코핑-주형 일체 교량의 접합부 형상에 따른 거동분석

Effect of Cap Geometry on Behavior of Steel I-girders to Inverted-T Bent Cap

이희영* · 조대연** · 정원석*** · 안주옥****

Lee, Hee Young · Cho, Dae Yeon · Chung, Won Seok · An, Zu Og

Abstract

Recently, a new steel girder bridge has been proposed to increase the space under the bridge and to improve aesthetic aspect of the urban area by connecting bent cap and steel girders. The core technology of the proposed bridge entails the introduction of prestressing force to steel girders and inverted-T bent cap by means of high-strength steel bars. This study investigates the effect of cap geometry on the behavior of the proposed bridge consisting of steel I-girders to inverted-t bent cap. Various geometries includes the change of width and height of bent cap. And this study is to ensure the structural safety of the proposed bridge system considering construction stages by means of 3-D finite element analysis. In each construction stage, stress states can be abruptly changed before each component of the proposed bridge works as a system. Variation of stress components for bent cap and girder were given with detail. It has been found that the height of inverted-T bent cap more sensitive factor to the behavior of the proposed bridge than width of bent cap. And analysis showed that sequential 3-D numerical analysis should be performed to ensure structural safety at each construction stage of the proposed bridge.

Key words : Coping, Continuous bridge, Inverted-T bent, Construction stage, Joint

요 지

일반적인 거더 교량은 거더 높이, 교량 받침, 교각 코핑부로 인해 측면 형상이 투박하여 형하 공간을 침해하고 시각적인 개방감을 저하시키며, 교량 받침 교체 등 유지관리에 불리한 측면이 있다. 본 연구에서는 교각 기둥 상단의 코핑부를 기 제작된 주형의 높이 내에 설치하여 주형과 일체가 될 수 있도록 PS강봉을 사용하여 강제 거더와 역T형 코핑부를 연결함과 동시에 프리스트레싱을 도입하여 강결시키는 시공방법을 제안한다. 제안교량의 구조적 특성 및 시공단계별 거동분석을 위해 2가지를 고려한다. 첫 번째는 코핑 주형 일체형 교량 코핑부의 기하학적 형상 변화에 따른 응력변화를 통하여 최적의 형상을 분석한다. 두 번째로 제안교량은 시공단계에서 각각 응력이 변화하여, 교량의 전체 구조시스템이 완전히 형성되지 않은 시공단계 중 코핑부의 안정성에 영향을 줄 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 상세유한요소해석을 통해 실제 코핑-주형 일체 교량 사례의 시공단계해석을 적용하여, 시공단계의 구조적 안정성을 분석하고자 한다.

핵심용어 : 코핑, 연속교, 역T형, 시공단계, 접합부

1. 서 론

최근 국내외적으로 교량 상부구조와 관련된 다양한 연구개발이 진행되고 있으며, 상부구조 형상 및 재료의 효율화, 복합재료의 활용 등을 통해 보다 안전하고 경제적이면서 주변 경관과 조화를 이루는 친환경적인 교량 건설이 이루어지고 있다. 기존의 국내 교량 또는 고가도로교는 교각 기둥 상부

에 코핑부를 형성하고, 코핑부 위에 주형이 설치되는 형식의 교량을 주로 채택하고 있다. 이와 같은 형식에서의 코핑부는 거대하고 투박하여 형하공간 확보에 불리하며, 하부교차로 이용자 및 조망자들의 시야를 차단하여 중압감을 갖게 한다.

건설선진국에서는 경관을 향상시키고 친화적 구조물로의 교량 건설을 위해 코핑을 매립하는 연구가 진행되고 있다 (Wassef and Davis, 2004). 선행연구로는 코핑부를 기 제작

*정회원. 경희대학교 공과대학 토목공학과 석사과정(E-mail: heeyoung0908@gmail.com)
Member. Department of Civil Engineering, Kyunghee University

**경희대학교 대학원 토목공학과 석사과정
Department of Civil Engineering, Kyunghee University

***정회원. 경희대학교 대학원 토목공학과 교수
Member. Professor, Department of Civil Engineering, Kyunghee University

****교신저자. 정회원. 경희대학교 대학원 토목공학과 교수(Tel: +82-31-201-2548, Fax: +82-031-202-8854, E-mail: zoan@khu.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Professor, Department of Civil Engineering, Kyunghee University

한 후 길이 방향의 프리텐션과 포스트텐션을 도입하는 구조적 연구가 진행되었고(Billington et al., 1999), 기초와 교각, 템플릿(Template), 역T형 코핑으로 이루어진 시스템이 제안되었다(Billington et al., 2001). 일본에서는 조립식 코핑부의 개발 연구를 진행하여 설계기법, 시공 가이드 라인, 세부사항을 제시하였다(Matsumoto et al., 2001). 또한 텍사스 주에서는 다양한 실험을 통한 역T형 코핑부의 균열 제어에 대하여 연구하였다(Zhu et al., 2005).

국내에서는 교각 코핑부 철근을 기 제작하여 선조립하는 방식이 개발되었고(Seo et al., 2002), 사전 제작된 코핑부와 PSC(Prestressed Concrete)교량의 기둥 연결방식에 대한 연구가 진행되었다(Kim et al., 2010).

본 연구에서는 코핑-주형 일체 교량 접합부의 코핑형상의 높이 비(b/B)와 폭의 비(h/H), 강봉의 수, 수직 보강재의 수를 매개변수로 3차원 유한요소 해석을 통한 부재별 응력을 산정하여 거동 변화를 분석하여 신설될 제안 교량의 형상을 결정하였고, 또한 결정된 표준단면에 대하여 코핑-주형 일체형 교량 사례의 시공단계에 따라 하중을 순차적으로 재하하고, 시공 중인 교량의 거동에 대하여 분석하여 시공단계의 구조적 안정성을 분석하였다.

2. 제안 교량의 개념 및 시공방법

2.1 제안교량의 구조적 특성

기존의 연속교 혹은 역T형 코핑부를 단순 거처하는 형식의 경우, 단순보처럼 거동하기 때문에 경간 중앙에서 모멘트의 단면력이 크게 발생된다. 따라서 교량의 단면이 증대되고 이에 따라 공사비의 증가, 유지관리비의 증가가 불가피하며 장경간 교량에도 매우 불리하다. 그러나 코핑-주형 일체형 교량은 지점부 교각에 단순 거처된 주형과 단차 코핑부 교각을 PS강봉(Prestress bar)으로 강결시키는 방법으로 코핑부가 교각 기둥의 상단에 횡방향으로 배치되어 기 제작된 주형의 높이 내에 설치되고, 강결로 일체화시키는 라멘식 구조를 형성하게 된다. 이는 교량의 거동이 단순보에서 연속보로 변하여 상부주형 정모멘트의 단면력이 저감된다. 연속교에서 지진시 교각 하단 모멘트가 고정단인 교각이 지진력을 부담하나, 강결구조는 지진력을 모든 교각이 부담하므로 지진력이 감소하여 단면력 감소에 효율적이다. 또한 강결 구조인 제안교량은 연속교와 달리 교량받침이 생략되어 유지관리 및 공사비 절감효과가 있다.

2.2 제안교량의 시공적 특성

역T형 형상의 코핑부와 주형이 연결되기 위해서 연결부재의 재료특성, 시공성 및 안정성이 고려되어야 하므로 연결부재를 먼저 선정할 필요가 있다. 본 제안 교량에서는 강봉을 이용하여 프리스트레싱을 도입하며, 상부에 강판과 볼트체결을 통한 접합부 강결을 택하였다.

제안교량은 기존의 코핑부 시공공법을 개선하는 시공방법을 제안한다. Fig. 1은 제안교량의 시공단계별 순서를 도시한 것이다. Fig. 1(a)와 같이 역T형 형상의 코핑부와 하부구조인

Fig. 1. Construction procedures of proposed bridge

기둥 및 기초를 시공 후 Fig. 1(b)와 같이 공장에서 기 제작된 강재 주형을 단차에 거처한다. 거처된 강재 주형을 단차 코핑부에 매립된 고정 앵커로 임시 고정 후 강재 주형 전면판을 고강도 모르타르로 충전하여 1차 결합한다. 이후 Fig. 1(c)와 같이 강재 주형과 코핑부를 PS강봉으로 2차 결합 후, Fig. 1(d)와 같이 코핑부 상단에 강판을 연결하여 볼트를 체결한다. Fig. 1(e)와 같이 상부 슬래브 타설 및 포장을 통해 코핑과 주형을 일체화 한 후, 프리스트레싱을 도입하여 시공은 마무리된다.

제안된 시공공법은 슬래브 하중에 의한 부모멘트를 코핑부 상단의 연결된 강판이 부담하고, 슬래브 경화 후, 강봉 긴장력을 도입하여 2차 고정하중 및 활하중은 강봉과 상부 강판이 서로 부담하도록 구성하였다. 슬래브 경화 후, 강봉 긴장력 도입으로 부모멘트부 상단 슬래브에 직접 압축력을 작용 시킴으로 부모멘트의 크기를 합리적으로 결정할 수 있다.

2.3 제안교량의 미관적 장점

종래의 교량은 콘크리트 바닥판 아래로 강재 주형과 콘크리트 코핑부가 순차적으로 존재하여 형하공간이 협소하다. 제안 교량의 시공은 교축방향에서 교각의 코핑부를 중심으로 양쪽의 주형이 연속되는 지점부 구조를 형성하기 위해 주형의 아래쪽으로 돌출시켰던 코핑부를 주형의 높이 내에 위치 시킴으로서 교량의 형고가 낮아지므로 형하공간 확보에 유리하다. 이는 고가도로의 종단 경사를 완화하거나 교량 연장을 짧게 하여 건설공사비의 예산을 절감할 수 있으며, 차량의 건축한계 확보가 용이하여 차로수 확보로 교차로 내 교통소통이 원활하도록 한다. 또한 기존의 투박한 모습을 드러내었던 코핑부가 주형의 높이 내에 위치하여 종래의 교량보다 시각적으로 개방감을 줄 수 있을 뿐만 아니라, 미관적으로 우수하여 교량 자체의 미관 및 도시경관의 향상을 유도할 수 있다.

3. 유한요소 해석모델

본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 코핑 연결부의 상세 해석을 위하여 3차원 유한요소해석 모델을 구성하고 수치해석을 통하여 제안 교량 접합부의 기하학적 형상 변화에 따른 거동변화를 분석하였다. 또한 부재별 응력을 산정하여 허용응력과 비교 분석하였다.

유한요소 해석은 총 2단계로 구분된다. 1단계 해석은 제안 교량을 전체 구조계 해석하여 교량의 단면력을 산정하였고, 2단계 해석은 제안교량의 접합부에 1단계해석에서 산정된 단면력을 하중으로 재하하여 상세해석을 수행하였다.

1단계는 단면력을 산정하기 위하여 상용프로그램인 MIDAS Civil(2012)를 사용하여 교량 전체 구조계를 해석하였다. 본 연구에서 고려한 경간 구성은 교량 하부공간에 제약이 있는 도심고가차도로교의 적용을 고려하여 전 교량의 경간장도로 40 m, 65 m, 40 m의 3연속 경간을 고려하였다. Fig. 2는 제안 교량에 재하되는 하중 및 시공성을 고려한 치수를 산정하여 나타낸 코핑-주형 접합부의 표준 단면도이다. 코핑-주형 접합부의 표준단면은 높이 비(h/H)와 폭의 비(b/B)가 0.5인 기하학적 형상의 역 T형 코핑부이며, 강봉의 수는 2열로 3단, 수직보강의 수는 2개를 기준으로 가정하였다. 모델에 재하된 하중은 DB-24 및 DL-24이다.

2단계는 제안교량의 접합부 상세해석에 다양한 기능과 유한요소의 선택이 가능한 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(2007)를 사용하였다. 코핑부를 중심으로 좌·우 10 m 위치의 지점까지 강재 주형을 모델링 하였으며 강재 주형은 3차원 Shell(S4R)요소를 사용하였고, 코핑부는 3차원 Solid(C3D8R) 요소를 사용하여 모델링 하였다. 강봉과 그 주변을 제외한 Shell요소와 Solid요소는 모두 사각요소로 처리하였으며, 요소의 폭/높이의 비는 1:1에 최대한 가깝게 하며, 최대 1:1.5를 넘지 않도록 하여 요소의 기하학적 형상에 의한 모델링 오류를 최소화하도록 구성하였다.

주형의 수평 보강재는 코핑부로부터 1.25 m 및 2 m에 Shell요소로 모델링 하였다. 강재 주형 양 끝의 지점조건은 자유단으로 하였으며, 코핑부의 지점조건은 고정단으로 하였다. 하중은 전체 구조계 해석 모델의 지점부 좌·우 10 m 위치의 단면력을 상세해석 모델의 외력으로 가하며, 상세해석모

Fig. 2. Layout of proposed bridge joint

Fig. 3. Detailed 3-D modeling of proposed bridge joint

델의 동일 위치가 되는 지점의 웨브(Web)의 상단 및 하단에 나누어 재하 하였다. Fig. 3은 앞서 설명한 표준 단면 모델의 3차원 유한요소해석 모델링의 완성된 모습과 지점조건을 나타낸다.

4. 매개변수 해석결과

본 연구에서는 코핑부 연결부의 기하학적 형상 변화, 강봉수의 변화, 수직 보강재 수의 변화 등 총 3가지의 매개변수 연구를 수행하여 동일 위치에서 최대 주응력 및 전단응력을 비교 분석하였다.

첫 번째 매개변수 연구는 코핑부의 최적화된 단면과 코핑부의 기하학적 형상의 변화에 따른 응력분포를 분석하기 위하여 실시되었다. 고려대상 기하학적 형상의 매개변수는 Fig. 4에 제시한 높이 비(h/H)와 폭의 비(b/B)이다. 또, 강봉 수와 수직보강재의 수는 표준 단면과 동일한 조건으로 고정하고 h/H 와 b/B 의 비를 각각 0.4, 0.5, 0.6으로 변화를 주어 표준 단면을 포함한 총 9종류의 단면에 대하여 해석을 수행하여 이에 따른 응력분포 응력의 변화를 비교하였다.

Fig. 5는 폭의 비가 동일할 때, 높이 비의 변화에 따른 코핑부 및 강재 주형부의 응력 변이를 나타낸 그래프이다. 코핑부에서의 최대 주응력, 최대 전단응력은 각각 0.62 MPa, -2.67 MPa로 폭의 비가 0.6이고, 높이 비가 0.4인 모델에서 나타났으며, 강재 주형부에서의 최대 주응력, 최대 전단응력은 각각 98.59 MPa, -21.78 MPa로 폭의 비가 0.4이고 높이 비가 0.6인 모델에서 나타났다. 또한 폭의 비를 고정하고 높이 비를 변화시킬 경우, 높이 비가 커질수록 코핑부에서의 응력은 증가하는 반면, 강재 주형부에서의 응력은 감소하는

Fig. 4. Geometric parameter for bent cap

(a) Maximum principal stress of bent cap

(b) Maximum principal stress of girder

(c) Maximum Shear stress of bent cap

(d) Maximum Shear stress of girder

Fig. 5. Stress changes of bent cap and girder on the change of geometric shape

경향을 보인다. 이는 코핑부와 주형부의 단면적 증감이 서로 상대적이기 때문에 제안교량 접합부에 있어 코핑부의 높이비가 접합부 응력변화의 주요한 요인임을 알 수 있다.

두 번째로는 프리스트레싱이 가해지는 강봉의 수가 코핑부 및 강재 주형부의 응력분포에 미치는 영향을 분석하였다. 코핑부의 형상은 높이 비와 폭의 비가 각각 0.5인 모델을 기준으로 하며, Fig. 6과 같이 강봉수를 웹(Web)을 중심으로

(a) First layer (b) Second layer (c) Third layer (d) Fourth layer

Fig. 6. Layout of steel bar for parametric study

(a) Maximum principal stress of bent cap

(b) Maximum principal stress of girder

(c) Maximum Shear stress of bent cap

(d) Maximum Shear stress of girder

Fig. 7. Stress changes of bent cap and girder on the change of number of steel bar

Fig. 8. Layout of vertical stiffener for parametric study

1단, 2단, 3단, 4단으로 변화하여 강봉 수에 따른 각 부재의 응력분포 및 최대응력의 변화를 비교하였다. 여기서 강봉의 총 단면적 및 가해지는 프리스트레싱의 크기는 각각 동일하게 하여 해석을 진행하였다.

Fig. 7은 강봉의 수가 변화에 따른 코핑부 및 강재 주형부의 응력 변화를 나타낸다. 코핑부에서의 최대 주응력, 최대 전단응력은 각각 1.66 MPa, 1.44 MPa로 강봉이 4단으로 배치된 모델에서 나타났으며, 강재 주형부에서의 최대 주응력, 최대 전단응력은 34.05 MPa, -25.83 MPa로 강봉이 1단으로 배치된 모델에서 나타났다. 강봉의 수가 증가할수록 코핑부의 응력은 프리스트레싱 도입시 코핑부 상부에 전체적인 응력집중현상으로 증가한다. 반면 강재의 응력은 강판 전체에 각 강봉의 응력이 분산되어 감소하는 경향을 알 수 있다.

세 번째로 요철부에 보강이 되는 수직보강재 수의 변화에 따른 응력변화를 분석하였다. 표준 단면과 동일한 조건하에 수직보강재의 수는 2개, 3개, 4개로 선정하였다. 수직보강재의 두께는 2개의 수직보강재 총 두께의 합을 기준으로 수직보강재 수에 관계없이 모든 모델이 동일한 두께를 유지하였다. Fig. 8은 수직보강재 수의 변화에 따른 단면을 나타낸다.

Fig. 9는 수직보강재 수의 변화에 따른 코핑부 및 강재 주형부의 응력 변이를 나타낸 그래프이다. 코핑부에서의 최대 주응력, 최대 전단응력은 각각 1.36 MPa, 1.32 MPa로 수직보강재가 2개만 배치된 모델에서 나타났으며, 마찬가지로 강재 주형부에서의 최대 주응력, 최대 전단응력은 각각 86.88 MPa, -20.95 MPa로 수직보강재가 2개만 배치된 모델에서 나타났다. 수직보강재의 수가 증가할수록 각각의 수직보강재가 코핑부와 강재의 응력을 분담하여 응력이 감소하는 것을 알 수 있다.

3가지의 기하학적 변화에 대한 응력검토 결과, 코핑부 혹은 강재 주형부 한쪽으로 하중 부담이 커지는 것보다 하중이 고르게 분배되는 경우가 효율적이다. 따라서 본 연구에서 고려한 매개변수의 구간 내에서는 높이 비와 폭의 비가 각각 0.5인 단면과 강봉은 3단으로 배열하며, 수직보강재는 2개가 적합한 것으로 분석된다.

제안교량의 구조안정성을 검토하기 위해서는 부재별 허용응력 검토가 필요하다. 이를 위해서 도로교 설계기준(2010)에서 제시하는 각 부재별 허용응력을 기준으로 산정된 응력과 비교검토를 실시하였다. 강재의 허용응력은 도로교 설계기

(a) Maximum principal stress of bent cap

(b) Maximum principal stress of girder

(c) Maximum Shear stress of bent cap

(d) Maximum Shear stress of girder

Fig. 9. Stress changes of bent cap and girder on the change of number of vertical stiffener

준에서 제시한 허용축방향인장응력 210 MPa이고 콘크리트의 허용압축강도(f_{ca})는 콘크리트설계강도(f_{ck})의 0.4배이다(도로교 설계기준, 2010).

제안교량의 주요 접합부의 매개변수 별 허용응력을 분석한 결과, 모든 콘크리트 코핑부의 응력 및 강재 주형부의 응력은 도로교 설계기준(2010)에서 제시한 허용응력 이내 값으로 안전한 것으로 분석된다.

5. 시공단계별 해석결과

교량의 전체 구조시스템이 완전히 형성되지 않은 교량시공 시에는 시공단계마다 응력이 변화하여 코핑부 안정성에 영향을 줄 수 있다. 시공단계 별 연결부 상세구조해석에 사용된 모델링의 세부사항은 앞 절에서 언급한 접합부 상세해석모델링과 동일하며, 부재별 응력검토는 도로교 설계기준(2010)과 각 부재의 주응력을 비교 검토하였다. 시공단계 별 해석은 크게 3가지로 구분된다. Table 1은 시공단계 해석 순서도를 나타낸다. 1단계는 코핑부에 강재 주형이 거치되었을 때의 강재의 자중만이 고려된 시공상태로 강재 주형의 상부와 하부의 최대주응력을 검토하였고, 2단계는 코핑부에 강재 주형이 결합되고 슬래브가 합성되기 전 슬래브의 자중을 코핑과 강재 주형이 분담하는 시공상태로 거치된 콘크리트의 상부와 강재 주형의 최대주응력을 검토하였다. 3단계는 코핑부의 슬래브가 합성된 후 프리스트레싱을 통하여 2차 고정하중, 지점침하, 활하중을 코핑부 상단의 강판과 강봉이 분담하는 시공상태로 콘크리트와 강재 주형, 강판의 최대주응력을 검토하였다. 시공단계 별 해석상에 사용된 작용하중은 전체계 해석의 각 단계별의 단면력을 작용하중으로 재하하였다. 콘크리트 검토부는 코핑부의 정중상부 상위이며, 강재 주형부는 웨브의 상·하연의 두 부분을 검토하였으며, 강판의 검토부는 강판

Table 1. The detailed model considering construction stages

Stage	Model	Consider load
Simply supported girder		Self-weight of girder
Before slab composite		Self-weight of slab
End of construction		After composite, Secondary dead load, Support settlement, Live load

Table 2. Maximum principal stress at each construction stages

Stage	Load	Concrete (MPa)	Girder (MPa)		Steel plate (MPa)
			Top	Bottom	End
1	Self-weight of girder		0.41	0.01	
2	Self-weight of slab	0.47	56.91	20.74	46.55
3	Secondary dead load	0.61	34.37	10.60	5.23
	Support settlement	0.62	3.36	8.74	1.14
	After composite	0.64	35.68	9.84	5.50
	Seismic load	0.62	13.20	51.14	0.17
	Live-load	0.68	7.37	34.51	-0.02
Total		3.64	151.30	135.58	58.57

의 끝단이다.

Table 2는 작용하중 재하시 응력분포의 시공단계 해석결과를 나타낸 것이다. 1단계에서 강재 주형에 발생하는 최대 주응력은 0.41 MPa이다. 또한 2단계에서 발생하는 코핑부의 최대 주응력은 0.47 MPa이며 강재 주형 및 강판의 최대 주응력은 각각 56.91 MPa과 46.55 MPa이며, 마지막으로 3단계에서 발생하는 코핑부의 최대 주응력은 0.68 MPa이며, 강재 주형 및 강판의 최대 주응력은 51.14 MPa과 5.50 MPa이다. 제안교량의 총 누적된 최대 주응력을 콘크리트의 허용휨압축응력과 강재의 허용휨인장응력을 기준으로 비교해 본 결과, 콘크리트의 허용휨압축응력(10.8 MPa)과 강재의 허용휨인장응력(210 MPa) 이내로 본 제안교량은 시공 중에도 안전한 것으로 분석된다.

6. 결론 및 요약

본 연구에서는 제안교량을 대상으로, 시공가능한 범위 내에서 코핑부 기하학적 형상, 강봉 수, 수직보강재 수를 변화시키며 최적의 형상을 분석하였다. 또한 최적 형상의 교량을 토대로 시공안정성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 코핑부의 기하학적 형상 매개변수의 해석에서 코핑부와 주형부 단면적의 증감은 서로 상대적이기 때문에 폭의 비가 동일한 경우에 높이비가 증가할수록 코핑부의 응력은 증가하며, 강재 주형부의 응력은 감소하는 경향이 나타났다.
- 2) 강봉 수 매개변수의 해석에서 강봉의 수가 증가할수록 코핑부의 응력은 프리스트레싱으로 상부에 압축응력의 집중현상이 생겨 증가하는 반면, 강재 주형부의 응력은 각 강봉으로 응력이 분산되어 감소하는 경향을 나타났다.
- 3) 수직보강재 수의 매개변수 해석에서는 수직보강재의 수가 증가할수록 코핑부와 강재 주형부 응력을 각각의 수직보강재가 분담하여 코핑부와 강재 주형부의 응력이 모두 감소하는 것으로 나타났다.
- 4) 집중적으로 하중 부담이 커지는 것보다 코핑부와 강재 주형부로 하중이 고르게 분배되는 경우가 합리적인 것으로 판단되며, 제안교량의 시공 가능한 범위 내에서는 높이 비와 폭의 비가 각각 0.5인 단면과 강봉은 3단으로 배열하며 수직보강재는 2개가 적합한 것으로 분석된다.
- 5) 제안교량에 대한 수치해석에서 기하학적 형상, 강봉 수,

수직보강재의 변화에 따른 매개변수 경우에서 모두 도로 교 설계기준의 허용 응력 검토기준 이내로 안전한 것으로 나타났다.

- 6) 제안된 단면의 시공단계별 해석에서는 콘크리트는 허용 휨압축응력 이내로 해석되었고, 강재 주형 및 강관 또한 강재의 허용휨인장응력 이내로 검토되어 제안된 교량형식은 시공단계 중 안전한 것으로 분석된다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부의 건설기술혁신 사업인 “코핑부의 주형 매립형 거더교량 실용화 연구” (과제번호 : 11CCTI-C061509-01)의 연구 성과로 이에 감사합니다.

References

ABAQUS, Inc (2007) ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.7.1. Pawtucket, R.I., USA.

Billington, S.L., Barnes, R.W. and Breen, J.E. (1999) A precast segmental substructure system for Standard Highway bridges, *PCI Journal*, Vol. 44, No. 4, pp.56-73.

Billington, S.L., Barnes, R.W. and Breen, J.E. (2001) Alternate Substructure System for Standard Highway Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 87-94.

Kim, T.H., Park, S.J. and Kim, Y.J. (2010) Precast concrete copings for precast segmental PSC bridge columns 1. Development and verification of system, *Korean Society of civil Engineers*, Vol. 30, No. 5, pp. 463-473.

Matsumoto, E.E., Waggoner, M.C. Sumen, G., Kreger, M.E. Wood, S.L. and Breen, J.E. (2001) Development of a precast bent cap system, Technical Report Documentation page, No. FHWA/TX-0-1748-2.

MIDAS Civil (2012) MIDAS IT., Korea.

Seo, Y.H., Kim, Y.H., Cho, K.Y. and Kim, D.H. (2002) Introduction of preformed bar arrangement pier coping, *Korean Society of civil Engineers*, Vol. 50, No. 11, pp. 14-18.

Standard Specifications for Highway Bridges (2012) Korea Road & Transportation Association.

Wassef, W.G. and Davis, D. (2004) Integral Steel Box-Beam Pier Caps, Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program Report 527.

Zhu, R.R.H., Dhonde, H. and Hsu, T.T.C. (2005) Crack width prediction for ledges in inverted 'T' bent caps, *American Concrete Institute*, Vol. 225, pp. 179-196.

-
- ◎ Received January 28, 2013
 - ◎ Revised January 31, 2013
 - ◎ Accepted February 13, 2013