

T형 교각의 탄성변형을 고려한 슬래브교의 유한요소 해석

Finite Element Analysis Reinforced Concrete Slab Bridge Considering Elastic deformations of Reinforced Concrete T-type Piers

이 성 철¹⁾ 윤 동 용²⁾
Lee, Sung-Chul Yoon, Dong-Yong

ABSTRACT

In practical design of girder bridges or reinforced concrete slab bridges with T-type piers, it is usually assumed that vertical movements of superstructures are completely restrained at the locations of bearings (shoes) on a cap beam of the pier. The resulting vertical reactions are applied to the bearing for the calculation of bending moments and shear forces in the cap beam. However, in reality, the overhang parts of the cap beam will deform under the dead load of superstructures and the live load so that it may act as an elastic foundation. Due to the settlement of the elastic foundation, the actual distribution of the reactions at the bearings along the cap beam may be different from that obtained under the assumption that the vertical movements are fixed at the bearings.

In the present study, investigated is the effects of elastic deformations of the T-type pier on the distribution of reactions at the bearings along the cap beam through 3-dimensional finite element analysis. Herein, for this purpose the whole structural system including the superstructure and piers as well is analyzed. It appears that the conventional practice which neglects the elastic deformations of the cap beam exhibits considerably different distributions of the reactions as compared with those obtained from the present finite element analysis. It is, therefore, recommended that in order to assess the reactions at bearings correctly, the whole structural system be analyzed using 3-dimensional finite element analysis.

Key words : cap beam, 3-D finite element analysis, elastic deformation of the piers, reinforced concrete slab bridges, shoes

1. 서론

일반적인 교량(橋梁)의 설계는 교각이나 교대 위에 설치된 교좌장치(shoes)에 의해서 상부 deck system이

1) 동국대학교 토목공학과 교수
2) 동국대학교 토목공학과 박사과정

상하 방향으로 고정지지 된 것으로 간주하여 사하중(자중 및 기타) 및 활하중(차량하중)을 직접 지지하는 교량 상부구조물을 설계한다. 그리고, 이 상부구조물의 설계시 고려된 하중에 의해서 교좌장치가 설치될 위치의 지점 부에 발생하는 반력을 계산하고, 이 반력을 이용하여 교각이나 교대를 설계하는 하중으로 삼는다. 또한 이 반력은 교좌장치를 설계하는 설계기준하중이 되기도 한다. 철근콘크리트 슬래브를 교량 바닥판으로 설치하는 대부분 형식의 교량 설계에 이러한 방법을 적용하는 것이 일반적이다. 특히, 본 연구에서 주로 다루게 될 T형 교각을 갖는 슬래브교에서도 교좌장치가 있는 위치를 고정지점으로 간주하는 방법을 대부분 사용하고 있다.

1.1 기존 설계 방법의 문제점

본 연구에서 주요 모델로 삼고 있는 슬래브교를 포함하는 일반적인 교량의 경우 교좌장치를 그림.1(b)와 같이 고정지점으로 간주하여 교량의 상부구조물을 설계하는 것에는 큰 문제점은 없을 것으로 보여진다. 그러나, 이와 같은 관용적인 방법에 의해서 교좌장치 및 교각 등의 하부구조물을 설계하는데 있어서 몇 가지 문제점이 있다고 판단된다. 특히, T형 교각 cap beam 의 overhang 부에서 휨모멘트나 전단력에 의한 변형으로 그림.1(c)와 같은 탄성 처짐이 발생하게 되며, 이러한 교각의 탄성변형의 영향으로 실제 교좌장치의 반력분포는 고정지점으로 보고 해석한 결과와는 다르게 된다. 이로 인해서 교각의 설계기준 전단력이나 휨모멘트가 상당히 달라질 수 있으며, 교각의 지나친 과대설계나 교좌장치의 과소설계를 유발할 수도 있다.

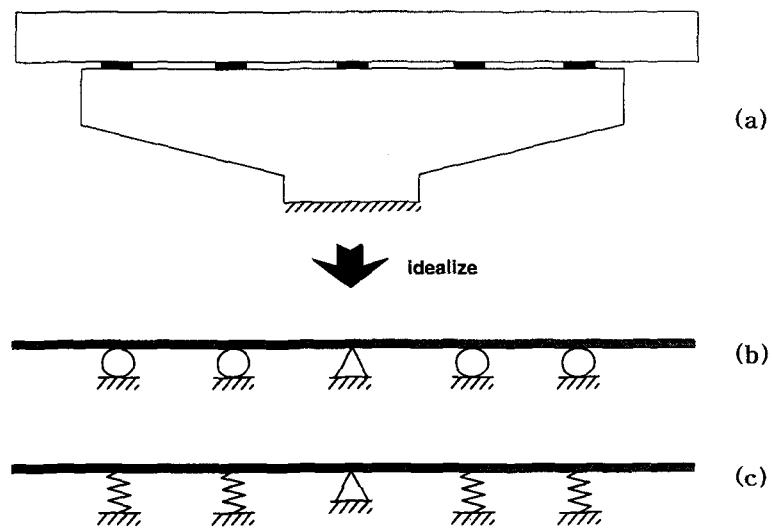


그림.1 지점의 고려 형태. (a)실제교각 및 교좌장치 (b)고정지점 (c)탄성받침

1.2 연구방향 및 방법

본 연구에서는 철근콘크리트의 T형 교각을 갖는 단순지간의 철근콘크리트 슬래브교 및 2경간 연속의 슬래브교를 대상으로 관용적인 방법과 슬래브와 교각을 동시에 고려한 3차원 유한요소해석을 통하여 교좌장치가 부

담하게 될 압축력과 코핑부의 설계기준력을 비교하고자 한다. 이러한 비교 연구를 통하여 기존의 설계방법에 대한 문제점을 파악하고, 교각이나 교대의 탄성변형과 슬래브 강성의 영향 등을 고려하는 정확한 설계가 가능한 구조해석 방법을 제시하고자 한다.

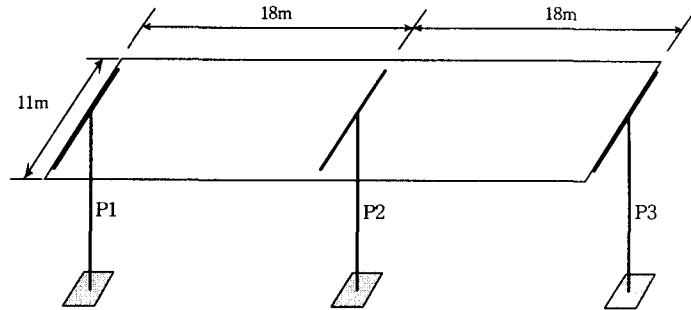


그림.2 2경간 연속 슬래브교

본 연구에서는 T형 교각을 2절점의 frame 요소로 구성하고, 슬래브는 4절

점의 plate/shell 요소로 구성하여 유한요소 해석을 수행한다. 이 해석에서 결정된 코핑부의 휨모멘트와 전단력을 설계기준 단면력으로 삼도록 하고, 교좌장치의 설계에서도 이 결과를 반영할 수 있도록 한다. 또한, 관용적인 유한요소 구조해석에서 교각의 수직부재와 수평부재가 만나는 연결부에 대한 실질적인 휨 및 전단 강성을 고려하지 못하고 있다는 점을 감안하여, 강성의 변화를 통해 문제점을 보완하는 방법을 제시하고자 한다.

본 연구에서 구조해석에 이용한 프로그램은 범용구조해석 프로그램인 SAP2000(Computers and Structures, Inc., 1998)을 이용하였다. SAP2000의 탄성해석결과에 대한 신뢰 정도는 이미 잘 알려져 있으므로 본문에서는 별도의 신뢰성 검증에 대한 언급은 하지 않았다.

2. 본론

2.1 설계 모델

본 연구에서는 T형 교각의 단순 슬래브교와 2경간 연속 슬래브교를 해석 대상으로 설정하였으며, 상부구조 및 교각의 형상과 치수는 위의 그림.2와 그림.3과 같다.

- 지간

단순교 : 18m

2경간 연속교 : $18 \times 2 = 36\text{m}$

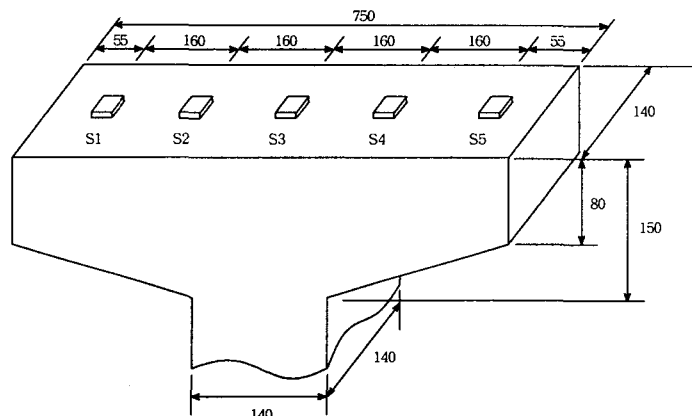


그림.3 T형 교각 형상 및 치수 (cm)

- 콘크리트 $f_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$, $E = 232,400 \text{ kgf/cm}^2$, $\nu = 0.18$
- 슬래브 형상 및 치수 : 그림.4 참조
- 교각
 - 수평부재 - $140 \text{ cm} \times (80 \sim 150 \text{ cm ; tapered beam})$
 - 수직부재 - $140 \text{ cm} \times 140 \text{ cm}$ (직사각형 기둥)
- 하중 : 슬래브 및 교각의 자중만을 고려(본 연구에서는 활하중의 영향은 제외).

아래 그림.4에서 볼 수 있듯이 슬래브는 4-node shell 요소를 이용하여 모델링을 하였으며, 교각은 frame 요소를 이용하여 모델링을 하였다. 그리고, 교좌장치는 길이가 짧은 frame 요소를 이용하였다. 상부 슬래브에서 전달되는 하중은 교좌장치를 통하여 교각에 전달되는데, 본 연구에서는 이 교좌장치를 frame 요소로 모델링하여 하중전달의 역할을 수행하도록 하였다. 그리고, 이때 교좌장치를 모델링한 frame 요소에 발생하는 압축력을 이용하여 교좌장치의 설계에 적용하면 될 것으로 판단된다. 슬래브와 교각에 있는 철근의 강성은 유한요소해석에서는 제외시켰다.

2.2 T형 교각 모델링

일반적으로 T형 교각의 유한요소 모델링은 frame 요소를 이용하여 설계 전단력과 휨모멘트를 결정하게 된다. 그리고, 이렇게 결정된 전단력과 휨모멘트를 기준으로 깊은 보(deep beam)인지 아닌지를 판단하여 시방서 규정을 적용하여 설계를 하게 된다. 그러나, 교각을 frame 요소로 모델링하는 과정에서 다음과 같은 문제점이

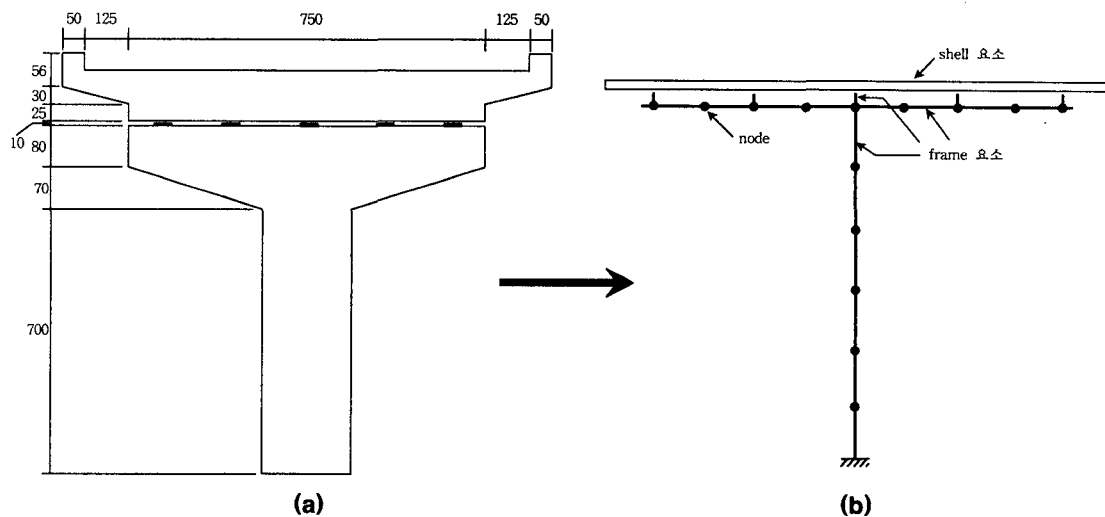


그림.4 교각 및 슬래브의 유한요소 모델 (a) 실제 교각 및 슬래브 (b) 유한요소 모델링

있어 유한요소 해석시 주의해야 한다. 교각의 코핑 또는 내민보와 기둥이 접치는 부분 즉, 우측의 그림.5 에서 stiff① 요소와 stiff② 요소는 A부분에서 서로의 단면이 겹치게 된다. 그러나, 이 A 단면에서는 휨이나 전단에 의한 변형은 거의 없을 것이며, 경계조건에서도 고정지지에 가깝다고 할 수 있다. 그러므로, frame 요소로 교각을 모델링하는 경우에는 수직부재와 수평부재가 접치는 부분에 대한 특별한 고려를 해야 할 것으로 보여진다. 이를 위해서 본 연구에서는 휨 강성(EI) 및 전단 강성(GA)을 확대시켜줌으로서 단면이 겹치는 부분의 영향을 고려하도록 하였다. stiff① 부재와 stiff② 부재의 휨 강성 및 전단강성을 원래 부재가 갖고 있는 강성의 100배를 확대시켰는데 이는 휨이나 전단에 의한 변형은 거의 없을 것으로 판단했기 때문이다. 또한, 본래의 강성 그대로 모델링한 경우와 강성을 확대한 경우가 어떻게 다른 거동을 하는지 함께 비교 분석하였다.

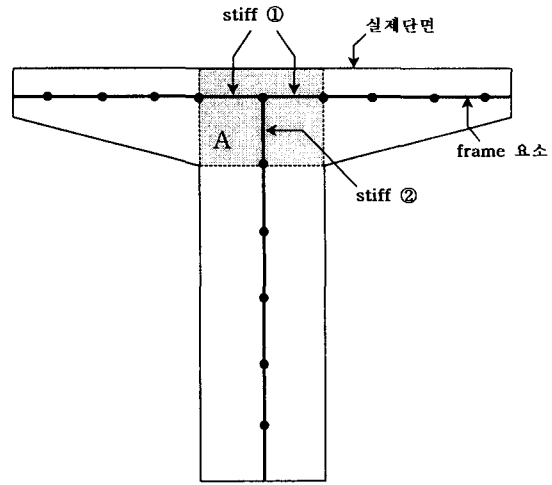


그림.5 교각의 유한요소 모델

2.3 슬래브와 교각의 연결

상부구조물인 슬래브와 하부구조물인 T형 교각을 동시에 모델링하여 유한요소 해석을 수행하는 과정에서 슬래브와 교좌장치와 교각이 접하는 부분을 다음 그림.6과 같이 모델링 하였다. 특히 이 부분에서 실제로는 교좌장치 위에 슬래브가 단순히 올려져 있는 형태이므로, 슬래브에서 교좌장치로 모멘트와 수평전단력의 전달은

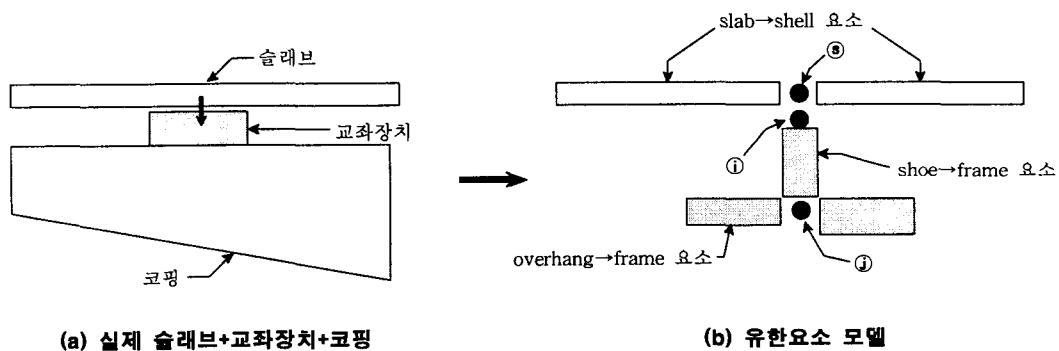


그림.6 슬래브와 교좌장치의 유한요소 모델

없으며 오로지 축방향력의 전달만이 있게 된다. 그래서 실제(그림.6a) 슬래브와 교좌장치, 코핑부의 shell과 frame을 이용한 유한요소 모델은 그림.6b 와 같이 된다.

그림.6b에서 절점 ⑤와 절점 ①은 같은 좌표에서 만나게 되지만, 절점 ⑤에서 절점 ①로의 모멘트와 전단력의 전달은 없어야 하며 단지 축방향력만이 전달되어야 한다. 그래서 본 연구에서는 ⑤와 ① 두 절점의 전단력과 모멘트의 전달을 없게 하였고, 축방향력의 전달만 가능하도록 요소의 제약조건을 설정하였다. 코핑부의 변단면은 좌우 높이 차이가 있어서 각 frame 요소의 양쪽 높이의 평균값을 이용하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 지점반력의 비교

앞에서 언급한 바와 같이 슬래브 전체를 모델링하고 교좌장치에 의해 처짐에 대한 고정지점으로 해석하는 경우[고정지점]와, 슬래브와 교각을 동시에 모델링하여 해석하는 경우로 나누어 연구를 수행하였다. 슬래브와 교각을 동시에 해석하는 모델은 2.2절에서 언급한 것처럼 수평부재와 수직부재가 접치는 부분에 대한 휨과 전단강성을 100배로 확대한 경우[탄성교각-강성확대]와 본래 강성 그대로 유지하면서 해석을 수행한 경우[탄성교각-강성유지]로 나누었다.

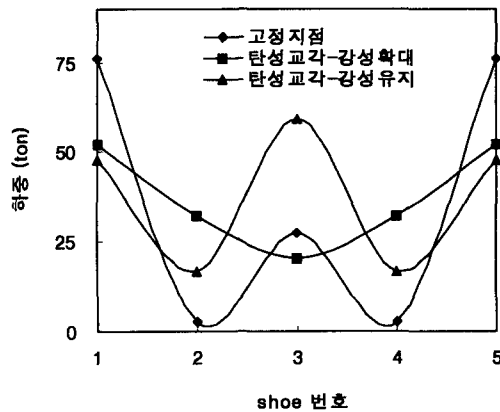


그림.7 단순교 지점부 반력 비교

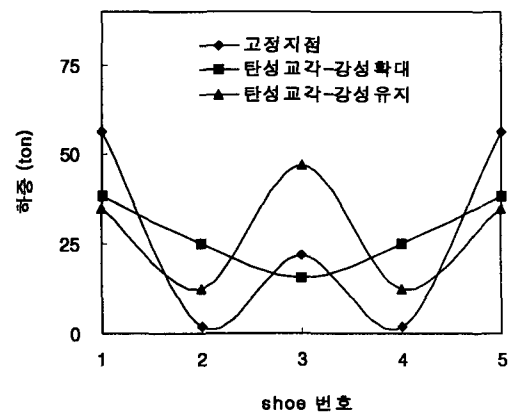


그림.8 2경간 연속교 외측 교각 교좌장치의 반력

그림.7은 단순 슬래브의 지점부 반력을 비교한 것이고, 그림.8은 2경간 연속 슬래브에서 외측 교각의 지점부 반력을 비교한 것이다. 단순교의 지점부나 연속교 외측 교각의 교좌장치의 위치에서 반력 분포는 고정지점으로 해석한 경우와 실제 교각을 포함하여 해석한 경우가 전혀 다른 결과를 보이고 있는데, 교좌장치의 위치에 따라

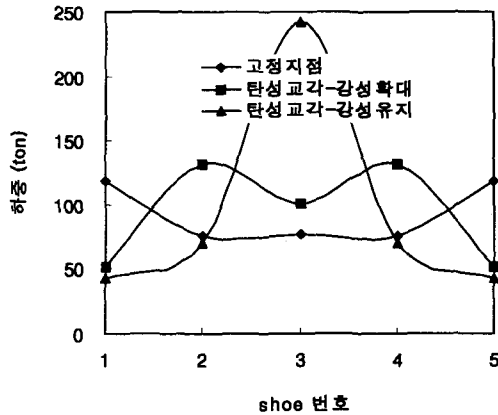


그림.9 2경간 연속교 내측 교각 교좌장치의 반력

양 지점부에 매우 큰 반력이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 교각 코핑부의 탄성처짐이 상당히 발생하여 슬래브 하중의 대부분이 중앙의 지점부로 집중되었기 때문으로 분석된다. 따라서, 앞선 2.2절에서 언급한 것처럼 frame 요소로 교각을 모델링하는 경우는 수평부재와 수직부재가 겹쳐지는 부분의 강성을 확대시키는 것이 타당한 것으로 판단된다.

3.2 최대모멘트 및 최대전단력의 비교

지점에 발생하는 반력 R1~R5는 교좌장치 설계의 직접적인 하중이 되는 것은 물론이고, 교각의 휨과 전단 설계에 하중으로 작용한다. 이러한 지점부 반력은 교각에 집중 하중으로 작용하게 되며, 외측과 내측 지점부의 하중 크기에 따라서 모멘트 및 전단력에도 상당한 영향을 미치게 된다. 각각의 해석방법에 따라 그림.10과 같이 a-a의 위험단면에서 모멘트와 전단력을 비교하였다.

그림.11은 T형 교각의 a-a의 위험단면에서 해석방법에 따른 최대 휨모멘트를 비교한 것이고, 그림.12는 같은 단면에서 해석방법에 따른 최대 전단력을 비교한 것이다. 고정지점으로 해석하는 것이 가장 큰 휨모멘트를 보이고 있으나, 전단력의 경우는 강성을 확대한 탄성교각으로 해석할 때가 큰 경우도 있다. 그리고, 탄성교각을 포함한 구조해석에서 교각의 강성을 유지한 경우가 가장 작은 전단력과 모멘트를 보인다.

서는 고정지점으로 해석한 경우보다 큰 반력과 작은 반력이 나타나고 있음을 알 수 있다.

좌측의 그림.9는 2경간 연속교의 중앙(내측) 교각에 발생하는 지점부 반력을 비교한 것이다. 고정지점으로 해석한 경우는 반력의 분포형태가 외측 교각의 반력분포와 비슷한 형태이나, 교각을 포함한 해석에서 앞의 그림.7이나 그림.8의 반력 분포와는 반대의 양상을 보이고 있다. 단순보의 경우에서 2번과 4번 지점에는 비교적 작은 반력이 발생하였으나, 연속교의 경우에는 오히려 2번과 4번 지점에서 최대 반력이 발생하고 있다.

그리고, 교각의 강성을 그대로 유지한 경우의 중

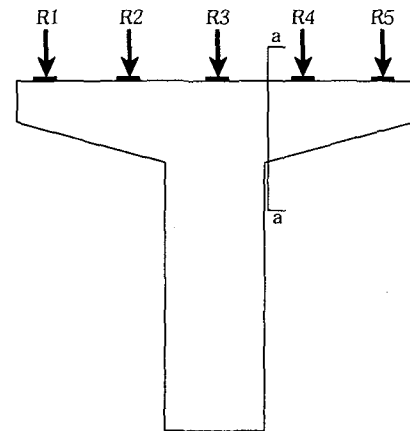


그림.10 전단력 및 휨모멘트 검토

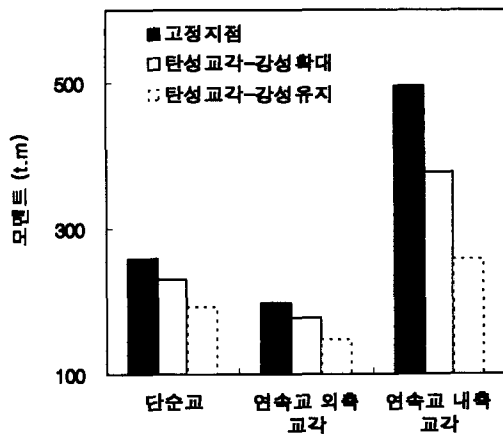


그림.11 교각부 위험단면 최대 휨모멘트

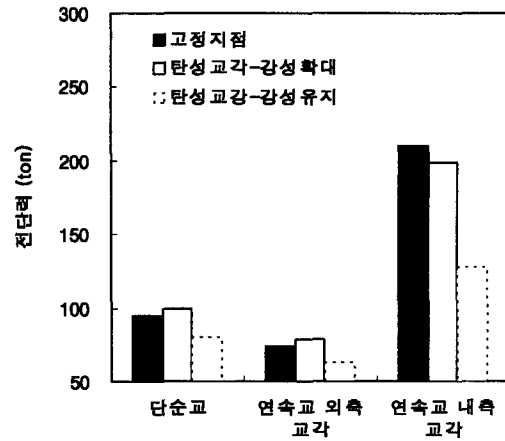


그림.12 교각부 위험단면 최대 전단력

4. 결론

일반적으로 T형 교각을 갖는 철근콘크리트 슬래브교 설계시 교좌장치가 있는 위치에서 수직방향의 변위가 구속된 것으로 간주하고 상부슬래브의 구조해석을 수행하며, 이 때 계산되는 수직반력을 이용하여 교각을 설계한다.

본 연구에서는 교각과 슬래브를 동시에 고려(활하중은 제외하고 자중만을 고려)한 유한요소 해석을 수행하였으며, 해석 결과로부터 교좌장치의 설계하중이나 교각의 설계단면력이 기존의 방법으로 결정되는 값과는 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다. 이러한 차이를 보이는 주요 원인은 교각의 탄성변형에 의한 것이라 판단되며, 결과적으로 교각 및 교좌장치의 부정확한 설계의 주요 원인이 될 수 있다. 또한 교각을 포함한 유한요소 해석에서도 교각을 frame 요소로 해석하는 경우, 교각의 수평부재와 수직부재가 겹치는 부분의 강성변화에 따라서 다른 결과를 보이고 있어 적절한 교각부의 강성확대를 통한 접합부의 영향을 반영하는 것이 바람직하다고 판단된다.

결론적으로, 교각 및 교좌장치 등의 하부구조물의 설계에 있어서 상부 및 하부구조물을 동시에 고려한 해석을 통하여 설계단면력을 결정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

5. 참고문헌(References)

1. 도로교 표준시방서, 건설교통부, 1996.
2. 콘크리트 표준시방서, 건설교통부, 1996.
3. SAP2000 Analysis Reference Vol 1, Vol 2, Vol 3, (1996), CSI, Inc..
4. Narendra Taly. (1998), Design of Modern Highway Bridges, McGraw-Hill.