

병행 진행공법에 의한 강섬유보강콘크리트 라이닝의 한계상태설계법

Limit State Design Method Applied to Extruded Concrete Lining Method With Steel Fiber Reinforced Concrete



윤 상 대*

최근 사회간접자본시설의 확충요구에 따라 특히 도로, 철도, 지하철 등의 건설은 터널공사가 많이 시행된다. 터널공사는 지반침하, 누수 등에 의하여 변형이 많고 이에 의한 콘크리트라이닝이 균열이 발생하여 그 구조적 기능이 자주 문제로 되고 안전에도 영향을 미치고 공기지연, 공사비증가 공기지연에 따른 외부비용의 증가 등이 풀리지 않았다. 그러나 터널공사에서 경제적으로 내구성이 양호한 콘크리트라이닝을 구축하기 위하여 강섬유보강콘크리트를 사용한 콘크리트라이닝공법이 연구되어 일본철도건설공단 설계실 鬼頭誠 씨외 2인이 일본토목학회논문집 VI-26 No. 510(1995. 3)에 발표한 것을 소개한다.

1. 서 론

대도시의 심각한 교통문제를 해결하기 위하여는

지하철도가 기본적으로 정비된다. 그러나 이 지하철터널의 건설에 있어서는 안전하고 빠르게 고품질의 구조물을 경제적으로 구축하는 것과 함께 침하나 누수가 없고 환경에도 영향이 적은 공법이 요구된다.

이러한 상황에서 새로운 쉘드공법의 하나로 되어 있는 무근콘크리트라이닝공법(이하 병행진행공법이라 한다)을 연약지반이나 수압이 높은 대심도 등 시공환경조건에 적합한 공법이 연구개발 되었다. 이것은 종래의 밀폐형쉘드를 사용 라이닝에는 유동성이 양호한 콘크리트를 쉘드 끝부분의 거푸집에 의해 연속가압주입하여 지반에 밀착된 고품질의 콘크리트라이닝을 구축하는 것으로서 주변지반의 느린 침하도 없는 등 특징을 가지고 환경상으로도 유호한 공법이다

이 새로운 공법에는 신재료로서 주목되는 강섬유보강 콘크리트 등을 사용한다. 지금까지의 허용용

* 정회원, 농어촌진흥공사 농공기술연구소 수석연구원

력도적인 설계법에서는 충분하게 그 재료특성을 활용한 설계가 될 수 없다. 여기서 강섬유보강콘크리트의 균열이 발생하여도 장력이 전달되는 특성이나 흙중의 원형상라이닝에는 축력이 작용하는 것 여기에는 병행진행공법의 특징으로 되어있는 주변지반에 밀착한 라이닝이 가능한 것으로 되어있는 것 등을 감안한 안전하고 합리적인 새로운 설계방법을 확립하는데 있다.

이러한 상황을 목표로 흙중 구조물의 구조계 내력과 파괴관련 등을 해명하는 원형공시체 재하실험 또한 부재의 한계내력산정과 밀접한 관계의 어느 균열상태를 고려한 강섬유보강콘크리트의 인장력 등을 해명하는 공시체 휨시험 등 각종 실험을 토대로 한계상태설계법으로서 파괴상태를 고려한 강섬유보강콘크리트라이닝의 내력산정법이 일본철도건설공단 설계지침으로서 정립되었다. 이들에 이르는 일련의 각종 연구성과 등에 대하여 극한한계상태를 주제로 다음과 같이 기술한다.

2. 라이닝의 내하력 검토

일반적으로 흙중 원형구조물은 축압축력이 주체로 되어 있다. 라이닝의 일부가 균열상태로 되어도 구조체로서의 내하력은 충분히 고려된다. 이러한 관계를 가지고 구조체로서의 내하력을 추정하기 위해 라이닝부재에는 균열상태를 고려한 응력-변형곡선을 사용 주변지반은 탄력으로서 모형실험이 쉬운 집중하중으로 한 그림 1에 도시한 것과 같은 모델에서 평면응력조건 아래서 면요소를 사용한 FEM해석을 시행하였다.

해석결과 작용하중의 증가에 따라 먼저 처음에 크라운부라이닝 내면에 균열이 발생하고 다음에 스프링부라이닝외면에 균열이 발생한다. 크라운부나 스프링부에 균열이 발생하여도 원형상구조로서는 안정상태를 보지한다. 계속 하중이 크게되면 결국 압축파괴응력에 달하여 구조적인 파괴상태로 된다.

이들은 터널라이닝이 부정정구조물로 되어있는 것, 라이닝과 주변지반이 일체로 작용하는 것 등으로부터 하중작용에 의하여 라이닝의 일부로서 균열이 발생하는 모멘트에 달하여도 단면력의 재분배가 일어나 곧 라이닝구조 전체의 파괴상태에는 이르지 않기 때문이다. 구조내력은 부재단면내력에 비하여 큰것도 추찰된다. 이런 것으로부터 균열발생전의 라이닝에 작용하는 단면력에 대하여 라이닝의 일부에 현저한 균열이 발생되는 상태에 달한 경우에 대하여 조사를 시행하여보면 안전측의 설계로 되는 것으로 생각된다.

3. 실험개요

전술한 것과 같은 고려방법을 검토하여 합리적인 내력산정법을 구하기 위해 주로 다음에 나타내는 점을 밝히는 것을 목적으로 원형모델 재하실험 실패터널라이닝 두께를 상정한 40cm 각주공시체와 일반적인 휨시험에서 시행하는 15cm 각주공시체의 휨시험을 시행하였다

- ① 원형구조로서의 파괴상태
- ② 부재로서 파괴상태
- ③ 균열개구폭-인장강도의 관계(인장영화곡선)
- ④ 균열깊이
- ⑤ 균열의 영향범위
- ⑥ 부재두께의 영향

가. 원형공시체 재하실험

1) 공시체 및 재하방법

공시체의 치수는 그림 2에 도시한 것과 같이 외경250cm, 라이닝두께 35cm, 라이닝폭 100cm으로 강섬유길이 30mm, 혼입율이 0.0%, 0.5%, 1.0%의 3개 공시체를 제작 이중 통상의 라이닝에 사용하는 혼입율1.0%의 콘크리트배합설계표를 표 1에 표시하였다.

계측에 있어서는 아래와 같은 목적으로 각 계측 기기를 장치하여 측정하였다. 균열깊이에 대하여는

표 1 콘크리트배합표(강섬유혼입율1.0%)

구 분				단 위 량 (kg/cm ³)					혼 합 계	
굵은골재의 최대치수(mm)	슬럼프의 범위cm	불시멘트비 W/C%	잔골재용 S/a%	강섬유	물 W	시멘트 C	잔골재 S	굵은골재 G	AE 감수제	공기량 조정제 cc/m ³
20	18±2	50.3	60.9	78.5	196	390	998	640	2.44	23.4

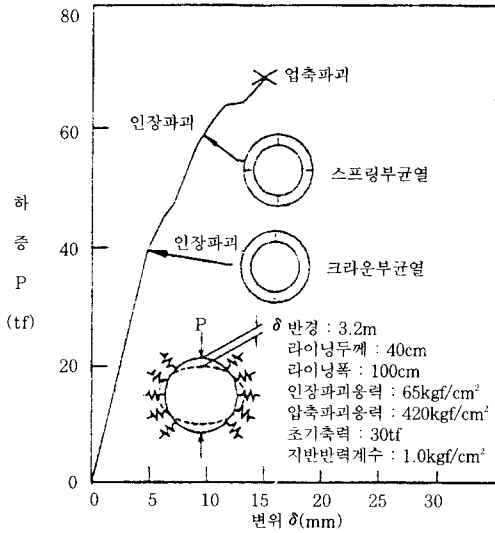


그림 1 원형지중구조물의 내하력

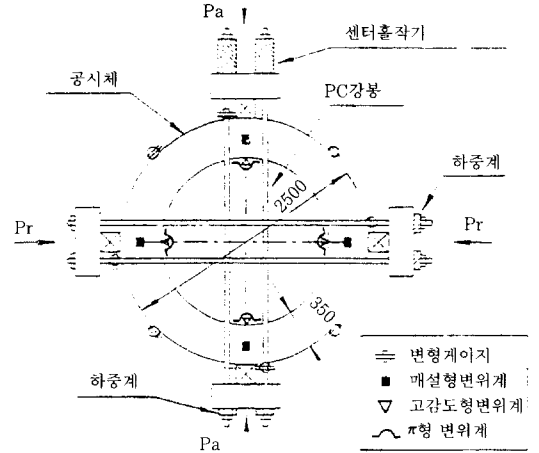


그림 2 원형공시체 재하장치 평면도

육안에 의하여 조사하였다.

- ① 재하하중과 반력하중 : 하중계
- ② 공시체의 균열폭 : π 형 변위계
- ③ 공시체의 변위량 : 고감도형 변위계
- ④ 재하방향의 직경변위량 : 매입형 변위계
- ⑤ 공시체 측면의 변형상태 : 변형게이지

재하방법은 0.1mm/min의 변위제어에 의해 Pa 방향으로부터 수평재하를 시행 여기서 Pa방향은 재하측, Pr방향은 반력측으로 되어있다.

2) 측정결과

그림 3에 공시체의 하중-변위관계를 도시하였다. 무근콘크리트 공시체에서는 재하하중 약 25tf에서 균열이 발생하여 그후 재하하중을 보지시키는 것으로부터 변위가 진행 재하를 계속시키지 않아도 다시 재하하중은 증가하는 경향을 나타낸다. 혼입을 1.0% 공시체에서는 약 43tf에서 최초로 균열이 발생한다. 그후 하중은 변위와 함께 순조롭게 증가된다. 변위량 8mm에서는 무근콘크리트에 대하여 약 1.8배 정도 재하하중을 나타낸다.

그림 4에 하중-균열개구폭의 관계를 도시하였다. 각 혼입을 공시체와 함께 하중-변위의 결과와 같이 재하하중이 증가 균열도 진행되는 특성곡선을 나타낸다. 이것은 변위와 균열개구폭이 원형구조의 내하력에 영향을 미치는 것도 고려된다. 통상의 라

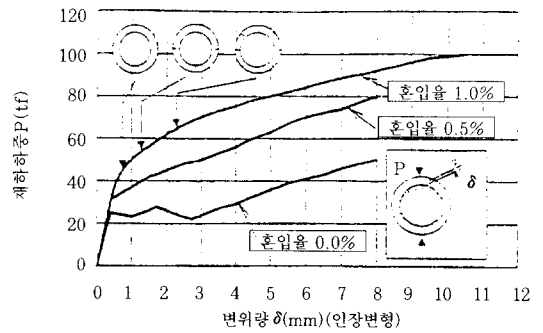


그림 3 재하하중-변위관계

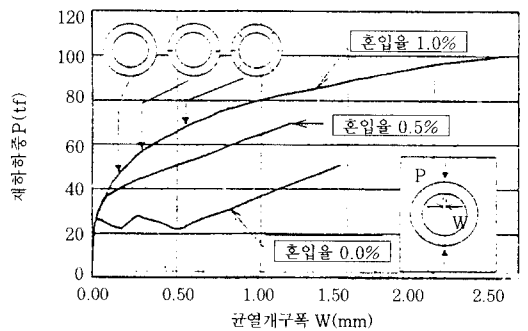


그림 4 재하하중-균열개구폭의 관계

이닝에 사용되는 강섬유혼입을 1.0% 공시체에서는 재하하중 약 43tf에서 육안으로 볼 수 있는 균열이 재하측에 발생된 균열개구폭은 0.2mm 정도를 나

타내었다. 재하를 계속하면 65tf로부터 반력축 가까이 반력축으로부터 45도 가까이 외측면에 균열이 몇개 발생하였다. 균열개구폭에 대하여 하중은 그후에도 순조롭게 증가한다. 실험종료시점의 재하하중 약 100tf에서는 균열개구폭이 2.4mm로 균열 깊이는 라이닝두께의 8할정도 된다. 균열이 관통하는 것은 없었다.

나. 원형공시체 재하실험해석

무근콘크리트 공시체에서는 균열이 발생하면 균열개구폭이 확대되는 경향을 나타내나 혼입율 1.0%의 공시체에서는 균열발생후에도 재하하중은 순조롭게 증가된다. 원형구조물의 구조내력은 부재 단면내력에 비하여 상당히 큰 것이 밝혀졌다. 이것은 강섬유에 의하여 전달되는 인장응력이 균열면에 작용하기 때문으로 생각된다.

이와같은 균열상태와 내하력의 관계를 설명하기 위해 균열면에서의 강섬유에 의하여 전달되는 인장응력을 지금까지의 실험 등으로부터 그림5에 도시한 것과 같은 인장응력과 균열개구폭의 단순한 인장연화곡선으로 나타내는 것으로 된다. 인장응력이

0으로 되는 개구폭을 한계개구폭 W_t 로서 균열발생후는 이 인장연화곡선을 사용 압축축에는 콘크리트 표준시방서에 있는 응력-변형곡선을 사용하여 FEM해석을 시행하였다. W_t 를 어떤 변화를 시켜 해석을 한 결과 그림 6에 도시한 것과 같이 재하하중-변위량 관계에 있어서 $W_t=5.0\text{mm}$ 로 한 경우 해석값이 실험값에 아주 가까웠다.

이상과 같은 해석결과로부터 내하력은 균열개구폭과 인장응력의 관계를 사용하여 산정이 가능한 것으로 추측된다. 축력이 작용하는 원형구조에서는 균열이 발생하여도 곧바로 구조적인 파괴상태에는 이르지 않고 균열후에도 내하력이 있는 것으로 밝혀졌다.

이러한 것으로부터 터널라이닝 단면파괴에 대한 안전성 조사에 있어서 원형구조물의 일부에 최초의 균열이 발생하는 상태로 되는 단면력을 설계에 사용하면 안전측의 설계로 되는 것이 확인되었다.

단면력의 산정에 대하여는 최초로 균열상태로 될 때까지 하중-변위량의 관계가 거의 직선적이다. 단면의 강성은 보이지는 것으로부터 강성이 균일한 링으로 취급한 것이다.

다. 사각형공시체 휨실험

1) 15cm 각주공시체의 제작 및 재하방법

공시체는 일반적인 휨시험에서 시행되는 것과 같이 15cm×15cm×53cm의 공시체형상으로서 강섬유 길이가 30mm, 혼입율은 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%의 7개 공시체를 제작하였다(표 2). 콘크리트배합은 원형공시체와 같은 것으로 하였다. 재하방법은 0.1mm/min의 변위제어에 의해 시행하여 균열개구폭이 8mm 이상, 10mm 정도로 될 때까지 재하를 계속하였다.

2) 15cm 각주공시체의 측정결과

15cm 각주공시체의 측정결과는 다음과 같다. 강섬유보강콘크리트의 재하하중-처짐량의 관계를 그림 7에 도시하였다. 최대하중을 나타낸 후의 하중변화는 처짐량의 증가에 따라서 순조롭게 점감되고 있다. 무근콘크리트와 같이 급격하게 파괴를 나타내는 것은 아니었다.

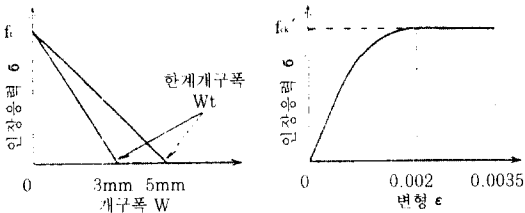


그림 5 인장연화곡선 및 압축응력-변형곡선

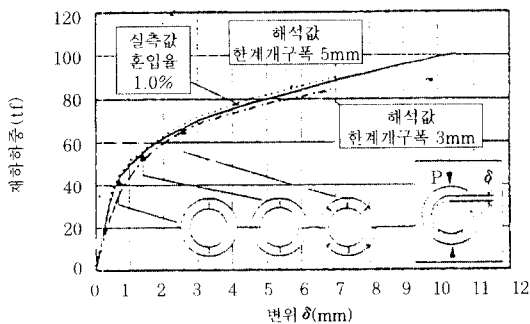


그림 6 원형공시체의 해석결과

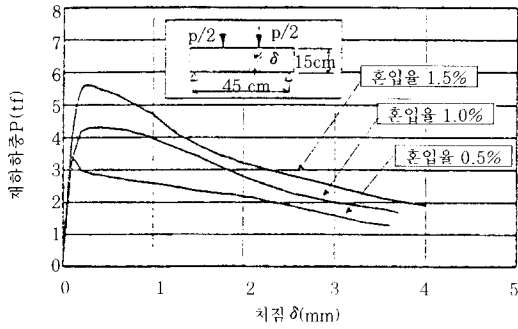


그림 7 15cm각주공시체의 하중-처짐관계

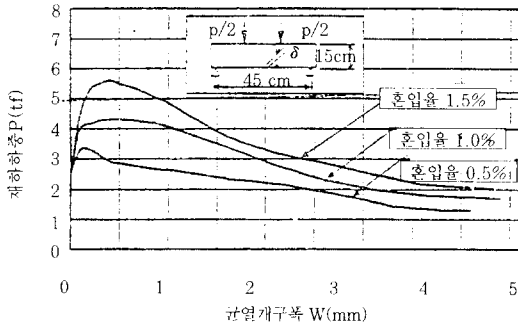


그림 8 15cm각주공시체의 하중-균열개구폭관계

같은 공시체의 재하하중-균열개구폭의 관계를 그림 8에 도시하였다. 균열발생 후 최대하중을 나타내는 하중-처짐곡선과 같이 균열개구폭에 따라서 내력은 점감하는 경향이다. 실험종료시점의 균열개구폭 8mm로 되었어도 단면내력은 보지되었다. 보통 터널라이닝에 사용되는 혼입율 1.0%의 공시체는 균열개구폭이 1.0mm의 경우에서 약 4.2tf의 단면내력을 보지하였다. 육안에 의한 균열 깊이는 최대하중시에 단면높이의 70% 이상을 나타내어 균열개구폭이 8mm정도에서는 80%를 넘었으나 균열이 관통되는 곳은 없었다.

3) 40cm각주공시체의 제작 및 재하방법

공시체는 실제의 터널라이닝과 거의 동일한 부재를 상정한 40cm×40cm×150cm의 형상으로서 강섬유길이 30mm, 혼입율이 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%의 공시체 54개를 제작하였다(표 3). 콘크리트배합은 원형공시체와 같은 것으로 하였다. 재하방법은 0.1mm/min의 변위제어에 의해 균열개구부폭이 8mm 이상될 때까지 재하를 계속하였다.

4) 40cm 각주공시체의 측정결과

40cm 각주공시체의 측정결과는 다음과 같다.

재하하중-처짐량의 관계는 그림 9에 도시한 혼입율 1.0% 실험결과로부터 최대하중을 나타낸 후의 하중변화는 처짐량의 증가에 따라서 순조롭게 점감된다. 무근콘크리트와 같이 급격한 변화를 나타내는 것은 아니다.

공시체의 재하하중-균열개구폭의 관계를 그림 10에 도시하였다. 균열발생후 최대하중을 나타낸 하중-처짐곡선과 같이 균열개구폭에 따라서 내력은 점감하는 경향이였다. 균열개구폭이 2.0mm 경우에서 약 22.5tf 단면내력을 보지하였다.

최대하중을 나타낸후 균열깊이는 그림 11에 도시한 것과 같이 단면높이의 70%를 넘는다. 실험종료시점에서 80% 이상이었다. 균열이 관통하는 것은

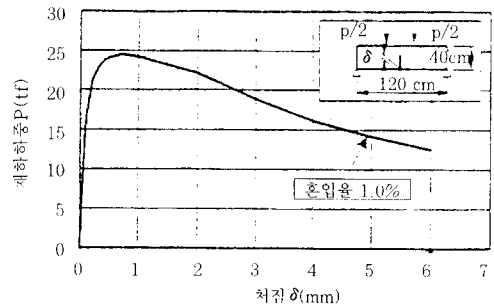


그림 9 40cm 각주 공시체의 하중-처짐관계

표2 15cm 각주공시체 제작

공시체 치수	혼입율 0%	혼입율 0.5%	혼입율 1.0%	혼입율 1.5%	합계(개)
15cm각주	18	18	18	18	72

표 3 40cm 각주공시체 제작

공시체 치수	혼입율 0%	혼입율 0.5%	혼입율 1.0%	혼입율 1.5%	합계(개)
40cm각주	6	12	24	12	54

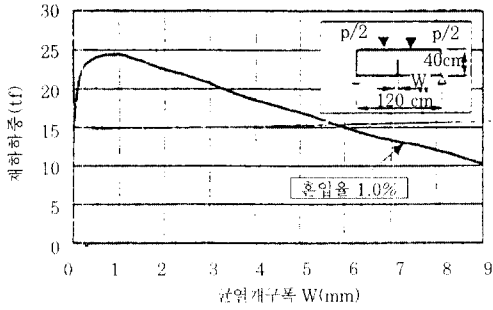


그림 10 40cm각주공시체의 하중 - 균열개구폭관계

없었다.

균열된 곳 근방에 인장변형을 조사하기위해 그림 12에 도시한 것과 같이 경간중상부근의 공시체 아래면에 표점간거리 150mm의 π 형변위계를 설치하였다. 변형이 발생할 때까지의 변위(인장변형)는 하중과함께 증가하나 균열이 발생하면 균열근방의 변위(인장변형)은 감소하는 거동을 나타낸다. 이와 같이 균열부분에 주변의 변위가 집약되기 때문에 근방 인장변형은 제하되는 경향을 나타냈다

균열개소를 좁혀 2점간의 변위를 조사하기 위해 그림 13에 도시한 것과 같이 균열개구폭 측정코저 표점간거리 150mm의 고감도변위계와 균열을 좁힌 300mm, 400mm 사이의 변위측정으로서 매입형 변위계를 설치하였다. 하중과 2점간의 변위량으로서 정리하면 150mm 사이의 변위량과 300mm 사이의 변위량이 거의 일치한다. 균열의 영향범위는 균열변위를 포함한 30cm 정도로 생각된다.

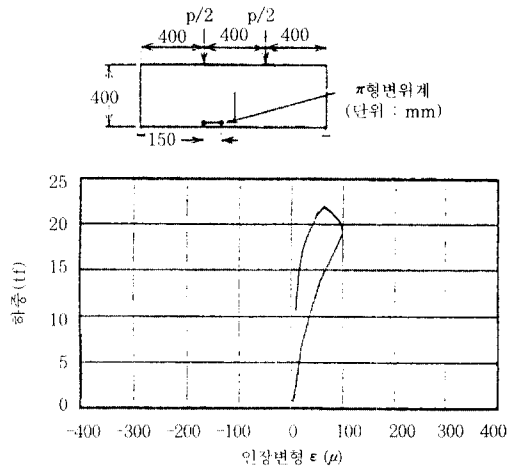


그림 12 하중 - 변위의 관계(인장변형)

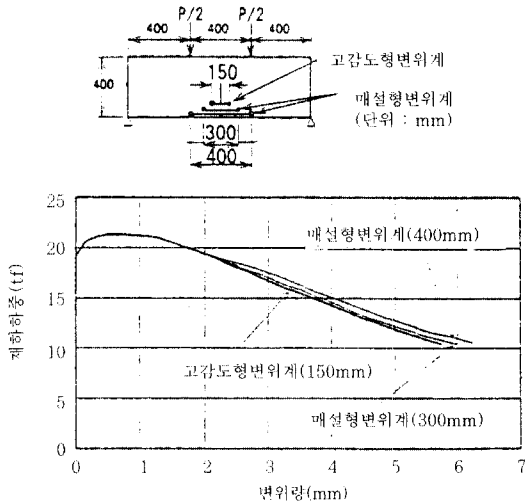


그림 13 하중 - 변위의 관계(아래면 인장변형)

실험으로부터 인장변형에 의한 신장이 균열개구 폭에 집약되는 것을 나타낸다.

공시체 윗면에 붙인 변형계이저로 측정한 압축축연 변형 - 하중의 관계를 그림 14에 도시하였다. G1~G5의 압축축연변형은 하중의 증가에 따라서 증가한다. 균열이 발생한 후에는 균열부분 바로 위의 G3는 압축연 변형이 증가되나 G1~G2, G4~G5의 압축연 변형은 균열이 진전하여 하중이 진전하는 것과 함께 감소된다. 그리고 양측 제하점에 가까운 곳에서는 제하되는 거동을 나타내나 균열 바

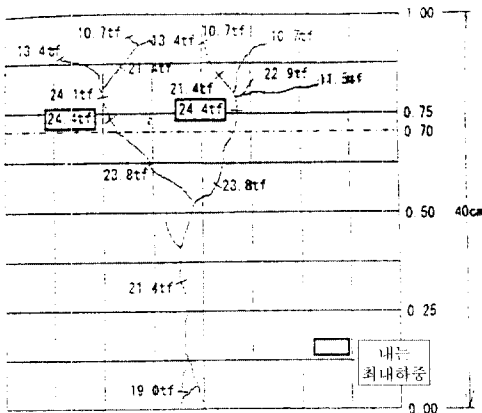


그림 11 균열깊이와 하중

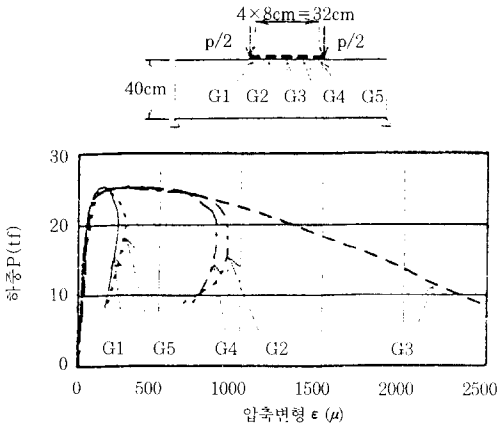


그림 14 압축연 변형- 하중의 관계

로워 부분에서는 증가된다. 변형이 극소화되는 것이 이해된다.

이것으로 부터도 G1~G5 사이의 약 30cm 정도가 균열의 영향범위로 추찰된다.

라. 각주공시체 휨실험의 해석

15cm 및 40cm 각주공시체의 휨과괴과정은 균열 발생 후에도 하중은 증가하여 최대단면내력을 나타낸 후 균열개구폭이 넓어짐 따라서 단면내력이 점감한다. 이것은 균열면에서 강섬유에 인장응력이 전달되는 힘의 균형이 보지되기 때문이다. 이 전달응력은 균열개구폭에 의존하는 것으로 생각된다. 원형모델재하실험과 같이 인장연화곡선의 한계개구폭 W_t 를 어떤 변화를 시켜서 FEM해석을 하였다. 그 결과 그림 15에 도시한 것과 같이 $W_t=5.0mm$ 의 경우가 실험값의 최대하중이나 균열발생후의 재하하중의 점감경향이 잘 맞는다. 따라서 강섬유보강콘크리트 부재의 단면내력은 균열개구폭과 강섬유가 받는 인장강도의 관계를 사용하여 산정이 가능한 것으로 추찰된다.

균열에 따른 인장변형상태의 변화에 대하여는 실험결과와 같이 균열근방의 아래면 인장변형은 제한되는 경향을 나타내어 변형에 의한 신장균열에 집약되는 것으로 판단된다. 이 경향범위는 40cm 각주공시체에서 30cm 정도로 추찰된다. 반대의 압축측에서는 양측의 재하점에 가까운 곳에서는 재하되

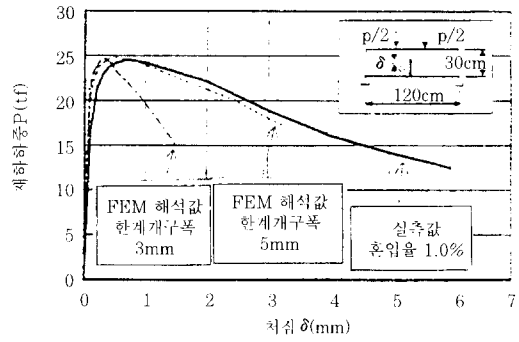


그림 15 40cm 각주공시체의 하중-처짐관계

는 경향을 나타내나 균열바로 위 부근에서는 증가하는 경향을 나타내어 변형이 극소화되는 것이다. 따라서 균열에 따른 변형변화는 균열에 흡수되는 어떤 경향을 나타내고 어떤 영향범위를 고려하여 내력산정을 할 필요가 있는 것으로 추찰된다.

이 단면산정에 사용되는 균열폭을 직접측정하는 것은 곤란하므로 비교적 측정이 용이한 처짐량을 가지고 상정하여 설계실무에 사용하는 것으로 하였다. 이 때문에 다음과 같은 처짐량으로부터 균열개구폭을 구하는 것을 검토하였다.

그림 16에 도시한 것과 같이 균열이 진행하여 탄성처짐량을 무시되는 상태를 상정하여 처짐량으로부터 균열개구폭을 구하는 것으로 하였다. 그림 16에 도시된 좌우 재하점위치의 처짐량을 균열발생위치에 의해 다른값을 나타내나 양재하점의 평균처짐량 δ_c 는

$$\delta_c = \frac{\delta_L + \delta_R}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{L - L_w}{L} \lambda \frac{L}{3} + \frac{L_w}{L} \lambda \frac{L}{3} \right) = \frac{L}{6} \lambda \quad (1)$$

로 되어 균열발생위치 L_w 에 의존하지 않는다. 따라서 변형 각 λ 의 균열이 공시체중앙에 발생한 경우와 같은 평균처짐량을 나타내는 것으로된다. 또한 $W = \lambda h$ 에 의해 식 (1)은 다음과 같이 균열개구폭 W 로 표시된다.

$$\delta_c = \frac{L}{6} \lambda = \frac{LW}{6h} = \frac{W}{2} \quad (2)$$

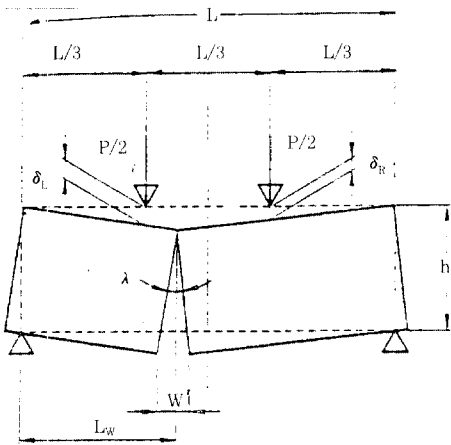


그림 16 균열위치의 처짐-개구폭의 관계

계측결과에 의한 실측균열개구폭 W 와 실측평균 처짐량 δ_c 의 관계 및 식 (2)를 그림 17에 도시하였다. 이 그림으로부터 실용적으로 사용되는 범위에서 공시체 치수 강섬유혼입율이 다른 차이는 적다. 균열개구폭과 평균처짐량은 대개 직선적인 관계에 있다. 식 (2)와 같은 경향을 나타내는 것으로 밝혀졌다. 그리고 재하점에서의 변위량을 측정하면 균열발생위치에 무관하게 개구폭이 추정된다.

이상과 같이 각주공시체의 휨시험결과로부터 균열깊이에 대하여는 최대하중에 달한 시점에서 단면 높이의 70% 이상을 나타내는 때 최대개구폭 8mm 시점에서는 80%까지 진전하였으나 균열이 관통되지는 않고 균열면에서 인장응력이 강섬유에 의해 보지되는 내하력이 있는 것으로부터 설계단면내력

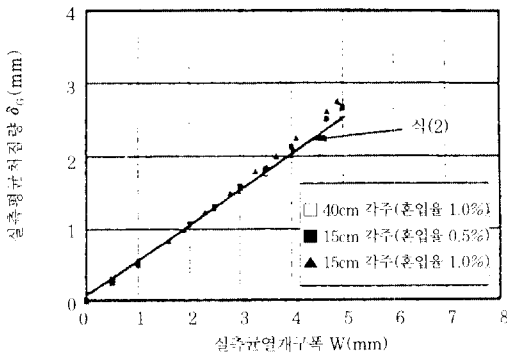


그림 17 실측균열개구폭과 실측평균처짐량의 관계

의 산정에 있어서는 균열깊이를 70%까지로 끝내는 것으로 하면 안전측으로 되는 것으로 판단된다.

단면내력산정에 사용되는 균열면에서의 인장응력은 균열개구폭과의 관계로 추정가능하나 정확하게 측정하는 것이 곤란한 균열개구폭에 대하여는 공시체의 처짐량으로부터 추정된다. 설계실무에 있어서는 일반적으로 휨시험에 의한 처짐측정을 하는 것이 좋은 것으로 판명되었다.

4. 균열영향범위의 검토

균열영향범위는 그림 18에 도시한 것과 같이 휨을 받아서 균열이 발생한 영향을 받은 부재의 중립축에서의 범위를 말한다. 이 영향범위를 가지고 규정하는 균열깊이에서의 균열발생폭을 상정하여 이 인장응력을 가진부재의 내력산정을 시행하는 것이다. 그 검토결과는 다음과 같다.

가. 균열개구폭과 영향범위의 관계

1) 균열영향범위의 정의

휨시험의 처짐량은 균열에 의한 변위와 공시체의 탄성변위량과의 값으로 처짐량과 개구부폭의 관계에 대하여 검토하였다. 재하점 각각의 처짐량은 균열위치에 따라 다르나 식(1)로부터 균열에 의한 처짐량은 $\frac{\lambda L}{3}$ 일정하게 되어 어느 위치에 균열이 발생하여도 그림 19에 도시한 것과 같이 중앙부에 균열이 발생한 경우로서 재하점변위량을 취급하는 것이 좋다. 엄밀하게는 재하점위치의 변위량 δL 은 균열

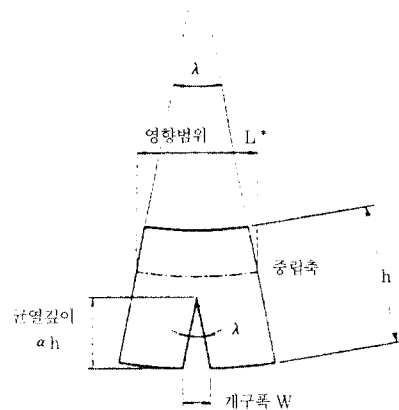


그림 18 변형각과 영향범위

면의 변형각 λ 와 기타부분의 탄성변형량으로부터 식 (3)과 같이 된다. 우변 제1항은 탄성변위를 제2항은 균열에 의한 변위를 나타낸다.

$$\delta_L = \frac{5P.L^3}{384EI} + \frac{\lambda L}{6} \quad (3)$$

여기서 P는 재하하중, L은 휨공시체 경간길이, λ 는 변형각, I는 단면2차모멘트($I = \frac{bh^3}{12} = \frac{h^4}{12}$)이다.

식 (3)의 균열면에서의 단면력과 변형각 λ 와의 관계를 구하기 위해 지금까지의 실험결과 등으로부터 다음과 같이 영향범위를 정의한다.

- ① 영향범위 L에서 처짐각은 그림 18에 도시한 것과 같이 균열개구에 의거발생된 변형각 λ 에 같게 한다.
- ② 압축측의 변형은 직선분포한다.
- ③ 인장응력이 부재의 순인장강도 σ_t 에 달하면 균열이 발생하는 것으로서 그후는 균열개구폭의 확대에 따라서 강섬유에 의해 전달되는 인장응력은 감소한다. 균열발생전은 인장응력과 변형이 선형관계에 있는 것으로 한다.
- ④ 개구폭은 균열선단으로부터 직선분포로 된다.

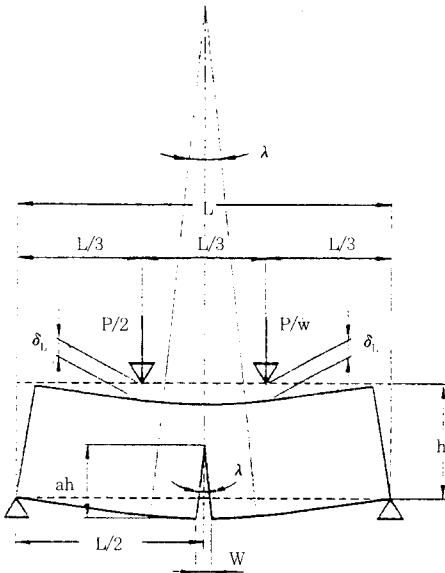


그림 19 재하점처짐량과 변형각

2) 개구부폭과 균열깊이

그림 18에 도시된 관계로부터 균열면에 있어서 변형각 λ 는 균열개구폭 W와 균열깊이로부터 식(4)의 관계로 된다.

$$\lambda = \frac{W}{ah} \quad (4)$$

여기서 α 는 단면높이에 대한 균열깊이의 비율이다. 따라서 휨실험에서 측정된 재하점변위량과 균열개구폭으로부터 식 (3) 및 식 (4)에 의해 균열깊이 αh 가 계산된다.

이러한 제관계에 의해 실측한 것을 가지고 균열개구폭 W와 균열깊이의 비율 α 의 관계를 산정하면 그림 20과 같이 된다. 균열발생후 개구부폭증가에 따라서 균열깊이도 증가 되는 것으로부터 최대하중에 달하여 이때 균열깊이는 80% 전후로 된다. 그후 균열깊이의 진전은 둔화 최종적으로 균열깊이는 그다지 변화되지 않고 개구부폭이 증가된다. 최대하중에 있어서 균열깊이의 비율은 단면의 80% 전후이다. 병행진행공률의 단면내력산정에 있어서 균열깊이를 단면높이의 70%까지로 하는 것은 최대하중이전의 값에 머무르길 하는 것으로 된다. 안전측의 범위를 사용하는 것으로 된다.

3) 균열깊이와 영향범위

균열면에 있어서 응력분포와 변형분포는 앞의 ②

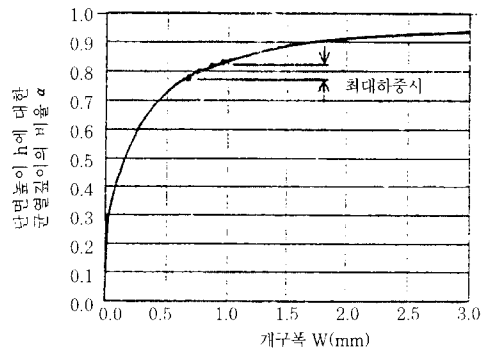


그림 20 균열깊이비율과 개구폭의 관계

및 ③의 가정으로부터 그림 21과 같이 된다. 단면 내의 응력은 균열 선단부에서 부재의 순인장강도 σ_t 에 달하게 된다. 이 인장강도의 변형을 인장한 계 변형 ϵ_t 로 하면 압축영역 변형분포의 기울기 κ 는 식 (5)와 같이 된다.

$$k = \frac{\epsilon_c + \epsilon_t}{(1-a)h} \quad (5)$$

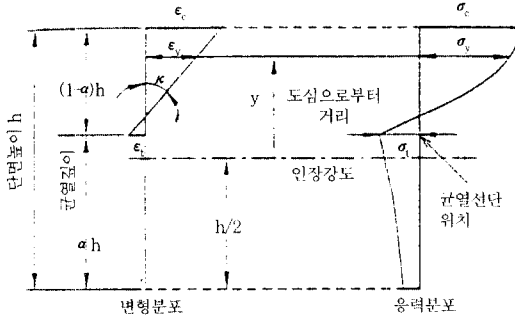


그림 21 부재단면의 변형분포와 응력분포의 관계

영향범위 끝에서는 평면보자가 성립되는 것으로 그림 22로부터 영향범위 L의 처짐각은 식(6)과 같이 된다.

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{d_{z1} + d_{z2}}{(1-a)h} \quad (6)$$

또한 $\frac{L}{2}$ 구간의 가장자리변형량은 가장자리변형으로부터 식 (7)과 같이 된다.

$$D_{z1} = \epsilon_c \cdot \frac{L^*}{2}, D_{z2} = \frac{L^*}{2} \quad (7)$$

따라서

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{(\epsilon_c + \epsilon_t)}{(1-a)h} \cdot \frac{L^*}{2} \quad (8)$$

에 의하여 영향범위 L에 있어서 처짐각 λ 는 식 (9)와 같이 된다.

$$\lambda = \frac{(\epsilon_c + \epsilon_t)}{(1-a)h} L^* = k \cdot L^* \quad (9)$$

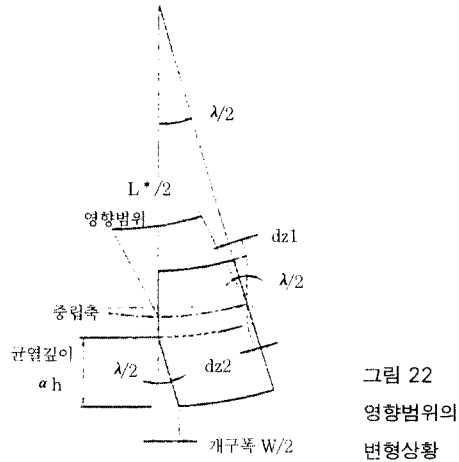


그림 22
영향범위의
변형상황

따라서 식 (4)와 식 (9)로부터 영향범위 L는 식 (10)과 같이 유도된다.

$$L^* = \frac{1-a}{a(\epsilon_c + \epsilon_t)} \cdot W \quad (10)$$

이 영향범위는 균열개구폭 W와 균열깊이 단면의 높이 h에 대한 비율 α 로 결정된다.

식 (10)에 의해 실측값으로부터 영향범위 L^* 을 산정한다. 산정에 있어서는 압축축의 끝변형은 공시체위면에 붙인 변형계이치의 측정값으로서 인장한계변형 ϵ_t 는 일반적으로는 $60\mu \sim 150\mu$ 로 된다. 여기서는 활열인장시험으로부터 구한 순인장강도와 압축실험결과에 의한 탄성계수를 사용하여 100μ 로 하였다.

영향범위와 균열깊이와의 관계를 그림 23에 도시하였다. 이 그림으로부터 균열깊이가 단면의 70%로 된 시점의 영향범위는 $0.65h \sim 0.80h$ 로 된다. 평균 $0.7h$ 로 되어 있다. 이것으로부터 균열깊이의 비율을 단면높이의 70%까지로 한 경우 그 균열영향범위는 평균으로 단면높이의 70%로 된다.

나. 균열의 영향범위를 사용한 내하력의 검토

1) 계산순서

균열깊이의 비율을 $\alpha=0.7$ 로 가정한 경우 단면내력산정의 타당성을 확인하기 위하여 그림 24에 도

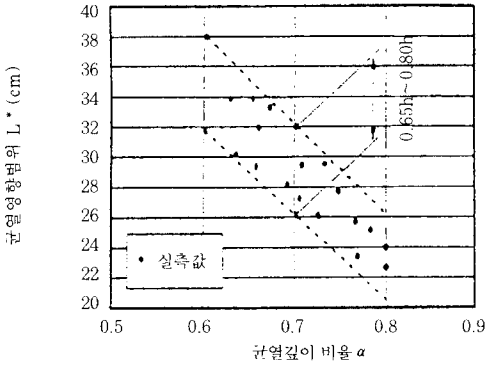


그림 23 균열깊이의 비율과 영향범위

시한 계산순서에 의거 단면내력 그리고 재하하중상 당값과 처짐량을 산정하여 휨실험시의 재하하중과 실측변형량을 비교검토하였다.

처짐량 산정에 있어서는 탄성보모델에 의한 처짐량과 균열에 의한 영향을 고려한 처짐량의 합계값으로 하였다. 그림의 순서 2에 나타낸 압축응력-변형곡선은 콘크리트표준시방서의 모델을 사용하고 인장연화선에 대하여는 실험결과로부터 한계개

구폭을 5mm로 한 경우가 비교적 좋은 결과를 나타내므로 이것을 입력조건으로 하였다.

이들 압축응력-변형관계와 균열면의 응력분포로부터 단면력은 그림 21에 도시한 관계로부터 식 (11) 및 식 (12)로 계산된다.

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_c(y) \cdot y \cdot b \cdot dy = \frac{PL}{6} \quad (11)$$

$$N' = \int_{-h/2}^{h/2} \delta_c(y) \cdot b \cdot dy = 0 \quad (12)$$

M은 휨모멘트, $\sigma_c(y)$ 는 도심으로부터의 거리 y의 응력, y는 도심으로부터의 거리, b는 공시체의 폭 (=h), h는 공시체의 높이, P는 재하하중, L은 공시체의 경간길이, N는 축방향력이다.

압축축의 변형분포기울기 κ 는 식(9)로부터 식 (13)과 같이 계산 된다.

$$k = \frac{\lambda}{L'} \quad (13)$$

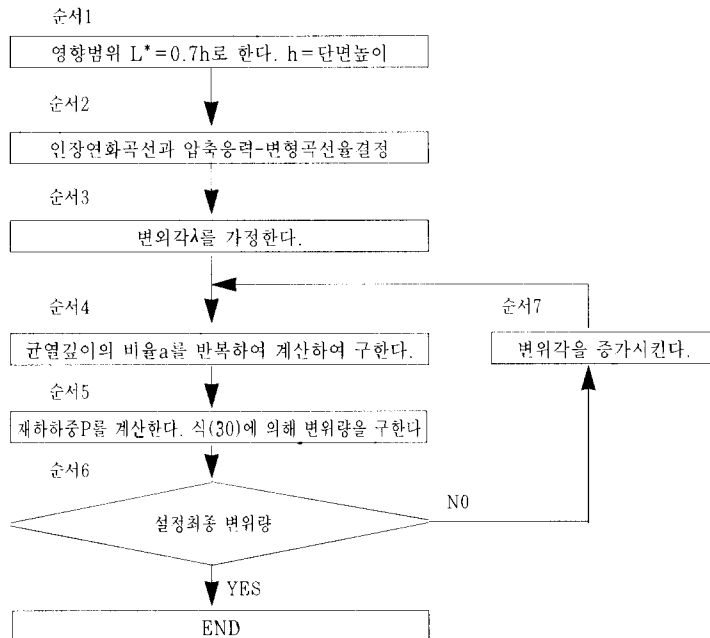


그림 24 검토계산순서

2) 계산결과

영향범위 L 를 0.7h로 한 경우에 있어서 균열면의 변형각 λ 를 가정하여 식 (5)와 식 (13)을 사용하여 이때의 실험조건(축력=0)로부터 압축력과 인장력이 같은 식 (12) 상태로써 균열깊이의 비율 α 를 구해 균열깊이 αh 에 있어서 압축력과 인장응력으로부터 휨모멘트를 식 (11)에 의하여 구해 이 모멘트로부터 재하하중 P 를 역산한다. 이것으로부터의 변형각 λ 와 재하하중 P 를 사용하여 식 (3)으로부터 처짐량이 산정된다. 이 계산값과 실측변위량을 비교한 것이 그림 25이다.

이와같이 균열영향범위를 0.7h로 하면 실험결과 최대하중값 및 하중이 접감되는 상태가 잘 맞는다. 따라서 영향범위를 단면높이의 70%로 하면 단면내력 등이 합리적으로 계산된다. 또한 이들 산정에는 본모델이 적용되는 결론이 얻어졌다.

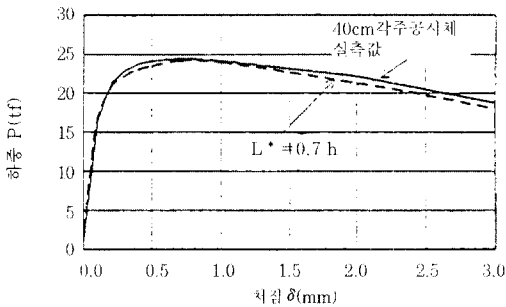


그림 25 $\alpha=0.7$ 을 사용한 계산값과 실측값의 비교

5. 강섬유보강콘크리트부재 설계방법

이상과 같은 해석결과로부터 다음과 같이 축력이 작용하는 터널라이닝의 부재내력을 산정한다.

가. 강섬유가 받는 인장강도의 산정방법

1) 강섬유보강콘크리트의 응력분포의 간편화

강섬유보강콘크리트를 사용한 균열발생후의 부재 내력산정에는 균열면에서의 전달응력과 균열개구폭의 관계가 필요하다. 이들은 실험결과 등으로부터 그림 26(a)에 도시한 것과 같이 개구변위가 크게됨에 따라서 전달응력이 적게 되는 것으로 판단

된다. 이들의 응력분포형상은 그림 26(b)와 같다. 여기서는 실무상의 간편을 고려하여 그림 26(c)와 같이 균열면에서의 강섬유가 받는 인장강도 f_{tr} 는 균열개구폭 W 에 대하여 일정한분포를 하는 것으로 내력산정을 한 것이다.

2) 균열깊이의 제한값

균열깊이는 다음과 같은 이유로부터 균열깊이의 비율을 $\alpha=0.7$ 까지로 하는 내하력곡선을 사용하는 것으로서 안전측의 설계로 되도록 하였다.

① 원형공시체의 재하실험으로부터 구조적인 내력은 단면내력에 비하여 상당히 큰 것이다. 그 균열깊이는 약 80%에 달하여도 구조적인내력은 보지되나 복수균열의 발생상태로 되면 처짐량은 크게 되는것으로부터 원형구조전체의 강성은 저하되는 것으로 생각된다. 이와같은 유효단면의 감소등 메카니즘의 극한한계상태에 대한 검토를 시행 구조계의 내력산정을 시행하는 방법도 고려되나 설계의 간편화 등 관점으로부터 여기서는 최초균열이 발생하여 균열깊이가 70%까지로 제한된 상태에 있어서 단면내력에 대하여 강성이 균일한 링으로서 산정한 단면력과 비교검토를 시행한 것으로서 안전측의 설계로 하는 것으로 하였다.

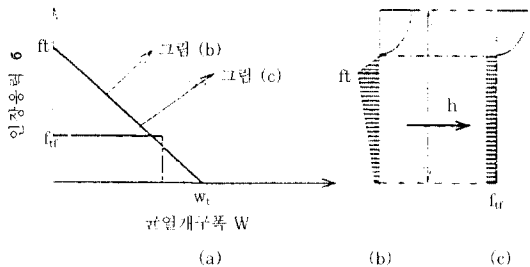


그림 26 설계에 사용되는 전달응력-균열개구폭

② 지금까지 실험결과로부터 최대하중을 나타내는시점에서 균열깊이는 단면높이의 70%를 넘었다. 최대개구폭 8mm를 나타내는 시점에서는 80%에 달하여 균열이 관통하는 것은 없고 내력에 여력이 있는 것으로 부터 70%까지로 하는 것이 안전측의 범위로 된다.

- ③ 압축에 의한 급격한 파괴상태에의 이행방이나 콘크리트의 내구성확보의 관점으로부터 30%의 압축영역이 남는 것으로 된다.
- ④ 상징하는 균열깊이가 크게되면 압축영역은 적게되는 것 압축응력과 단면중심과의 거리가 길게되므로 그림 27에 도시한 것과 같이 이 계산상의 내력은 증대한다 그렇지만 설계상 합리적 경제적인 범위로서 $\alpha=0.7$ 로 하는 내하력선으로 규정하였다.

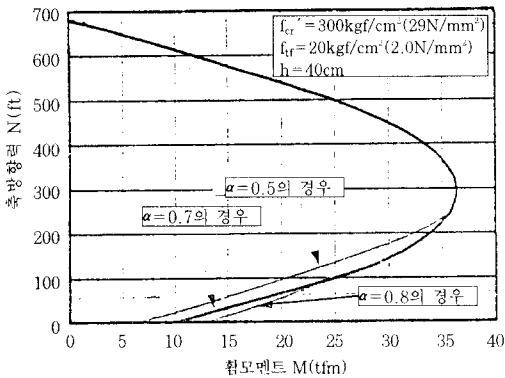


그림 27 균열깊이에 의한 단면내력의 비교

3) 균열 설계한계개구폭

균열영향범위를 0.7h로 가정하는 것이 적절한 것으로 결론이 얻어졌다. 따라서 설계에 사용되는 부재의 균열설계한계개구폭은 그림 28에 도시한 것과 같이 설계부재높이 40cm에 대하여 산정하면 균열깊이의 제한값이 $\alpha=0.7$ 로 되어있는 것 아축끝의 극한변형이 $\epsilon_{cu} = 0.0035$ 로 되어있는 것으로부터

$$W_{tf} = L^* \epsilon_{tu} = 0.7h \epsilon_{cu} (0.7/0.3)$$

$$= 0.7 \times 400 \times 0.0035 \times (0.7/0.3) = 2.3\text{mm} \quad (14)$$

로 극한한계상태에 대한 인장응력을 산정하는 균열의 설계한계개구폭 W_{tf} 를 설정하는 것이 좋다.

한편 극한한계상태의 다른 내구성에 관한 사용한계상태의 검토를 시행하는 것도 필요하다. 이 경우 강섬유보강 콘크리트라이닝의 내구성에 대하여는 미해명된 점도 있으나 균열이 내구성에 크게 기여하는 것으로서 이것을 제한하는 고려방법으로 조사

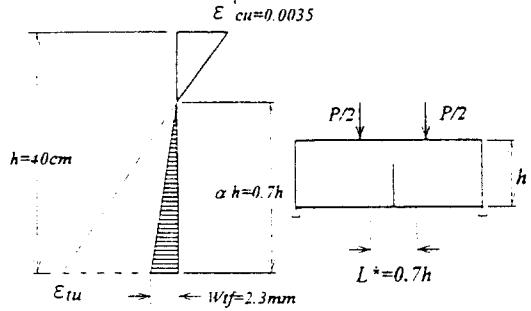


그림 28 균열깊이와 설계한계개구폭

하는 것으로 되어있다. 일본철도건설공단에서는 사용한계상태에서는 통상사용하는 하중을 사용 안전계수등 기준으로하는 1.0을 사용하여 균열개구폭을 검토하는 것으로 발생하는 균열개구폭은 일반적으로는 철근콘크리트의 흡중환경에서 균열제한값 이하로 되어있다. 사용한계상태보다도 극한한계상태 쪽이 가혹한 조건이 되므로 극한한계상태를 기본으로 설계하는 것으로 되어있다.

4) 인장강도산정

설계한계개구폭에 상응하는 하중 P를 그림 29에 도시한 것과 같이 휨시험의 하중-처짐곡선으로부터 구한다. 다음으로 하중과 축방향력=0의 관계를 만족하는 것과 같이 그림 30에 도시한 $\alpha=0.7$ 로 된 경우의 응력-변형관계로부터 강섬유보강콘크리트의 인장강도 f_{ft} 를 구한다.

나. 부재두께를 고려한 인장강도 산정

인장강도산정에 있어서는 실제 설계부재치수에 의한 실험결과로부터 구하는 것이 좋으나 대규모적

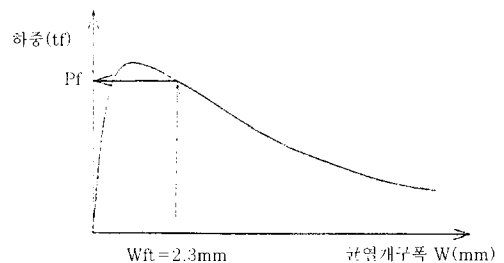


그림 29 한계개구폭으로부터 하중을 구하는 방법

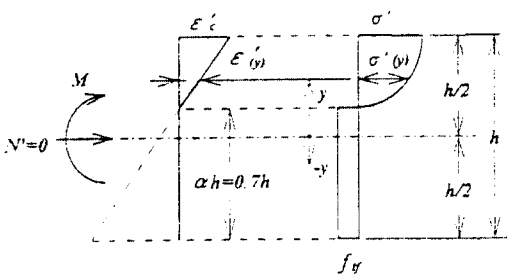


그림 30 응력-변형관계와 단면내력 산정

인 부재휨실험이다. 설계실무의 관점으로부터는 일반적으로 사용되는 15cm 각주공시체 휨시험으로부터 구하는 것이 요구된다. 강섬유보강콘크리트 인장강도를 저감보정하여 산정되는 것과 같이 검토를 시행하였다. 이 경우 그림 31에 도시한 것과 같이 실험결과로부터 한계개구폭을 부재치수에 따라서 정한 인장력을 사용하여 내력산정을 시행하였다.

강섬유보강콘크리트 부재치수의 영향에 대하여는 명확한 것은 없으나 지금까지의 실험 등으로부터 강섬유보강콘크리트의 인장강도는 콘크리트강도에 크게 의존되는 것, 실험결과와 표 4에 나타난 기왕의 연구를 참고로 비교하면 그림 32에 도시한 것과 같다. 콘크리트부재계수를 사용한 ①의 방법에 의한 경우가 비교적 계산값과 일치하여 안전측의 값을 나타내는 것으로부터 식 (15)에 나타난 보정식을 사용하여 부재치수 등의 영향을 고려하는 것

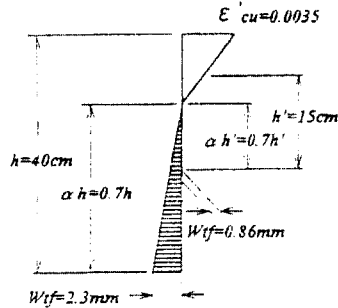


그림 31
부재치수와
한계개구폭

으로 하였다.

$$k_t = \frac{0.53}{h^{1/3}} \quad (15)$$

여기서 h는 부재단면의 높이(m)이다.

따라서 설계단면치수가 h=0.40m의 경우에 사용된 인장강도 $f_{t1}(40)$ 은 0.15m 각주공시체로부터 산정된 강섬유가 받는 인장강도 $f_{t1}(15)$ 에 $\kappa t = 0.72$ 를 곱한 것에 의하여 구한다.

다. 부재단면의 내력산정

1) 산정조건 및 산정식

강섬유보강콘크리트부재의 단면파괴에 대한 검토에 있어서 이 설계단면내력을 부재단면의 단위폭에 대하여 산정하는 경우 다음과 같은 가정조건을 가지고 설계하는 것으로 하였다.

표4 부재치수 등의 영향에 관한 검토

①설계인장강도에 곱한 계수(무근콘크리트) $k_t = 0.6/(h^{1/3})$ (h:부재의 단면높이(m)) 일본철도구조물 등 설계표준		
부재의 단면높이(m)	설계인장강도에 곱한 계수	0.15m의 경우를 1.0로 환율
0.15	$k_t = 1.13$	$k_t = 1.00$
0.40	$k_t = 0.81$	$k_t = 0.72$
②설계휨강도에 곱한 계수(무근콘크리트) $k_b = 0.5/(h/2)^{1/3}$ (h:부재의 단면높이) 일본철도구조물 설계표준		
부재의 단면높이(m)	설계휨강도에 곱한 계수	0.15m의 경우를 1.0로 환율
0.15	$k_b = 1.19$	$k_b = 1.00$
0.40	$k_b = 0.85$	$k_b = 0.72$
③문헌(콘크리트의 휨강도추정에 관한 파괴역학적 검토) (枝學大學: 小柳외)		
일변의 길이(cm)	정방형단면의 휨강도 추정값(kgf/cm ²)	15cm의 경우를 1.0으로 환율
10	41.7	1.06
(15)	(39.2)	1.00
20	36.7	0.94
40	33.2	0.85

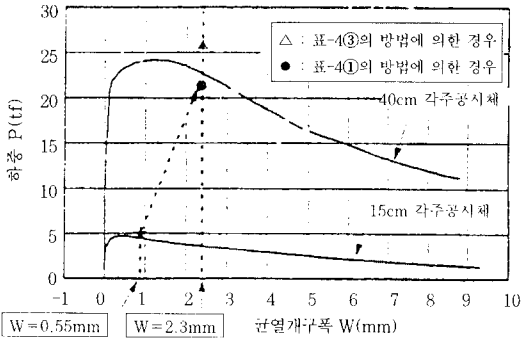


그림32 부재치수 등의 영향을 고려한 단면내력의 산정결과

- ① 압축축의 강섬유변형은 단면의 중립축으로부터 거리에 비례한다.
- ② 강섬유보강콘크리트부재의 압축응력-변형곡선에 대하여는 콘크리트표준시방서에 의한 것을 원칙으로 한다.
- ③ 강섬유보강콘크리트부재의 인장축응력은 강섬유가 받는 설계인장강도 f_{ftd} 를 고려한다.
- ④ 균열깊이는 부재높이의 70%까지로 한다.
- ⑤ 강섬유가 받는 인장강도 f_{ft} 의 상정된 균열면에 있어서 설계한계개구폭 W_{ft} 를 고려한다.

이러한 조건으로부터 설계단면내력의 산정은 그림 33에 도시한 기호 등에 기초 식 (16), (17)에 의하여 구하는 것이 좋다.

$$M_{ud} = \left\{ \int_{-h/2}^{h/2} \sigma(y) \cdot b \, dy \right\} \cdot \frac{1}{Y_b} \quad (16)$$

$$N'_{ud} = \left\{ \int_{-h/2}^{h/2} \sigma(y) \cdot b \, dy \right\} \cdot \frac{1}{Y_b} \quad (17)$$

여기서 M_{ud} 는 설계휨내력, N'_{ud} 는 설계축방향압축내력, h 는 라이닝두께, b 는 단위폭, Y_b 는 부재계수이다.

2) 내하력곡선의 산정

변형의 상태는 종국압축변형 및 균열깊이의 제한치를 보지하는 것으로부터 그림 34와 같이 이행되는 것으로서(M_{ud} , N'_{ud})곡선을 작성한다.

- ① 전단면에 걸쳐서 콘크리트의 극한압축변형 ϵ'_{cu} 로 아래쪽변형이 $\epsilon'_{cu}=0$ 로 되는 상태

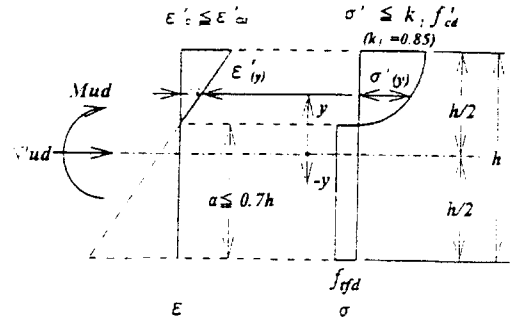


그림33 응력-변형관계와 단면내력의 산정

(응력상태 a)

- ② 압축축끝변형이 콘크리트의 종국압축변형 ϵ'_{cu} 로 아래쪽끝변형이 $\epsilon'_{cu}=0$ 로 되는 상태 (응력상태 b)
- ③ 압축축 끝변형이 콘크리트의 종국압축변형 ϵ'_{cu} 로 균열깊이가 최대값으로 되는 상태 그렇지만 $\epsilon'_{cu}=0$ 의 점이 제한값의 $a=a_h$ 까지 진전된 상태(응력상태(c))
- ④ 균열깊이의 제한값 $a=a_h$ 를 보지하는 것으로부터 압축축끝변형이 감소하여 설계축방향력 $N'_{ud}=0$ 로 되는 상태(응력상태(d))

3) 안전성 조사

라이닝공사 설계에 사용되는 안전계수는 표 5에 표시한 것과 같다. 이 안전계수가 본 라이닝공사에 사용되는 완성시의 극한한계상태에서의 채움값에 대하여는 다음과 같이 고려한다.

표 5 현장타설 콘크리트라이닝의 안전계수

안전계수	한계상태		극한한계상태		사용한계상태
			단면과력에 대한검토		균열검토
	탄형시	완성시	탄형시	완성시	완성시
재료계수 r_m	콘크리트	압축	1.3	1.3	1.0
		인장	1.3	1.3	1.0
하중계수 r_f	라이닝자중	도입	1.05	1.05	1.0
		연직방향	1.0	1.1	1.0
		수평방향	1.0	1.1	1.0
		수압	1.0	1.0	1.0
구조해석계수 r_a	지반반력		1.0	1.0	1.0
	구조물계수 r_b		1.0	1.0	1.0
부재계수 r_b	휨	휨	1.15	1.15	1.0
		압축	1.3	1.3	1.0
구조물계수 r_i	1.0		1.1	1.0	1.0

① 재료계수 γ_m : 콘크리트강도에 대하여는 콘크리트치기조건을 가지고 만들어진 품질변동 양생조건이 다른영향 현장비밀에 의한 품질관리의 변동 타설된 콘크리트의 불균일성 등의 변동요인이 있다. 재료계수를 사용하여 안전성을 확보하는 것이 된다. 강섬유보강콘크리트는 무근콘크리트에 비하여 압축취그러들음에 견뎌 압축강도도 일단 올라가는 것도 고려되나 무근콘크리트와 같이 안전계수 $\gamma_c = 1.3$ 으로 하였다. 여기서 강섬유보강콘크리트의 인장력에 대한 안전계수에 대하여는 인장력이 압축과 같이 콘크리트의 강도에 준거되는 것 각

종실험결과로부터 안전측의 산정방법을 사용하였다. 이것으로부터 압축에 대한 안전계수와 같은계수 $\gamma_c = 1.3$ 을 사용하는 것으로 하였다.

② 하중계수 γ_m : 설계하중은 지금까지의 터널시공실적 등으로부터 충분하게 안전측의 하중체계로 되어있기 때문에 일본토목학회 터널표준시방서(쉴드편)의 하중체계를 사용하는 것으로 하였다. 따라서 극한한계상태 검토에 있어서는 일반적으로 사용되는 $\gamma_f = 1.0 \sim 1.1$ 로 하였다. 라이닝자중에 대하여는 자중의 변동이 쉴드굴착시 여굴에 의하여 두께가 증가하기 때문에 $\gamma_f = 1.05$ 로 하였다.

③ 구조해석계수 γ_a : 본공법에 의한 라이닝은 강성이 균일한링이다. 세그먼트와 같은 볼트이음은 아니고 실구조와 해석모델과의 차가 거의 없는 것으로 생각된다. 후레임모델에 의해 원형단면을 의사해석하는 것으로부터 절점위의 단면력은 이론적인 원형구조보다 큰 값으로 된다. 따라서 이 방법에 의한 설계는 일반적으로 안전측으로 되므로 $\gamma_a = 1.0$ 으로 하였다.

④ 부재계수 γ_b : 터널과같은 부정정구조물은 최대휨응력점에서 균열이 발생하여도 응력의 재분배가 되어 파괴에 이르지 않고 구조체로서의 내력은 크고 상당히 안전성이 높은 것 라이닝두께는 일반적으로 설계치수보다 크게 되는 것으로부터 휨과 축방향력을 받는 부재로서의 안전성검토는 콘크리트표준시방서의 값 $\gamma_b = 1.15$ 로 하였다.

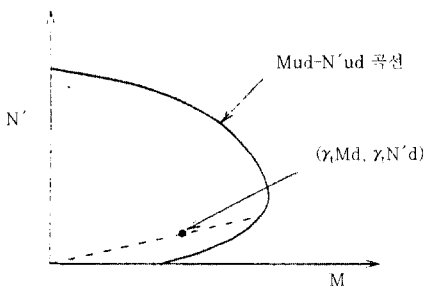


그림 35 안전성 검토

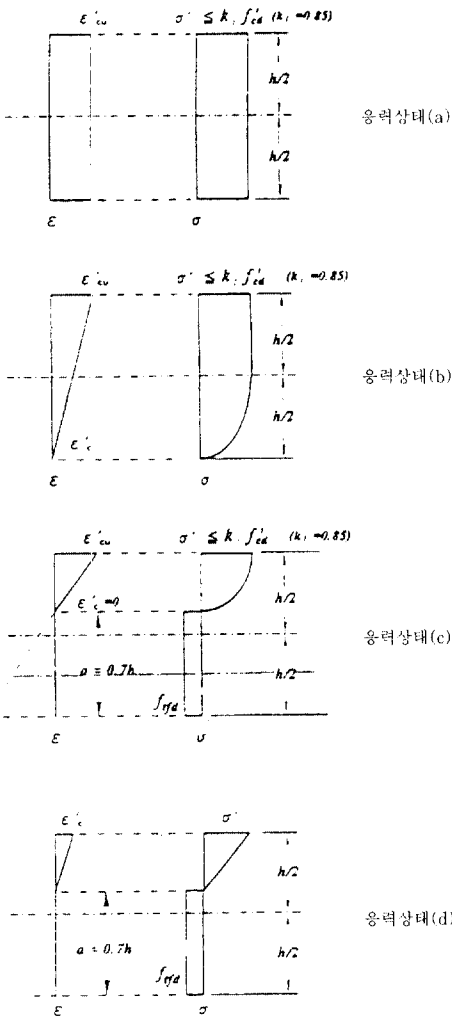


그림 34 변형상태의 설정과 응력분포상태

- ⑤ 구조물계수 γ_i : 완성시의 구조물계수는 콘크리트표준과 같은 것으로 $\gamma_i = 1.11$ 로 하였다. 이상의 안전계수를 사용하여 단면력 및 단면내력의 산정을 하여 축방향력 및 휨모멘트에 대한 안전성검토에서는 그림 35에 도시한 것과 같이 설계단면력의 점($\gamma_i M_d, Y_i, N'_d$)가 구한 (M_{nd}, N'_d)곡선의 내측, 즉 원점에 넣는 것이 기본조건으로 된다. 이상과 같은 것으로서 안전성이 검토된다.

6. 결 론

강섬유보강콘크리트의 원형공시체 재하실험 및 각주공시체 휨실험을 시행, 이것에 해석을 하여 설계법의 검토를 시행한 결과 다음과 같은 것이 밝혀졌다.

- ① 터널라이닝에 있어서 파괴 균열상태 내하력 등 구조내력이 해명되었다.
- ② 라이닝의 구조내력을 산정하는 경우 처음에 현저한 균열이 발생하는 데까지의 내하력을 사용하면 안전측의 내력으로 된다. 따라서 일 부부재의 내하력을 가지고 설계계산을 하는 것으로 대응된다.
- ③ 구조내력이나 부재의 단면력을 산정할 경우 비교적 단순한 인장연화곡선으로 이것을 적절하게 표현된다.
- ④ 단면내력에 맞추어 부재의 70% 균열깊이를 규정하여 내하력을 구하면 적절한 안전측의 설계가 된다.
- ⑤ 균열깊이를 70%로 규정한 경우 그 영향범위는 0.7h로서 설계한계 균열개구폭을 구하면 실용적인 내하력범위가 구해진다.
- ⑥ 내하력산정에 사용되는 강섬유가 받는 인장강도 f_{yR} 는 일반적으로 시행되는 15cm 각주공시체의 휨시험에 의해 구하여진 인장강도로부터 추정가능하다. 부재치수 등을 고려한 보정계수 κ_f 에 의해 저감보정된 값을 사용하는 것이 좋은 것으로 확인되었다.

이상과 같은 결론을 얻어 새로운 현장타설강섬유보강콘크리트의 한계상태설계법에 의한 설계지침이 제정되었다.

참 고 문 헌

1. 鬼頭誠, 峯本守, 梶原雄三, 松岡茂: 鋼纖維補強コンクリトを用いたトンネル覆工の設計方法, 土木學會4回トンネル工學研究發表會論文集, 1994. 11
2. 日本鐵道建設工團: 掘削 覆工併進工法設計施工指針(案) 都市トンネル編, 1992.3(追加資料, 1994. 5を含む)
3. 六郷惠哲, 内田裕市, 小柳治, 岩佐正徳, 瀬古繁喜: 鋼纖維補強コンクリトの引張軟化特性, 土木學會第44會年次學術講演會, 1989. 10 pp. 290-291
4. 内田柳市, 六郷哲, 小柳治: 콘크리트의 曲げ強度의 寸法效果에 關する 破壊力學的 檢討, 土木學會論文集, NO442/V-16. pp. 101-107, 1992.2
5. HORII Hideyuki and NANAKORN Prue-tteha: Fracture Mechanics Based Design of SFRC Tunnel Lining, JCI International Workshop on Site Effect Concrete Structures, pp. 347-358, 1993
6. 土木學會: 콘크리트標準示方書設計編, 3.2.3 應力ひずみ曲線, pp. 21-22, 1991.9
7. 木學會鋼纖維補強コンクリト研究小委員會: 鋼纖維補強コンクリト設計施工指針(案), 콘크리트ライブラリ 第50號, pp. 58-61, 1983. 3
8. 石井確一, 堀井秀之: クラック進展によるRC梁の曲げ變形量, 土木學會第46會年次學術講演會, 1991. 9
9. CEB: CEB-FIP.MODECODE1990, Bulletin information NO 203-207, 1991-7
10. 運輸省鐵道局, 鐵道總合技術研究所編: 鐵道構造物等設計標準, 丸善, 콘크리트構造物1 0.4.2. 曲げモメントおよび軸方向に對する檢討, pp. 155-156, 1992. 4