

그라운드 앵커의 하중전이 현상에 대한 연구 A Study on Load Transfer of Ground Anchors

김낙경¹⁾, Nak-Kyung Kim, 박완서²⁾, Woan-Suh Park

¹⁾성균관대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan Univ.

²⁾성균관대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil engineering, Sungkyunkwan Univ.

SYNOPSIS The load distribution in a ground anchor is very complex because it involves three different materials(soil, grout, and steel), which sometimes act as composite sections (bonded length) or separately (unbonded length). Therefore it is very hard to understand load transfer mechanism on the anchor. In order to understand the load transfer, it is essential to consider the load distribution in the three different materials. On these purposes, full scale anchor test is planned on the geotechnical site at Sunkyunkwan University. Prior to the test, modeling and analyses of the load transfer mechanism were performed on the data from the case histories.

Key words : Anchor Bond Stress, Load Distribution, Load Transfer

1. 서론

그라운드 앵커는 그 뜻과 같이 지반에 박는 못이란 의미이며 여러 종류의 지반구조물에 횡방향(tieback) 또는 연직반향의 구속력(tiedown) 또는 선행하중을 가하기 위한 효과적인 공법으로 흙 막이, 붕괴억지, 사면 안정, 댐의 보강, 지하구조물의 부력앵커등의 목적으로 근래에 국내외에서 활발히 사용되고 있다. 앵커는 앵커체의 형태에 따라 마찰방식, 지압방식, 그리고 복합방식으로 나뉘어 진다. 국내외에서 많이 사용되고 있는 것은 마찰방식으로 그라우트가 받는 응력의 형태에 따라 인장형 앵커와 압축형 앵커로 나누어진다. 앵커는 지반, 그라우트, 강선등 세가지의 성질이 다른 재료들이 정착부와 자유부에서 복합적인 하중의 거동을 통해 지반에 대한 지지 역할을 하고 있다. 앵커는 앵커체와 지반의 마찰력에 의해서 구조물을 지지하는 역할을 하며 하중과 변형의 관계를 규명하기 위해서는 마찰력 분포의 변화(하중전이)가 가장 중요한 요소가 된다. 따라서 앵커를 구성하는 각각의 재료들이 하중조건, 지반조건에 따라 발생하는 하중의 변화 특성에 따라 분포양상이 변하기 때문에 하중전이를 이해하기 위해서는 강선과 그라우트의 하중분포 그리고 앵커 그라우트체와 지반의 마찰력 분포를 알아야 한다(Weatherby, 1982) 본 연구는 성균관 대학교 지반 시험장에 계획된 현장 앵커 시험을 시행하기 앞서 시공사례(Muller et. al., 1998)의 현장 계측 데이터를 이용하여 앵커의 하중전이 미캐니즘을 분석하고 모델링을 하였다.

2. 연구배경

2.1 앵커의 극한강도

앵커 시공 및 설계에서 가장 중요한 것은 지반에 대한 앵커의 지지 능력인 극한강도를 사전에 정확히 예상하고 적용하는 것이다. 인장형 그라운드 앵커의 경우에 다음과 같은 사항들을 고려하여 극한강도를 결정하여

극한 하중으로 사용하게 된다.(AASHTO, 1990., PTI, 1996)

(1) 앵커와 지반간의 마찰력

앵커와 지반간의 마찰력 크기는 점성토 지반에서는 표1에서와 같이 정착계수 (Weatherby, 1982)에 따라 결정되며 식1에 의해서 결정할 수 있다.

$$Q_u = \pi D L_a f_{max} \quad \text{----- (식.1)}$$

$$f_{max} = \alpha S_u \quad (\text{점성토일 경우})$$

- α : 정착계수
- L_a : 정착장의 길이 (m)
- S_u : 비배수 전단강도 (kN/m²)

표 1. 점성토 지반에서의 정착계수 (Weatherby, 1982)

Soil type	Shear Strength	α	Reference
Stiff London Clay	9.0 kPa	0.3-0.35	Littlejohn, 1968
Stiff Overconsolidated Clay at Taranta Italy	27.0 kPa	0.28-0.36	Sapio, 1975
Stiff to Very Stiff Marl at Leicester, England	28.7 kPa	0.48-0.6	Littlejohn, 1970
Stiff Clayey Silt at Johannesburg, South Africa	9.5 kPa	0.45	Neely et. al., 1974
Heavily Overconsolidated Clay in Sweden	5.0 kPa	0.5	Broms, 1968

(2) 강선의 인장강도

$$Q_u = A_s f_{pu} \quad \text{----- (식.2)}$$

- A_s : 강선의 단면적
- f_{pu} : 강선의 극한응력 (kN/m²)

(3) 그라우트의 인장강도

압축형 앵커에서는 그라우트의 압축강도를 이용하여 인장형일때는 균열에 대한 브라질리안 시험값에 의해 결정되는 식3과 같이 표시되는 인장강도를 이용하여 결정한다.

$$Q_u = A_g f_t \quad \text{----- (식.3)}$$

$$f_t = \frac{2P}{\pi DL}$$

- D : 시료의 직경
- L : 시료의 길이
- A_g : 그라우트의 단면적

(4) 강연선과 그라우트의 부착응력

$$Q_u = n \pi D_c L_b f_b \quad \text{----- (식.4)}$$

- n : 강선의 개수
- D_e : 강선의 유효직경
- L_b : 강선의 정착길이
- f_b : 강선과 그라우트의 부착응력

2.2 하중분포

극한 하중 재하시 앵커 주변부의 마찰응력이 일정하다고 가정한다면

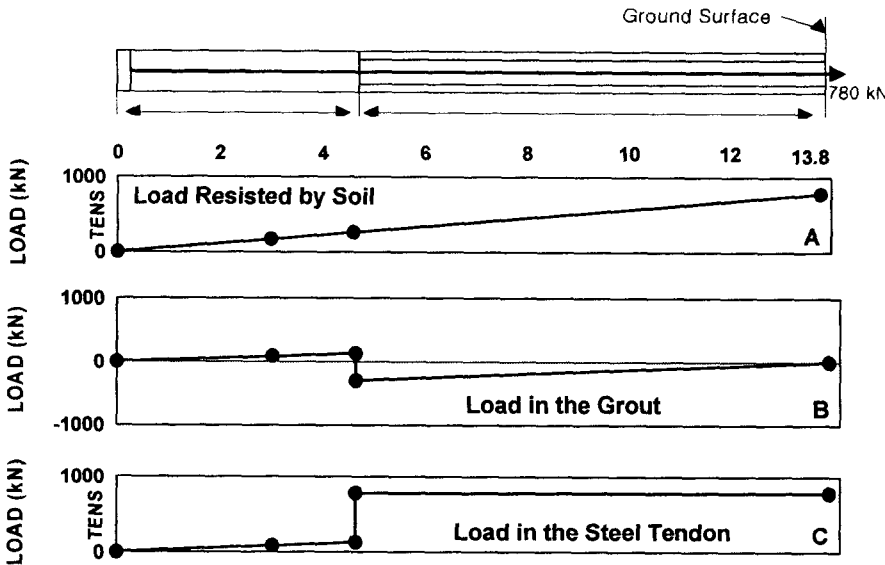


그림 1. 극한 하중에 재하시 하중분포

각 부분의 하중분포가 그림1에 나타나 있으며 지반에 대한 앵커의 지지력은 그라우트에서 발생하는 하중의 분포(C)와 강선에서 발생하는 하중(B)의 합으로 표현할 수 있다. (Briaud et. al., 1998) 이때 그라우트의 하중 분포는 인장재인 강선과 그라우트 사이의 정착응력 분포형태와 크기에 따라서 하중의 분포가 변하기 때문에 하중전이의 미캐니즘을 연구하기전에 앵커체의 정착응력을 결정하는 것이 선행 과제이다. 정착응력은 인장형 앵커에서는 인장재인 강선의 탈착 및 그라우트 된 앵커체와 흙 사이에 하중분포에 대해 영향을 미치는 등 앵커체에 인장력 재하시

앵커체 거동에 많은 영향이 있는 것에 불구하고 시험을 통한 정착응력을 산정하기가 어렵고, 콘크리트의 압축강도, 그라우트와 강선의 접합상태에 따라 부착응력의 크기나 분포가 달라진다(Hana, 1982).

3. 인발 시험 시공 사례

3.1 지반조건

시공사례(Muller et. al., 1998)의 앵커 시험 장소는 크게 두 개의 점토 층으로 나눌 수 있는데 그림2와 같이 지표로부터 6.5 m 까지의 평균적인 지반의 특성은 함수비 24.4%, 소성한계 20.9%, 액성한계 53.7%, 단위중량 19.6 kN/m², 비배수 전단강도 110 kN/m², 콘관입시험 저항치 2MPa, SPT에서 N=12 (blows/0.3 m)이며 지하수위는 지표로부터 6m 아래에 있고 6.5 m 근방에서는 0.5-1m 두께의 단단한 모래와 자갈 층이 분포하고 있다. 이 모래와 자갈층 밑으로 12.5 m 까지는 매우 단단한 점토층이 있으며 지반 특성치는 함수비는 24.5%, 소성한계 22%, 액성한계 65.5%, 단위중량 19.5 kN/m², 비배수 전단강도 140 kN/m², 콘관입시험 저항치 6MPa, SPT에서 N=32 (blows/0.3 m) 이다.

3.2 앵커의 재원

시공사례로 이용한 현장 시험에서 사용된 앵커는 정착장의 길이가 다른 열 개의 앵커를 사용하였고 이중

에서 그림2에서 보는 것과 같이 두 앵커의 길이는 13.8 m 이나 No.1, 2번은 그라우트와 강선이 부착이된 정착장의 길이가 4.6 m이고, 앵커 No 7, 8, 9, 10 번은 정착부의 길이는 9.2m 이다. 앵커의 직경은 300 mm (1ft) 이고 직경이 15.4mm (0.6 inches)인 강선을 7개를 한 다발로 묶어 사용했고 앵커의 그라우트의 단면적은 72045mm^2 , 탄성계수 $2.07 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ 강선 7개의 총단면적은 980mm^2 , 탄성계수는 $2.07 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ 이다.

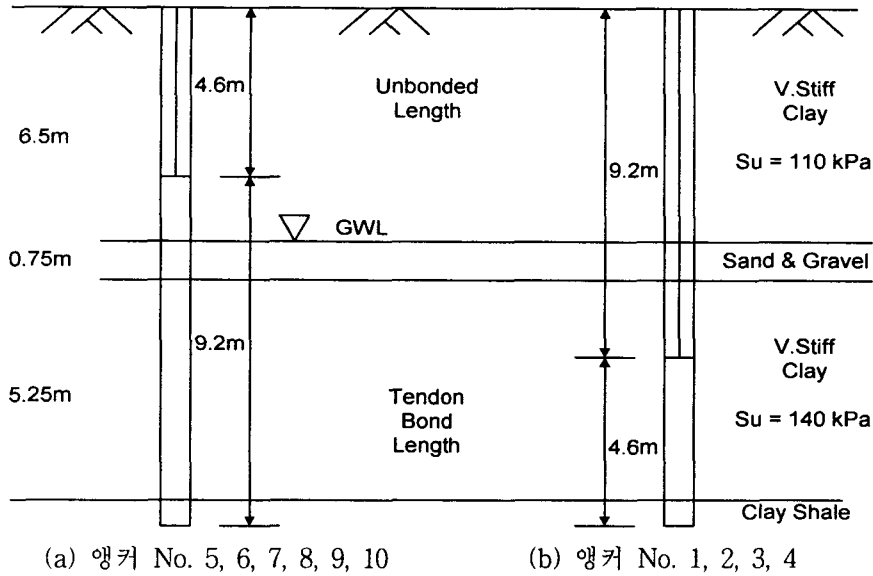


그림 2. 앵커 설치 장소의 지반 및 위치

3.3 인발 시험

그라운드 앵커의 인발시험은 AASHTO에서 제시하고 있는 그라운드 앵커의 시방 기준에 의해 앵커의 확인 시험(Proof Test), 인발 적성 시험(Performance test) 및 크립 시험(Creep Test)을 실시했다(AASHTO, 1990).

- 1) 확인시험 (Proof Test) : 앵커의 확인 시험은 단기간의 재하시험으로서 앵커의 설계하중의 133%를 저항할 수 있는지를 확인하는 시험으로 먼저 초기하중 AL (Alignment Load)에서부터 설계 하중 DL(Design load)에 대한 일정한 비율로 10분 단위로 증가시키면서 각 하중 단계마다 기준치보다 작은 변위가 발생 할 경우에 앵커의 설계내력이 있는 것으로 판정하는 시험이다(그림3-a).
- 2) 인발적성시험 (Performance test) : 앵커의 인발 적성시험은 단기의 반복하중에 대한 앵커의 설계내력을 측정하여 확인하는 시험으로 각 하중단계 재하후에 다시 초기하중으로 되돌아 다음 하중 단계로 반복 인발하는 것으로서 하중단계는 AL(Alignment Load)에서부터 설계하중 DL(Design load)에 대한 비율로서 각 하중단계에 대하여 기준치보다 작은 변형이 발생하는 것을 확인한다. 또한 비정착장의 시공여부를 확인 할 수 있는 자료로 이용 할 수 있다(그림3-b).
- 3) 크립시험(Creep Test) : 앵커의 크립테스트는 시간변화에 따른 장기거동에 측정하기 위한 것으로 본시험에서는 인발 시험과 같은 하중을 재하하나 인발 시간을 인발 적성 시험 보다 더 길게 주어 시간에 따른 크립을 확인하는 시험이다(그림3-c).

3.4 시공

시공사례에 사용된 앵커의 시공은 인장재로 사용할 강선에 계측기를 설치한 후 오거(hollow stem auger)를 이용하여 지반을 13.8m 까지 천공한 후 강관을 삽입하고 인장재를 지반에 수직으로 삽입한다. 인장재가 삽입된 후에는 0.69 MPa인 일정한 압력으로 그라우트 펌프를 이용하여 콘크리트를 주입하며 강관을 빼어 낸다. 앵커의 그라우트의 양생이 끝나면 앵커에 인장력을 가할 때 지지대로 사용할 철근 콘크리트의 기초(2.5m ×

2.5m×1m)를 설치한다.

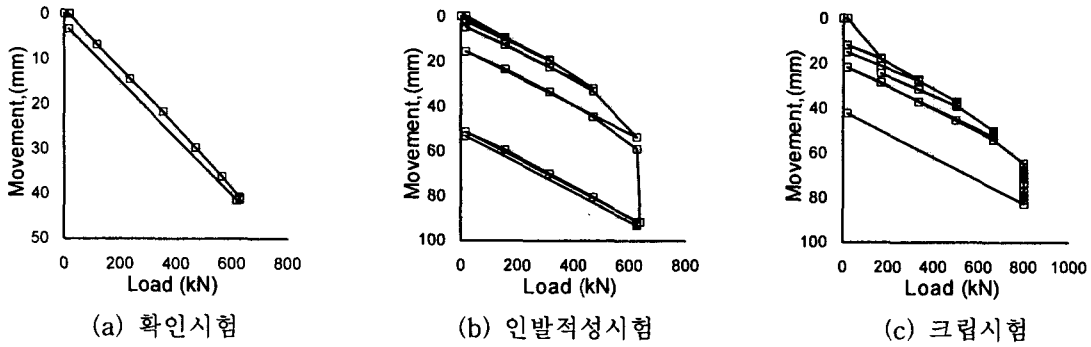


그림 3. 앵커의 인발시험시 하중 변위 곡선

3.5 계측 및 인발시험 결과

앵커의 두부에 진동현식 하중계가 장착된 유압식 하중 재하기를 콘크리트 기초위에 설치하고 하중을 점차 증가시켜 거의 극한하중이 될때까지 하중을 재하시키며 변형률을 측정한다. 강선에는 진동현식 변형율계를 그라우트에는 진동현식 응력게이지를 설치한다. 또한 인발시험시 발생하는 변위는 앵커 근접한 위치에 설치한 침하계를 기준으로 하여 측정하였다. 본 논문에서 사용된 앵커 1번의 게이지 설치위치가 그림4에 나타나있다.

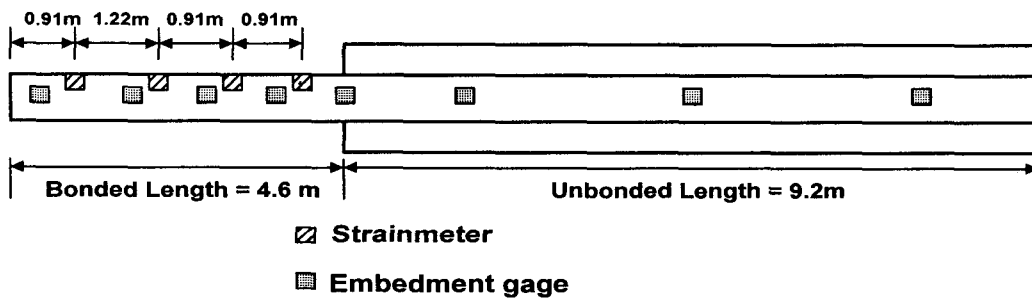
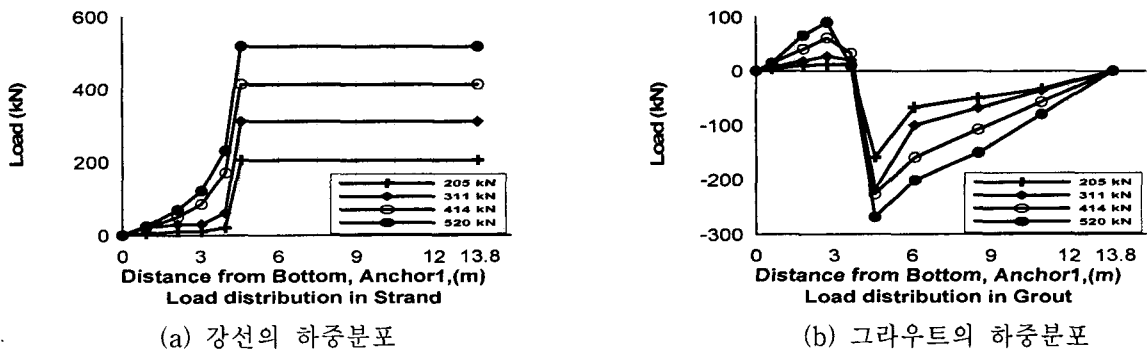
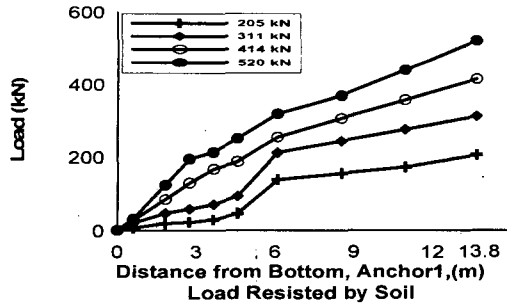


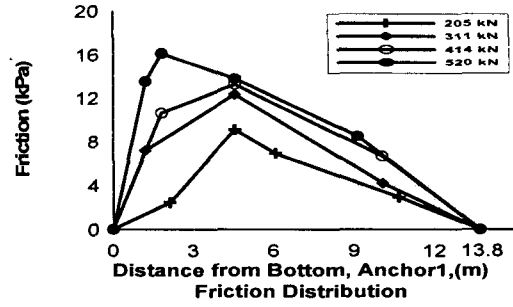
그림 4. 앵커 1번 변형량 측정을 위한 게이지 부착 위치

인발시험의 계측 결과를 이용하여 하중전이 분포를 구하기 위해서는 우선적으로 그라우트와 강선 사이에 발생하는 정착응력을 분석해야만 한다. 강선의 하중의 분포는 정착응력과 직접적인 관련이 있으므로 우선은 강선에서 발생하는 하중 분포를 통해서 정착응력을 구할 수 있고 이를 통해 앵커 그라우트에 작용하는 하중 전이 분포를 예측하고 분석할 수 있다. 또한 구해진 정착응력을 이용하여 역해석을 실시하여 실측된 하중의 분포와 수치해석에 의하여 해석한 결과를 비교하였다. 앵커 1번의 계측자료를 이용해서 얻은 강선에서의 하중의 분포(a), 그라우트의 하중분포(b), 앵커체에 지반의 마찰력에 의한 하중분포(c) 그리고 하중전이 분포(d)가 그림5에 나타나있다.





(c) 지반과의 마찰력 분포



(d) 하중전이 분포

그림 5. 앵커 1번의 계측결과 정리

4. 하중전이 현상의 모델링 및 수치해석

탄성체의 인장거동과 지반의 전단저항이 탄성체의 변형에 비례한다고 가정하면 구성방정식(Constitutive Equation)은 다음과 같이 세울 수 있다.

$$\frac{d^2w}{dx^2} - \frac{pK}{AE_a} w = 0 \quad \text{----- (식.5)}$$

본 연구에서 수치해석의 목적은 그라운드앵커의 하중-변위관계를 규명하고 하중전이 분포를 구하기 위하여 수치해석 기법을 도입하여 적용하고 현장시험과의 비교를 통하여 수치해석 모델의 타당성을 검증하였다. 앵커의 거동에 대한 모델링은 보-기둥 이론 해석에 의한 모델을 사용하였으며 앵커를 강성을 가진 일차원 요소로 분할하고 지반을 스프링으로 모사하는 기법이다. 보-기둥이론 해석법은 지반스프링을 표시하는 마찰저항과 변위와의 관계곡선을 구성하여 일차원의 유한차분법을 이용하여 해석하는 기법이다. 그라운드앵커의 지배방정식은 식5에서부터 연직 마찰력 $F(x,w) = -pkw$ 로 치환하면 다음 식6과 같이 되며, 앵커를 모델링하고 지반스프링을 f-w 곡선으로 나타내면 그림6에서와 같다.

$$\frac{d^2w}{dx^2} + F(x,w) = 0 \quad \text{----- (식.6)}$$

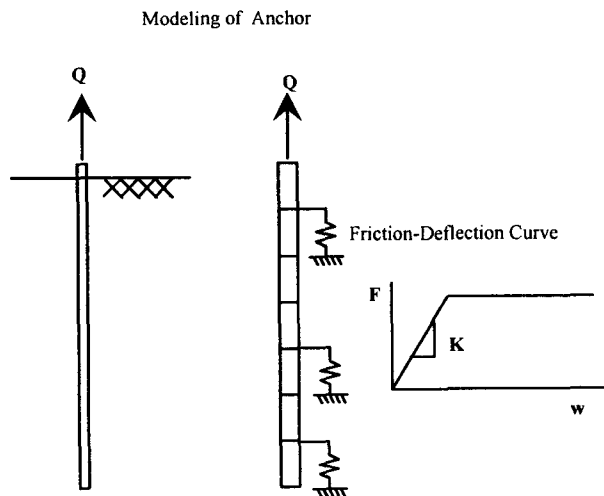


그림 6. 앵커의 모델링

실제 앵커의 경우 비정착장과 정착장으로 구분되어있고 비정착장은 그라우트와의 마찰 없이 인발력을 정착장에 직접 전달하기 때문에 수치해석에 의한 앵커의 거동해석을 위해서는 두 가지의 해석이 수행되어야 한다. 첫째로, 인장부인 강선(또는 강봉)과 그라우트와의 마찰거동을 규명하여야 하고, 둘째로 첫째 결과에 따라 앵커체와 지반과의 거동을 해석한다. 수치해석 결과와 계측자료로부터 구한 강선에서의 하중, 그라우트에서의 하중분포 및 하중전이 분포를 비교하여 그림 7에 도시하였다.

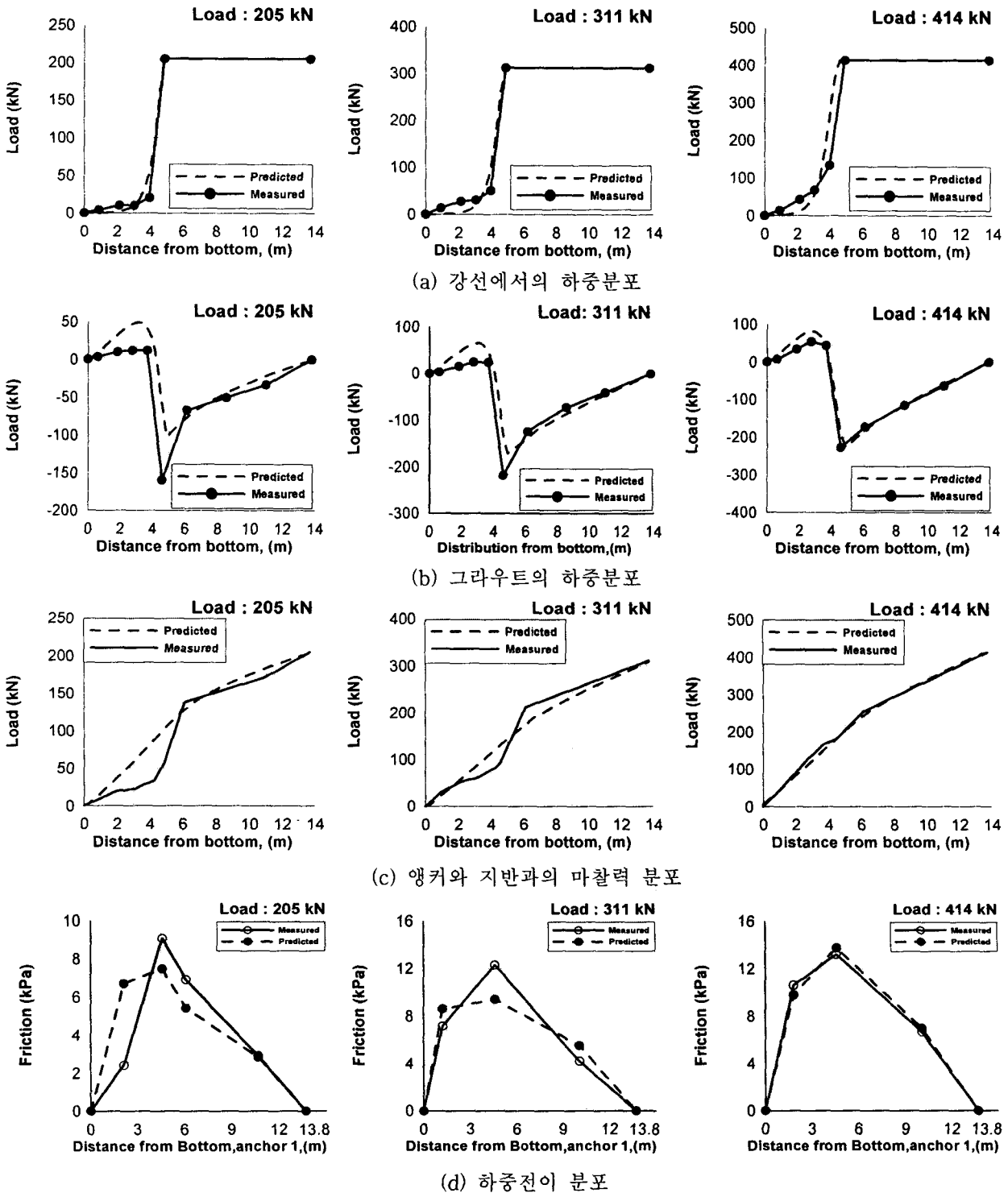


그림 7. 앵커 1번의 실측치와 수치해석의 비교

5. 결론

1. 계측기가 장착된 앵커의 인발시험을 통하여 각 앵커의 하중 단계에 따라 앵커의 강선과 그라우트에서 발생하는 하중의 분포 및 지반과 앵커체에 작용하는 하중전이 분포를 예측할 수 있었다.
2. 수치해석 프로그램을 이용하여 모델링한 후 저압형 그라운드 앵커의 하중전이 분포를 예측하여 실측치와 비교하여 비슷한 경향을 확인 할 수 있었다.
3. 하중전이 분포는 정착부와 자유부의 경계부에서 최대값 임을 알 수 있으며 하중 단계가 점점 더 커질수록 앵커의 하중전이의 크기도 증가하여 앵커체의 선단부로 이동하는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 99년도 산학연 컨소시엄 사업(참여기업 : 삼우기초기술)의 1차년도 연구비로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

* 참고 문헌

1. AASHTO. (1990), "Tieback Specifications", AASHTO-AGC-ARTBA TF27.
2. Briaud, Jean-Louis, William, F. PowerIII, Weatherby, D. E. (1998), "Should Grouted Anchors Have Short Tendon Bond Length?" , ASCE, J. of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol.124, No.2, pp110-119.
3. Broms, B.B. (1968), "Swedish Tieback System for Sheetpile Wall", Proc. 3rd Budapest Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp391-403.
4. Littlejohn, G.S.(1968), "Recent Developements in Ground Anchor Construction", Ground Engineering, Vol.1, No3, pp32-36.
5. Littlejohn, G.S.(1970), "Soil Anchors", ICE Conf. on Ground Engineering, London.
6. Muller, C.G., Long, J.H., Weatherby, D.E., Cording, E.J., Powers, W.F., and Briaud, J-L.(1998), "Summary Report of Research on Permanent Ground Anchor Walls, Vol.3, Model-Scale Wall and Ground Anchor Test", Report-RD-98-067, FHWA,McLean,VA
7. Neely, W.J., Montague-Jones, M.(1974), "Pull-out Capacity of Straight Shafted and Underreamed Ground Anchor", Die Siviele Ingenieur in Suid-Africa, Jaargang 16, NR 14, pp131-134.
8. PTI(1996), Recommadations for Prestressed Rock and Soil Anchors 3rd ed. Post tensioning Institute, Phoenix, Arizona.
8. Sapio, G.(1975), "Comportamento di tiranti de ancoraggio in formazioi de argile preconsolidation." XII Convegno Nazionale de Geotechnica, Consenza, Italy.
9. Tomas H. Hanna. (1982), "Foundations in Tension-Ground Anchor", Trans Tech Publication Series on Rock and Soil Mechanics, Vol.6.
10. Weatherby, D.E. (1982), "Tiebacks", Report FHWA/RD-82/047, U.S. Dept. of Transportation, Fed. Hwy. Admin., Washington, D.C.