

복합구조 적용에 따른 콘크리트 열 응답

Thermal Response of Concrete in Steel-Concrete Composite Structure

손 영 현*

Son, Young-Hyun

Abstract

This paper presents the thermal problems of steel-concrete composite structure and the basic references in placing concrete into the structure. Based on the analytical investigation, application of the composite structure has the effect of highly decreasing the temperature difference between the center section and the surface section of the structure, though its application has little influence on the decrement of the maximum temperature under the same using material and placing temperature. Meanwhile, its application causes the section decrement of a concrete structure, and in the section which the decrement ratio is relatively large, the restraint action by a old concrete structure takes place highly tensile stresses over a tensile strength. And, the stress is concentrated on sharp edges of the steel-concrete boundary. Both restraint action and stress concentration considerably decrease the reduction effect of the temperature difference. Therefore, the prediction of thermal response and the reasonable steps are required through the simulation considering the factors and the sections related to those problems.

요 약

본 연구에서는 해석적 검토를 수행하여 합성구조물의 열적응답을 예측하고 발생가능한 문제점을 고찰함으로써 합성형구조 실 시공시 효율적인 자료를 제공토록 하였다. 복합구조의 적용에 의한 콘크리트 단면의 감소는 동일한 구성재료와 타설온도를 적용할 경우 최대온도의 발현량을 감소시키는 효과는 거의 없지만, 중앙부와 표면부의 온도차는 크게 감소시킬 수 있는 것으로 판단된다. 한편, 복합구조의 적용은 콘크리트 구조물의 단면감소를 유발하고, 감소율이 상대적으로 큰 단면에서 기설 콘크리트 구조물에 의한 구속작용으로 인장강도를 초과하는 인장응력이 발생된다. 이러한 응력은 Steel Box와 콘크리트 접촉면의 모서리부에 집중되는 것으로 판단된다. 이와같은 구속작용과 응력집중 현상은 복합구조 적용에 따른 온도차 감소효과를 상쇄시키는 것으로 판단된다. 따라서, 복합구조 적용시 이러한 문제점과 관련된 인자들과 단면 등을 고려한 해석적 검토를 통하여 온도응답 및 적절한 대책이 요구된다.

Keywords : temperature difference, steel-concrete composite structure, section decrement, restraint action, stress concentration

핵심용어 : 온도차, 복합구조, 단면감소, 구속작용, 응력집중

* (주) C.S.M 엔지니어링, 기술이사, 공학박사

E-mail : 0419yhson@mail.hananet.net 016-308-4805

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2003년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

뎀과 같은 대형구조체의 콘크리트에만 적용되는 것으로 인식되어 왔던 매스콘크리트의 개념은 최근 콘크리트 구조물이 대형화, 특수화되어 유동성이 충분히 확보된 콘크리트의 대량 급속 시공이 증가하고 있어 그 특별한 범주를 규정하기 힘든 실정이다. 이와같은 현실 뿐만아니라 과거보다는 상대적으로 고강도화 된 콘크리트가 요구되고 있기 때문에 빈번히 관찰되고 있는 매스콘크리트 구조물의 균열 발생원인 및 발생시기의 예측이 어려워지고 있다(D. I. Chang et.al.,1997).

이러한 구조물의 가장 중요한 특징은 열적 거동으로서, 매스콘크리트에 대한 설계는 열응력에 의해 발생된 온도균열의 폭과 간격을 감소시키고 제어하는데 그 목적이 있다. 따라서, 대상구조물의 타설이후에 있어서 온도이력이나 온도응력을 적절한 방법을 이용하여 정확히 예측할 수 있다면, 보다 효과적으로 온도균열을 제어할 수 있을 것이다(허택녕 등,2001;ACI, 1994;日本コンクリート工學協會,1983).

최근 강재와 철근의 특성을 이용하여 합성시 구조적으로 장점을 최대한 이용하는 것을 목적으로 하는 복합구조는 토목구조물의 교각 기둥부 및 코핑부에 그 적용이 증가하고 있다. 이와같은 복합구조는 강재구조만으로는 강성이 부족하고, RC구조만으로는 단면이 크게 증대될 필요가 있는 곳에 대체 사용되고 있다. 그러나 설계방법에 대한 구체적인 정립이 미비할 뿐만 아니라 설계가 상대적으로 복잡하여 외국설계기준이나 경험적 견해에 의존하고 있다.

이러한 측면을 고려하여 국내 여러 연구자들에 의해 그 설계기법에 대한 실험적·해석적 연구가 진행되고 있다(윤상문 등, 1997;조병완 등, 1999). 한편, 콘크리트의 단면을 감소시킬 수 있다는 측면에서 강박스형의 구조물을 교각 기둥부 혹은 코핑부의 중심에 매립하였을 경우 발생하는 열적거동 변화에 대해서는 검토된 사례가 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 범용 구조해석프로그램(TNO, 1994)을 이용한 해석적 검토를 수행하여 복합구조물의 열적응답을 예측하고 발생 가능한 문제점을 고찰함으로써 향후 복합구조 시공시 효율적인 자료를 제공토록 하였다.

2. 온도해석

2.1 대상 구조물

본 연구에서는 직경 18m, 높이 3m인 우물통기초 상부의 “Y” 형의 교각구조물을 대상으로, 구조물 중심부에 2m×2m의 Steel Box 구조물이 거치되어 콘크리트와 Steel Box의 복합구조를 이루는 것으로 하였다. 또한, 검토대상 구조부위로서 교각하부영역을 선정하고, 장변의 길이가 약 22m, 단변의 길이가 약 8m인 콘크리트 단면 중 장변의 양단부 일부가 절단된 형상을 갖추도록 하였다(Fig. 1).

이때 전술한 Steel Box 구조물의 거치에 따른 복합구조 적용에 의해 교각하부영역에서는 복합구조 비 적용시에 비해 장변방향으로 약 9%, 단변방향으로 약 25%의 콘크리트 단면의 감소가 발생된다. 시공단계에 대해서는 내부 Steel Box를 거치 후 최초 2.2m를 타설한 후 추가로 2.2m를 타설하여 총 4.4m를 구축하는 과정을 설정하였다.

이러한 시공단계를 고려하여 2.2m를 시공한 경우와 전체 4.4m를 1회에 시공했을 경우 및 Steel Box에 의한 합성구조 설정 유무의 영향 등을 해석적으로 검토하였으며, Table 1에는 온도이력 및 응력이력 해석의 경우를 정리하여 제시하였다.

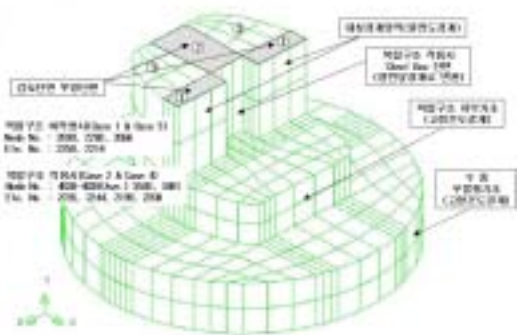


Fig. 1 구성된 유한요소모델

Table 1 온도해석의 case 분류

Case	타설높이(m)	Steel Box 적용여부	검토사항
Case 1	2.2	비 적용	온도 및 응력이력
Case 2	2.2	적 용	온도 및 응력이력
Case 3	4.4	비적용	온도 및 응력이력
Case 4	4.4	적 용	온도 및 응력이력

2.2 해석조건

온도해석은 시멘트의 수화열에 기인하는 콘크리트의 발열특성, 타설온도, 외기온도 및 양생조건 등을 고려하여 비정상열전도해석을 수행하고, 구조물 내부의 온도이력을 구하게 된다. 이때 구조물 중앙부와 표면부의 온도차, 온도강하속도 등을 검토함으로써 균열발생 여부를 판단할 수 있다.

본 연구에서는 가정된 교각구조물의 온도균열발생 여부의 간접적인 판단자료로서 European Standard ENV 206에서 선정하고 있는 온도상승시와 온도하강시 내·외부 온도차 20℃를 채택하여 균열발생 가능성에 대한 참고기준으로 하였다(A.M.Neville,1996).

표면부와 측면부의 열전달계와 직접 관련되는 외기온도는 열발산 및 콘크리트 표면부의 균열 등에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 외기조건에 대하여 본 연구에서는 최대 대기온도 35℃와 최소 대기온도 20℃

Table 2 콘크리트 열 특성값

구조부위	Density (kg/m ³)	Conductivity (kcal/mh℃)	Specific Heat (kcal/kg℃)	Heat Capacity (kcal/m ³ ℃)
기초 및 교각부	2500	23	0.23	575.0
기초하부 수중부	2450	23	0.23	563.5

Table 3 사용 거푸집의 열전달계수

측 면 (kcal/m ² h℃)		상 부 (kcal/m ² h℃)	
거푸집 탈형전	거푸집 탈형후	양생포 제거전	양생포 제거후
7.0	12.0	4.5	12.0

* Steel Box와 맞닿는 영역은 전체재령에 대해 12.0으로 설정함.

일 때를 대상으로 하였으며, 기초하부 콘크리트와 수중 초기온도는 15℃로 일정하게 하였다.

한편, 콘크리트의 열특성 값 및 목재거푸집 그리고 Steel Box와 맞닿는 콘크리트 부위의 열전달률은 콘크리트 표준시방서(건설교통부, 1999)를 참조하여 정하였으며, 다음 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다. 또한, 열전달률의 재령에 따른 경계점인 양생기간은 7일로 일정하게 하였다. 콘크리트에 있어서 시멘트 수화작용에 의해 발생하는 수화열은 콘크리트 구조물의 온도분포와 온도응력 발생에 큰 영향을 미치는 요인으로 단열온도상승곡선으로 표현된다.

본 연구에서는 콘크리트 타설온도가 25℃ 일 때의 단열온도특성값을 콘크리트 표준시방서 추천값에 준하여 적용하였으며, 다음 식(1)과 같이 단위시간당, 단위체적당 내부발열량(q_c)을 구하여 해석시 입력값으로 활용하였다. 이때 단위시멘트량은 300 kg/m³으로 일정하게 하였다.

$$q_c = C_c \rho 45.5 \frac{1.321}{24} e^{(-\frac{1.321}{24} t)} \quad (1)$$

상기 식에서 t는 재령(일), C_c 는 콘크리트의 비열(kcal/kg℃), ρ 는 밀도(kg/m³)이다.

한편, 온도응력에 대한 검토에서 검토단면의 28일 압축강도는 252kgf/cm², 인장강도는 22.2kgf/cm², 그리고 탄성계수는 2.38×10⁵kgf/cm²으로 콘크리트 표준시방서를 참조하여 추정하였다. 또한, 열팽창계수는 1.0×10⁻⁵/℃, 프와송비는 0.18로 설정하였다.

다음 Fig. 1은 가정된 구조물의 유한요소모델을 나타낸 것이다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 온도이력

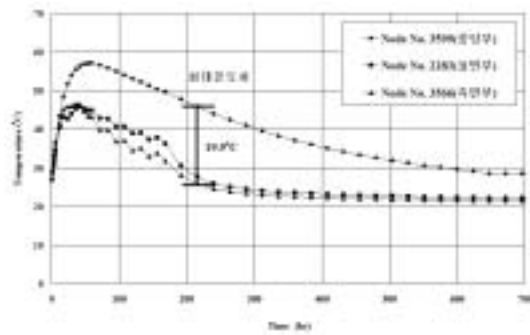
다음 Fig. 2는 해석 Case 별 중앙부(Node No. 3509, 4638-4639(평균값)), 표면부(Node No. 2283, 3481) 및 측면부(Node No. 3566, 3502, 3503)의 온도이력을 나타낸 것이다.

또한, Table 4에 온도이력해석의 주요결과를 정리하였다. Fig. 2와 Table 4의 해석결과에서 알 수 있듯이, 복합구조를 적용하기 전 단면내 최대 온도발현량은 타설높이 2.2m(Case 1)인 경우 약 57℃, 4.4m인 경우(Case 3)는 약 61℃ 정도로 나타나고 있다.

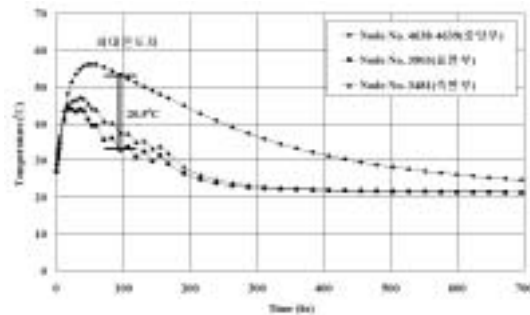
또한, 복합구조를 적용시 약 56℃, 59℃를 각각 보이고 있어, 복합구조 적용 전후의 콘크리트 단면내 최대 온도발현량은 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Table 4 온도이력해석 결과

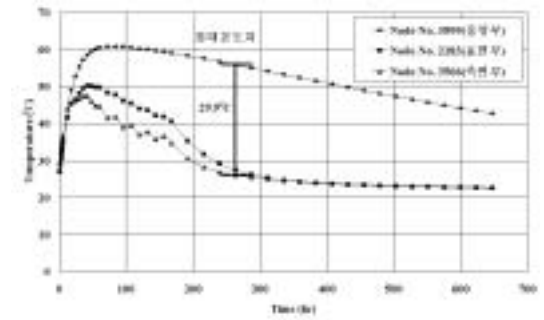
Case	최대온도 (℃)	내외부온도차 (℃)	온도하강구배 (℃/hr)
1	57.1	19.9	0.064
2	56.1	20.5	0.073
3	60.8	29.9	0.031
4	58.8	24.1	0.058



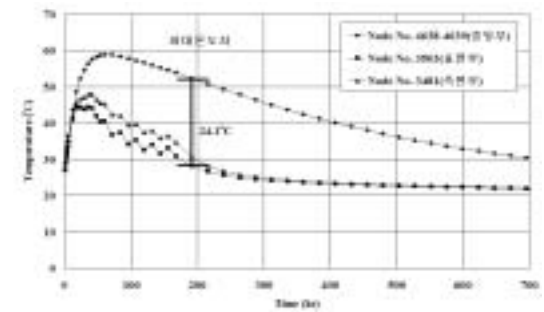
(a) Case 1 온도이력



(b) Case 2 온도이력



(c) Case 3 온도이력



(d) Case 4 온도이력

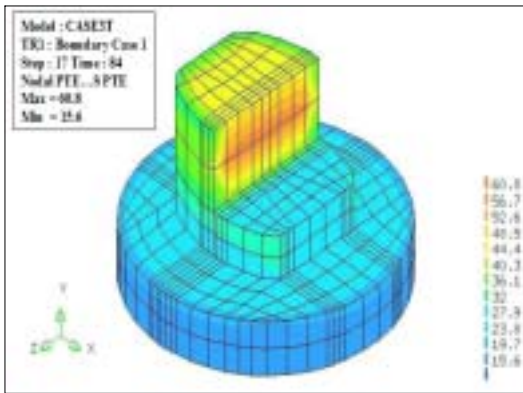
Fig. 2 Case별 온도이력해석 결과

또한, 중앙부와 표면부의 온도차에서는 타설높이에 따라 복합구조를 적용하기 전 약 20℃~30℃, 복합구조 적용 후에 약 21℃~24℃를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 교각 등과 같은 대규모 콘크리트 구조물에 복합구조의 적용에 의한 콘크리트 단면 감소는 동일한 구성재료와 타설온도를 적용할 경우 최대온도 발현량을 감소시키는 효과는 크지 않음을 알 수 있다. 그러나, 중앙부와 표면부의 온도차는 비교적 크게 감소시킬 수 있는 것으로 판단되며, 특히, 이러한 감소효과는 타설높이가 증가할 수록 높을 것으로 판단된다. 또한, 복합구조를 적용하지 않을 경우 중앙부와 표면부의 온도차가 타설높이에 따라 약 10℃ 정도의 차이를 보이는 반면, 복합구조를 적용한 경우, 약 4℃의 온도차를 보이고 있다.

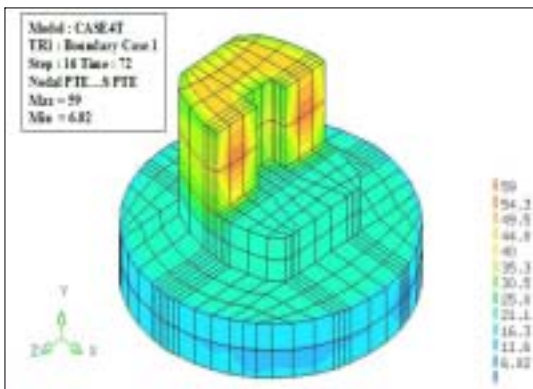
이러한 결과는 콘크리트 구조물의 최대온도 발현량을 감소시킬 수 있는 추가적 방법이 도입될 경우, 중앙부의 온도상승량 감소에 따라 타설높이를 일반적인

경우보다 높게 설정하여 시공하더라도 유해균열의 억제는 충분할 것으로 판단된다.

최대온도와 외기온 평형상태의 단면 중앙부 온도의 차이를 기준으로 평가된 단위시간당 온도곡선의 하강구배를 검토한 결과, 복합구조를 적용할 경우인 Case 2와 Case 4가 동일 타설높이에서 빠른 온도하강의 경향을 보이는 것으로 나타나고 있다. 또한, 복합구조 적용 전(a)과 적용 후(b)의 단면내 온도분포를 보인 Fig. 3에서 알 수 있듯이 복합구조를 적용함으로써 Steel Box와 콘크리트 경계면의 온도분포가 약 30°C~40°C 정도로 나타나고 있어 최대온도값 59°C와 큰 온도차를 보이고 있다.



(a) 복합구조를 적용하지 않은 경우



(b) 복합구조를 적용한 경우

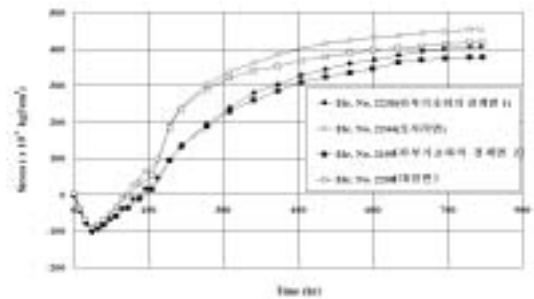
Fig. 3 대표적인 단면내 온도분포

이와같은 결과는 복합구조 적용시 Steel Box와 콘크리트 경계면에서의 열전달효과에 의한 것으로써 3.2 절의 온도변화에 따른 온도응력 증가를 유발하는 중요한 인자로서 영향을 미치게 될 것으로 판단된다.

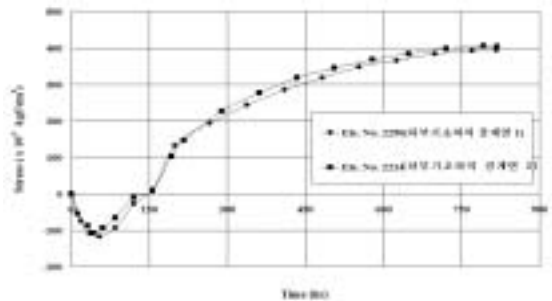
3.2 응력이력

온도응력해석은 온도이력해석 결과와 재령에 따른 탄성계수변화를 고려하여 수행하였으며, 그 결과는 다음 Fig. 4와 같다.

주요 요소에 대한 온도응력 해석결과, 동일 타설높이에서 복합구조 적용전·후 주요 요소의 평균 응력이력은 타설높이가 2.2m인 경우, 하부기초와의 경계면(Ele. No. 2214, 2250)에서 평균 약 40 kgf/cm² 정도로 나타나고 있고, 이에 대응하는 복합구조 적용시의 하부기초와의 경계면(Ele. No. 2199, 2235) 또한 유사한 값을 보이고 있다. 그러나, Steel Box와의 접촉면에서의 응력이력을 보이는 Ele. No.

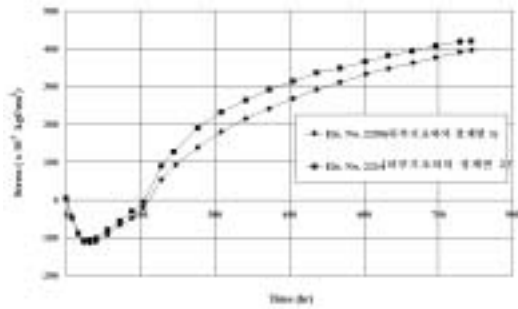


(a) Case 1 응력이력

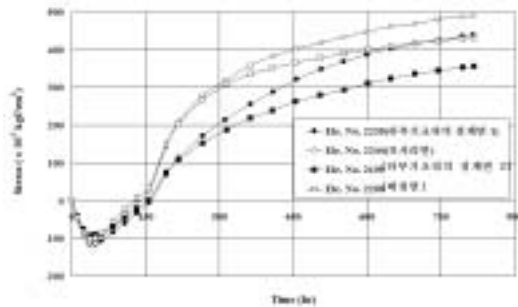


(b) Case 2 응력이력

Fig. 4 Case별 응력해석 결과



(c) Case 3 응력이력



(d) Case 4 응력이력

Fig. 4 Case별 응력해석 결과(계속)

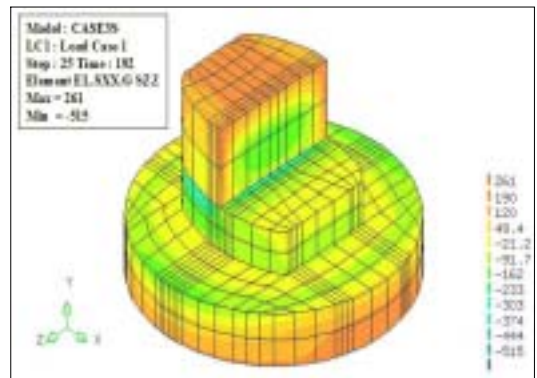
2208(대칭면), Ele. No. 2244(모서리)에서 약 42 kgf/cm²와 45 kgf/cm² 정도를 나타내고 있어 복합구조 적용에 따라 하부기초와 경계면보다는 Steel Box와의 접촉면에서 보다 높은 인장응력이 발생되고 있다. 또한, 인장강도를 초과하는 인장응력의 발생시기 즉 초기 균열의 발생시점이 하부기초와의 경계면보다 약 90-100hr 빠른 경향을 보이고 있어 월등히 높은 균열 발생가능성을 갖는 것으로 판단된다.

타설높이가 4.4m인 경우, 타설높이 2.2m인 경우와 비교하여 복합구조를 적용하지 않을 경우 최대 응력이력의 변화는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나, 복합구조를 적용한 경우 표면부의 위치에 따라 Fig. 1의 ①의 하부기초와의 경계면에서는 약 44 kgf/cm², ②의 경계면에서는 약 35 kgf/cm² 정도로 약 9 kgf/cm²의 인장응력 차를 보이고 있다.

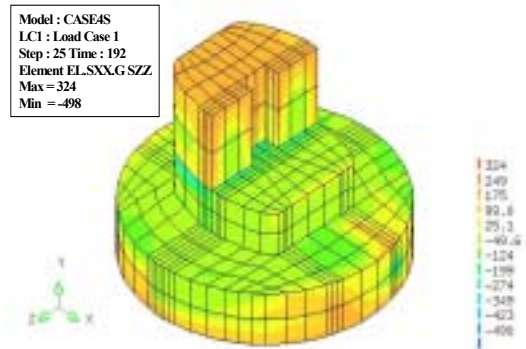
이러한 현상은 복합구조를 적용함에 따라 발생하는

① 영역의 상대적인 높은 단면 Slim화로 인하여 ②와 ③ 영역과의 큰 강성의 차에 따른 변형구속을 크게 받기 때문으로 사료된다. 또한, Steel Box와의 접촉면에서는 인장응력이 전체적으로 높게 나타나는 경향을 보이고 있는데, 모서리부의 경우 약 50 kgf/cm²에 이르고 있어 온도균열지수에 따른 균열발생가능성도 약 10%이상 증가되고 있으며, 타설높이 2.2m와 비교하여 높은 인장응력의 증가 경향을 나타내고 있다.

이상과 같은 경향은 대표적인 단면내 온도응력 분포를 보인 Fig. 5에서도 알 수 있다. 즉, 복합구조를 적용하지 않은 Fig. 5(a)의 경우 중앙부 전체에 압축응력이 지배적인 반면, Fig 5(b)와 같이 중앙 단면에 Steel Box를 거치하여 복합구조를 적용함에



(a) 복합구조를 적용하지 않은 경우



(b) 복합구조를 적용한 경우

Fig. 5 대표적인 단면내 응력분포

따라 모서리 및 접촉면에 콘크리트 타설 후 동일재령(192hr)에서 인장강도를 초과하는 인장응력이 발생되고 있다.

결과적으로, 타설높이가 증가할 수록 복합구조 적용에 따른 단면감소율이 상대적으로 증가하는 영역의 하부기초와의 경계면에서는 균열발생 가능성이 복합구조 적용 전과 비교하여 커질 것으로 판단된다. 또한, Steel Box와 콘크리트 단면과의 접촉면 특히, 모서리에서는 주변단면과 비교하여 인장응력 집중현상이 뚜렷하기 때문에 시공 전에 충분한 검토와 적절한 대책의 수립이 요망된다.

4. 결 론

본 연구에서는 해석적 검토를 수행하여 복합구조물의 열 응답을 예측하고 발생 가능한 문제점을 고찰함으로써 복합구조 시공시 효율적인 자료를 제공토록 하였다.

복합구조의 적용에 의한 콘크리트 단면의 감소는 동일한 구성재료와 타설온도를 적용할 경우 최대온도의 발현량을 감소시키는 효과는 낮지만, 중앙부와 표면부의 온도차는 크게 감소시킬 수 있는 것으로 판단된다. 그러나, 타설높이가 증가할 수록 복합구조 적용에 따른 단면감소율이 상대적으로 증가하는 영역의 하부기초와의 경계면에서는 강성의 변화에 따른 변형구속작용으로 균열발생가능성이 커질 것으로 판단된다.

또한, 복합구조 적용에 따른 강재와 콘크리트 접촉면의 모서리에는 인장응력 집중현상의 발생이 증가되기 때문에 시공전에 온도이력 뿐만아니라 온도응력에 대한 충분한 검토와 적절한 대책의 수립이 요망되는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. “콘크리트표준시방서”, 건설교통부, 1999.
2. 윤상문, 김원태, 최광호, “콘크리트 기동과 철골보로 이루어진 복합구조의 적용성에 관한 연구,” 한국콘크리트학회 봄학술대회 논문집, 1997. 7, pp.508-514.
3. 조병완, 김영진, 박성민, “매립형 합성보의 구조적 거동에 관한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회 가을학술대회 논문집, 1999. 10, pp. 549-552.
4. 허택녕, 손영현, 이석홍, “기계기초 매스콘 크리트의 균열제어를 위한 온도관리기법의 개발,” 한국구조물진단학회지, 제5권 4호, 2001. 10, pp.227-233.
5. ACI Committee 207, “Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete”, ACI Manual of Concrete Practice, 207.2R, 1994.
6. A.M. Neville, “Properties of Concrete”, LONGMAN, 1996.
7. D. I. Chang, W. K. Chai, K. H. Jo, Y. H. Son & K. I. Kim, “Temperature and Crack Control for Massive Concrete Structure,” 22nd Conference on OWICS, 1997.8, pp.113~ 119.
8. TNO, DIANA Manual, 1994.
9. 日本コンクリート工學協會, “マスコンクリートの溫度應力推定方法に關する既往研究とその總括(その2), 콘크리트工學, Vol. 21, No. 9, 1983.

(접수일자 : 2002년 11월 21일)