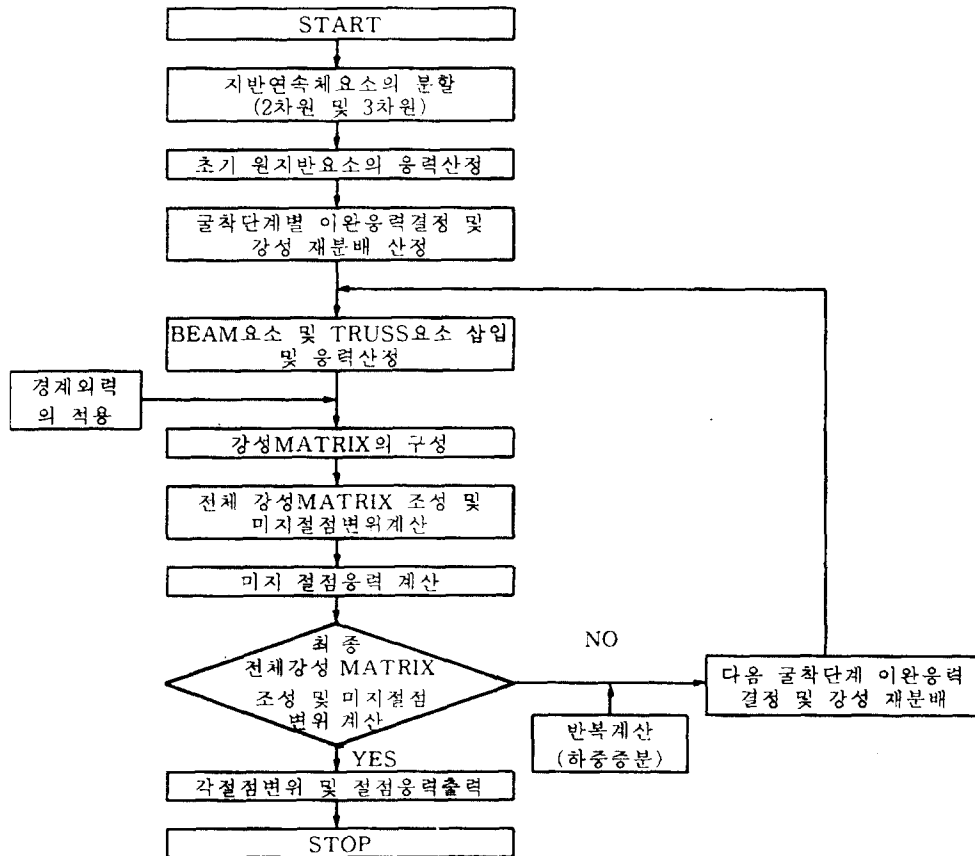


그림 2.2 해석 프로그램의 개략 흐름도

2.3 해석 프로그램에 적용된 재료모델 및 안전율

재료모델은 유동법칙(Flow rule)과 관계된 소성이론을 근거로 하고 있으며, 일반화된 형태의 모델은 Von mises, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager 그리고 현장암반모델(일반화된 Hoek Brown)로 모형화할 수 있다.

중분 탄성기본법칙은 다음 Matrix형태로 표현할 수 있다.

$$\{d\sigma\} = [D^e] \{d\epsilon^e\} \quad \text{여기서 } d\epsilon^e \text{ 는 탄성변형 중분} \quad (2.1)$$

소성이론과 관련된 유동법칙이 가정되었으며, 소성변형 증분 $\{d\epsilon^p\}$ 는 파괴시 팽창이 허용되는 항복면에 대하여 법선방향으로 작용된다.

$$\{d\epsilon^p\} = d\lambda\{a\} \quad (2.2)$$

여기서 $d\lambda$ 는 양의 비례상수이고, $\{a\}$ 는 응력성분에 관한 항복함수에서 유도된 행벡터이다.

$$\{a\} = \{\partial F / \partial \sigma\} \quad (2.3)$$

항복이 일어날때 적합방정식은 다음과 같이 응력에서 하중을 산정할 수 있도록 하였다.

$$dF = \{a\}^T\{d\sigma\} = 0 \quad (2.4)$$

전체변형은 탄성과 소성변형의 합으로 나타난다.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} \quad (2.5)$$

식 (2.1) 식 (2.5)에서 전체응력을 구할수 있다.

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\epsilon\} - d\lambda[D^e]\{a\} \quad (2.6)$$

식 (2.2)에서 정의한 유동법칙으로부터 식 (2.6)을 정리하면

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\epsilon\} - d\lambda[D^e]\{a\} \quad (2.7)$$

$$d\lambda = \frac{\{a\}^T[D^e]\{d\epsilon\}}{\{a\}^T[D^e]\{a\}} \quad (2.8)$$

전체변형 증분과 직접적으로 관계되는 전체응력은 다음과 같다.

$$\{d\sigma\} = [D^{ep}]\{d\epsilon\} \quad (2.9)$$

따라서 증가된 탄소성 구성행렬은 다음과 같다.

$$[D^{ep}] = [D^e] - \frac{[D^e]\{a\}\{a\}^T[D^e]}{\{a\}^T[D^e]\{a\}} \quad (2.10)$$

본 연구에서는 콘크리트 또는 암석, 흙 등의 지반에 대해서 일반적으로 널리 사용되고 있는 Mohr-Coulomb 의 파괴기준을 적용하였으며, 안전율(F.S.)의 산정은 그림 2.3과 같다.

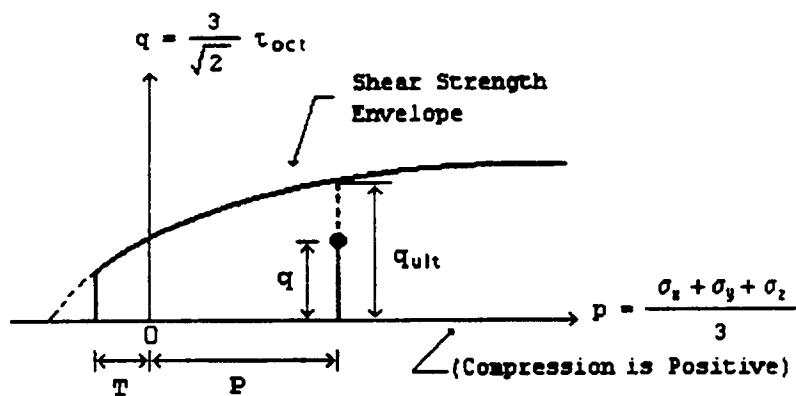


그림 2.3 안전율의 정의

본 프로그램에서는 탄성재료의 경우 $F.S. = 10$, 탄소성재료인 경우 $P \leq -T$ 일때 $F.S. = 1$, $P \geq -T$ 일때 $F.S. = q_{ult} / q$, 안전율의 한계는 $1 \leq F.S. \leq 10$ 이다.

3. 해석결과 및 분석

2차원 유한요소해석을 적용하여 쌍굴터널굴착시 2차터널 굴진의 영향으로 터널이격거리에 따라 변화하는 간섭효과를 지표면침하증가비, 천단변위증가비, 간섭체적비로 나타내었다.

3.1 간섭체적비에 대한 비교분석

쌍굴터널 굴착에서 나타나는 주변지반의 거동은 단일터널 굴착시 나타나는 거동과는 상이한 형태를 나타낸다. 2차터널을 단일터널로 가상시 발생하는 지표면침하의 체적(V_{S0})에 대한 1차터널 굴착후 2차터널의 굴착으로 인하여 추가적으로 발생하는 지표침하의 증가체적(dV_S)을 간섭체적비(Volume of Interference, dV_S / V_{S0})로 나타낸다. 이는 2차터널굴착으로 인한 단일터널에 대한 간섭효과의 정도를 의미한다.

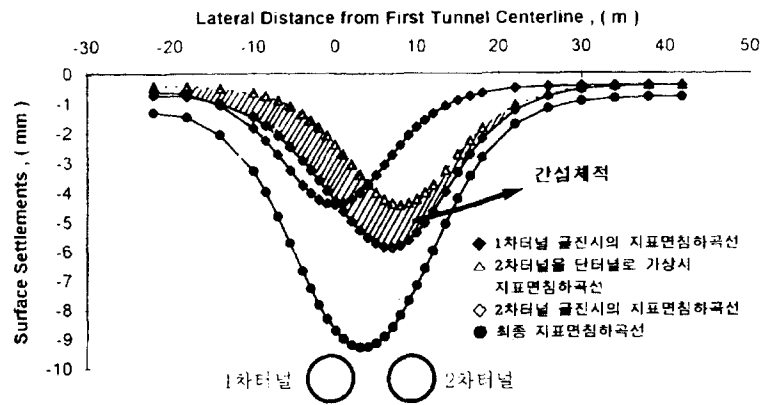


그림 3.1 쌍굴터널 굴착시 간섭체적이 고려된 지표면 침하곡선

간섭체적비의 변화에 대한 유한요소해석결과는 표 3.1 에 나타나 있다.

표 3.1 간섭체적비와 터널이격거리비 관계

터널직경 4m 경우

터널직경 8m 경우

지 층	터널이격거리				지 층	터널이격거리			
	1 D	2 D	3 D	4 D		1 D	2 D	3 D	4 D
토사지층 $K_0 = 0.5$	0.466	0.334	0.283	0.262	토사지층 $K_0 = 0.5$	0.696	0.432	0.353	0.308
토사지층 $K_0 = 1.0$	0.162	0.065	0.032	0.020	토사지층 $K_0 = 1.0$	0.198	0.093	0.065	0.042
암반지층 $K_0 = 0.5$	0.154	0.052	0.021	0.008	암반지층 $K_0 = 0.5$	0.206	0.095	0.061	0.046
암반지층 $K_0 = 1.0$	0.154	0.052	0.021	0.008	암반지층 $K_0 = 1.0$	0.155	0.053	0.023	0.009
암반지층 $K_0 = 1.5$	0.154	0.053	0.021	0.009	암반지층 $K_0 = 1.5$	0.154	0.053	0.022	0.008

해석결과 그림 3.2에서와 같이 터널직경 4m, 8m인 경우 토사층에서 측압계수 $K_0 = 0.5$ 인 경우를 제외하고는 비슷한 결과를 보였으며, 터널이격거리가 1D(D:터널직경)에서 2D로 넓어짐에 따라 간섭효과를 나타내는 간섭체적비가 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 터널이격거리가 3D이상으로 넓어짐에 따라서는 간섭체적비가 일정한 값에 수렴하여 2차터널 굴착으로 인한 간섭체적비의 변화가 뚜렷하게 나타나지 않고 있어 1차터널굴착후 2차터널굴착시 터널간 한계이격거리는 2D임을 알 수 있었다. 터널이격거리 1D와 2D의 간섭체적비가 급격히 감소하는 경향은 그림 3.3 에 도시한 쌍굴터널 주변지

반의 소성영역을 나타내는 안전율 분포의 비교를 통하여 확인할 수 있었다. 터널이격거리가 1D에서 2D로 변화함에 따라 소성영역의 범위가 터널주변으로 좁아지고 이로 인하여 주변지반의 이완영역이 감소하므로서 1D의 경우보다 2D의 경우에서 간섭체적비가 급격히 감소되는 결과를 가져오게 된다.

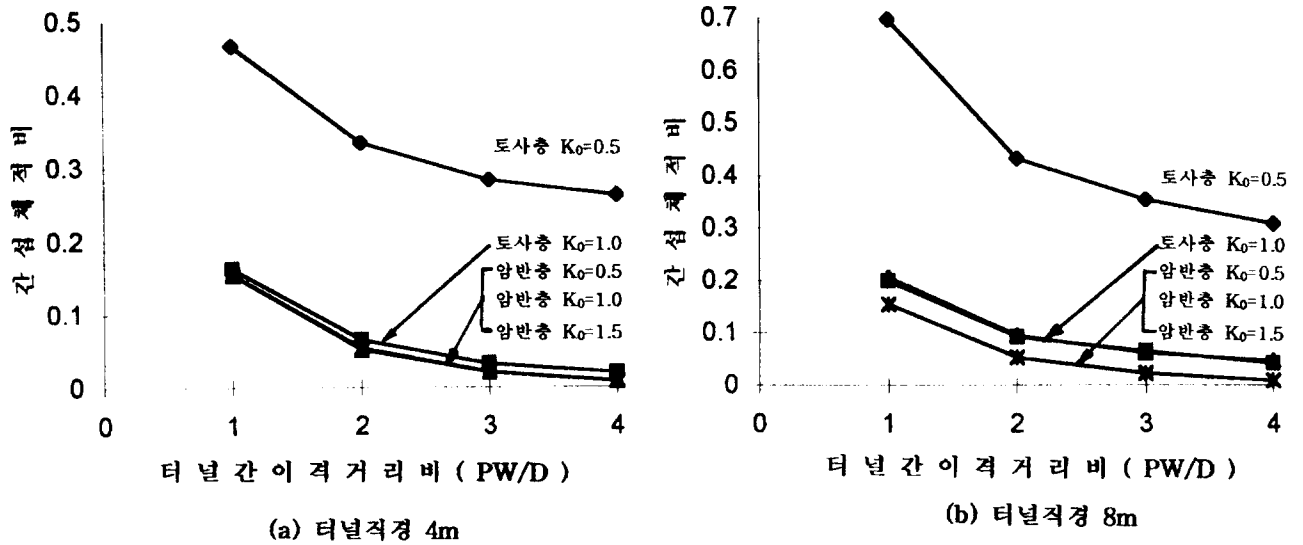
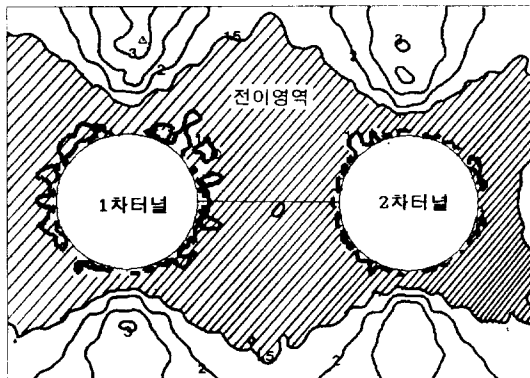
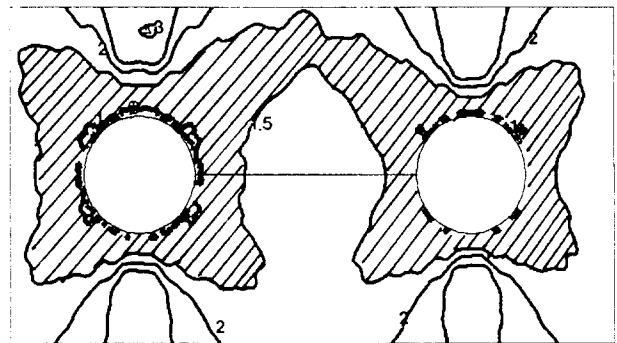


그림 3.2 터널이격거리비와 간섭체적비 관계



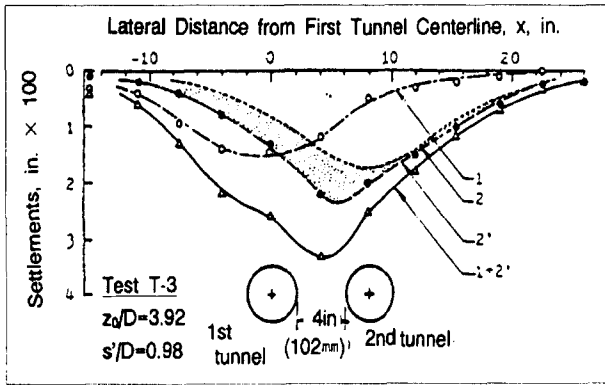
(a) 터널간 이격거리 1D일 경우



(b) 터널간 이격거리 2D일 경우

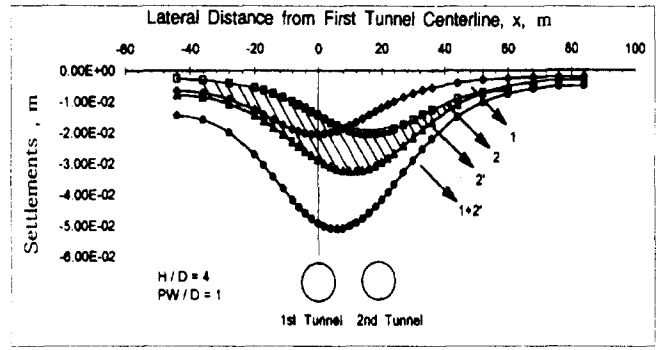
그림 3.3 터널간 이격거리 변화에 따른 쌍굴터널 주변지반의 전이영역 분포

그림 3.4는 쌍굴터널굴착에 따른 지표침하량분포와 지표침하곡선의 변화 및 쌍굴터널중 2차터널굴착에 대한 간섭체적비를 모형실험의 결과⁽²⁾와 본연구에서의 토사지층에 대한 토피고 4D, 터널간이격거리 1D인 조건의 결과와 비교한 것이다. 터널굴착에 따른 지표면 최대침하의 위치는 터널간 이격거리가 작아 1차터널과 2차터널중간에서 나타나고 있으며, 이는 해석결과에서도 유사한 경향을 나타내고 있다. 그리고 간섭체적의 형태도 모형실험결과와 해석결과가 일치하는 경향을 나타내었다. 표 3.2에서 모형실험에 의한 간섭체적비와 해석에 의한 간섭체적비의 차이를 보이고 있으나 이는 실제지반조건의 차이 및 실험시 굴착시간 등에서 기인하는 것으로 판단된다. 여기서 터널간 이격거리비가 증가함에 따라 간섭체적비가 감소하는 것을 볼 수 있다.



Curve 1 = 1차터널 굴착에 의한 지표면 침하곡선
 Curve 1+2' = 최종 침하곡선

(a) 모형실험결과 (Hong, 1984)



Curve 2' = 2차터널 굴착에 의한 지표면 침하곡선
 Curve 2 = 2차터널을 단터널로 가상시 침하곡선

(b) 프로그램 해석결과

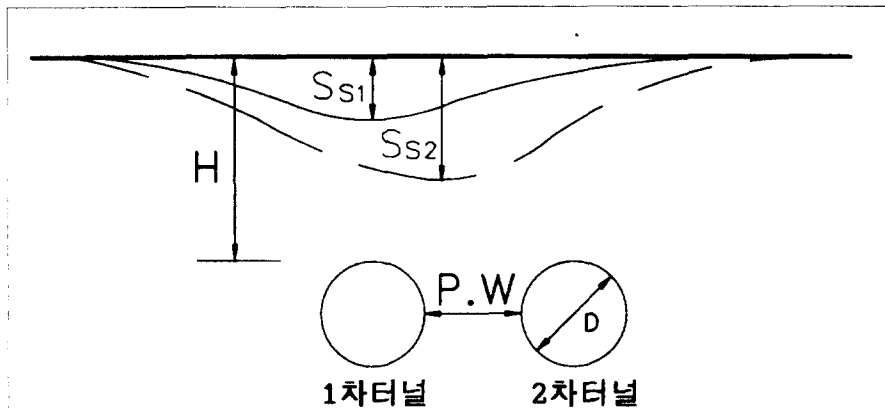
그림 3.4 터널굴착에 따른 간섭체적비의 분포비교

표 3.2 모형실험과 해석결과에 의한 간섭체적비

test no	Tunnel Geometry				Ground Loss, 2nd Tunnel in ³ /in (mm ³ /mm)	Observed Volume of Surface Settlement			2차터널을 단터널로 가상시 체적 V _{s2}	간섭체적	ΔV _s /V _{s2} 모형실험 결과	ΔV _s /V _{s2} 프로그램 해석결과
	D	z ₀	z ₀ /D	s/D		V _{s1}	V _{s2}	V _{s3}				
	in (mm)	in (mm)										
T-3	4.10 (106)	16.07 (408)	3.92	0.97	0.707 (456)	0.257 (166)	0.405 (261)	0.662 (427)	0.298 (192)	0.107 (69)	0.36	0.466
T-2	4.10 (106)	16.68 (424)	4.07	1.95	0.707 (456)	0.255 (164)	0.382 (246)	0.637 (411)	0.296 (191)	0.086 (55)	0.29	0.334

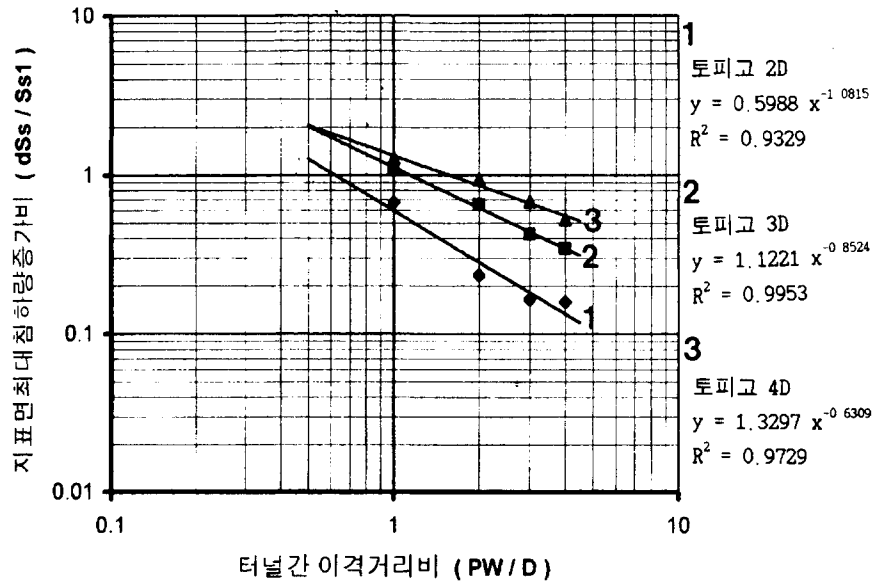
3.2 터널간 이격거리에 따른 지표면 최대침하량 증가비

1차터널 굴착후 2차터널 굴진시에 지표면 최대침하량의 증가비를 지반조건, 터널직경, 토피고 및 터널간이격거리의 변화에 따라 분석하여 그림 그림 3.5에 나타내었다. 그림에 대한 부호는 다음과 같다.

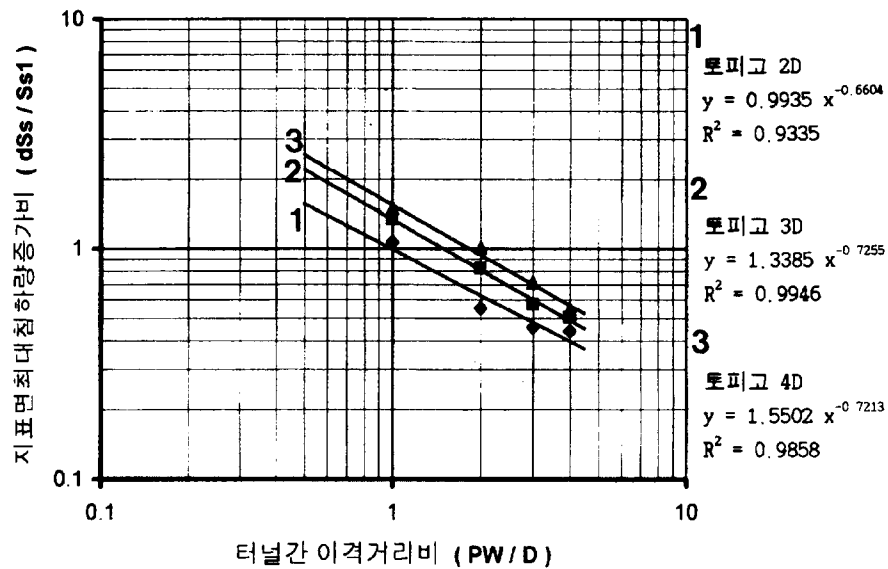


여기서 $dS_s = S_{s1} - S_{s2}$, S_{s1} : 1차터널굴착시 지표면 최대침하량, S_{s2} : 2차터널굴착시 지표면 최대침하량

암반층으로 가정한 경우 토압계수(K_0)의 변화에 따른 지표면침하증가비의 차이가 없었으나, 토사층으로 가정한 경우에는 토압계수(K_0)의 변화에 따라 지표면침하증가비의 차이를 보이고 있다. 터널직경에 대한 비교에서 터널직경이 4m인 경우와 8m인 경우, 터널직경비에 관계없이 지표면 최대침하량의 증가비는 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 해석 결과에 의해서 측압계수의 변화와 터널간 이격거리비의 변화에 따른 지표면 최대침하량의 증가비의 관계식을 예측해볼 수 있다. 이는 향후 보다 많은 모형실험이나 실측자료의 분석에 의하여 정확히 규명하는 것이 바람직하다.



(a) 토사터널 $K_0 = 0.5$, $D = 4m$



(b) 암반터널 $K_0 = 1.0$, $D = 4m$

그림 3.5 터널이격거리와 지표면최대침하량 증가비의 관계

3.3 터널이격거리에 따른 천단침하증가비 분석

터널굴착에 의한 주변지반거동에 영향을 주는 요소중 천단침하는 터널주변지반에 이완영역을 발생시키며, 이로 인하여 지표면 침하에 영향을 미쳐 터널상부 인접구조물에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 쌍굴터널 굴착해석중 1차터널굴진후 2차터널굴진에 의한 1차터널의 천단침하 증가비를 토피고, 지반조건, 터널직경에 대하여 비교하여 나타내었다. 해석결과에서 터널간 이격거리가 1D에서 4D까지 변화함에 따라 천단침하증가비가 감소하는 것을 볼 수 있으며, 특히 토피고가 2D인 경우 터널간 이격거리비가 2D이상에서는 1D에서 2D로 증가할 때보다 감소하는 비율이 낮아지는 것으로 나타나 쌍굴터널 굴착시의 터널간 한계이격거리비가 2D임을 알 수 있다. 지반조건을 토사층으로 가정한 경우의 해석결과는 터널간 이격거리비가 4D까지 증가하여도 천단변위증가비가 계속 감소하여, 2차터널굴착으로 인한 영향이 1차굴착터널의 천단침하에 영향을 미치는 것으로 볼 수 있으며, 지반조건을 암반층으로 가정한 경우의 해석결과에서는 천단침하증가비가 최대 0.14~0.16의 범위에 있어 토사층의 경우에 비하여 2차터널굴착으로 인한 영향이 미소한 것을 알 수 있으며, 특히 토피고가 2D인 경우, 터널간 이격거리비가 2D이상에서는 2차터널굴착에 의한 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

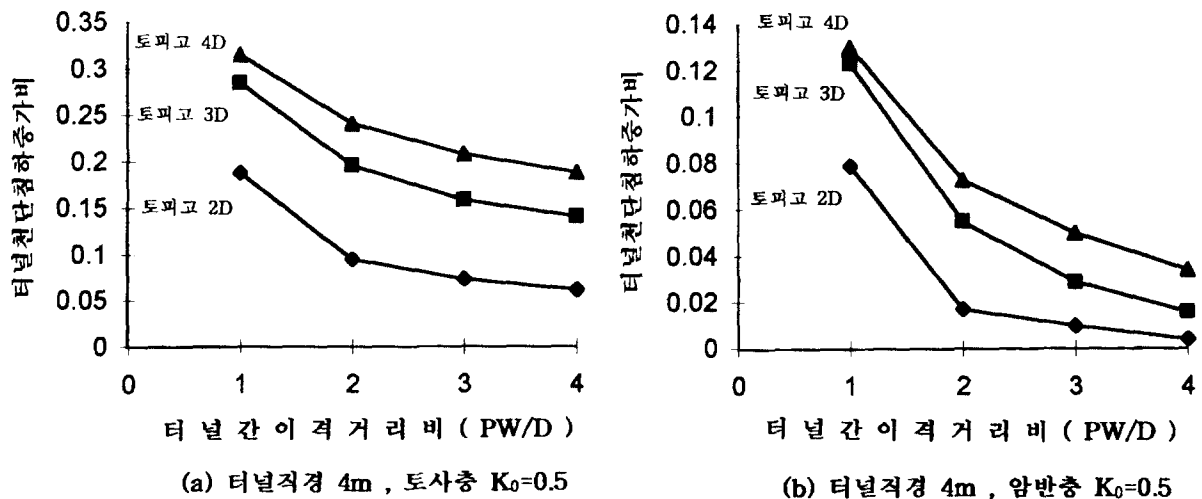


그림 3.6 터널이격거리와 천단침하증가비의 관계

4. 결 론

쌍굴터널굴진에 따른 주변지반(토사지층, 암반지층)의 거동에 대하여 2차원 유한요소 해석을 수행하였고, 그 결과를 1차터널 굴착후 2차터널 굴진에 따른 간섭체적비, 지표침하증가비, 천단침하증가비로 구분하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 터널이격거리(Pillar폭)가 1D에서 4D로 변화함에 따라 일반적으로 간섭체적비의 감소경향을 나타내었으며, 터널이격거리가 2D에서 1D로 감소시에 가장 급격한 간섭체적비의 증가현상을 나타내었다. 그러므로 쌍굴터널 굴착의 경우 터널간 이격거리를 최소한 터널직경의 2배이상으로 유지시켜 주는 것이 간섭효과를 감소시키고 주변지반의 안정성을 확보하는데 유리할 것으로 판단된다. 이는 지표면침하증가비, 천단침하증가비의 분석에서도 나타나있다.
- 2) 모형실험과 본연구결과를 비교분석하여보면, 간섭체적비는 터널심도가 깊어짐에 따라서 약간의 변화가 있으나 실제 지반조건에의 차이 및 실험방법 등을 고려하더라도 그 차이가 0.1~0.3%정도로 서로의 값이 상당히 근접함을 보이고 있다.
- 3) 토피고가 2D, 4D의 경우, 측압계수의 변화와 터널간이격거리비 ($X = PW / D$)의 변화에 따른 지표면최대침하량의 증

가비 ($Y = dS_s / S_{s1}$) 를 나타내는 관계식 $Y = \alpha X^\beta$ 에서 α, β 계수의 지반조건별 범위를 다음과 같이 얻었다.

◎ 토사층

Ko = 0.5 경우 $\alpha = 0.59 \sim 0.99$, $\beta = -0.66 \sim -1.08$ (토포고 2D)
 $\alpha = 1.33 \sim 1.55$, $\beta = -0.63 \sim -0.72$ (토포고 4D)

◎ 암반층

Ko = 1.5 경우 $\alpha = 0.317 \sim 0.321$, $\beta = -2.686 \sim -2.689$ (토포고 2D)
 $\alpha = 1.01 \sim 1.05$, $\beta = -1.02 \sim -1.06$ (토포고 4D)

지표면 최대침하량의 증가비에 대한 관계식은 상기와 같이 제시할 수 있으나, 향후 보다 많은 모형실험이나 실측자료의 분석에 의하여 정확히 규명하는 것이 바람직하다.

5. 참고문헌

- (1) Duddeck, H. & Erdmann, K. J.(1982) "Structural design models for tunnels", Tunnelling 82, The institution of mining and metallurgy, proceedings of the third international symposium, pp83~91
- (2) Hong, S. W(1984) "Ground movements around model Tunnels in sand", University of Illinois at Urban-Champaign USA, PhD
- (3) Peck, R. B.(1969) "Deep Excavation and Tunnelling in soft Ground", State of The Art Report, Proceedings of the seventh international conference on soil mechanics and foundation engineering, Mexico, pp225~290
- (4) Shirlaw, J. N. & Doran, S.(1988) "Ground movement and settlements caused by tunnelling for the singapore Mass Rapid Trasit system", Tunnelling 88, The institution of mining and metallurgy, proceedings of the fifth international symposium, pp295~314
- (5) Szechy, K.(1973) "The Art of Tunnelling", 2nd English ed. AKADEMIAIKIADO
- (6) 배규진(1989) "토사터널 굴착에 따른 주변지반의 변위예측에 관한 연구", 연세대 대학원 박사학위논문
- (7) 이봉열,김광진,김학문(1994) "Hoek-Brown암반모델을 이용한 비선형 유한요소 터널해석 및 평가", 한국지반공학회 창립 10주년기념 및 '94가을 학술발표회 논문집"
- (8) 이봉열,김광진,김학문(1995) "비선형 유한요소법을 이용한 터널해석 및 효율성 평가", 대한토목학회논문집 제15권 제3호
- (9) 임수빈,이성민,이제우,백영식(1994) "터널 掘鑿時 考慮해야 할 周邊 岩盤의 媒介變數와 進行性 破壞", 한국지반공학회 창립10주년기념 및 '94가을 학술발표회 논문집", pp.231~234
- (10) 한국건설기술연구원(1985) "지반침하 방지공법에 관한 연구보고서", pp39~61