

도시 NATM 터널에서 변위에측기술의 적용 사례연구
A CASE STUDY ON DISPLACEMENT FORECASTING METHOD IN TUNNELLING BY NATM IN URBAN AREA

정한중, HAN-JOONG CHUNG*; 조경태, KYUNG-TAE CHO**; 김태영, TAE-YOUNG KIM**; 김용일, YONG-IL KIM**

* (주)대우 건설기술연구소 선임연구원, Senior Research Engineer, Daewoo Institute of Construction Technology
** (주)대우 건설기술연구소 연구원, Research Engineer, Daewoo Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : In tunnelling by NATM convergence data are used most importantly to ascertain the safety of tunnel. Therefore, a reliable method is required that can predict ultimate displacements by using earlier displacement data. Displacement forecasting method is classified into statistical method and functional regression method. Convergence data measured in Seoul subway 5-45 site during '92.5 ~ '92.12 were analyzed by above said two methods. The analysis results of convergence data show that the functional regression method is more reliable in completely weathered rock, but the statistical method in slightly weathered rock.

1. 서론

터널굴착에 따른 내공변위량의 변화는 막장에서 관찰되는 지질상태의 변화와 함께 시공 관리상 가장 중요한 지표가 된다. 지질상태 및 시공상황의 변화에 따른 내공변위의 변화상을 감시하고, 굴착 개시후 되도록이면 초기에 최종변위량을 예측하는 것은, 최종적인 터널의 안정성을 조기에 예측하기 위한 중요한 척도가 된다.

최종변위량의 예측방법으로 과거의 시공실적에 기초하여 굴착 후 초기의 변위량에서 최종변위량을 통계적 수법을 이용하여 예측하는 방법과 내공변위 곡선을 임의의 함수(지수함수, 분수함수 등)도 근사하여 초기의 변위량에서 최종변위량을 예측하는 방법에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다.

예를 들면 吉川등(1983)은 철도터널에서의 계속사태에 근거하여 최대 변위속도(초기변위속도)가 최대변위량(최종변위량)과 양 대수용 지상에 정비례 관계가 있음을 보였으며, 단면법(단선, 복선), 시공법법(전단면 공법, Bench Cut 공법)의 상관도에 의해 보다 간편한 예측법을 제안하였다. 또한 福代(1984)는 本四備續線 터널의 계속 Data를 통계적으로 분석하여 최대변위속도가 최종변위량과 양대수 용지 상에 정비례 관계에 있음을 보였다. 그뒤, 大川등(1992)은 畷田 터널의 구간별 계속 Data를 분석하여 최대변위속도가 최종변위량과 정비례 관계에 있음을 보였다.

五味등(1981), 高橋등(1986), 増本등(1988)은 NATM 터널의 계속결과를 통계분석하여 막장거리 1D에서의 변위량이 최종변위량과 정비례 관계에 있음을 보였다.

함수에 의한 근사 예로는 Liu등(1986)은 분수함수에 의해 초기변위량을 근사 해석하여 최종변위량의 예측이 가능함을 보였다. 그뒤, Junichi등(1987), Minoru등(1988)은 지수함수에 의해 초기변위량을 근사 해석하여 최종변위량의 예측이 가능함을 보였다.

따라서, 본 연구에서는 통계적 방법 및 함수에 의한 근사방법에 의한 최종변위 예측기술의 적용 가능성을 알아보기 위하여, 서울 지하철 5호선 45공구 현장에서 실측한 내공변위 Data에 적용하여, 변위에측 기술의 타당성 및 정확도를 분석·검토하였다. 계속 Data의 부족 및 분석적인 면에서 미흡한 점이 많으나, NATM Tunnel에서의 내공변위 예측에 관한 Data로서 참고가 되고자 하였다.

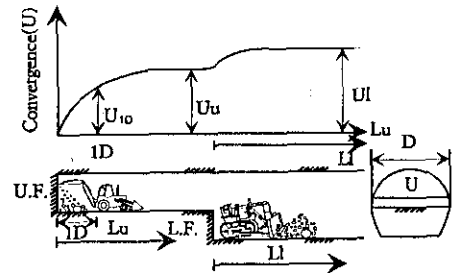


그림 1. 막장굴착에 따른 내공변위 변화

2. 분석내용

터널굴착에 따른 내공변위 증가는 일반적으로 그림 1과 같은 경향을 나타낸다. 즉, 상반 막장 굴착에 따라 내공변위량이 증가하여 상반굴착에 따른 최종변위(Uu, 이하 상반최종변위)로 수렴하다가, 하반굴착에 의해 다시 내공변위가 증가하여 최종적으로 상·하반굴착에 따른 최종변위(U1, 이하 하반최종변위)로 수렴하는 경향을 나타낸다.

본 연구에서는 서울지하철 5-45현장의 내공변위 측정 Data를 중심으로 상반막장거리(Lu) 1D에서의 내공변위 Data와 상반최종변위(Uu)의 상관관계 및 초기 최대변위속도(Vmax)와 상반최종변위(Uu)의 상관관계를 이용하여 상반최종변위(Uu)를 초기에 예측하는 회귀식을 구하였으며, 상반최종변위(Uu)와 하반최종변위(U1)의 상관 관계를 이용하여 하반최종변위(U1)를 예측하는 회귀식을 구하여 상관관계를 검토하였다.

또한 상반막장거리(Lu)가 1D 이내인 때의 내공변위 Data를 이용하여 상반막장 거리의 변화에 따른 내공변위의 변화를 지수함수, 분수함수 등에 의하여 회귀분석을 수행하여 그 상관계수 및 실측치와의 비교·분석을 통하여 각 함수의 특성 및 정확도를 분석하였으며, 기존 함수의 수정·보완을 통하여 최적 근사함수를 모색하였다.

3. 현상상황 및 측정결과

서울지하철 5호선 5-45 공구 직선부 터널은 PD-3 복선단면의 수정 마제형이며, 주 지보공으로 직경 25mm, 길이 3.0m의 Rockbolt 16개, Shotcrete 20cm 및 Wiremesh 2겹, H125의 강지보공으로 구성되어 있다. 터널 굴착방법은 Short Bench Ring Cut으로 상반굴착후 Shotcrete 5cm 타설, 강지보공 설치, Rockbolt 타입 및 Shotcrete 15cm 타설 순으로 시공하고, 상반굴착 진행과 병행하여 20m~40m 간격을 두고 하반을 같은 방법으로 굴착 시공하였다.

당 현상의 11月末 현재 계속기 설치현황은 그림 2와 같으며, Shaft를 기준으로 시점부 4 축점(Sta. 782, 790, 795, 800), 중점부 3 축점(Sta. 845, 860, 880)에서 측정한 내공변위 Data를 예측방법에 의해 각각 분석하였다.

시점부의 지질은 파쇄 정도가 매우 심한 풍화암(Completely Weathered Rock, 이하 강풍화암)으로서 상반굴착에 따른 내공변위의 전체적인 변화 경향은 그림 3(a)와 같으며, 내공변위량은 40mm~90mm 정도의 큰 변위량을 나타내었다.

중점부의 지질은 풍화 정도가 약간 풍화암(Slightly Weathered Rock, 이하 약풍화암)으로서 상반굴착에 따른 내공변위의 전체적인 변화 경향은 그림 3(b)와 같으며, 내공변위량은 1mm~6mm 정도의 매우 작은 변위량을 나타내었다.

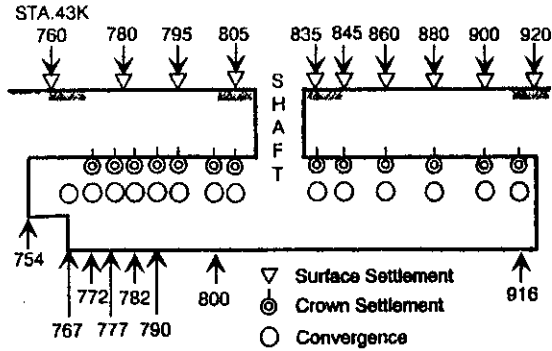


그림 2. 일상계속(A 계속) 항목 및 위치

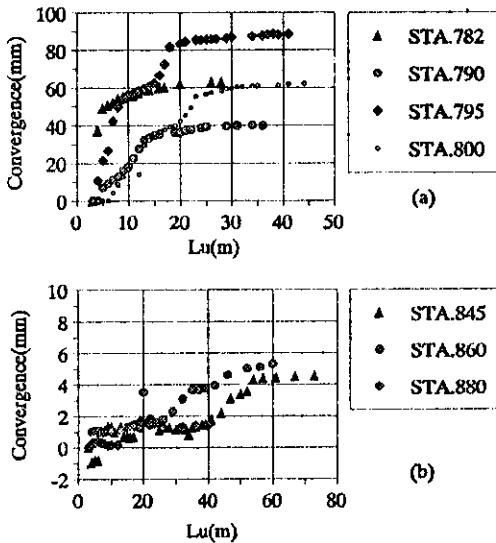


그림 3. 상반굴착에 따른 내공변위 변화 (a) 강풍화암 (b) 약풍화암

4. 분석결과

본 연구에서는 강풍화암(시점부)과 약풍화암(중점부) 각각에 대하여 상반막장거리가 1D 이내의 Data를 이용하여 통계적 방법 및 함수에 의한 근사 방법을 통한 최종변위의 예측을 수행하였으며, 예측치와 실측치의 비교·분석을 통하여 예측 방법의 타당성을 점검하였다.

4.1 통계적 방법

4.1.1 굴착초기변위와 상반최종변위의 상관관계

상반굴착 이후 상반막장거리가 1D 인 때의 내공변위량과 상반최종 변위량 사이의 상관관계를 알아내기 위하여 막장거리 1D 에서의 내공 변위 Data와 상반최종변위 Data를 1차식에 의한 회귀 분석을 한 결과, 강풍화암(시점부)의 경우 그림 4와 같은 결과를 얻었으며, 약풍화암 (중점부)의 경우는 그림 5와 같은 결과를 얻었으며, 이 결과도 부더 다음과 같은 경향을 알 수 있었다.

강풍화암(시점부)의 경우는 막장거리가 1.0D에서 상관관계가 낮은 값(0.71)을 나타내었다. 이것은 내공 변위의 변화 경향(그림 3(a))이 Sta. 782와 같이 초기에 급격한 변위를 나타낸 후에 초기에 수렴하는 경우도 있으나, Sta. 800처럼 초기에는 변위가 거의 없지만 막장 거리가 증가함에 따라서 꾸준히 변위가 증가하여 천천히 수렴하는 경우도 있기 때문으로 판단된다.

약풍화암(중점부)의 경우는 막장거리가 1.0D 에서 상관계수가 0.93 을 나타내어 회귀식의 정확도가 상당히 높은 결과를 얻었다. 이것은 내공변위의 변화경향(그림 3(b))이 강풍화암의 경우와는 달리, 초기에는 변위가 적지만 막장 거리가 증가함에 따라 꾸준히 증가하는 일정한 경향을 따라서 변화하고 있기 때문으로 판단된다.

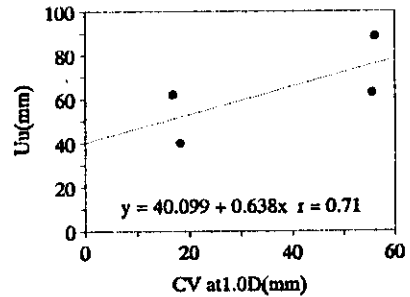


그림 4. 상반막장이 1D인 때의 내공변위(CV)와 상반굴착에 따른 최종변위(Uu)의 상관관계(강풍화암)

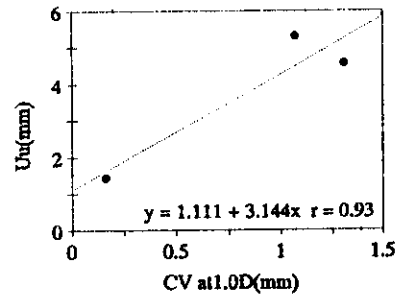


그림 5. 상반막장이 1D인 때의 내공변위(CV)와 상반굴착에 따른 최종변위(Uu)의 상관관계(약풍화암)

4.1.2 최대변위속도와 상반최종변위의 상관관계

상반괄장거리가 1.0D 이내인 때의 내공변위 Data중 최대변위속도와 상반최종 변위 Data를 1차식에 의한 회기분석을 수행한 결과, 강중화압(시점부)의 경우는 그림 6과 같은 결과를 얻었고, 약중화압(중점부)의 경우는 그림 7과 같은 결과를 얻었다. 한편, 최대변위속도와 상반최종변위를 Log Scale로 변환하여 1차식에 의한 회기분석을 수행한 결과, 강중화압(시점부)의 경우는 그림 8과 같은 결과를 얻었고, 약중화압(중점부)의 경우는 그림 9와 같은 결과를 얻었다.

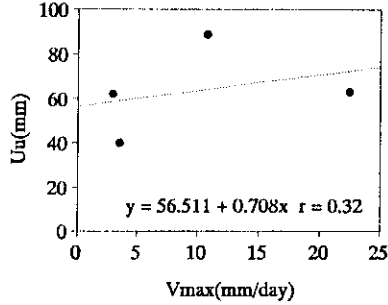


그림 6. 상반괄착에 따른 최대변위속도(Vmax)와 최종변위(Uu)의 일차식에 의한 상관관계(강중화압)

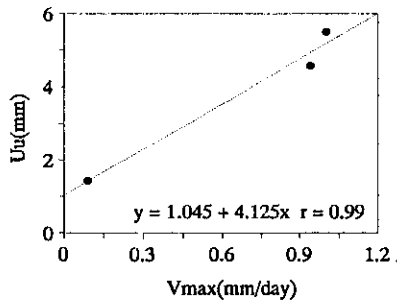


그림 7. 상반괄착에 따른 최대변위속도(Vmax)와 최종변위(Uu)의 일차식에 의한 상관관계(약중화압)

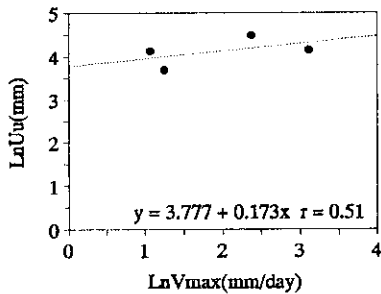


그림 8. 상반괄착에 따른 최대변위속도(Vmax)와 최종변위(Uu)의 Log변환에 의한 상관관계(강중화압)

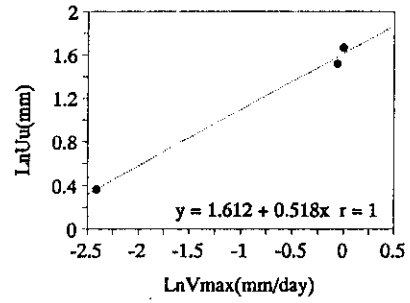


그림 9. 상반괄착에 따른 최대변위속도(Vmax)와 최종변위(Uu)의 Log변환에 의한 상관관계(약중화압)

강중화압(시점부)의 경우 일반 1차 회기식에 의한 분석방법보다 Log 1차 회기식에 의한 분석방법의 경우가 상관계수가 1.6배 정도 크게 나왔으나, 상관계수 값은 0.32, 0.51의 매우 낮은 값을 나타내었다. 이것은 강중화압(시점부)의 변위양상이 지점별로 많은 차이를 나타내어, Sta. 782의 경우는 처음에는 변위속도가 큰 반면 이후에는 변위속도가 계속 크게 감소하여 수렴하는 경향을 나타내지만, Sta. 795의 경우는 처음에는 변위속도가 크지 않지만 이후에는 변위속도가 크게 감소하지 않고 증감을 거듭하여 0.8D까지 일정하게 유지하는 변위 경향을 보이기 때문으로 판단된다. 이와같이 변위경향이 차이가 발생하는 원인은 강중화압(시점부)의 지점별 지질상태, 응수, 시공상황 등의 차이가 복합적으로 작용한 결과라고 판단된다.

약중화압(중점부)의 경우도 일반 1차 회기식에 의한 분석 방법보다 Log 1차 회기식에 의한 분석방법의 경우가 상관계수가 크게 나왔으나, 그 차이는 미미하였으며, 상관계수 값은 0.99, 1.0의 매우 높은 값을 나타내었다. 이것은 약중화압(중점부)의 변위양상이 지점별로 큰 차이가 없이 처음에 큰 변위속도를 나타낸 후 변위 속도가 급격히 감소하여 거의 수렴한 뒤, 막장거리 1D 이후부터 다시 변위속도가 증가할 후 수렴하는 경향을 나타내기 때문으로 판단된다. 이와같이 변위경향에 차이가 없는 이유는 약중화압(중점부)의 경우 지점별 지질상태 및 시공상황 등이 거의 일정하기 때문으로 판단된다. 또한 중점부의 경우 초기에 지반 변위를 제어하는 NATM의 기본원리에 충실히 따랐기 때문으로 판단된다.

4.1.3 상반최종변위와 하반최종변위의 상관관계

상반괄착에 따른 최종변위와 하반괄착이 완료된 후의 최종변위 사이의 관계를 1차식에 의한 회기분석을 수행한 결과, 강중화압(시점부)의 경우는 그림 10과 같은 결과를 얻었고, 약중화압(중점부)의 경우는 그림 11과 같은 결과를 얻었다.

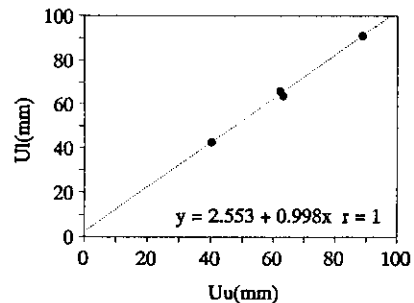


그림 10. 상반괄착에 따른 최종변위(Uu)와 상·하반괄착에 따른 최종변위(U1)의 상관관계(강중화압)

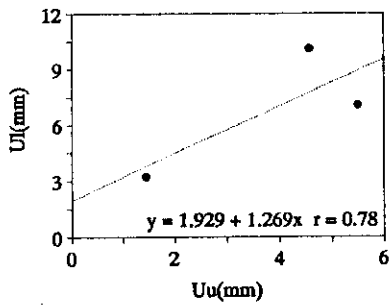


그림 11. 상반굴착에 따른 최종변위(Uu)와 상·하반굴착에 따른 최종변위(Ui)의 상관관계(약중화암)

회귀분석 결과 강중화암(시점부)의 경우가 약중화암(종점부)의 경우보다 상관 계수가 높은 결과를 얻었다. 이것은 강중화암(시점부)의 경우 하반 굴착에 의한 추가변위가 작지만, 약중화암(종점부)의 경우는 하반굴착에 의한 추가변위가 크기 때문으로 판단된다.

4.2 함수에 의한 근사방법

상반 막장거리가 1D 이하인 때의 Data를 본 장에서는 표1과 같은 함수에 의하여 근사해석을 수행하였다.

표 1. 근사함수의 종류

함수	이름	함수식	미지수
지수함수	EXP1	$U = A(1 - \exp(-B \cdot (L-3)))$	A, B
	EXP2	$U = A(1 - \exp(-B \cdot L)) - A(1 - \exp(-3 \cdot B))$	A, B
	EXPM	$U = A(1 - \exp(-B \cdot (L-C)))$	A, B, C
분수함수	FRA1	$U = A \cdot B \cdot (L-3) / (B \cdot (L-3) + 1)$	A, B

(U: 내공변위, L: 막장거리)

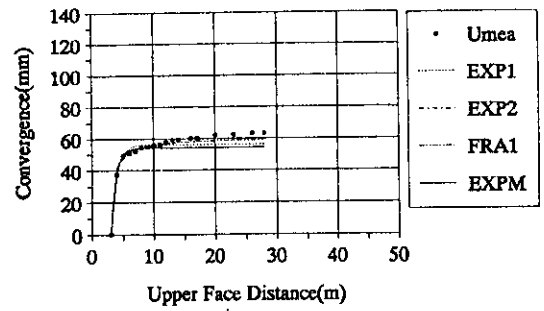
함수는 지수함수와 분수함수를 기본으로 하였으나, 내공변위 측정을 상반 막장거리가 3m 떨어진 시점부터 시작하였으므로 각각 x축으로 Graph를 3m 이동시킨 EXP1과 FRA1에 관하여 근사해석을 수행하였다. 지수함수의 경우는 계속개시 지점인 상반 막장거리 3m 이전에도 변위가 발생하였다는 개념을 도입하여 지수함수를 $-A(1 - \exp(-3 \cdot B))$ 만큼 y축으로 이동시킨 EXP2에 대하여 근사해석을 수행하였다. 또한, 계속된 내공변위 Data의 변화 특성을 고려하여 지수함수의 x축 이동량(C)을 미지수화 한 EXPM에 대한 근사해석을 수행하였다.

이들 4가지 함수를 강중화암(시점부), 약중화암(종점부)에 각각 적용하여 미지수 값 및 상관계수를 구하였으며, 실측된 상반최종변위와의 비교를 통하여 각 함수의 예측 정도를 비교, 검토하였다.

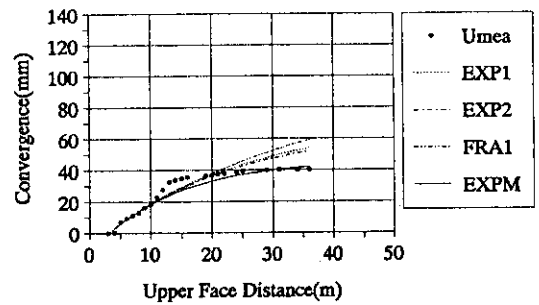
4.2.1. 강중화암(시점부)

강중화암(시점부)의 내공변위 Data중 상반막장거리 1D까지의 Data에 대하여 위의 4가지 함수를 이용하여 근사해석을 수행한 결과 그림 12와 같은 결과를 얻었다. 또한, 각 함수에 의한 최종변위예측 결과와 실측된 최종변위의 지점별 비교 결과는 그림 13에 나와 있다.

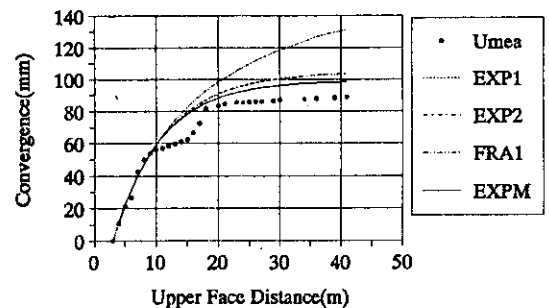
각 함수에 의한 근사해석 결과를 검토해보면 FRA1이 대체로 다른 함수에 비해서 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, EXP1과 EXP2는 Sta. 790을 제외하고는 거의 같은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 예측치의 정확도를 기준으로 검토해보면, EXPM이 Sta. 782의 경우를 제외하고는 가장 정확한 예측을 하고 있음을 알 수 있으며, EXP1과 EXP2가 그 다음으로 정확한 예측을 수행하였다. FRA1은 Sta. 780에서만 가장 정확한 예측결과를 나타내었음 뿐 그 이외의 경우에는 대체로 실측치보다 상당히 큰 값을 나타내었다.



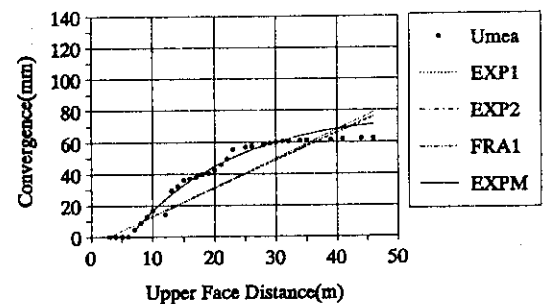
(a) STA.782



(b) STA.790



(c) STA.795



(d) STA.800

그림 12. 상반굴착에 따른 내공변위 Data와 근사함수에 의한 변위예측곡선의 비교(강중화암)

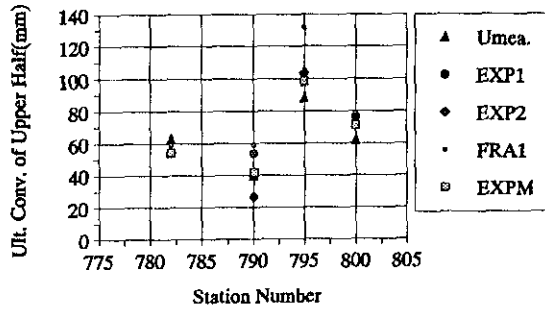


그림 13. 상반굴착에 따른 최종 내공변위 Data와 근사함수에 의한 예측치의 비교(강중화암)

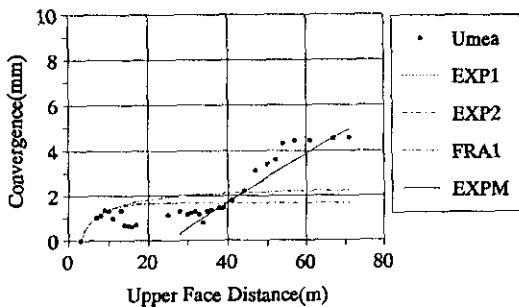
각 함수에 의한 근사해석 결과를 최종변위 뿐만 아니라 중간 Data와의 근사도를 검토해 보면, EXPM이 가장 실측 Data에 근사하다는 사실을 알 수 있다. 특히, Sta. 800에 있어서는 계속 Data의 특성상 상반막장거리가 6m 떨어진 지점까지 거의 변위가 발생하지 않다가 7m 떨어진 지점부터 변위가 발생하기 시작하는 경향을 보이는 x축 절편을 자유로이 옮길 수 있는 EXPM이 가장 정확한 예측을 수행하는 결과를 나타내었다.

4.2.2. 약중화암(중점부)

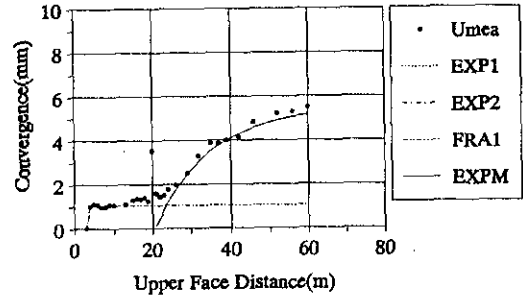
약중화암의 내공변위 변화 양상을 보면 상반굴착에 의한 내공변위량은 초기에는 1mm~2mm의 매우 작은 값으로 수렴하였으나, 하반굴착에 의해 하반 막장면이 계속지점을 통과한 뒤에, 다시 상반을 굴착한 경우에는 내공변위가 다시 증가하는 경향을 나타내었다.

따라서, 약중화암(중점부)의 경우에는 상반막장거리 1D까지의 내공변위 Data를 이용하여 예측한 결과를 하반막장이 계속 지점을 통과하기 이전까지의 1차 수렴치를 예측하는 것은 가능하다, 하반막장이 계속 지점을 통과한 이후 다시 상반 막장을 굴착하는 경우에 발생하는 내공변위의 2차 수렴치를 예측하는 것은 불가능하였다.

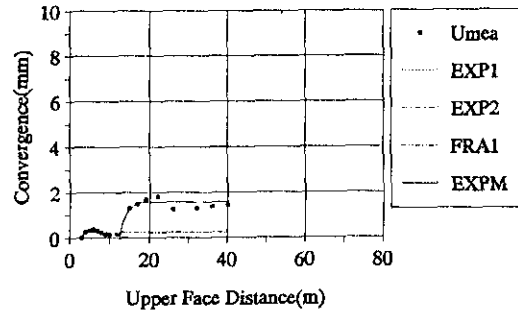
이와같이 하반막장이 계속지점을 통과한 이후 상반막장을 2차로 굴착하는 경우 추가변위가 발생하는 이유는 하반 막장의 통과로 인하여 계속 지점에서의 터널의 굴착 면적이 증가하였기 때문에 기존의 구조적 평형 상태가 깨지면서 상반굴착의 영향 범위를 넘어났던 계속지점이 다시 영향 범위내로 편입됨에 의한 결과로 사료된다. 그런데, 이와 같은 현상은 암중에 상관없이 발생하였으나, 강중화암(시점부)의 경우 1차 변위가 매우 크기 때문에 2차 변위에 의한 영향이 작았으나, 약중화암(중점부)의 경우는 1차 변위가 작아서 2차 변위에 의한 영향이 크게 나타나는 결과를 얻었다고 사료된다.



(a) STA.845



(b) STA.860



(c) STA.880

그림 14. 상반굴착에 따른 내공변위 Data와 근사함수에 의한 변위예측곡선의 비교(약중화암)

이에 대한 해결책으로 하반막장이 계속지점을 통과한 이후 다시 상반막장을 굴착하여 1D 정도 막장이 진행된 때 까지의 Data를 이용하여 EXPM 함수에 의한 근사해석을 수행한 결과 그림 14 같은 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

NATM에 의한 Tunnel 시공에 있어서 막장거리가 1D 이내인 때의 초기 내공변위 Data를 이용하여 최종변위를 통계적 방법 및 함수 근사법을 이용하여 예측을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 통계적 방법에 의한 예측에서, 상반굴착에 따른 초기 내공변위와 최종변위의 상관관계를 분석한 결과 강중화암(시점부)의 경우 막장거리 1D에서의 상관계수가 낮은 값(0.71)을 나타내었으나, 약중화암(중점부)의 경우 막장거리 1D에서 상관계수가 높은 값(0.93)을 나타내었다.
- (2) 상반굴착에 따른 최대변위속도와 최종변위의 상관관계를 분석한 결과 강중화암(시점부)의 경우 상관 계수가 0.32(일반 1차 회기), 0.51(log 1차 회기)의 낮은 값을 나타내었으나, 약중화암(중점부)의 경우 상관 계수가 0.99(일반 1차 회기), 1.0(log 1차 회기)의 높은 상관 관계를 나타내었다.
- (3) 상반굴착에 의한 최종변위와 상,하반굴착에 의한 최종변위의 상관관계를 분석한 결과 강중화암(시점부)의 경우 높은 상관계수(1.0)를 나타내었으나, 약중화암(중점부)의 경우는 낮은 값(0.78)을 나타내었다.

- (4) 함수근사법에 의한 예측에서, 상반굴착에 따른 초기 내공변위 Data(막장거리 1D이하)를 지수함수(EXP1, EXP2, EXPM)와 분수함수(FRA1)을 이용하여 근사해석을 수행한 결과 강중화암(시점부)의 경우, 최종변위 뿐만 아니라, 중간 Data와의 근사도를 종합적으로 검토해 보면, EXPM이 가장 정확한 예측을 수행하였다. 약중화암(중점부)의 경우 1차 상반굴착에 따른 내공변위의 1차 수렴치에 비해, 하반굴착 이후 2차 상반굴착에 의해 더 큰 내공변위가 추가로 발생하는 경향을 보여, 초기변위 Data(막장거리 1D 이하)에 의한 최종변위 예측은 실제와 맞지않는 결과를 보였다.

이상의 분석결과를 종합해 보면, 내공변위는 강중화암(시점부)의 경우 함수근사법이 보다 정확한 예측결과를 나타내었으며, 약중화암(중점부)의 경우 통계적 방법이 보다 정확한 예측결과를 나타내었다. 지표침하 및 천단침하의 경우 함수 근사법에 의해 정확한 예측이 가능하였다.

<참 고 문 헌 >

- (1) 吉川惠也, 祖倉俊弘, 日吉直, 遠藤眞一(1983). NATM計測実績の統計分析. 第 5回岩盤力学に関するシンポジウム.
- (2) 福代博志(1984). 本四備讃線下付トンネルの計畫と施工. 鐵道土木, Vol.26, No.10.
- (3) 大川征治, 伊藤修, 大窪克巳(1992). 新第三紀泥岩を補助へんち付き全断面で掘削 長野自動車道 會田トンネル. トンネルと地下, Vol.23, No.4.
- (4) 高橋文雄, 佐藤馨介, 關順一, 岡園正之(1986). 變形の大きいトンネルでの計測管理事例. 土と基礎, Vol. 34, No.2.
- (5) 五味道義, 田中弘一, 肥後滿朗(1981). 片岩を代表とするトンネルの掘削に伴う計測とその評價について. 間組研究年報.
- (6) 増本治夫, 橋口誠之, 清水努(1988). 軟岩・湧水區間の NATM 施工と計測管理. 土木學會誌, Vol.20.
- (7) Junichi,S., Masayuki,O., Hiroyuki,I. and Toshihiko, M.(1987). Adaptability of Convergence Forecasting Method for Controlling Tunnel Construction. 2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Sakurai(ed.), Kobe. pp. 907-916
- (8) Liu, H.and Wang,Z.(1986). Monitoring Analysis of Stability of Caverns in Weak Rock. Proc. of the Int. Symp. on LRC, Helsinki. pp. 1319-1328
- (9) Minoru, D., Yuji, T.and Kenichi, N.(1988). Realtime Construction Control of Tunnel Excavation(part 1). Proc. of the 18th Symp. on Rock Mech., Japan. pp.26-30