

최적화 설계를 통한 과긴장 앵커의 하중-저항계수 산정 연구

A Study on the Calculation of Load Resistance Factor of over Tension Anchors by Optimization Design

이성규¹, 이영진¹, 송용재¹, 조태준², 이강일^{2*}

Soung-Kyu Lee¹, Yeong-Jin Lee¹, Yong-Jae Song¹, Tae-Jun Cho², Kang-Il Lee^{2*}

¹Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environment Engineering, Daejin Univ., 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do 11159, Republic of Korea

²Member, Professor, Dept. of Smart Construction and Environmental Engineering, Daejin Univ., 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do 11159, Republic of Korea

ABSTRACT

To consider the risk of damage and fracture of P.C strands, the existing post-maintenance system alone has the limitations, hence it is necessary to quantitatively evaluate and predict the deterioration, durability and safety of facilities and establish a reasonable maintenance system considering the asset value of facilities. Therefore, it is worth considering a preventive maintenance plan that allows proactive measures to be taken before a major defect occurs in the temporary anchor. This study devised a preventive over tension method, reviewed its effectiveness through design and field tests, by calculating the resistance factors by performing a reliability-based optimization design. At this time, the over tension anchor method was evaluated using the ratio of the residual tension force after the fracture of P.C strands to the effective tension force before the fracture of P.C strand, followed by the resistance factor calculated by the optimal solution for each random variables using Excel solver and applying it to the limit state equations. As a result of the study, if the over tension ratio is 125% to 130%, the remaining strands showed a high resistance effect even after the fracture of P.C strand. As a result of the optimization design, it was found that it is appropriate to apply the load factor (γ) of 1.25, and the resistance factors of Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 as 0.7, 0.5, 0.6.

요 지

강연선의 손상 및 파단위험에 대하여 적극적으로 대처하기 위해서는 기존의 사후 유지관리 체계만으로는 한계가 있으며 시설물의 내구성, 안전성 저하를 정량적으로 평가 및 예측하고 시설물의 자산가치를 고려한 합리적인 유지관리 체계의 구축이 요구된다. 따라서 가설앵커에 큰 결함이 발생하기 전 사전조치가 이루어지도록 하는 선제적 유지관리 방안을 고려해볼 가치가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 선제적 과긴장 공법을 고안하여 설계 및 현장시험을 통해 그 효과를 검토하고 신뢰성 기반 최적화 설계를 수행하여 저항계수를 산정하였다. 이때 과긴장 앵커의 흠막이 가시설 지지효과는 강연선 파단 전 유효긴장력에 대한 강연선 파단 후 잔존긴장력의 비를 이용하여 평가하였으며 저항계수는 각 확률변수에 대한 최적해를 Excel solver를 이용하여 구하고 이를 한계상태식에 적용하여 산정하였다. 연구결과 과긴장률이 125%~130%인 경우 강연선 파단 후에도 높은 흠막이 가시설 지지효과를 보였으며 최적화 설계결과 하중계수(γ)는 1.25, 저항계수 Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 은 0.7, 0.5, 0.6을 적용함이 적절한 것으로 나타났다.

Keywords : Anchor, P.C strand, Over tension method, Preventive maintenance, Resistance factor

Received 10 Oct. 2023, Revised 28 Nov. 2023, Accepted 11 Dec. 2023

*Corresponding author

Tel: +82-31-539-2024; Fax: +82-31-539-2020

E-mail address: kilee@daejin.ac.kr (K.I. Lee)

1. 서론

앵커의 유지관리에 대한 논의는 1970년대부터 노후된 지반앵커에 대한 파손 또는 기능 저하가 보고됨에 따라 시작되었다. 영국은 지반앵커의 주요 파괴요인으로 구조물의 파손, 인장재의 릴렉세이션, 과인장이 있다고 하였다 (British Standard Institution, 1989). 미국에서는 기 시공된 지반앵커에 대하여 중장기적인 계획이 수행되도록 제시하고 있으며(Sabatini et al., 1999), 일본에서는 유지관리 점검의 종류를 초기점검, 일상점검, 정기점검, 긴급점검, 정밀안전진단으로 분류하여 점검기준을 제시하였고(Public Works Research Institute, 2008), 독일에서는 유지관리 점검의 종류가 아닌 앵커의 부재별 점검기준을 제시하였다 (Deutsches Norm, 1990). 국내의 경우 Cha et al.(2009)은 지반앵커의 장기간 사용 시 발생하는 문제점과 앵커의 변형 요인, 유지관리 소홀로 인해 생기는 문제점 등을 분석하고 국내 실정에 맞는 점검 및 정밀안전진단의 빈도, 유지관리 기록 등에 대한 방안을 제시하였다. Choi et al.(2021)은 리프트오프 시험을 실시하여 현장 가설 앵커의 안정상태를 평가하고 불안정한 앵커에 대해서는 주의관찰을 할 수 있도록 제시한 바 있다.

이렇듯 기존의 연구는 앵커에 문제가 발생한 후 보수보강을 실시하는 사후 유지관리를 중점으로 이루어져 있으나 강연선의 손상 및 파단위험에 대하여 적극적으로 대처하기 위해서는 기존의 사후 유지관리 체계만으로는 한계가 있으며 시설물의 내구성, 안전성 저하를 정량적으로 평가 및 예측하고 시설물의 자산가치를 고려한 합리적인 유지관리 체계의 구축이 요구되고 있다(KICT, 2019). 따라서 가설앵커에 큰 결함이 발생하기 전 사전조치가 이루어

지도록 하는 선제적 유지관리(Preventive Maintenance) 방안을 고려해볼 가치가 있다. 예를 들면 TRB에서는 교량의 선제적 유지관리 효과에 대한 연구를 진행하고 있으며, FHWA에서는 터널 등의 선제적 유지관리를 위한 가이드라인도 마련하고 있다(Cho et al., 2008). 특히 독일의 SAP 사에서는 PdMS(Predictive Maintenance & Service)를 적용하여 생산설비 고장시간 44% 감소와 정비비용 17% 감소 효과를 보고하였다(Muller et al., 2008).

따라서 본 연구에서는 가설앵커의 선제적 유지관리 방안으로 가설앵커의 과긴장 공법을 제안하였다. 이 공법은 가설앵커의 강연선 중 하나가 파단되더라도 남아 있는 강연선의 긴장력만으로 전체 흙막이 가시설이 정상적인 거동을 할 수 있도록 하는 원리이다. 이를 위해 시방서에 제시된 앵커 설계방법과 현장시험을 이용하여 강연선 중 하나가 파단된 후에 대한 과긴장 앵커의 흙막이 가시설 지지 효과를 검토하였다. 그리고 안정성과 경제성을 고려한 과긴장 공법의 설계방안을 제시하기 위하여 신뢰성 기반 최적화 설계를 실시하였고 그 결과로 하중-저항계수를 제시하였다.

2. 과긴장 시험 현장 조사

과긴장 공법과 설계방안을 제시하기 위해서는 지반과 앵커 구조물간의 거동특성을 파악하여야 하며 이를 위해 본 연구에서는 현장시험을 실시하였다. 시험 대상 현장은 A현장에 위치한 흙막이 가시설 굴착공사 현장으로써 부지면적은 29,118.00m²이며 흙막이 가시설의 단면은 Fig. 1과 같이 굴착깊이 12.16m, 근입장 2.0m이다. 여기서 과

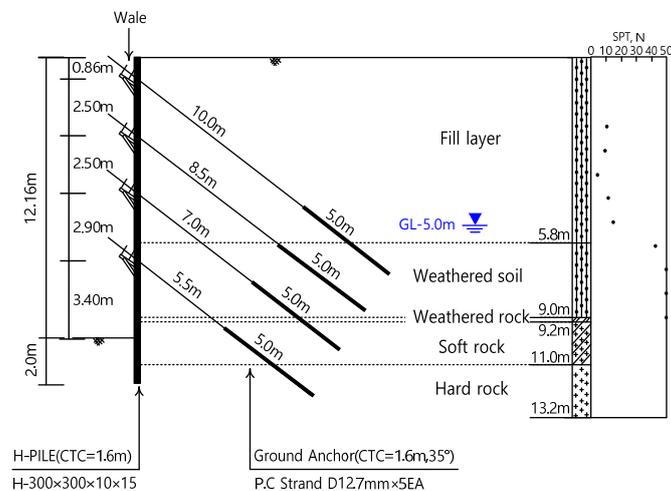


Fig. 1. Section of anchored earth retaining wall for field test (A Site)

Table 1. Field ground conditions and SPT results

Division	Depth (m)	Soil conditions	SPT N value	TCR/RQD
Fill layer	0.0~5.8	Gravelly and silty sand	5/30~15/30	-
Weathered soil	5.8~9.0	Silty sand	43/30~50/15	-
Weathered rock	9.0~9.2	Silty sand	50/2	-
Soft rock	9.2~11.0	Biotite gneiss	-	67%/6%
Hard rock	11.0~13.2	Biotite gneiss	-	95%/48%

Table 2. Field earth retaining wall conditions

Division	Conditions
Retaining wall	· H-Pile : H-300×300×10/15 (C.T.C = 1.6m)
	· Timber plate : t = 100mm
Ground anchor	· P.C Strand : D12.7mm, 5EA (C.T.C = 1.6m, Angle = 35°) · Free length : 5.5m~10.0m (4th anchor = 5.5m) · Bonded length : 5.0m · Spare length : 1.5m

Table 3. Input data of ground materials

Division	γ_t (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	k_h (kN/m ³)
Fill layer	18.0	0.0	26.0	18,000
Weathered soil	19.0	15.0	30.0	32,000
Weathered rock	21.0	31.0	32.0	40,000
Soft rock	25.0	50.0	35.0	60,000
Hard rock	25.0	100.0	40.0	100,000

Table 4. Input data of ground anchor

Division	D_s (mm)	A_p (mm ²)	D (mm)	E_p (MPa)	f_{py} (MPa)	f_{pu} (MPa)	P_a (kN)	
							$N_p=5EA$	$N_p=4EA$
Value	12,70	98,71	100,00	200,00	1,570.00	1,860.00	596.70	477.36

긴장 시험은 연암~경암 지반에 정착이 이루어진 4단 앵커를 대상으로 실시하였다. A현장의 지반조사는 시추조사와 표준관입시험(SPT)을 실시하였으며 조사결과는 Table 1과 같다. 또한 흙막이 가시설은 H-Pile+토류판 공법과 가설 앵커공법이 적용되었으며 상세 제원은 Table 2와 같다.

3. 과긴장 앵커 설계

3.1 지반 및 가설 앵커 물성치

본 연구에서는 현장 과긴장 시험을 실시하기 전에 탄소성해석을 이용하여 앵커지지 흙막이 가시설에 대한 안정성 검토를 실시하였다. 탄소성해석시 요구되는 지반 물성치는 단위중량(γ_t), 점착력(c), 내부마찰각(ϕ), 수평지반반력계수(k_h)이며 본 현장의 지반 물성치는 Table 1의 지반

조사 결과와 문헌조사 결과를 바탕으로 Table 3과 같이 산정하였다.

또한 가설 앵커 설계시 요구되는 제원과 물성치는 1개 강연선의 공칭직경(D_s), 공칭단면적(A_p), 천공경(D), 탄성계수(E_p), 항복하중(f_{py}), 극한하중(f_{pu})이 있으며 허용인장강도(P_a)는 항복하중과 극한하중을 이용하여 Table 4와 같이 산정한다.

3.2 앵커 설계 방법

가설앵커 설계시에는 우선 흙막이 가시설의 안정상태를 유지하기 위한 유효긴장력에 긴장력 손실량을 고려하여 초기긴장력과 변위를 산정한다. 그리고 강연선의 파단에 대한 안정성, 지반-그라우트간 인발에 대한 안정성, 그라우트-강연선간 인발에 대한 안정성을 검토한다. 본 현장

과 같은 마찰형 앵커의 초기긴장력(JF_{req})은 유효긴장력(T_{req})에 정착장치 활동에 의한 긴장력 손실량(ΔP_p)과 릴렉세이션에 의한 긴장력 손실량(ΔP_{pr})을 더하여 산정한다. 강연선의 파단에 대한 안정성은 초기긴장력(JF_{req})이 허용인장강도(P_a)보다 작을 경우 안전하다고 볼 수 있으며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$JF_{req} \leq P_a \quad (1)$$

지반-그라우트간의 인발에 대한 안정성은 앵커의 유효긴장력이 지반과 그라우트간에 발생하는 마찰강도보다 작으면 안전하다고 볼 수 있으며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{req} \leq \pi \cdot D \cdot \tau_u \cdot L_a / 1,000,000 / 1.5 \quad (2)$$

여기서 L_a 는 정착장의 길이(mm), τ_u 는 주면마찰저항이며 본 현장의 앵커는 Fig. 1과 같이 연암 및 경암지반에 정착되어 있으므로 Japan Anchor Association(2009)를 참고하여 주면마찰저항은 1,000kPa을 적용하였다. 또한 1.5는 가설앵커의 마찰저항에 대한 안전율이다. 그라우트-강연선간의 인발에 대한 안정성은 앵커의 유효긴장력이 그라우트와 강연선간에 발생하는 부착강도보다 작으면 안전하다고 볼 수 있으며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{req} \leq \pi \cdot N_p \cdot D_s \cdot \tau_a \cdot L_a / 1,000,000 \quad (3)$$

여기서, τ_a 는 그라우트와 강연선간의 허용부착응력을 나타낸다.

3.3 과긴장 앵커 설계 결과

본 절에서는 가설앵커 과긴장 공법의 선제적 유지관리 효과를 연구하기 위해 식 (1)~식 (3)을 이용한 설계를 실시하였다. 설계 조건은 앵커의 파단전과 파단후에 대한 과긴장 효과를 검토하기 위해 강연선 갯수(N_p)와 과긴장률(Over Tension Ratio, OTR)을 달리하여 6개 경우를 고려하였으며 과긴장률은 식 (4)와 같이 산정하였다. 굴착단계와 경험토압을 고려한 탄소성해석 및 구조계산 결과에 의하면 벽체와 지보재를 포함하는 전체 흙막이 가시설에 대한 안정성은 확보되는 것으로 검토되었다. 또한 현장 시험이 이루어지는 4단 앵커의 유효긴장력(T_{req})은 5연선 앵커에서 흙막이 가시설의 안정성을 확보하기 위해 330.85kN 이상을 유지해야 하는 것으로 나타났으며 이 결과를 기반으로 각 조건별 과긴장력(JF_{over}), 긴장력 손실량($\Delta P_p + \Delta P_{pr}$), 잔존 긴장력($T_{residual}$), 변위(δ_{el})를 Table 5와 같이 산정하였다.

$$OTR = \frac{JF_{over}}{JF_{req}} \times 100(\%) \quad (4)$$

과긴장력 및 잔존긴장력과 변위간의 관계는 Fig. 2와 같이 모두 선형적인 결과를 보인다. 과긴장률이 100%인 파단전 5연선 앵커의 초기긴장력은 411.20kN이고 앵커가 파단되어 4연선이 될 경우 328.95kN으로 긴장력 감소가 발생한다. 여기서 만약 긴장력 손실($\Delta P_p + \Delta P_{pr}$)이 발생하지 않아 328.95kN을 유지하더라도 유효 긴장력인 330.85kN 보다 작은 긴장력을 보인다. 이는 강연선 파단이 발생할 경우의 긴장력의 손실이 정착장치의 활동이나 릴렉세이션

Table 5. Case of over tension anchor

Case	OTR (%)	N_p (EA)	JF_{over} (kN)	$\Delta P_p + \Delta P_{pr}$ (kN)	$T_{residual}$ (kN)	δ_{el} (mm)
Case1	100	5	411.20	80.35	330.85	24.99
		4	328.95	64.28	264.67	24.99
Case2	110	5	452.32	80.35	371.97	27.49
		4	361.85	64.28	297.57	27.49
Case3	120	5	493.44	80.35	413.09	29.99
		4	394.74	64.28	330.46	29.99
Case4	125	5	514.00	80.35	433.65	31.24
		4	411.19	64.28	346.91	31.24
Case5	128	5	526.34	80.35	445.99	31.99
		4	421.06	64.28	356.78	31.99
Case6	130	5	534.56	80.35	454.21	32.49
		4	427.64	64.28	363.36	32.49

에 의한 손실보다 크다는 것을 보여주며 앵커 파단후에는 흠막이 가시설의 안정성에 문제가 발생할 수 있음을 나타낸다.

각 조건별 과긴장력은 5연선인 경우 411.20kN~534.56kN, 4연선인 경우 328.95kN~427.64kN으로 계산되었으며 잔존긴장력은 5연선인 경우 330.85kN~454.21kN, 4연선인

경우 264.67kN~363.36kN으로 계산되었다. 현장시험시 앵커의 파단 및 인발에 대한 안정성은 식 (1)~식 (3)을 이용하여 검토하였으며 그 결과는 Table 6과 같이 모두 허용치를 만족하는 것으로 나타났다.

4. 현장 과긴장 시험 결과

4.1 과긴장 시험 방법 및 결과

과긴장 시험방법은 우선 파단전으로 가정된 5연선 앵커에 과긴장력(JF_{over})을 재하하고 변위(δ)를 측정한다. 그리고 강연선이 파단된 상황을 가정하여 동일한 앵커의 4연선에 과긴장력을 재하하고 변위를 측정한다. 그리고 4연선 앵커의 긴장력이 안정화된 후의 유효긴장력을 측정한다. 만약 과긴장력을 재하하는 도중 앵커에 문제가 발생하는 경우 해당 케이스에 대한 시험을 종료한다. 과긴장 시험의 종류는 Table 5와 동일하다.

과긴장 시험 결과는 Table 7과 같이 과긴장률 110% 및 120%에서 앵커의 인발로 인한 웨지(Wedge)의 파단이 발생함에 따라 시험을 중단하였으나 과긴장률 100%, 125%,

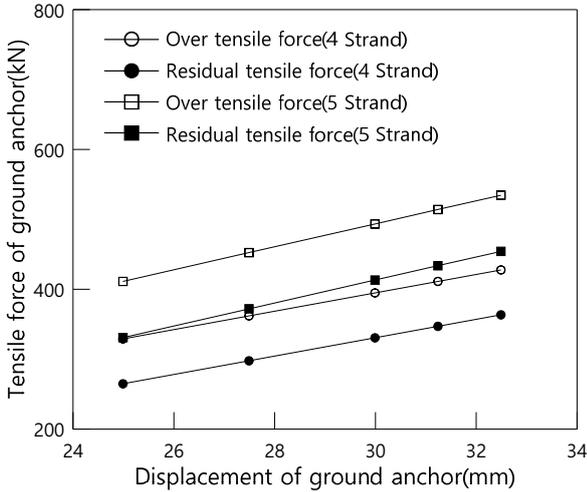


Fig. 2. Over tensile force and residual tensile force according to displacement

Table 6. Stability evaluation of ground anchor

Division	N_p (EA)	JF_{req} or $T_{residual}$ (kN)	Allowable strength (kN)	Judgment
Fracture stability (Strand)	5	411.20~534.56	596.70	OK
	4	328.95~427.64	477.36	OK
Pull out stability (Ground-Grout)	5	330.85~454.21	1,151.92	OK
	4	264.67~363.36	1,151.92	OK
Pull out stability (Grout-Strand)	5	330.85~454.21	997.46	OK
	4	264.67~363.36	797.96	OK

Table 7. Field test results of over tension method

Case	OTR (%)	N_p (EA)	JF_{over} (kN)	$T_{residual}$ (kN)	δ_{el} (mm)
Case1	100	5	411.0	-	61
		4	277.0	287.75	49
Case2	110	5	Anchor failure		
		4			
Case3	120	5	Anchor failure		
		4			
Case4	125	5	514.0	-	64
		4	360.0	358.13	50
Case5	128	5	525.0	-	72
		4	369.0	361.88	55
Case6	130	5	534.0	-	15
		4	427.0	364.93	68

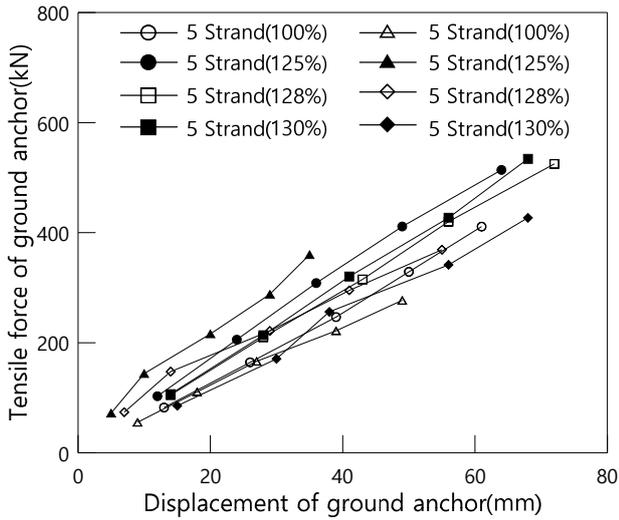


Fig. 3. Displacement and tensile force of ground anchor for field test

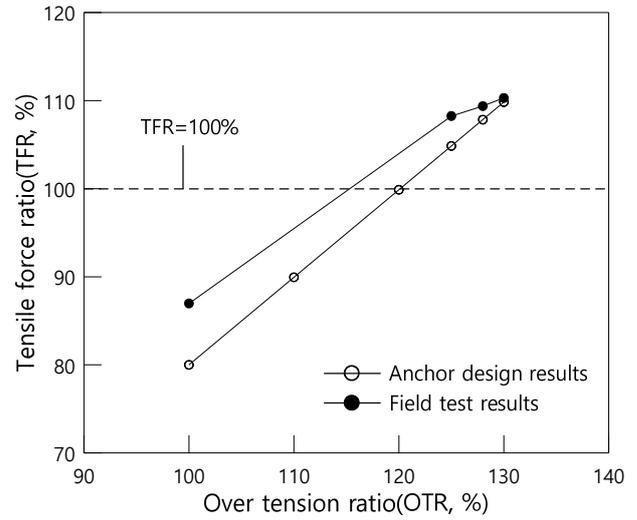


Fig. 4. Tensile force ratio according to over tension ratio

Table 8. Tensile force ratio according to over tension ratio

Case	OTR (%)	$T_{req(safety)}$ (kN)	Anchor design results		Field test results	
			$T_{residual(failure)}$ (kN)	TFR (%)	$T_{residual(failure)}$ (kN)	TFR (%)
Case1	100	330.85	264.67	80.00	287.75	86.97
Case2	110		297.57	89.94	-	-
Case3	120		330.46	99.88	-	-
Case4	125		346.91	104.85	358.13	108.25
Case5	128		356.78	107.84	361.88	109.38
Case6	130		363.36	109.83	364.93	110.30

128%, 130%에서는 정상적인 시험이 수행되었다. 시험 결과 4연선 앵커의 잔존긴장력은 287.75kN~364.93kN으로 과긴장력인 277kN~427kN과 비교할 경우 최대 62.07kN 정도 긴장력이 손실되었다. 현장시험시의 긴장력 손실량은 Table 5에서 산정한 설계시의 긴장력 손실량($\Delta P_p + \Delta P_{pr}$) 64.28kN과 비교하여 적은 손실이 발생함에 따라 안정적으로 앵커의 정착이 이루어졌다.

현장시험시 앵커에 발생된 변위는 설계시의 경우 Table 5와 같이 24.99mm~32.49mm의 값을 보였으나 현장시험 시에는 49mm~72mm만큼 발생되어 현장시험 결과가 설계치보다 196%~222% 더 큰 값을 보였다. 이는 설계식과 모형시험, 수치해석의 정착장 길이를 비교한 Han et al. (2017)의 연구와 부합하는 결과로써 설계시의 경우 앵커의 끝단을 고정단의 경계조건으로 가정하지만 실제지반은 긴장력에 의하여 정착장에 마찰 변형이 발생하기 때문으로 판단된다. 그러나 과긴장력과 변위간의 관계는 Fig. 3과 같이 파단전과 파단후 모두 선형적인 결과를 보였다.

4.2 과긴장 앵커의 선제적 유지관리 효과 검토

앵커의 강연선이 파단되어 긴장력 손실이 발생하더라도 전체 흙막이 가시설이 안정상태를 유지하기 위해서는 식 (5)와 같이 긴장력비(Tensile Force Ratio, TFR)가 100%보다 큰 값이어야 한다.

$$TFR = \frac{T_{residual(failure)}}{T_{req(safety)}} \times 100\% \geq 100\% \quad (5)$$

여기서, $T_{residual(failure)}$ 는 강연선 파단후(4연선)의 잔존긴장력(kN)이고 $T_{req(safety)}$ 는 강연선 파단전(5연선)의 유효긴장력(kN)이다. 긴장력비는 탄소성해석 결과로 얻은 앵커 파단전(5연선)의 유효긴장력과 설계(Table 5) 및 현장시험(Table 7)을 통해 얻은 앵커 파단후(4연선)의 잔존긴장력을 이용하여 Table 8과 같이 산정하였다. Table 8 및 Fig. 4와 같이 과긴장률 100%~120%에서의 긴장력비는 설계시의 경우 80.00%~99.88%, 현장시험시의 경우 86.97%

로 나타나 100%이상을 만족하지 못하였다. 그러나 과긴장률 125%~130%에서의 긴장력비는 설계시의 경우 104.85%~109.83%, 현장시험의 경우 108.25%~110.30%로 나타나 100% 이상을 확보하였다. 즉 앵커의 강연선에 파단이 발생하더라도 과긴장률을 125%~130%확보할 경우 흙막이 가시설의 안정을 유지할 수 있는 것으로 검토되었다.

5. 과긴장 앵커의 신뢰성 기반 최적화 설계

5.1 신뢰성 기반 최적화 설계 방법

Table 5와 Table 7을 비교한 결과 긴장력에 따른 앵커의 변위는 설계시와 현장 시험시에 상이하다. 이는 앵커 설계시 정착장을 고정단으로 가정하나 실제의 경계조건은 그라우트와 지반간의 마찰로 인한 스프링 경계조건에 가깝기 때문에 발생하는 차이로 판단된다. 그러나 가설 앵커의 이러한 거동을 반영할 수 있는 설계기준은 전무한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 신뢰성 기반 최적화 설계기법을 이용하여 기존의 설계식을 한계상태 설계식으로 수정하였으며 한계상태 설계식은 AASHTO의 하중조합 방법을 사용하여 최적화 설계방안을 제시하였다.

신뢰성기반 최적화 설계는 구조물 파괴확률에 관한 척도인 신뢰성 지수를 이용하여 확률론적 처리를 수행하는 신뢰성지수 접근법(Reliability Index Approach, RIA)과 목표 성능값 방법(Performance Measure Approach, PMA)이 있다. 여기서 RIA는 확률분포가 비정규성을 띄기 때문에 매 해석과정마다 신뢰성 지수를 구하기 위한 과정이 요구되며 수렴에 어렵다는 단점이 있다. 따라서 최근에는 정규화된 확률분포를 목적함수로 사용하여 수렴성이 편리한 PMA가 주로 사용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 PMA를 이용하여 신뢰성 기반 최적화 설계를 실시하였으며 이를 위해 Microsoft Excel Solver(해 찾기 기능)를 이용하였다. 이때 목표 파괴확률(P_f)과 목적함수인 신뢰성지수(β)의 관계는 식 (6)과 같다.

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (6)$$

여기서, Φ 는 표준 정규분포함수이며, 신뢰성지수(β)는 정규화변수(u)를 이용하여 식 (7)과 같이 계산한다.

$$\beta = \min \sqrt{[u]^2 + [u]^2 + \dots} \quad (7)$$

여기서, 정규화변수(u)는 확률변수(x)에서 확률변수의 평균(\bar{x})을 빼고 이를 표준편차(σ)로 나눈 값으로 식 (8)과 같다.

$$u = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (8)$$

또한 표준편차(σ)는 확률변수의 평균(\bar{x})에 변동지수(V)를 곱한 값으로 식 (9)와 같이 구한다.

$$\sigma = \bar{x} V \quad (9)$$

확률변수의 최적해는 목표 파괴확률에 대한 신뢰성 지수를 만족하는 값을 산정하여야 한다. 이때 파괴확률(P_f)은 구조물의 목적, 사회적 요구와 예산 등에 의해 결정하며 PMA에서의 파괴확률별 신뢰성지수(β)는 Table 9와 같다.

구조물기초 분야에서 Meyerhof(1970)는 파괴확률을 10^{-3} ~ 10^{-4} 로 제안한바 있으며 항만 구조물을 대상으로 Wu et al.(1989)는 2.0~3.0, Tang et al.(1990)은 1.4~3.0의 신뢰성지수를 제안한 바 있다. 이를 참고하여 가설앵커에 대한 신뢰성 지수는 설계수명(2년)과 경제성을 고려하여 3.0을 목표 신뢰성지수로 설정함이 적절할 것으로 보이며 이때의 파괴확률은 약 10^{-3} 이다. 이는 변동지수(V)가 0.1인 경우 허용응력설계법에서의 안전율 약 1.5에 해당된다 (Meyerhof, 1970).

5.2 한계상태식 및 하중-저항계수 결정

하중계수(γ) 및 저항계수(ϕ)는 Fig. 5와 같이 정규화 된 확률분포를 이용하여 결정할 수 있으며 한계상태식($g()$)은 식 (10)과 계수하중(ϕR)과 한계내력($\gamma_i Q_i$)을 뺀 값이 0 이상일 때의 해로 구한다.

Table 9. Reliability index by destruction probability in PMA

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1.28	2.33	3.09	3.71	4.26	4.75	5.19

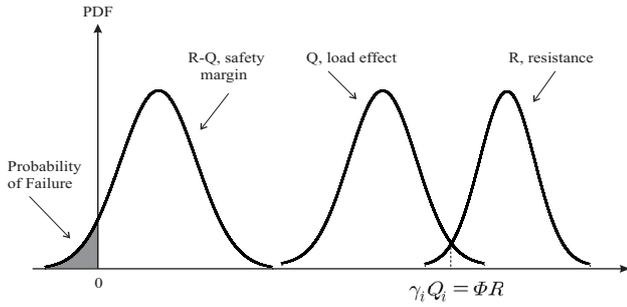


Fig. 5. Load factor and resistance factor in limit state design

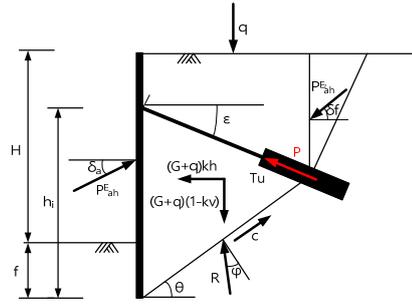


Fig. 6. Kranz model outline

Table 10. Optimal solution for random variables

x	\bar{x}	V	σ	u	Optimal solution
$\delta_a(^{\circ})$	7	0.1	0.7	1.31	7.92
$\delta_f(^{\circ})$	10	0.1	1.0	1.88	11.88
$\theta(^{\circ})$	28	0.1	2.8	0.00	28.01
$\phi(^{\circ})$	10	0.1	1.0	1.88	11.88
$\epsilon(^{\circ})$	20	0.1	2.0	-0.46	19.07

Table 11. Tensile force and resistance factor for performance reliability index

Case	OTR (%)	$T_{residual}$ (kN)	Resistance factor		
			Φ_1	Φ_2	Φ_3
Case1	100	194.9	0.70	0.43	0.64
Case2	110	217.3	0.70	0.50	0.60
Case3	120	235.2	0.70	0.50	0.60
Case4	125	243.8	0.70	0.50	0.60
Case5	128	243.8	0.70	0.50	0.60
Case6	130	243.8	0.70	0.50	0.60

$$g() = \Phi R - \gamma_i Q_i \geq 0 \quad (10)$$

여기서, 하중계수(γ)는 편향계수(λ), 변동지수(V), 극한한계상태상수(n)를 고려하여 식 (11)과 같이 계산한다.

$$\gamma = \lambda(1 + nV) \quad (11)$$

AASHTO LRFD 교량설계 시방서에 의하면 편향계수(λ)는 1.05이며 극한한계상태상수(n)은 2, 변동지수(V)는 0.1이므로 하중계수(γ)는 1.25로 결정할 수 있다. 따라서 결정된 하중계수(γ) 1.25와 아직 결정되지 않은 저항계수(Φ)를 적용하여 가설앵커의 안정성과 관련된 식 (1)~식 (3)을 식 (12)~식 (14)와 같은 한계상태식으로 수정할 수 있다.

$$g_1() = \Phi_1 \cdot P_a - 1.25 \cdot T_{residual} \geq 0 \quad (12)$$

$$g_2() = \Phi_2 \cdot \pi \cdot D \cdot \tau_u \cdot L_a - 1.25 \cdot T_{residual} \geq 0 \quad (13)$$

$$g_3() = \Phi_3 \cdot \pi \cdot N_p \cdot D_s \cdot \tau_a \cdot L_a - 1.25 \cdot T_{residual} \geq 0 \quad (14)$$

결정된 한계상태식의 저항계수(Φ)를 산정하기 위해 PMA를 이용한 최적화 설계를 수행하였으며 이때 앵커의 파괴기준은 Kranz 모델을 적용하였다. Kranz 모델은 점착력이 있는 토질조건에 대하여 내진토압을 평가하는 이론적 모델로써(Whitlow, 1995; Benamara et al., 2020) 파괴기준은 Fig. 6과 같다. 여기서 앵커의 파괴와 관련된 확률변수(x)는 벽체마찰각(δ_w), 쐐기마찰각(ϕ), 활동면의 경사각(θ), 내부마찰각(ϕ), 앵커의 경사각(ϵ)이며 이에 대한 평균값(\bar{x})은 Benamara et al.(2020)의 연구결과를 참고하여 Table 10과 같이 적용하였다. 변동지수(V)는 AASHTO LRFD 교량설계 시방서에 의하면 0.1을 적용함이 적절하며 Kranz 모델 파괴기준에 대하여 신뢰성지수 3.0을 만족하는 최적해를 산정한 결과는 Table 10과 같다. 해석 결과는 목표 신뢰성 지수 3.0에 수렴하였으며 이때의 파괴확률은 0.135%인 것으로 나타났다.

Table 12. Stiffness comparison of anchor design, field test and optimization design

Case	OTR(%)	Anchor design			Field test			Optimization design		
		δ_{el} (mm)	$T_{residual}$ (kN)	k (kN/mm)	δ_{el} (mm)	$T_{residual}$ (kN)	k (kN/mm)	δ_{el} (mm)	$T_{residual}$ (kN)	k (kN/mm)
Case1	100	24.99	264.67	10.59	49	287.75	5.87	24.99	194.9	7.80
Case2	110	27.49	297.57	10.82	-	-	-	27.49	217.3	7.90
Case3	120	29.99	330.46	11.02	-	-	-	29.99	235.2	7.84
Case4	125	31.24	346.91	11.10	50	358.13	7.16	31.24	243.8	7.80
Case5	128	31.99	356.78	11.15	55	361.88	6.58	31.99	243.8	7.62
Case6	130	32.49	363.36	11.18	68	364.93	5.37	32.49	243.8	7.50

또한 Table 10의 최적해에 대한 긴장력($T_{residual}$)은 Table 11과 같으며 산정된 긴장력을 식 (12)~식 (14)에 적용한 결과 $g_1()$, $g_2()$, $g_3()$ 이 0을 만족하는 ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 의 저항계수가 산정되었다. 앵커의 정착장이 연암 및 경암에 설치된 본 현장의 저항계수 ϕ_1 은 0.70, ϕ_2 는 0.43~0.50, ϕ_3 은 0.60~0.64의 값으로 산정되었으며 분석 결과 과긴장률에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 과긴장 앵커의 설계시 저항계수 ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 은 각각 0.7, 0.5, 0.6 정도를 적용함이 적절할 것으로 보인다.

5.3 최적화 설계의 적용성 평가

앞서 제안한 과긴장 앵커의 저항계수는 기존의 앵커 설계법과 현장시험, 최적화 설계 결과로 얻은 긴장력 ($T_{residual}$)-변위(δ_{el}) 관계를 비교함으로써 적용성을 평가하였다. 긴장력($T_{residual}$)-변위(δ_{el}) 관계는 식 (15)와 같이 강성도(k)로 표현할 수 있으며 Table 5, Table 7, Table 11의 긴장력($T_{residual}$)-변위(δ_{el}) 결과를 이용하여 강성도(Stiffness of anchor, k)를 구한 결과는 Table 12와 같다.

$$k = \frac{T_{residual}}{\delta_{el}} \quad (15)$$

강성도(k) 산정 결과 정착장이 고정단 경계조건인 앵커 설계의 경우 10.59kN/mm~11.18kN/mm의 값을 보였으나 현장시험의 경우 지반과 그라우트간 마찰 변형으로 인해 5.87kN/mm~7.16kN/mm의 작은 값을 보였다. 본 연구에서 실시한 최적화 결과의 경우 강성도가 7.50kN/mm~7.90kN/mm의 값을 보여 Fig. 7과 같이 현장시험 결과보다 조금 과대하지만 기존 설계방법 보다는 비교적 근사한 값을 나타내었다. 따라서 본 연구에서 제안한 하중계수(γ

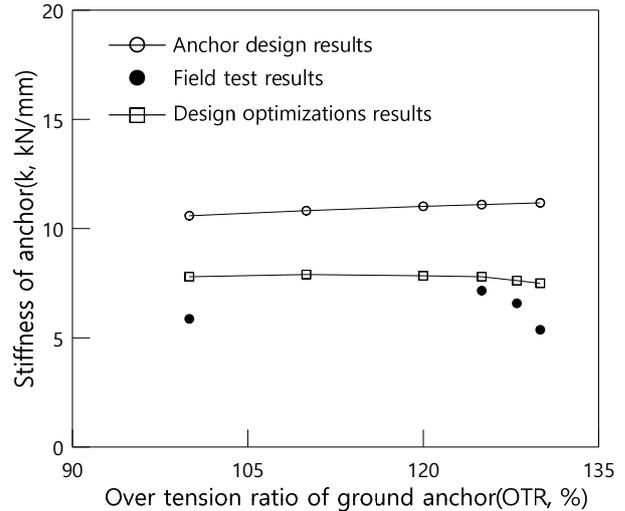


Fig. 7. Stiffness comparison of anchor design, field test and optimization design

=1.25)와 저항계수($\phi_1=0.6$, $\phi_2=0.5$, $\phi_3=0.7$)은 과긴장 앵커 설계시 적용이 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구는 현장시험을 통해 과긴장 앵커의 파단후 흠막이 가시성 지지효과를 검토하였으며 신뢰성 기반 최적화 설계를 통해 목표 신뢰성 지수에 대한 하중-저항계수를 제안하였다. 그리고 현장시험과 최적화 설계 결과를 비교하여 제안한 하중-저항계수의 적용성을 평가하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 현장시험 결과 연암 및 경암지반을 대상으로 한 가설앵커의 과긴장 공법은 과긴장률(OTR)을 125%~130% 적용할 경우 강연선 파단 후에도 유효긴장력($T_{req(safety)}$)보다 8.25%~10.30%의 긴장력이 추가로 작용하여 높은 흠막이 가시성 지지효과를 보였다.

- 2) 과긴장 앵커의 하중계수(γ)는 문헌고찰 결과 1.25로 결정하였으며 Kranz모델의 파괴기준에 의한 신뢰성 기반 최적화 설계결과 저항계수(ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3)는 각각 0.7, 0.5, 0.6 정도의 값을 적용함이 적절한 것으로 분석되었다.
- 3) 앵커의 강성도(k)를 비교한 결과 최적화 설계의 강성도는 7.50kN/mm~7.90kN/mm으로 현장시험 결과의 강성도인 5.87kN/mm~7.72kN/mm과 비교적 근접한 결과를 보여 과긴장 앵커 설계시 적용이 가능한 것으로 나타났다.

가설앵커의 과긴장 공법은 제한된 지반 및 앵커조건에 대하여 실시한 기초연구로써 현장 시험시 일부 실패사례를 확인함에 따라 추후 다양한 조건에 대한 데이터베이스를 이용하여 지속적인 보완 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

1. Benamara, Z. F., Rouaiguia, A. and Bencheikh, M. (2020), *Stability of Anchored retaining Walls under Seismic Loading Conditions to Obtain Minimal Anchor Lengths Using the Improves Failure Model*, Civil and Environmental Engineering Reports, Vol.30, No.3 pp.214-233.
2. British Standard Institution (1989), *British Standard Code of Practice of Ground Anchorages*, BS. 8081.
3. Cha, A. R., Chang, B. S., You, D. W., Kim, B. H. and Kim, T. H. (2009), *Proposal for the maintenance and inspection of ground anchor*, KGS Spring National Conference, pp.1032-1041.
4. Cho, H. N., Lim, J. G., Choi, Y. M. and Park, K. H. (2008), *Life Cycle Cost Analysis of Infrastructure*, Goomibook, p.6.
5. Choi, T. S., Yun, J. M., Kim, Y. S., You, S. K. and Lee, K. I. (2021), "Stability Evaluation of Anchors Using Lift-off Field Test", *Proceedings of the The Korean Society of Disaster Information*, Vol.17, No.1, pp.128-142.
6. Deutsches Norm (1990), *Ground Anchorages Design, Construction and Testing*, DIN-4125.
7. Han, J. M., Kim, G. H., Woo, J. T. and Lee, K. I. (2017), "Evaluation of Pullout Capacity of Anchors by Bonded Length through Model Test", *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol.16, No.3, pp.11-19.
8. Japan Anchor Association (2009), *Inspection and Maintenance Manual for Ground Anchor*, CIR.
9. KICT (2019), *Development of Preventive Management System for Road Facilities based on Big-data considering Preemptive Countermeasures and Renewal*, KICT 2019-025.
10. Meyerhof, G. G. (1970), "Safety factors in soil mechanics", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.7, pp.349-355.
11. Muller, A., Marquez, A. and Iung, B. (2008), "On the Concept of E-maintenance: Review and Current Research", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.93, No.8, pp.1165-1187.
12. Public Works Research Institute (2008), *Inspection and Maintenance Manual for Ground Anchors*, Japan anchor association.
13. Sabatini, P. J., Pas, D. G. and Bachus, R. C. (1999), *Geotechnical Engineering Circular No.4 Ground Anchors and Anchored Systems*, FHWA-SA-99-015, Office of Bridge Technology Federal Highway Administration, Washington, D.C.
14. Tang, W., Woodford, D. and Pelletier, J. (1990), "Performance reliability of offshore piles", *Proceedings of the 22nd Annual Off-shore Technology Conference*, Houston, TX, Paper No.OTC 6379, *Offshore Technology Conference, Richardson, TX*, Vol.3, pp.299-308.
15. Whitlow, R. B. (1995), *Asic soil mechanics*, Wesley Longman, Editor received the manuscript.
16. Wu, T., Tang, W., Sangrey, D. and Baecher, G. (1989), Reliability of offshore foundations-state of the art, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.115, No.2, pp.157-178.