모듈화된 내부구속 중공 철근콘크리트 보 연결부의 이력거동 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Behavior of Modularized Internally Confined Hollow Reinforced Concrete Beam Joints

김성원* · 한택희**

Kim, Sungwon*, and Han, Taek Hee**

Abstract

In this study, two types of connecting method were suggested for modularized internally confined hollow reinforced concrete (ICH RC) beams. To evaluate their performances, bending tests were carried out with a single-body specimen and two modular specimens. The two modular specimens have different connections which are distinguished with the shapes of sheath tube and the existence of connecting steel plates. The four points loading tests were performed to investigate the behavior of the modular specimens and their failure patterns. The test results showed that modular specimens have lower strengths than the single-body specimen in the elastic region, but the modular specimens finally exerted almost equal strengths to the single-body specimen at the plastic region. The maximum loads of the modular specimens were measured as 90%~95% of the single body specimen. Those experimental results are supposed by the discontinuity of the concrete at the joint and the fracture of the reinforced coupler. If these defects are reinforced, a modular ICH RC structure may show similar behavior to a single-body ICH RC structure.

Key words : Connection, Modularization, Beam, Internally Confined, Concrete

요 지

중공철근콘크리트 내부를 강관으로 보강한 내부구속 중공 철근콘크리트(ICH RC: Internally Confined Hollow Reinforced Concrete) 보의 모듈화를 위하여 두 종류의 연결부 형식을 제안하고, 그 성능을 실험적으로 평가하였다. 일체형 시험체와 쉬스관 형상과 내부 연결 플레이트의 사용 유무에 차이를 둔 두 가지 시험체를 제작하였으며, 4점 재하실험을 수행하여 접합부 거동 특성 및 파괴양상을 분석하였다. 실험 결과, 탄성구간에서 모듈형 시험체와 일체형 시험체에서 발현하는 하중의 차이를 보였으나 소성구간으로 갈수록 그 차이가 감소하는 것으로 나타났으며, 모듈형 시험체의 최대하중은 일체형 시험체 최대하중의 90%~95% 까지 발현하는 것으로 나타났다. 접합부에서의 콘크리트의 비연속성과 철근 커플러의 파단에 의한 결과로 사료되며, 이러한 부분이 보강된다면, 모듈형 ICH RC 구조물과 일체형 ICH RC 구조물의 거동이 유사하게 나타날 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 연결부, 모듈화, 보, 내부구속, 콘크리트

1. 서 론

Roland Berger (2013)와 Gabel (2016)에 따르면, 최근 초고

층빌딩, 대용량 해상풍력 및 장대교량과 같이 구조물의 대형화가 진행됨에 따라 지지 구조물에 대한 성능요구가 증가하고 있다. 또한 중량의 감소요구를 충족시키고, 단면적을

*정회원, 한국해양과학기술원 연안개발연구센터 연구원(E-mail: swkim@kiost.ac.kr)

Member, Research Scientist, Coastal Development Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

**교신저자, 정회원, 한국해양과학기술원 연안개발연구센터 책임연구원 / 한국해양대학교 해양과학기술융합과 교수

(Tel: +82-51-664-3529, Fax: +82-51-664-3529, E-mail: taekheehan@kiost.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Principal Research Scientist, Coastal Development Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology / Professor, School of Ocean Science & Technology, Korea Maritime & Ocean University

줄이면서 사용 면적을 확보하기 위한 지지구조물 관련 연구들이 많은 연구자들에 의해 계속해서 진행 중에 있다(Kim et al., 2010; Lee et al., 2011; Han et al., 2013).

Zhan et al. (1990)에 따르면 교각이나 기둥의 자중 감소와 재료의 절감을 위해 널리 사용되는 중공 철근콘크리트(RC: Reinforced Concrete) 구조는 중공 내측의 취성 파괴로 인하여 낮은 연성거동을 보인다. 이러한 중공 RC 구조물의 내벽에 강관을 삽입하여 콘크리트를 3축 구속 상태로 만들어 지지 성능을 향상시킨 내부구속 중공 철근콘크리트(ICH RC: Internally Confined Hollow Reinforced Concrete) 구조가 Han et al. (2008)에 의해 제안되었다. Fig. 1에 ICH RC 구조에 대한 구성을 나타내었으며, 여러 강점을 가지고 있는 ICH RC 구조는 풍력타워 및 교각 등 지지구조물로서의 적용성이 뛰어나고, 이와 관련된 많은 연구들이 Han et al. (2010)과 Kim et al. (2016)에 의해 진행되었다.

Fig. 1. Cross-section of ICH RC Column (Han et al., 2008)

대형 구조물에 대한 지지 구조물은 건설현장에서 바로 제작이 되는 경우도 있지만, 해상 풍력타워 또는 대형교량 교각과 같은 경우, 현장에서의 제작이 어려운 상황이 발생 가능하다. 이러한 현장제작 제약조건을 해결하고 운반과 시공성의 향상을 위한 방법으로 프리캐스트 공법으로 구조물을 모듈화하여 현장에서 조립하는 방법을 고려할 수 있다. Zaleski-Zamenhof et al. (1990)에 따르면 부유식 모듈 구조물에 콘크리트 부유식 구조체를 시공한 뒤, 부유 구조체 위에 목적 구조물을 시공하는 개념의 프리캐스트 콘크리트 모듈을 적용하는 경우가 증가하고 있다.

모듈화된 구조물은 반드시 모듈과 모듈간의 접합이 이루어지는 연결부에 대한 검토가 필요하다. 각 모듈을 결합하여 완전한 구조물로서 역할을 수행하기 위해서는 접합부에서의 강도가 확보되어야 하며, 응력이 효과적으로 전달되어야 한다(Annamalai and Brown, 1990).

본 연구에서는 ICH RC 구조를 적용한 모듈화된 구조물의 접합부에 대한 거동특성을 분석하고자 하였다. 형상이 다른 스위스관과 모듈과 모듈사이의 접합 플레이트의 적용여부를 다르게 적용한 두 가지 접합방법을 제안하고, 일체형 시험체와 모듈형 보 시험체를 각각 제작하여 4점 재하실험을 통해 일체형 ICH RC 보의 거동과 모듈형 ICH RC 보의 거동을 비교 분석하고자 하였다.

2. 연결부 시험체

내부구속 중공 철근콘크리트 보 접합부의 거동 특성을 파악하기 위하여 일체형 시험체와 서로 다른 연결방법을 사용한 두 모듈 시험체를 제작하였다. 본 연구에 사용된 시험체는 콘크리트구조기준(KCI, 2012)에서 제시하는 권장안에 따라 철근의 간격과 콘크리트 피복의 두께 등이 설계되었으며, 시험체의 단면을 Fig. 2에 나타내었다. 세 시험체 모두 동일한 단면으로 제작되었으며, 횡철근은 띠철근으로 100 mm간격으로 배치하였다. 두 종류의 모듈화된 시험체는 세그먼트간의 접합연결방식에 스위스관의 형상과 내부 연결 플레이트의 유무에 따른 차이를 두고 설계하였다.

Fig. 2. Cross-section of Specimens

2.1 일체형 시험체 SP-NM

시험체 SP-NM (Non-Modulized)은 모듈화하지 않은 일체형 시험체로서 비교군으로 적용되며, 종단면도를 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 모듈형 시험체 SP-MF (철근커플러-플랫 파이프 연결형)

시험체 SP-MF (Modulized & Flat pipe)는 철근 커플러를 이용하여 모듈을 연결하는 방법으로, 내부강관의 경우 접합 원형플레이트를 사용하여 볼트를 체결하여 내부강관이 일체 거동 할 수 있도록 하였다. Fig. 4에 SP-MF 시험체의 종단면도를 나타내었으며, PART A, PART C와 접합하는 세그먼트의 내부강관은 용접 접합을 하며, 종철근에 횡철근을 결속하여 접합하였다. PART B의 세그먼트 4와 PART A의 경우 콘크리트를 같이 타설하였으며, 세그먼트 4와 세그먼트 3은 철근 커플러와 내부강관의 원형 플레이트를 이용한 볼팅접합을 통하여 시험체를 접합한다. PART B에 플랫 스위스관을 설치하여 파이프 외부에 횡방향 철근을 결속 시키며, 스위스관 내부는 몰탈을 타설하도록 하였다. 세그먼트의 양 끝단에는 강재 플레이트를 설치하여 강재끼리 접합되는 것으로 하였다.

Fig. 3. Longitudinal Section View of SP-NM

Fig. 4. Longitudinal Section View of SP-MF

Fig. 5. Longitudinal Section View of SP-MC

커플러를 이용하여 연결되는 철근이 효율적으로 연결이 될 수 있도록 철근 양단의 나사선을 각각 20 mm, 50 mm로 제작 하였다. 내부강관의 경우에는 접합 원형 플레이트를 이용하여 마찰접합 하도록 하였으며, 원형 이음판은 원형 판을 반으로 나누어서 시공성을 높였다. 원형 플레이트 접합에 사용되는 볼트는 M16 고장력 볼트 52개를 사용하였다.

2.3 모듈형 시험체 SP-MC (철근커플러-파형관 연결형)

SP-MC (Modulized & Corrugated pipe) 시험체의 경우 Fig. 5에 나타난 것과 같이, SP-MF 시험체와는 달리 각 모듈 세그먼트 양단에 강재 플레이트를 설치하지 않았다. 하지만 시험체 SP-MF와 유사한 접합방법으로 철근 커플러를 이용하여 모듈간의 종철근을 연결하지만 쉬스관으로 원형 플랫폼 파이프가 아닌 파형관을 삽입하여 콘크리트와의 접합면적을 넓게 하였다. 이를 Fig. 6에 나타내었다. 시험체의 PART A, PART C와 접합하는 세그먼트의 내부강관은 용접 접합을 하였으며, 종철근에 횡철근을 결속하여 접합하도록 하였다. PART B의 세그먼트 4와 PART A의 경우 콘크리트를 같이 타설하도록 하였으며, 세그먼트 4와 세그먼트 3은 SP-MF 시험체와 마찬가지로 종철근은 커플러로 연결하고, 내부강관은 원형 접합플레이트와 볼트를 이용하여 접합하였으며,

이를 Fig. 7에 나타내었다. 시험체 단면 제원 및 철근 제원, 내부강관 접합 플레이트는 SP-MF와 동일하다.

Fig. 6. Module Connection

Fig. 7. Bolting of Inner Tube Connecting Plate

2.4 시험체 제작

시험체 설계 결과에 따라 일체형 시험체 SP-NM과 모듈형 시험체인 SP-MF와 SP-MC, 총 3종의 시험체를 1기씩 제작하였다. Fig. 8은 각 시험체의 제작과정을 보여주고 있다.

Fig. 8. Manufacturing Specimens

시험체에 사용된 콘크리트의 경우, 타설시 공시체를 제작하여 3일 강도와 실험 시작일의 강도를 측정하였다. 측정 결과 3일 강도는 평균 22.45 MPa, 표준편차 0.85로 나타났으며, 콘크리트 타설 28일이 경과한 이후 실험 시작일의 평균 강도는 39.37 MPa, 표준편차 1.31로 나타났다.

내부 강관은 제작의 용이성과 비용절감을 위해 기성품인 KS D 3507 (KSSN, 2013a) 배관용 탄소강관을 사용하였으며, 외경은 406.4 mm, 공칭두께는 7.9 mm, 인장강도는 294 MPa이다. Table 1에 KS D 3507 배관용 탄소강관의 재료특성을 나타내었다. 시험체에 사용된 철근의 경우 D16과 D13에 대한 철근 인장 테스트를 3회 실시하였으며, 평균 인장하중이 D16과 D13 각각 125.548 kN과 81.011 kN으로 나타났다. 철근 재료실험에 대한 응력-변형률 결과를 Fig. 9에 나타내었으며, 3개의 시편에 대한 평균값을 Table 2에 나타냈다.

Table 1. Material Property of KS D 3507

KS D 3507	Chemical Composition (Max) %		Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
	P	S		
SPP(SGP)	0.04	0.04	294	30

Fig. 9. Stress Strain Curves of D16 and D13

Table 2. Test Result of Reinforcement

		Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (mm)
D16	Average	504.276	624.743	17.23
	Std.	9.83	1.37	1.01
D13	Average	530.710	610.643	14.70
	Std.	1.99	1.27	1.43

Std.: Standard deviation

3. 연결부 성능

3.1 실험 방법

본 연구에서는 2 MN 용량의 가력장치를 사용하여 하중을 재하하였으며, 가력 제어방식으로는 변위제어방식을 적용하였다. KS F 4306 (KSSN, 2013b)에서의 휨 강도 시험방법을 참고하여 Fig. 10과 같이 시험체 길이의 3/5를 지간장으로 하여 지지하였으며, 지간 중앙에서 양쪽으로 500 mm씩 떨어진 두 곳에 연직하중을 재하하였다. 지간의 정중앙과 모듈 접합부를 일치시켜 접합부에 최대 휨 모멘트가 발생하도록 하였다.

Fig. 10. Test Set-up

각 Drift Level에 따라 동일한 변위하중을 10회 반복하여 가력 하였으며, 휨 파괴를 일으키기 전에 하중가력부나 지점부에서 국부 파괴를 일으킬 경우 실험을 종료하였다. 시험체 가력에 사용된 Drift Level은 Fig. 11과 같으며, drift ratio를 단계별로 0.05%부터 지속적으로 증가시켜 작은 변위하중으로부터 하중 단계별 시험체의 거동을 분석하고자 하였다.

Fig. 11. Loading Protocol

타워 시험체의 변위를 측정하기 위해 시험체 중앙을 기준으로 3개의 모듈 접합부 부분에 각각 변위계(LVDT)를 설치하여 접합 부분에서의 변위를 측정하였으며, 시험체 양 끝단에도 LVDT를 설치하였다. 내부강관을 볼팅으로 연결한 지간의 중심부와 용접으로 연결한 경계지점부의 내부강관 외측의 상·하부에 스트레인게이지를 설치하여 내부강관의 횡방향 변형률을 측정하였다. 내부강관 접합 플레이트 내측의 상·하부에 내부강관과 일치하는 위치에 스트레인게이지를 부착하여 변형률을 관측하고자 하였다. 콘크리트 균열은 하중 가력부와 가력부 후면, 경계지점부에서 발생하기 때문에 경계지점 근처의 모듈 접합부 하부와 하중 가력부 모듈의 중앙부에 스트레인게이지를 설치하였다.

3.2 일체형 시험체(SP-NM)의 파괴 거동

Fig. 12에 일체형 시험체 SP-NM의 하중-변위 곡선을 나타내었으며, 58 mm의 변위하중을 가력했을 때 1,035 kN의 최대하중을 나타내었다. 시험체 콘크리트 부에서 측정된 변형률 결과와 콘크리트 변형률 게이지의 위치를 보의 정 중앙을 기준으로 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 14에는 내부강관의 내측에서 측정된 변형률 결과를 나타내었으며, 시험체 정중앙의 SPT2, SPB2를 기준으로 SPT3에서 압축, SPB1에서 인장에 대한 최대 변형이 발생하였다. 최대 변형이 나타나는 시점에서 시험체 가력부에 Fig. 15와 같이 압괴가 발생하였다.

Fig. 12. Load Displacement Curves (SP-NM)

Fig. 13. Strain Responses of Concrete (SP-NM)

Fig. 14. Strain Responses of Inner Tube (SP-NM)

Fig. 15. Failure of SP-NM

3.3 모듈형 시험체(SP-MF)의 파괴 거동

플랫 파이프 쉬스관을 이용한 SP-MF의 실험 결과는 Fig. 16의 하중-변위곡선 결과에서 확인할 수 있듯이, 변위하중을 61 mm로 가력 시에 927 kN의 최대하중이 발생되었다. Fig. 16에 철근이 파단되는 시점을 나타내었으며, 변위하중을 65 mm 정도 재하하였을 때 약 870 kN의 하중에 의해 1차 커플러의 파단이 발생하였고, 변위하중 85 mm 정도 가력하였을 때 약 800 kN의 하중에 의하여 2차 커플러파단이 발생하였다. 모듈형 시험체의 콘크리트 변형을 관측을 위한 게이지는 일체형 시험체와는 달리 정중앙과 접합부의 양쪽에 하나씩 부착하여 총 6개의 게이지를 설치하였다. Fig. 17에 콘크리트 변형을 측정결과를 나타내었으며, 세그먼트 2번과 3번의 가력부에서 압축변형이 발생하였다. 내부 강관의 접합을 위해 사용된 접합 플레이트에서의 변형을 결과를 Fig. 18에 나타내었으며, CPB1과 CPB3에서 유사한 인장 거동이 발생하는 것으로 나타났으며, Fig. 19에 마지막 변위하중 가력 후 시험체 중앙부의 모습을 나타내었다.

가력부에서 콘크리트의 압축변형이 크게 발생하였으며, 이는 보 중앙에 위치한 segment와 segment사이의 콘크리트 연결부에서의 접합 강재 플레이트에 의한 간섭으로 인하여 가력부 반대위치에서 콘크리트의 인장변형은 거의 발생하지 않고, 가력부 주변에서 압축변형이 발생한 것으로 사료된다. 가력부의 반대에 위치한 내부 연결 플레이트에서는 시험체 정중앙에서 인장 변형률이 가장 높게 나타나는 결과를 보였다.

Fig. 16. Load Displacement Curves (SP-MF)

Fig. 17. Strain Responses of Concrete (SP-MF)

Fig. 18. Strain Responses of Connection Plate (SP-MF)

Fig. 19. Failure of Specimen SP-MF

3.4 모듈형 시험체(SP-MC)의 파괴 거동

모듈형 시험체 SP-MF와 달리 파형관을 삽입한 SP-MC 시험체의 실험 결과를 Figs. 20~22에 나타내었다. 97 mm의 변위하중을 재하할 때에 990 kN의 최대 하중이 발생되었으며, Fig. 20에 표시한 부분과 같이 100 mm의 변위하중이 가력될 때 약 950 kN의 하중으로 인하여 철근 커플러의 파단이 일어났으며, 접합부의 내부 강관 연결을 위해 사용된 원형 접합플레이트의 CPB1, 2, 3에서 유사한 거동이 나타났다. Fig. 23은 실험 종료 직전의 시험체의 모습을 보여준다.

모듈형 시험체 SP-MC에서는 일체형 시험체와 마찬가지로 가력부의 반대위치에서 콘크리트의 인장변형이 가력부에서의 콘크리트 압축변형에 비해 높게 나타났다. 인장부에서 시험체의 정중앙보다 양쪽에 근접한 위치에서의 콘크리트 변형률이 높은 것으로 나타났으며, 이는 모듈형 시험체의 정중앙에서의 콘크리트부의 불연속성으로 인하여 정중앙에서의 변형률이 거의 측정되지 않은 것으로 판단된다. 원형 접합 강재 플레이트의 경우 가력부 반대 위치에서의 인장변형이 시험체의 정중앙보다는 양쪽에 인접한 접합부에서 더 높게 나타났으며, 이는 SP-MF 시험체와는 다르게 segment와 segment 사이에 강재 플레이트의 부재로 인한 것으로 사료된다.

Fig. 20. Load Displacement Curves (SP-MC)

Fig. 21. Strain Responses of Concrete (SP-MC)

Fig. 22. Strain Responses of Connection Plate (SP-MC)

Fig. 23. Failure of Specimen SP-MC

3.5 시험체 결과 비교분석

Figs. 24와 25에 일체형 시험체와 두 가지 모듈형 시험체의 하중-변위 이력곡선과 포락곡선을 함께 나타내어 비교하였으며, Table 3에 그 내용을 간단히 비교하였다. 변위하중 가력 초기에는 일체형 시험체에서 모듈형 시험체에 비해 비교적 높은 하중이 나타났으며, 가력 후반부로 갈수록 최대하중이 세 가지 시험체에서 모두 유사하게 나타나는 경향을 보였다. 또한, Fig. 24의 하중 재하(loading) 및 제하(unloading) 시의 그래프의 기울기는 각 시험체 모두 유사하게 나타나 강성의 차이는 크지 않은 것으로 판단되나, Fig. 25의 포락곡선의 초기 기울기 차이는 크게 나타났다. 이는 연결부 존재에 따른 초기 강성 차이에 다른 결과로 판단된다. 변위연성도는 일체형 시험체 SP-NM이 3.77, 모듈형 시험체 SP-MF가 1.72, 모듈형 시험체 SP-MC가 1.66으로 나타나 일체형 시험체의 경우 모듈형 시험체에 비해 연성거동을 보였다. 모듈형 시험체의 경우 철근 연결부의 커플러의 파단에 의해 강성의 감소량이 급격하게 감소하면서 취성적인 파괴거동을 보여, 모듈형 시험체의 일체 거동을 위해서는 철근 접합부에 대한 보완이 필요한 것으로 사료된다.

Table 3. Comparison of Test Result

Specimen	SP-NM	SP-MF	SP-MC
Peak Load (kN)	1,035	983	930
	100%	95.0%	89.9%
Displ. at Peak Load (mm)	58	61	97
	100%	105.2%	167.2%
Dissipated Energy (kN-m)	94.38	72.21	59.57
	100%	76.5%	63.1%
Stiffness (kN/mm)	31.1	15.2	14.5
	100%	48.9%	46.6%

Fig. 24. Load-Displacement Curves

Fig. 25. Load-Displacement Envelope Curves

Fig. 25의 포락곡선으로부터 산출된 초기 탄성구간에서의 강성 값을 Table 3에 정리하였다. SP-NM, SP-MF, SP-MC 시험체의 최대하중은 각각 1,035 kN, 983 kN, 930 kN로서, SP-MF의 경우, 일체형 시험체인 SP-NM의 95% 수준으로서 모듈화에 충분히 적용 가능한 값을 나타낸다고 판단된다. SP-MC의 경우에도 최대강도가 SP-NM의 90% 수준으로서 SP-MF와 같이 보강관을 설치한다면, 더 향상된 강도를 가질 수 있을 것으로 판단된다. 중국에너지소산도는 변위-하중 곡선의 면적을 계산하여 산출하였으며, 각각 94.38 kN-m, 72.21 kN-m, 59.57 kN-m로 나타나 일체형 시험체에서 가장 높게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 ICH RC 구조를 적용한 모듈형 보의 접합부 성능 평가를 위하여 일체형 시험체와 서로 다른 접합방법을 이용한 모듈형 시험체 총 세 기를 제작하여 거동을 평가하고자 하였다.

세 시험체에 대한 실험 결과를 비교해보면, 일체형 시험체 SP-NM에서 1,035 kN으로 가장 높은 최대하중이 발생하였으며, 최대 변형이 나타나는 시점에서 시험체 가력부에 콘크리트의 압괴가 발생하였다.

모듈형 시험체 SP-MF의 경우 변위하중을 61 mm로 가력시에 927 kN의 최대하중이 발생되었다. 이후 두 번의 커플러의 파단이 발생하며 가력부에서 콘크리트의 압축변형이 크게 발생하였고 이는 콘크리트 연결부에서의 접합 강재 플레이트에 의한 간섭으로 인한 것으로 사료된다. 가력부의 반대에 위치한 내부 연결 플레이트에서는 시험체의 정중앙에서 인장 변형률이 가장 높게 나타나는 결과를 보였다.

모듈형 시험체 SP-MF와 달리 파형관을 삽입한 SP-MC의 경우에는 일체형 시험체와 마찬가지로 가력부의 반대위치에서 콘크리트의 인장변형이 높게 나타났다. 원형 접합 강재 플레이트의 경우 가력부 반대 위치에서의 인장변형이 시험체의 정중앙보다는 양쪽에 인접한 접합부에서 더 높게 나타

났으며, 이는 SP-MF와는 달리 segment 접합부 사이에 강재 플레이트가 없는 구조이기 때문인 것으로 사료된다.

초기 탄성구간에서의 하중이 일체형 시험체에서 높게 나타났고 가력 후반부 소성구간으로 갈수록 모듈형 시험체의 하중이 983 kN, 930 kN까지 증가하면서 일체형 시험체 최대하중의 95%, 90% 까지 도달하는 경향을 나타냈다. 이는 모듈형 시험체의 콘크리트의 불연속성으로 인한 것으로 사료되며, 중국에너지소산도의 계산결과에서도 이로 인한 결과를 확인할 수 있었다.

따라서 ICH RC 구조를 적용한 모듈형 보가 일체형 보와 유사한 거동을 확보하기 위해서는 철근 커플러의 보강과 접합부에 대해서 콘크리트의 연속성을 확보하기 위한 대안이 필요할 것으로 판단되며, 세그먼트 사이에 삽입되는 연결 플레이트는 하중이 재하되는 위치에 따라 사용 유무를 결정하고 배치위치를 결정해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 12기술혁신E09) 및 한국해양과학기술원(KIOST)의 “조류에너지 융복합 발전기술 개발(PE99521)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Annamalai, G., and Brown, R.C.Jr. (1990) Shear-transfer Behavior of Post-tensioned Grouted Shear-key Connections in Precast Concrete-framed Structures. *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 1, pp. 53-59.
- Gabel, J. (2016) 2016 Another Record-breaker for Skyscraper Completions: 18 “Tallest Titles” Bestowed. Council on Tall Buildings and Urban Habitat.
- Han, T.H., Stallings, J.M., Cho, S.K., and Kang, Y.J. (2008) Behaviour of a Hollow RC Column with an Internal Tube. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 62, No. 1, pp. 25-38.
- Han, T.H., Won, D., and Kim, S. (2013) Applicability of Double-skinned Composite Tubular Member for Offshore Wind Turbine Tower. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 4, pp. 55-66.
- Han, T.H., Yoon, K.Y., and Kang, Y.J. (2010) Compressive Strength of Circular Hollow Reinforced Concrete Confined by an Internal Steel Tube. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 9, pp. 1690-1699.
- Kim, C.S., Park, H.G., Choi, I.R., Chung, K.S., and Kim, J.H. (2010) Structural Performance of Concrete-encased Steel Columns Using 800 MPa Steel and

- 100 MPa Concrete. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 22, No. 5, pp. 497-509.
- Kim, S., Kim, J.J., and Han, T.H. (2016) Section Design of Internally Confined Hollow Reinforced Concrete Wind Power Tower. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 4, pp. 163-174.
- KCI (Korea Concrete Institute) (2012) *Structural Concrete Design Code*.
- KSSN (Korean Standards Service Network) (2013a) *KS D 3507, Carbon Steel Pipes for Ordinary Piping*.
- KSSN (Korean Standards Service Network) (2013b) *KS F 4306, Pretensioned Spun High Strength Concrete Piles*.
- Lee, H.L., Kim, H.J., and Hwang, W.S. (2011) Behavior of the Foundation of Concrete Filled Steel Tubular Pier. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 24, No. 5, pp. 491-498.
- Roland Berger Strategy Consultants (2013) *Offshore Wind Toward 2020*.
- Zaleski-Zamenhof, L.C., Gerwick, B.C., Hellesland, J., Matsuishi, M., and Zhang, X. (1990) Concrete Marine Structures: A State-of-the-art Review. *Marine Structures*, Vol. 3, pp. 199-235.
- Zhan, F.A., Park, R., and Priestly, M.J.N. (1990) Flexural Strength and Ductility of Circular Hollow Reinforced Concrete Columns without Confinement on Inside Face. *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 2, pp. 156-166.

Received	■ August 24, 2017
Revised	■ August 28, 2017
Accepted	■ January 15, 2018