

쌍굴터널 굴진에 따른 주변지반의 거동과 간섭효과

김 학 문¹⁾

Effect of interference and Ground Movement by Twin Tunnelling

Hak-Moon Kim

ABSTRACT The behaviour of ground movement during the construction of two parallel tunnels in weathered zone and soft rock has been investigated. 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 were examined. The results of FEM nonlinear analysis were compared with some of model test results in weathered zone to verify the numerical method. It was found that minimum interference was obtained in the parallel construction case when the twin tunnel distance (pillar width) is just over the twice of tunnel diameter. Guide line for the interference of twin tunnelling has been introduced for the ground of weathered zone and soft rock.

1. 서 론

지하공간개발이 활성화되면서 기존터널에 인접하여 지하공간을 가장 경제적으로 이용할 수 있는 쌍굴터널(Twin Tunnel)의 건설이 바람직하나, 이로 인한 주변지반의 거동 예측은 단일터널보다 복잡할뿐더러 복잡한 양상을 나타낸다. 그러므로 본 연구에서는 쌍굴터널 굴진에 의한 주변지반거동을 예측하고, 단일터널과의 차이점을 규명함으로써, 제반 문제점을 도출하여 상호간섭효과를 비교 고찰하였다. 또한 쌍굴터널 굴진시 주변지반에 영향을 미칠 수 있는 제반요소 즉, 기하학적요소인 토피고(H: depth), 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 2차터널 굴진에 따른 간섭제척비, 지표침하증가비, 천단침하증가비로 구분하여 비교, 분석하였다.

2. 해석조건 및 방법

2.1 해석대상 지반조건

쌍굴터널의 굴진에 따른 간섭효과와 지반거동을 분석

하기 위하여 시공순서에 준하여 해석단계를 1차터널 굴착후 2차터널이 굴착되는 것으로 하여 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 풍화대 터널에 대한 적용을 위해 풍화도와 풍화암의 중간 물성치를 적용하였으며, 연암터널의 적용을 위해 연암에 대한 일반적인 물성치를 적용하였다. 지중응력상태에 따른 터널의 거동을 파악하기 위하여 축압계수는 풍화대터널의 경우 $K=0.5$ 와 1.0 을 연암터널의 대하여서는 $K=0.5, 1.0, 1.5$ 를 사용하였으며, 해석에 적용된 지반물성치는 Table 1과 같다.

쌍굴터널 굴착에 대한 2차원 터널해석 유한요소망과 경계조건을 Fig. 1에 나타내었다.

쌍굴터널 굴진에 따른 지반거동을 분석하기 위하여 해석에 적용된 상수변화로서는 첫 번째 터널의 기하학적 형상요소 변화인 터널의 직경을 4 m와 8 m로 하였고, 둘째는 지반조건을 고려한 영향분석을 위하여 터널

1) 정희원, 단국대학교 토목공학과, 부교수

에 대한 축압계수를 0.5, 1.0, 1.5로 사용하였으며, 셋째는 상재 토괴하중에 대한 영향으로 토괴고를 2D에서 4D까지 변화시켰다. 그리고 2차터널 굴착에 대한 영향으로 터널간 이격거리는 1D에서 4D까지 해석조건들을 Table 2와 같이 변화시켰다.

2.2 해석 프로그램 개요

2차원 터널해석에 사용된 SMAP-S2 프로그램은 4~8절점 요소의 2차원 평면변형, 평면응력 그리고 축대칭 해석이 가능하며, 적용할 수 있는 유한요소의 종류는 지반을 모델화하는 연속체요소, 압축 또는 힘을 받는 Shotcrete나 Lining을 모델화하는 보요소, 인장과 압

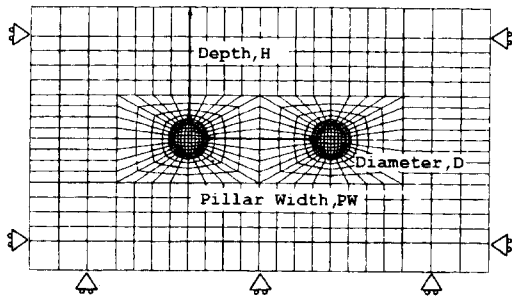


Fig. 1. Finite-element and boundary condition of twin tunnel.

축을 받는 Rockbolt를 모델화하는 트러스요소가 있다.

재료모델은 유동법칙(Flow rule)과 관계된 소성이론을 근거로 하고 있으며, 일반화된 형태의 모델은 Von mises, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager 그리고 현장 압박모델(일반화된 Hoek Brown)로도 모형화 할 수 있다. 본 컴퓨터 프로그램에 대한 상세한 내용은 기존의 논문을 통하여 발표되었다.^{1,2)}

본 연구에서는 콘크리트 또는 암석, 흙 등의 지반에 대해서 일반적으로 널리 사용되고 있는 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 적용하였으며, 안전율(S.F.)의 산정은 Fig. 2와 같다.

본 프로그램에서는 탄성재료의 경우 S.F.(안전율)=10, 탄소성재료인 경우 $P \leq -T$ 일 때 $S.F.=1$, $P > -T$ 일 때 $S.F.=q_{ult}/q$, 안전율의 한계는 $1 \leq S.F. \leq 10$ 이다.

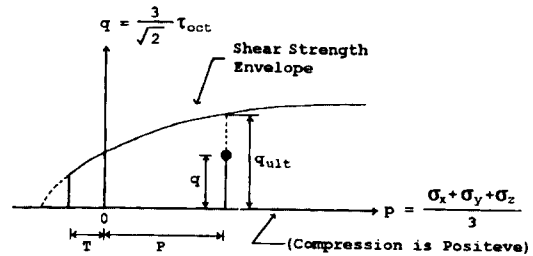


Fig. 2. Definition of Safety Factor.

Table 1. Strength parameters used in the analytical method

Ground Condition	γ (t/m ³)	E (t/m ²)	C (t/m ²)	ϕ (°)	K_0	ν
Weathered Zone	1.9	5,000	3	35	0.5, 1.0	0.3
Soft Rock	2.1	10,000	10	38	0.5, 1.0, 1.5	0.25

Where: γ : Unit weight, ϕ : Internal friction angle, E: Modulus of elasticity, K_0 : Lateral pressure coefficient, C: Cohesion, ν : Poission's ratio.

Table 2. Finite-element mesh variation for the parametric study

Diameter D (m)	Pillar Width PW (m)	Depth H (m)	No. of Node	No. of Element	Diameter D (m)	Pillar Width PW (m)	Depth H (m)	No. of Node	No. of Element
4	1D (4 m)	2D (8 m)	928	879	8	1D (8 m)	2D (16 m)	1056	1007
4	1D (4 m)	3D (12 m)	996	945	8	1D (8 m)	3D (24 m)	1124	1073
4	1D (4 m)	4D (16 m)	1030	978	8	1D (8 m)	4D (32 m)	1158	1106
4	2D (8 m)	2D (8 m)	912	868	8	2D (16 m)	2D (16 m)	1040	996
4	2D (8 m)	3D (12 m)	970	924	8	2D (16 m)	3D (24 m)	1098	1052
4	2D (8 m)	4D (16 m)	999	952	8	2D (16 m)	4D (32 m)	1172	1080
4	3D (12 m)	2D (8 m)	864	823	8	3D (24 m)	2D (16 m)	992	951
4	3D (12 m)	3D (12 m)	916	873	8	3D (24 m)	3D (24 m)	1044	1001
4	3D (12 m)	4D (16 m)	942	898	8	3D (24 m)	4D (32 m)	1070	1026
4	4D (16 m)	2D (8 m)	816	778	8	4D (32 m)	2D (16 m)	944	906
4	4D (16 m)	3D (12 m)	862	822	8	4D (32 m)	3D (24 m)	990	950
4	4D (16 m)	4D (16 m)	885	844	8	4D (32 m)	4D (32 m)	1013	972

3. 해석결과 및 분석

2차원 터널의 유한요소해석을 적용하여, 1차터널 시공후 2차터널 굴진의 영향을 조사하기 위하여 터널간 이격거리에 따라 변화하는 간섭효과를 간섭체적비(dV_s/V_{s2}), 지표면침하증가비(dS_s), 천단변위증가비(dS_{cl}/S_{cl})로 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_{s2})에 대한 1차터널 굴착후 2차터널의 굴착으로 인하여 추가적으로 발생하는 지표침하의 증가체적(dV_s)을 간섭체적비(Volume of Interference, dV_s/V_{s2})로 나타내었으며 Fig. 3과 같다. 이는 2차터널굴착으로 인한 증가영향으로부터 단일터널에 대한 간섭효과 정도를 의미한다.

간섭체적비의 변화에 대한 유한요소해석 결과는 Table 3에 나타나 있다.

무차원화 시킨 터널간 이격거리비(Pw/D)에 따른 지반조건별 간섭체적비의 변화는 Fig. 4와 같다. 터널직경이 4m와 8m일때 풍화대층에서 축압계수 $K_0=1.0$ 인 경우는 같은 지반에서 $K_0=0.5$ 보다 상당한 간섭체적비의 차이를 보이고 있는 반면 그 크기는 연암의 결과와 유사함으로 보아 지중응력상태가 간섭체적비에 상

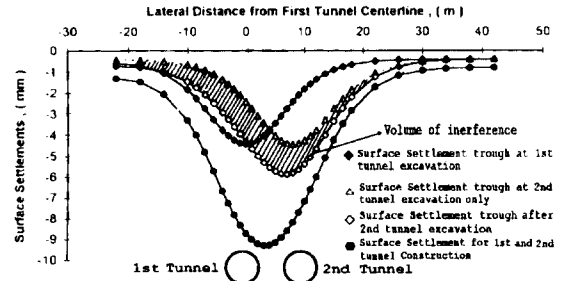


Fig. 3. Surface Settlement based on the volume of interface.

Table 3. Relationship between the volume of interference and pillar width

Tunnel Diameter=4 m (H=4D)					Tunnel Diameter=8 m (H=4D)				
Ground Condition	Pillar Width				Ground Condition	Pillar Width			
	1D	2D	3D	4D		1D	2D	3D	4D
Weathered Zone $K_0=0.5$	0.466	0.334	0.283	0.262	Weathered Zone $K_0=0.5$	0.696	0.432	0.353	0.308
Weathered Zone $K_0=1.0$	0.162	0.065	0.032	0.020	Weathered Zone $K_0=1.0$	0.198	0.093	0.065	0.042
Soft Rock $K_0=0.5$	0.154	0.052	0.021	0.008	Soft Rock $K_0=0.5$	0.206	0.095	0.061	0.046
Soft Rock $K_0=1.0$	0.154	0.052	0.021	0.008	Soft Rock $K_0=1.0$	0.155	0.053	0.023	0.009
Soft Rock $K_0=1.5$	0.154	0.053	0.021	0.009	Soft Rock $K_0=1.5$	0.154	0.053	0.022	0.008

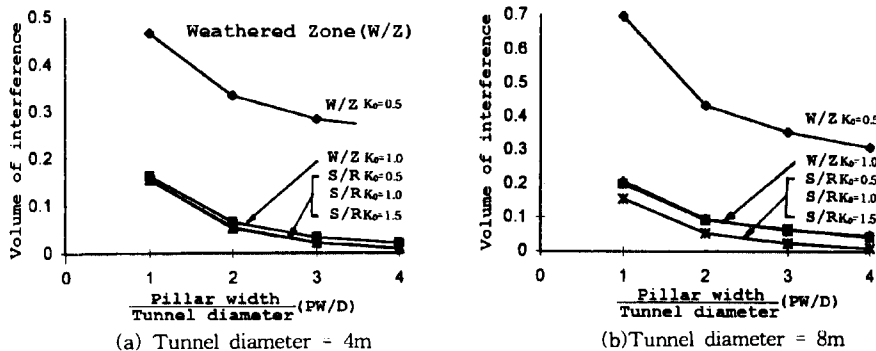
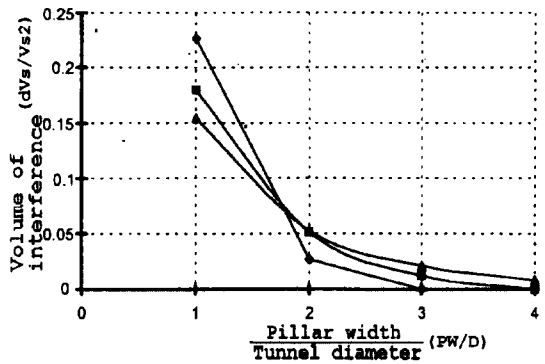


Fig. 4. Twin tunnel distance ratio against volume of interference in various ground conditions.

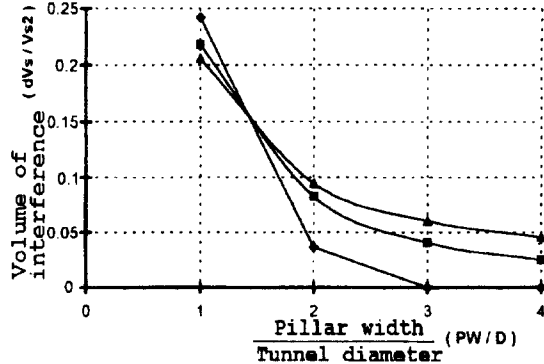
당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

터널간 이격거리가 1D(D:터널직경)에서 2D로 넓어짐에 따라 간섭효과를 나타내는 간섭체적비가 급격히 감소하는 경향을 나타내고 있어 1차터널굴착후 2차터널굴착시 터널간 한계 이격거리는 2D임을 알 수 있었다. 그러나 터널간 이격거리가 3D이상으로 넓어지면 간섭체적비는 일정한 값에 수렴하여 2차터널 굴착으로 인한 간섭체적비의 변화가 뚜렷하게 나타나지 않는다.

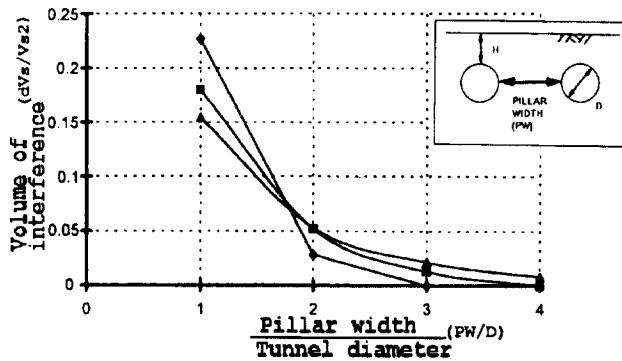
연암터널의 직경이 4 m와 8 m 경우에서(Fig. 5) 터널간 이격거리비가 1D에서 2D로 증가시에 간섭체적비가 급격히 감소함으로써 pillar width가 터널직경의 2배 일 때에 터널심도에 관계없이 최소의 영향을 미칠 수 있는 거리임을 알 수 있다. 비교적 얇은 토피인 H=2D경우에 터널간 이격거리비가 1에서 2로 증가되면 깊은 토피인 H=3D, 4D보다 적은 간섭체적비를 나타내고 있다.



(a) $K_o=0.5$ (Soft Rock, Tunnel, Diameter = 4 m)



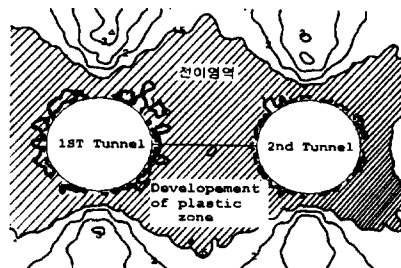
(b) $K_o=0.5$ (Soft Rock, Tunnel, Diameter = 8 m)



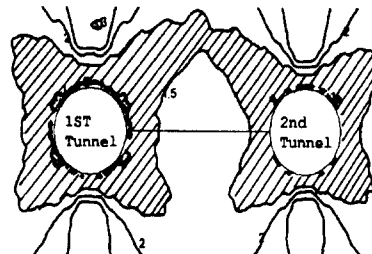
(c) $K_o=1.0$ (Soft Rock, Tunnel, Diameter = 8 m)

Fig. 5. Twin tunnel distance ratio against volume of interference for various tunnel depth in soft rock.

▲H : 4D, ■H : 3D, ●H : 2D

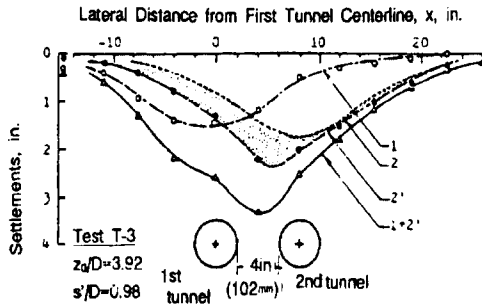


(a) Pillar Width = 1D

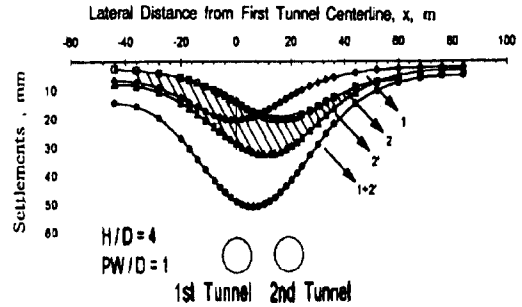


(b) Pillar Width = 2D

Fig. 6. Development of plastic zone at decrease of two tunnel distance.



Curve 1=Surface settlement at 1st tunnel exc.
Curve 1+2'=Final settlement (Dense Sand)
(a) Model Test⁽³⁾



Curve 2'=Surface settlement at 2nd tunnel exc.
Curve 2=Surface settlement at 2nd tunnel exc. only.
(b) FEM. Solution (Weathered Zone)

Fig. 7. Model test results are compared with the numerical solution of similar conditions

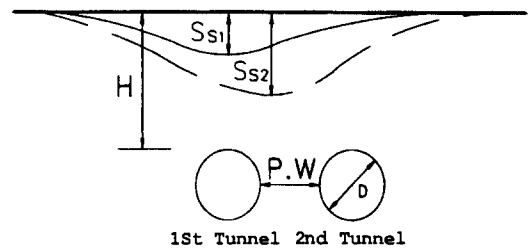
Table 4. A comparison of model test result with the numerical analysis

Test No	Tunnel Geometry				Ground Loss, 2nd Tunnel in ³ /in (mm ³ /mm)	Observed Volume of Surface Settlement			Vol. of settl. 2nd Tunnel only V _{S2}	Vol. of Interf ΔVs	ΔVs/V _{S2} Model Test	ΔVs/V _{S2} FEM Result
	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

터널간 이격거리가 1D에서 2D로 증가하면 간섭체적비가 급격히 감소하는 경향은 Fig. 6에 도시한 쌍굴터널 주변지반의 소성영역을 나타내는 안전율에서도 확인할 수가 있다. 그 이유로는 소성영역의 범위가 터널주변으로 좁아들고 이로 인하여 주변지반의 이완영역이 감소하므로서 1D의 경우보다 2D의 경우에서 간섭체적비가 급격히 감소되는 결과를 가져오게 된다.

쌍굴터널 주변지반의 소성영역을 나타내는 안전율 분포비교를 나타낸 Fig. 6에서 터널간 이격거리가 2D에서 1D로 감소됨에 따라 전이 영역이 합쳐지면서 두 터널 전체가 소성영역으로 변함을 알 수 있다.

Fig. 7은 쌍굴터널굴착에 따른 지표침하량분포와 지표침하곡선의 변화 및 쌍굴터널중 2차터널굴착에 대한 간섭체적비를 모형실험의 결과³⁾와 본 연구에서의 풍화대층에 대한 토피고 4D, 터널간 이격거리 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 모형실험(토피고 3.92, 터널간 이격거리 0.98D) 결과와 해석결과가 일치하는 경향을 나타내었다. Table. 3에서

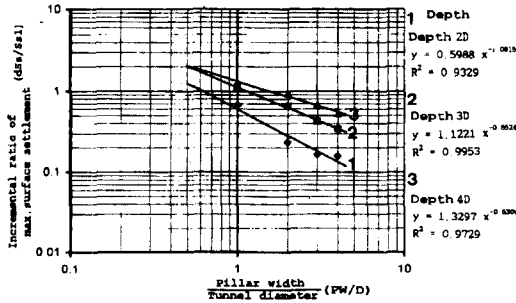


Where, $dS_s = S_{s2} - S_{s1}$
S_{S1}: Max. surface settlement at 1st tunnel excavation.
S_{S2}: Max. surface settlement at 2nd tunnel excavation.
Fig. 8. Incremental ratio of maximum surface settlement (dS_s/S_{s1}).

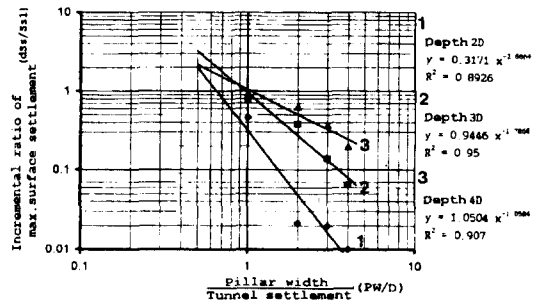
모형실험에 의한 간섭체적비와 해석에 의한 간섭체적비의 차이를 조금 보이고 있으나 이는 실제지반조건 및 실험시 굴착방법 등의 차이에서 기인하는 것으로 판단된다. 여기서 터널간 이격거리비가 증가함에 따라 간섭체적비가 감소하는 것을 볼 수 있다.

3.2 지표면 최대침하량 증가비

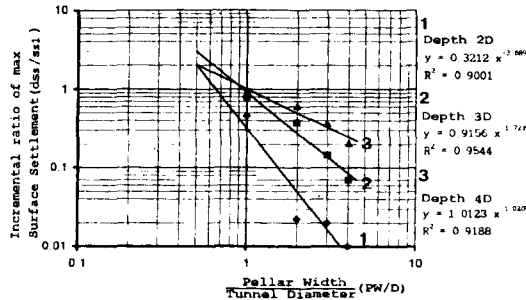
1차터널 굴착후 2차터널 굴진시에 지표면 최대침하량의 증가비를 지반조건, 터널직경, 토피고 및 터널간



(a) Tunnel Diameter = 4 m (Weathered Zone, $K_0=0.5$)



(b) Tunnel Diameter = 4 m (Soft Rock, $K_0=1.5$)



(c) Tunnel Diameter = 8 m (Soft Rock, $K_0=1.5$)

Fig. 9. Twin tunnel distance ratio against incremental ratio of maximum surface settlement various tunnel locations.

이격거리의 변화에 따라 분석하여 Fig. 9에 나타내었다. 지표면 침하량증가비(dS_0/S_{s1})의 설명은 Fig. 8과 같다.

연암층에서 Fig. 9(b), (c)의 경우 토압계수(K_0)의 변화에 따른 지표면 최대침하증가비의 차이는 없었다. 풍화대층의 경우에는 터널간 이격거리비의 증가에 따라 지표면 최대침하증가비의 감소가 완만하였으나 연암에서는 그 감소율이 급격하여 강도가 높은 지반일수록 터널간 거리에 민감한 영향을 나타낸다. 연암에서 터널직경이 4 m와 8 m인 경우, 터널직경비에 관계없이 지표면 최대침하량의 증가비는 비슷한 경향을 보이고 있다. 해석결과로부터 주어진 터널조건하에서 터널간 이격거리비의 변화에 따른 지표면 최대침하량의 증가비를 예측할 수 있는 관계식을 유도하였다. 이 공식들은 향후 보다 많은 모형실험이나 실측자료의 분석에 의하여 정확히 규명하는 것이 바람직하다고 사료된다.

$Y = \alpha X^\beta$ Where: $Y = dS_0/S_{s1}$
 $X = PW/D$
 $\alpha, \beta = \text{Coefficient}$

◎풍화대층(D=8 m)

$K_0=0.5$ 경우 $\alpha=0.99, \beta=-0.66$ (토피고 2D)

$\alpha=1.34, \beta=-0.73$ (토피고 3D)

$\alpha=1.55, \beta=-0.72$ (토피고 3D)

◎연암층(D=8 m)

$K_0=1.5$ 경우 $\alpha=0.32, \beta=-2.69$ (토피고 2D)

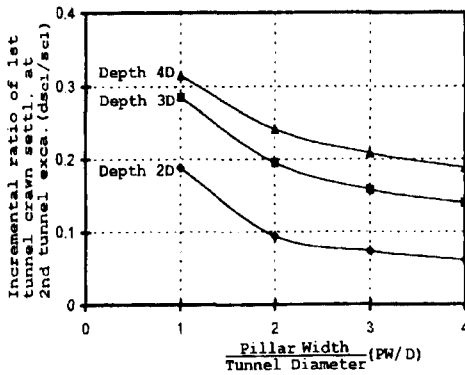
$\alpha=0.92, \beta=-1.72$ (토피고 3D)

$\alpha=1.01, \beta=-1.04$ (토피고 4D)

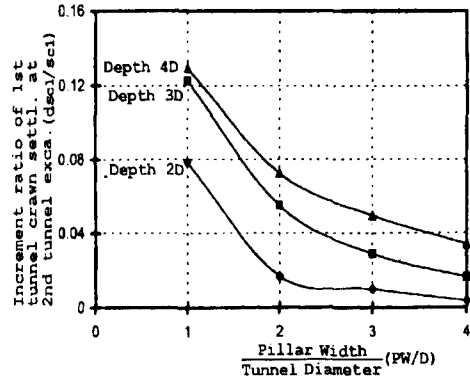
3.3 천단침하 증가비 분석

터널굴착에 의한 주변지반거동에 영향을 주는 요소 중 천단침하는 터널주변지반에 이완영역을 발생시키며, 이로 인하여 지표면 침하에 영향을 미쳐 터널상부 인접구조물에 영향을 줄 수 있는 중요한 요소이다. 쌍굴터널 굴착해석중 1차터널굴진후 2차터널굴진에 의한 1차터널의 천단침하 증가비를 토피고, 지반조건, 터널 직경에 대하여 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 2차터널 굴진에 의한 1차 터널의 천단침하증가비는 dS_{c1}/S_{c1} 으로 나타내었고, $dS_{c1} = S_{c2}$ (2차터널 굴착에 의한 1차터널 천단침하량) - S_{c1} (1차터널 굴착에 의한 1차터널 천단침하량). 천단침하비의 의미는 2차터널 굴착에 의한 1차터널 천단침하량의 영향을 예측하고자 한다.

해석 결과에서 터널간 이격거리가 1D에서 4D까지 변화함에 따라 천단침하증가비가 감소하는 것을 볼 수



(a) Weathered Zone Tunnel (D=4 m, Ko=0.5)



(b) Soft Rock Tunnel (D=4 m, Ko=0.5)

Fig. 10. Twin tunnel distance ratio against incremental ratio of tunnel crown settlement.

있으며, 특히 토피고가 2D이고 터널간 이격거리비 (PW/D)가 2이상인 경우에는 감소하는 비율이 낮아지는 경향으로 나타나 쌍굴터널 굴착시의 터널간 한계 이격거리비가 2D임을 알 수 있다.

지반조건을 풍화대층으로 가정한 경우의 해석결과에서 터널간 이격거리비가 4D까지 증가하여도 천단침하 증가비가 계속 감소하고 있으므로, 2차터널굴착으로 인한 1차 터널의 천단침하에 영향이 계속되고 있다. 지반조건을 연암층으로 가정한 경우의 해석 결과에서는 천단침하증가비가 최대 0.16으로 풍화대층의 0.32에 비하여 반으로 감소되고 있어 2차터널굴착으로 인한 영향이 미소함을 알 수 있으며, 특히 토피고2D이고 터널간 이격거리비가 2이상에서는 2차터널굴착에 의한 영향은 거의 없다.

4. 결 론

쌍굴터널굴진에 따른 주변지반(풍화대층, 연암층)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) 터널간 이격거리(Pillar폭)가 1D에서 4D로 변화함에 따라 일반적으로 간섭체적비의 감소경향을 나타내었으며, 터널간 이격거리가 2D에서 1D로 감소시에 가장 급격한 간섭체적비의 증가현상을 나타내었다. 그러므로 쌍굴터널 굴착의 경우 터널간 이격거리를 최소한 터널직경의 2배이상으로 유지시켜 주는 것이 간섭

효과를 감소시키고 주변지반의 안정성을 확보하는데 유리할 것으로 판단된다. 이는 지표면침하증가비, 천단침하증가비의 분석에서도 나타나있다.

2) 모형실험과 본연구결과를 유사한 조건하에서 비교분석하여보면, 간섭체적비는 터널심도가 깊어짐에 따라서 약간의 변화가 있으나 실제 지반조건의 차이 및 실험방법 등을 고려하더라도 그 차이가 0.1~0.3% 정도로 상당히 근접함을 보이고 있다.

3) 수치해석 결과의 분석을 통하여 터널간 이격거리비 (X=PW/D)의 변화에 따른 지표면 최대침하량의 증가비 (Y=dS_s/S_{s1})를 나타내는 관계식을 다음과 같이 얻었다.

$$Y = \alpha X^\beta \quad (\text{여기서 } \alpha, \beta \text{는 계수})$$

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

참 고 문 헌

1. 이봉열, 김광진, 김학문 (1994) "Hoek-Brown암반모델을 이용한 비선형 유한요소 터널해석 및 평가", 한국지반공학회 창립10주년기념 및 '94가을 학술발표회 논문집.
2. 이봉열, 김광진, 김학문 (1995) "비선형 유한요소법을 이용한 터널해석 및 효율성 평가", 대한토목학회논문집 제15권 제3호.
3. Hong, S. W (1984) "Ground movements around model Tunnels in sand", University of Illinois at Urban-Champaign USA, PhD.