

베이스플레이트식 체결장치의 앵커볼트 설계

Design of anchor-bolt for the rail fastening system with baseplate

김 은* 장 승 업** 조 용 진***
Kim, Eun Jang, Seung Yup Cho, Yong Chin

ABSTRACT

Anchor bolt in baseplate fastenings on the slab track is an important component to conform placing and safety of fastenings. Due to the way of load transmission control of fastenings, sometimes anchor bolt has to be applied lateral load. So we have to take care for it when we design. Especially, in the case of anchor bolt which is applied loads repeatedly, we have to consider fatigue failure. If parts of machine are damaged in static loads, stress will exceed the yield strength. So parts could be transformed largely. Therefore because they are visible to the naked eyes, we can replace parts before failure. However, because fatigue failure that are invisible to the naked eyes happen unexpectedly, it's very dangerous.

To make a reasonable design of anchor bolts, we will analyze them by changing diameters of anchor bolt, quality of insert, initial gap between anchor bolt and insert, the presence of insert, etc. which affect the stresses of anchor bolts. We can get the maximum and minimum amplitude of stress through the modified Goodman diagram or Smith diagram which represents limit of all strengths and stress components to the average stress. We also tried to show the way of examining the expected th life of anchor bolt briefly through considering above.

1. 서론

슬래브레도에서 주로 사용되는 베이스플레이트식 체결장치에서 앵커볼트는 체결구의 위치, 안전성을 확보하는데 중요한 역할을 하는 구성품이다. 앵커볼트는 체결장치의 하중전달 제어 방식에 의해 체결장치의 횡방향 하중을 앵커볼트가 진담하는 경우가 있어 설계에 있어 주의를 요한다. 특히 반복적으로 하중을 받는 앵커볼트의 경우에 있어 피로파괴에 대한 고려가 이루어져야 한다. 기계부품이 정적하중에 의해 파손될 경우, 응력이 항복강도를 초과하기 때문에 대개 매우 큰 변형을 일으킨다. 따라서 육안으로 미리 감지할 수 있기 때문에 파손이 발생하기 전에 해당 부품의 교체가 가능하다. 그러나 눈으로 감지할 수 없는 피로파손은 갑작스럽게 일어나기 때문에 매우 위험하다.

이에 본고에서는 앵커볼트의 적정한 설계를 위해 앵커볼트에 발생하는 응력에 영향을 미치는 앵커볼트 형상, 매립전의 재질, 앵커볼트와 매립전의 초기 gap, 매립전의 유무 등을 고려하여 해석을 수행하고, 체결장치의 실내성능시험 데이터를 이용하여 특정 평균응력에 대한 모든 강도와 모든 응력성분의 한계값을 나타내는 수정 Goodman선도 또는 Smith선도를 통해 앵커볼트에 발생하는 평균응력으로 최대, 최소 응력진폭을 구하고, 그에 따른 내구수명을 간략하게 검토할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

* 정희원, 한국철도기술연구원, 레도구조연구팀
E-mail : eunkim@krii.re.kr
TEL : (031) 460-5328 FAX : (031) 460-5814
* 한국철도기술연구원
* 한국철도기술연구원

2. 앵커볼트의 이론적 해석

(1) 해석모델

앵커볼트의 내구수명을 예측하기 위해 범용유한요소 프로그램인 LUSAS를 이용하여 앵커볼트의 발생 응력을 구하였다. 요소는 solid요소를 사용하였고, 앵커볼트와 매립전, 콘크리트를 모델링하여 해석을 수행하였다. 또한 앵커볼트와 매립전 사이에 있는 초기 gap을 모델링하기 위해 tied mesh를 사용하여 접촉되어 있는 면의 모델링을 해주었고, 이를 통해 초기 gap을 나타내었다. 초기 gap이 있는 모델에서는 초기 gap까지의 발생응력과 접촉 이후의 발생응력을 superposition하여 발생응력을 계산하였다. 하중은 접촉면적에 대한 투영하중을 주어 응력집중으로 인한 해석의 오류를 줄이고자 하였다.

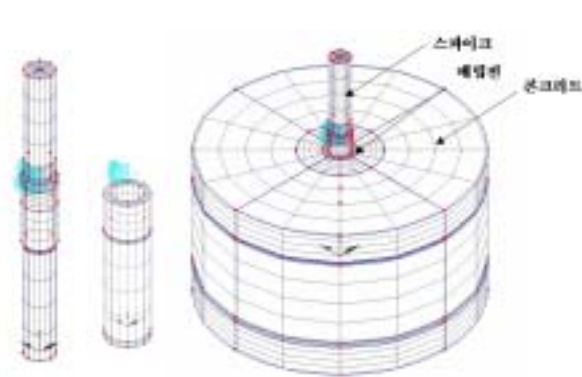


그림 1 해석모델

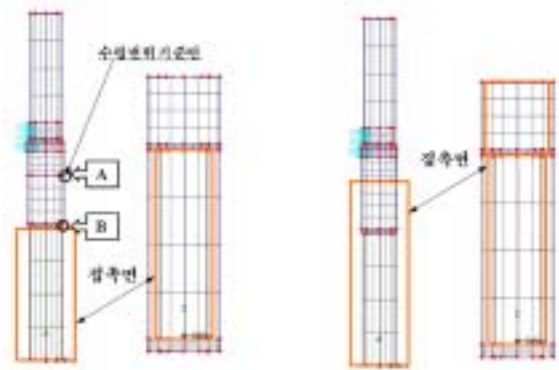


그림 2 초기 gap을 고려한 해석

(2) 하중결정

앵커볼트에 작용하는 하중은 레일체결장치의 실내성능시험 중 반복하중재하시험(EN 13146-4)을 모사하여 사용하였다. 레일체결장치의 반복하중재하시험은 26° 경사를 주고 10kN~120kN의 반복하중을 4Hz로 재하하는 시험으로 우선 4개의 앵커볼트에 작용하는 하중은 일정하다고 가정하고, 하중 재하각을 고려하여 앵커볼트에 작용하는 횡방향 하중을 산정하였다. 그래서 앵커볼트 하나당 작용하는 하중은 1.10kN~13.00kN으로 산정하여 해석에 적용하였다.

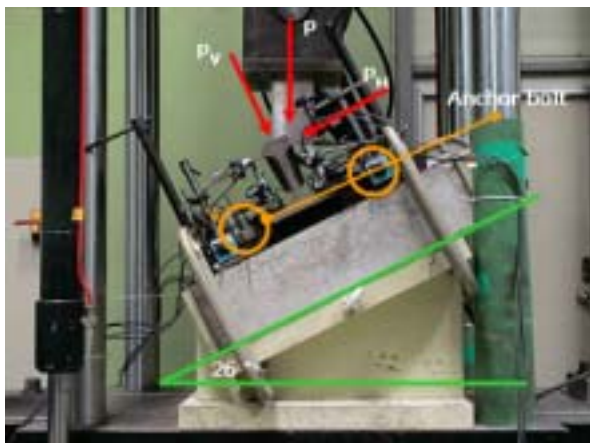


그림 3 레일체결장치 반복하중재하 시험

(3) 해석 및 해석결과

앵커볼트의 해석은 앵커볼트의 직경, 매립전의 유무, 초기gap, 매립전의 물성을 변수로 하여 해석을 수행하였다. 해석결과는 표 1과 같다.

표 1 해석결과

구분	직경	$P_{H(max)}$	$P_{H(max)}$	E_{bolt}	E_{insert}	insert	Gap _{initial}	σ_{bolt}	$D_{H(bolt)}$
	mm	kN	kN	N/mm ²	N/mm ²	O X	mm	N/mm ²	mm
①	22	13.00	1.10	209000	2700	O	0.250	399.020	0.267
②	22	13.00	1.10	209000	2700	O	0.000	242.000	0.217
③	24	13.00	1.10	209000	2700	O	0.750	793.800	0.068
④	24	13.00	1.10	209000	2700	O	0.000	166.400	0.682
⑤	24	13.00	1.10	209000	4480	O	0.000	233.000	0.069
⑥	25.5	13.00	1.10	209000	4480	O	0.000	194.900	0.058
⑦	27.5	13.00	1.10	209000	4480	O	0.000	140.000	0.043
⑧	25.5	13.00	1.10	209000	X	X	0.000	222.800	0.057
⑨	27.5	13.00	1.10	209000	X	X	0.000	143.100	0.032
⑩	28	13.00	1.10	209000	X	X	0.000	141.400	0.028
⑪	30	13.00	1.10	209000	X	X	0.000	122.200	0.018
⑫	25.5	13.00	1.10	209000	2700	O	0.250	587.170	0.045

①~④ 앵커볼트와 매립전의 초기 gap의 영향

: 앵커볼트 체결 시에 매립전과 앵커볼트 사이에 발생하는 초기 gap의 영향을 알아보기 위해 22mm 직경의 앵커볼트를 0.25mm의 gap이 있다고 가정하여 해석하고 gap이 없는 모델이 해석결과와 비교하였다. 또 24mm 직경의 앵커볼트에 0.75mm의 gap이 있는 모델과 gap이 없는 모델을 해석하여 비교하였다. 표 2에서와 같이 초기 gap에 크기와 유무에 따라 앵커볼트의 응력이 크게 증가하는 경향을 보여, 초기 gap이 횡방향 하중을 받는 앵커볼트에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

④~⑤ 매립전 탄성계수의 영향

: 우선 초기 gap이 없이 24mm의 직경을 갖는 앵커볼트에 2700N/mm²의 탄성계수를 갖는 매립전을 모델링하여 해석하고 매립전의 탄성계수를 4480N/mm²로 변화시켜 결과를 비교하였다. 표 1에서와 같이 앵커볼트의 응력은 166.4 MPa에서 233MPa로 증가하였다.

⑥~⑨ 매립전의 유무에 따른 영향

: 앵커볼트의 직경별 매립전의 유무에 따른 앵커볼트의 응력을 비교한 결과, 탄성계수의 영향과 마찬가지로 앵커볼트의 주변의 탄성계수가 커지면 앵커볼트의 응력이 커짐을 알 수 있다.

⑧~⑪ 앵커볼트 직경의 영향

: 앵커볼트의 직경에 따른 응력변화를 나타낸 것으로 앵커볼트의 직경이 커짐에 따라 앵커볼트의 응력이 감소하는 것을 알 수 있었다.

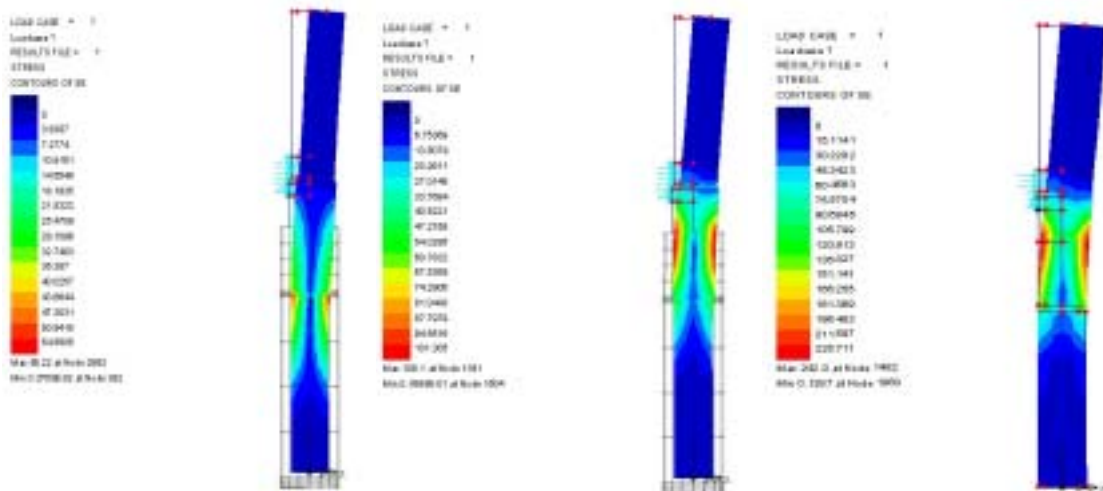


그림 4 앵커볼트의 해석결과(例)

3. 시험결과

매립전의 유무, 앵커볼트 직경 등에 따라 그림 3과 같이 체결장치의 반복하중재하 시험(EN 13146-4)을 수행하여 횡압을 받는 앵커볼트의 거동을 관찰하였다. 시험결과는 표 2와 같이 22mm 직경을 갖고, 매립전에 체결되는 앵커볼트를 실험한 결과 300만회의 반복하중을 견디지 못하고 도중에 파손되었고, 매립전에 체결되는 나사산의 형상을 바꾸고, 직경을 24mm로 키워 실험한 결과도 마찬가지로 도중에서 파손되었다. 이에 직경을 25.5mm로 바꾸고 실험한 결과도 도중에 파손되었다.

이후 직경을 30mm로 하고, 침목에 앵커볼트를 직접 매립하여 실험을 하였고, 30mm 직경의 앵커볼트는 300만회의 반복하중에도 파손되지 않았다.

표 2 실험결과

구분(표 3과 비교)	직경	insert	시험결과
	mm	O X	
①,②	22.0	O	≒ 35,000회 파단
③,④	24.0	O	≒ 1,000,000회 파단
⑥,⑧,⑫	25.5	O	≒ 1,800,000회 파단
⑪	30.0	X	3,000,000회 시험완료



그림 5 파단형상그림

4. 피로파괴 예측

앵커볼트의 재질인 SM45C에 대한 항복응력(σ_y)과 극한응력(σ_{ut}), N회에서의 피로한도(σ_e)를 통해 특정 평균응력에 대한 모든 강도와 모든 응력성분의 한계값을 나타내는 Smith 선도를 그리면 그림 6과 같이 앵커볼트에 발생하는 임의의 응력으로 N회 까지 파단되지 않는 피로강도를 가지는 최대 최소 응력($\sigma_{max}, \sigma_{min}$)을 구할 수 있다.

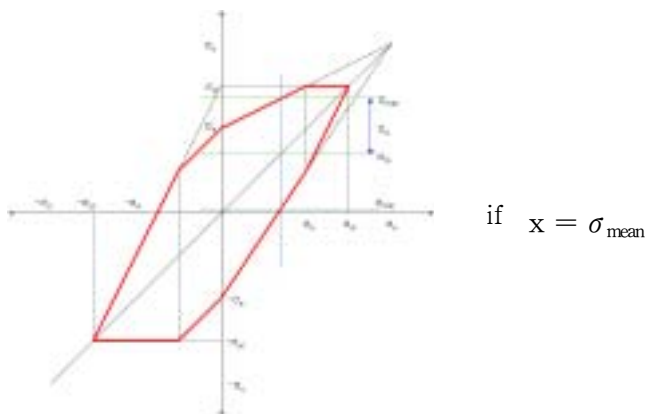


그림 6 Smith 선도

정확한 Smith 선도를 그리기 위해 SM45C 시편의 인장강도 시험을 수행하였다. 시험결과 항복응력(σ_y)

은 612.1MPa, 극한응력(σ_{ut})은 834.2MPa 로 KS D 3752에서 나타난 최소값보다 큰 응력을 나타냈다.



구분	P_{max}	$P_{(0.2\%)}$	D	A	σ_{ut}	σ_Y
	[kN]	[kN]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]
1	130.45	55.34	14	153.9	847.6	640.6
2	126.12	50.86	14	153.9	819.5	588.8
3	128.58	52.42	14	153.9	835.5	606.9
Ave	128.38	52.87	14	153.9	834.2	612.1

그림 7 SM45C 시편의 인장강도 시험

SM45C의 피로한도는 “기계구조용 탄소강과 기계구조용 합금강의 기계적 성질”을 참조하여 표 3과 같이 나타내었다.

표 3 SM45C의 피로한도

기 호	피로한도 $N=10^7$ MPa (Kgf/mm ²)		
	회전굽힘	양진동비틀림	양진동인장압축
SM45C	215.77~294.23(22~30)	117.69~205.96(12~21)	186.35~284.42(19~29)
SM45C _{합금철}	264.81~392.31(27~40)	137.31~215.77(14~22)	225.58~353.08(23~36)

그림 7과 표 3의 값으로 SM45C의 Smith 선도를 그리고, 반복하중시험 시 파괴된 앵커볼트의 구조해석결과를 Smith 선도에 표시하여 허용 최대진폭을 넘어서는지를 비교하면 그림 9, 10과 같다.

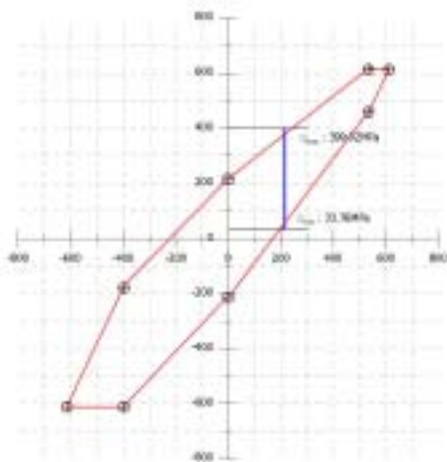


그림 9 SM45C 시편의 Smith 선도
(피로한도 $N=10^7$ 구조해석 ①번)

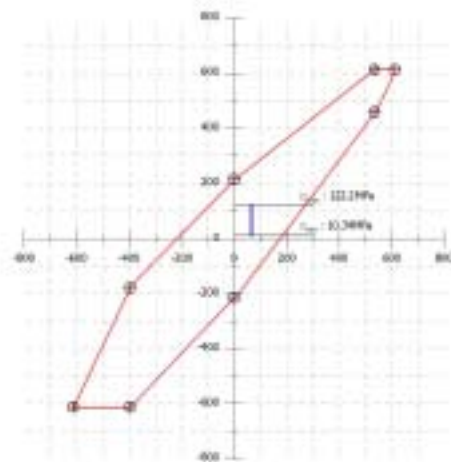


그림 10 SM45C 시편의 Smith 선도
(피로한도 $N=10^7$ 구조해석 ⑩번)

그림 9는 구조해석 ①번의 최대 최소응력을 나타낸 것으로 앵커볼트에 작용하는 응력이 $N=10^7$ 의 피로한도선도 밖에 표시되는 것을 알 수 있어 SM45C의 10^7 반복하중의 허용 값을 넘어 파괴된 것을 확인할 수 있다. 하지만 구조해석 ⑩번을 나타낸 그림 10에서는 앵커볼트의 σ_{mean} 값이 66.27MPa이고, 최대 최소응력(10.34~122.2MPa)이 허용범위(-132.40MPa~264.81MPa)내에 있어 10^7 반복하중에서는

안전할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 앵커볼트의 적절한 설계를 위해 앵커볼트에 발생하는 응력에 영향을 미치는 요소들을 정하고, 이를 고려하여 범용 유한요소프로그램으로 해석하였다. 그리고 체결장치의 반복하중재하시험에서 파단된 앵커볼트들의 직경, 초기gap 매립전특성 등을 해석결과와의 관계를 알아내고 실험 시 파단되었던 시편모델의 구조해석에서 계산된 발생응력을 Smith 선도에 적용하여 파단한도 내에 있는지를 확인하였다.

구조해석결과, 초기 gap에 크기와 유무에 따라 앵커볼트의 응력이 크게 증가하는 경향을 보여, 초기 gap이 횡방향 하중을 받는 앵커볼트에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 또한 앵커볼트 주변 모델들의 탄성계수의 영향으로 탄성계수가 증가함에 따라 앵커볼트의 응력이 커짐을 알 수 있었다. 앵커볼트의 직경이 커짐에 따라 앵커볼트의 응력이 감소하는 것을 알 수 있었다.

구조해석과 실험의 결과를 고려해 보면, 초기 gap을 고려하지 않은 앵커볼트들의 최대최소 발생응력은 Smith 선도에서 허용 범위 내에 있었으나 파손되었고, 이후 앵커볼트의 직경을 30mm로 증가시키고, 매립전을 없앤 후 앵커볼트를 침목에 직접 매립시킨 앵커볼트는 300만회의 반복하중에 파손되지 않았다. 이러한 결과는 앵커볼트의 직경을 30mm로 증가시키기도 하였지만 매립전을 없애고 침목에 직접 매립하여 초기 gap을 없앤 영향이 크다고 판단된다.

위의 결과로 매립전을 사용하지 않고 매립되는 앵커볼트는 앵커볼트의 형상, 직경, 물성을 고려하여 설계되어야 하며, 매립전이 사용이 되고 횡압을 받는 앵커볼트를 갖는 레일체결장치에서는 매립전과 앵커볼트의 초기 gap을 고려한 피로파괴에 대한 설계가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

1. 長藤敬晴, 변동응력하의 레일체결장치 내용연수 예측, RTRI report Vol. 5, No. 8, 1991
2. Kimmo Oostermeijer and Koen Ingels, Optimising ballastless track fir HSL-Zuid, 1999
3. 장동일, “구조공학에서의 파괴와 피로”, 동명사, 2000
3. CEN, Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 4 : Effect of repeated loading, 2002