

유공강판 전단연결재로 보강된 강관말뚝 머리의 인발실험

이경훈
국민안전처 중앙119구조본부

Pull-out Test of Steel Pipe Pile Reinforced with Hollow Steel Plate Shear Connectors

Kyounghun Lee

National 119 Rescue Headquarters, Ministry of Public Safety and Security

요약 본 연구의 목적은 유공강판 전단연결재로 보강된 강관말뚝의 인발실험을 통하여 구조성능을 평가하는 것이다. 인발 실험에 앞서 재료의 특성을 파악하기 위하여 콘크리트 압축강도 실험을 수행하였으며, 실험에 사용되는 철근 및 철관의 항복 하중, 인장강도 및 연신율 등의 재료적 특성을 미리 파악하였다. 유공강판 전단연결재로 보강된 강관말뚝의 인발실험은 2,000kN 용량의 UTM을 이용하여 0.01mm/sec 재하속도의 변위제어 방법으로 실험을 수행하였다. 계측을 위하여 철근 및 유공강판 중앙에 strain gauge를 부착하였으며, 가력판과 충전콘크리트 사이의 상대변위 측정을 위하여 변위계(LVDT)를 설치하였다. 유공강판 전단연결재로 보강된 실험체의 항복하중은 각각 923.8kN과 981.1kN으로 기존 설계법에 의하여 제작된 실험체의 항복하중인 641.7kN에 비하여 1.44배 ~ 1.53배 증가됨을 알 수 있었다. 또한 유공강판 전단연결재로 보강된 실험체의 극한하중은 각각 1004.4kN과 1055.5kN으로 기존 설계법에 의하여 제작된 실험체의 극한하중인 813.7kN에 비하여 1.23배 ~ 1.29배 증가됨을 알 수 있었다. 반면, 유공강판 전단연결재로 보강된 실험체의 항복변위 및 극한상태의 변위는 기존 설계법에 의하여 제작된 실험체에 비하여 각각 0.61배 및 0.42배 감소됨을 알 수 있었다. 따라서 유공강판 전단연결재로 보강된 강관말뚝은 강성은 증가하고 상대변위 및 변형률은 낮게 측정되어 기존 말뚝머리 보강방법을 대체할 수 있는 적절한 보강 방법임 알 수 있었다.

Abstract The purpose of this study was to evaluate the structural capacity of steel pipe pile specimens reinforced with hollow steel plate shear connectors by pull-out test. Compressive strength testing of concrete was conducted and yield forces, tensile strengths and elongation ratios of re-bars and hollow steel plate were investigated. A 2,000kN capacity UTM was used for the pull-out test with 0.01mm/sec velocity by displacement control method. Strain gauges were installed at the center of re-bars and hollow steel plates and LVDTs were also installed to measure the relative displacement between the loading plate and in-filled concrete pile specimens. The yield forces of the steel pipe pile specimens reinforced with hollow steel plate shear connectors were increased 1.44-fold and 1.53-fold compared to that of a control specimen, respectively. Limited state forces of steel pipe pile specimens reinforced with hollow steel plate shear connectors were increased 1.23-fold and 1.29-fold compared to that of a control specimen, respectively. Yield state displacement and limited state displacement of steel pipe pile specimens reinforced with hollow steel plate shear connector were decreased 0.61-fold and 0.42-fold compared to that of a control specimen, respectively.

Keywords : Limited State Force, Pull-out Test, Steel Pipe Pile, Hollow Steel Plate Shear Connector, Yield State Force

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

건축·토목 구조물을 시공하는 경우 지내력이 확보되지 않을 때에는 파일기초 등의 공법을 적용하여 구조물의 하중을 지반으로 전달한다. 상부구조물로부터 전달되

*Corresponding Author : Kyounghun Lee(Ministry of Public Safety and Security)

Tel: +82-53-712-1052 email: leekhun@korea.kr

Received October 14, 2016

Revised (1st November 15, 2016, 2nd November 23, 2016)

Accepted December 8, 2016

Published December 31, 2016

는 모든 하중을 지반 자체의 내력으로 지지하기 어려운 경우 확대기초는 기초 저면하부에 말뚝을 견고한 지반까지 근입하여 구조물의 지지력을 확보할 수 있다. 근래에 건설장비의 발달로 대구경 강관말뚝의 시공이 가능해짐에 따라 강관말뚝 한 본이 받는 하중이 커지고, 지진하중과 같은 동적하중에 대한 설계가 강조되어 말뚝기초의 안전성을 새롭게 검토할 필요가 생겼다. 이때 말뚝은 철근콘크리트인 확대기초와 접합이 필요한데, 그 결합방법에 따라 말뚝에 전달되는 작용력이 변화하고 또한 구조물의 중요도에 따라 그 방법을 결정한다. 이러한 결합방법은 기준에서 말뚝머리 보강방법이라고 한다.

현재 말뚝머리 보강방법으로 확대기초 내에 약게 100mm 정도 근입하고 보강수직철근을 활용하는 방법이 작업성과 배근의 용이성의 이점으로 일본, 중국 등에서도 널리 적용되고 있다. 국내는 몇 차례의 시방서 개정으로 말뚝머리 보강방법을 표준화하기에 이르렀고, 다양한 연결방법에 대한 실험적 연구가 축적되었다.

본 연구에서는 현행 설계기준상의 강관말뚝머리 연결부 결합방법이 갖고 있는 다양한 문제점을 개선하고자 유공강관 전단연결재를 활용한 새로운 보강방법을 고안하여 거동특성을 실험적으로 규명하였다.

1.2 기존연구

유공강관 전단연결재(Hollow Steel Plate Shear Connector)는 강합성 거더교에 적용하는 스티드의 피로 문제를 해결하기 위하여 Zellner(1987)에 의해 제안된 강재 스트립형 구조요소(Perforated Flat Bar)로써, 삼입강관에 가공된 홀에서의 다웰작용(Dowel Action)으로 작용하중에 의한 수평전단력 및 수직분리력에 저항하는 결합용 구조요소이다. 이러한 유공강관 전단연결재는 기존의 스티드에 비해 전단강도, 피로특성 및 시공성 등이 우수한 것으로 밝혀진 후 이에 대한 관심과 적용사례가 증가되어 왔다.

Veldanda(1992) 등은 직접전단 실험(Push-over Test)을 통하여 유공강관 전단연결재와 스티드 전단연결재의 성능을 비교하였으며, Oguejiofor(1992, 1994, 1997) 등은 합성보 실험을 통하여 유공강관 전단연결재의 안전성에 대한 평가와 전단강도 평가식을 제안하였다. 이후 Sara(2002) 등은 강재와 콘크리트 접촉면에서의 부착강도를 고려하여 Oguejiofor가 제안한 전단강도 평가식에 대한 수정식을 제시하였다. 또한, Machaeck(2002),

Valente(2004)등에 의해 경량콘크리트를 이용한 유공강관 전단연결재의 전단강도 및 거동에 대한 연구가 수행되었으며, 현재도 상세 및 하중에 따른 구조적 특성규명과 다양한 구조 시스템에 적용하기 위한 관련연구가 지속적으로 수행되고 있다.

2. 보강방법 및 재료실험

2.1 이론적 고찰

국내 도로교 설계기준에서 규정하고 있는 말뚝머리의 설계방법을 정리하면 다음과 같다.

- ① 확대기초 콘크리트 수직지압응력

$$f_{cv} = \frac{P_{max}}{\pi D^2/4} \leq f_{va} \quad (1)$$

여기서, P_{max} 는 말뚝에 작용하는 최대 연직하중(kN), f_{cv} 는 최대 평균압축응력(MPa), D 는 강관말뚝의 직경(mm), f_{va} 는 연직하중에 대한 콘크리트의 허용지압응력(MPa)

- ② 확대기초 콘크리트의 수직방향 편칭전단응력

$$\tau_{cv} = \frac{P_{max}}{\pi(D+h)h} \leq \tau_{va} \quad (2)$$

여기서, τ_{cv} 는 최대 평균전단응력(MPa), τ_{va} 는 연직하중에 대한 콘크리트의 허용편칭전단응력(MPa), h 는 확대기초 유효두께(mm)

- ③ 확대기초 콘크리트의 수평지압응력

$$f_{ch} = \frac{P_{Hmax}}{D \cdot T} \leq f_{ha} \quad (3)$$

여기서, P_{Hmax} 는 말뚝에 작용하는 최대 수평하중(kN), f_{ch} 는 최대 평균수평지압응력(MPa), T 는 강관말뚝의 매입길이(=100mm), f_{ha} 는 수평하중에 대한 콘크리트의 허용지압응력(MPa)

④ 확대기초 콘크리트의 수평방향 편칭전단응력

$$\tau_{ch} = \frac{P_{max}}{H'(2T+D+2H)} \leq \tau_{va} \quad (4)$$

여기서, τ_{ch} 는 수평편칭전단응력(MPa), τ_{va} 는 수평하중에 대한 콘크리트의 허용편칭전단응력(MPa), H' 은 수평방향의 편칭전단에 저항하는 확대기초의 유효두께(mm)

2.2 말뚝머리 보강방법 및 재료실험

국내의 설계기준에서 제시하고 있는 일반적인 말뚝머리 연결부의 결합방법은 강결합 방식과 현지결합 방식의 두 가지 형태로 구분될 수 있으며, 각 설계기준에서는 발생 가능한 모든 응력에 충분한 저항성능을 확보할 수 있도록 말뚝머리 연결부의 결합방법에 대한 다양한 상세를 규정하고 있다.

일반적으로 토목구조물은 일반 구조물에 비하여 상대적으로 높은 중요도를 보유하고 있어 다양한 연구를 통한 명확한 설계법이 정립된 강결합 방식이 적합한 것으로 알려져 있으며, 현행 국내 도로교설계기준 역시 말뚝과 확대기초의 결합부인 말뚝머리에 대해 고정으로 설계함을 원칙으로 규정하고 있다.

본 연구에서는 구조실험을 수행하기 위한 재료의 특성을 파악하기 위하여 콘크리트의 압축강도 실험을 수행하였다. 실험체는 150mm x 300mm크기의 원형 공시체를 제작하였으며, 5,000kN 용량의 UTM을 이용하여 실험을 수행하였으며 그 결과는 Table 1과 Figure 1과 같다. 또한 실험체 제작에 사용된 철근과 유공강판 전단연결재, 강관말뚝의 재료특성은 Table 2와 같다.

3. 유공강판 보강구조의 인발성능 실험

3.1 실험개요 및 방법

본 연구에서는 매입식 유공강판 말뚝머리 보강구조를 적용한 말뚝 머리부의 인발하중 전달 메카니즘을 규명하고 전단돌기형 유공강판 연결재를 적용 시 인발하중에 대한 강관말뚝 머리부의 인발내력을 평가하기 위한 인발 실험을 수행하였다. 본 실험은 인발하중에 대한 속채움 콘크리트와 강관간의 합성거동을 확인하고, 일정 매립깊이(설계기준, 1.0D+100 mm)에 대한 유공강판 형상, 즉

전단보강 돌기의 유무, 다웰작용을 위한 폐쇄형 및 개방형 구멍 등이 인발거동에 미치는 영향을 확인하는 데에 목적이 있다.

실험체는 Table 3과 같으며, 지름 406mm 강관을 이용한 기존 도로교설계기준에서 제시하는 머리보강방법 실험체(NPPT-10SB)와 6개의 유공강판 연결재를 등간격 배치한 머리보강방법 실험체 3종류를 제작하였다. 유공강판을 이용한 머리보강 방법 실험체는 25mm 관통홀을 가진 유공강판 실험체(NPPT-10PO), 폭 15mm와 길이 30mm의 전단보강 돌기를 가진 유공강판 실험체(NPPT-10PO-S) 및 폭 15mm와 길이 40mm의 측면 홈을 가진 유공강판 실험체(NPPT-10PU)로 구분하여 제작하였다. 단, 유공강판의 경우에는 강관의 폭을 75mm와 65mm로 달리하여 제작하였는데, 이는 관통홀 지름 및 돌기와 측면 홈의 폭을 고려하여 강관의 유효 폭이 모든 실험체에서 동일하게 50mm가 되도록 하기 위한 것이다.

Table 1. Compressive Strength Test Results

	No.1	No.2	No.3	No.4
Compressive Strength (MPa)	36.8	39.2	38.0	36.8
Mean Value of Compressive Strength(MPa)	37.7			

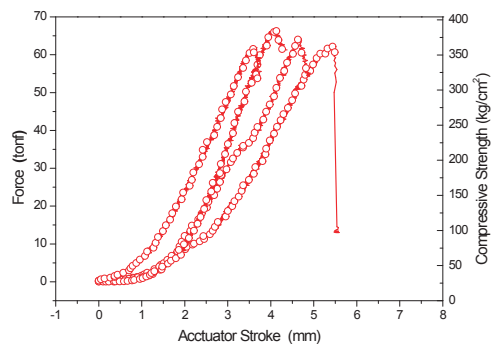


Fig. 1. Compressive Strength Test Results

말뚝머리 보강방법의 인발실험은 Figure 2의 가력 계획처럼 2,000kN 용량의 UTM을 이용하여 0.01mm/sec 재하속도의 변위제어 방법으로 실험을 수행하였다. 실험 중 거동 계측을 위하여 철근 및 유공강판 중앙에 변형률 게이지를 부착하였고, 가력판과 충전콘크리트 사이의 상대변위를 계측하기 위하여 변위계를 설치하였다. 계측대

이터는 TDS-303 data logger를 통해 수집하였으며 Figure 3은 인발시험 가력 실험체의 상세를 나타낸 것이다.

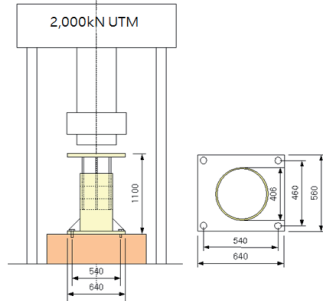


Fig. 2. Loading Plan

Table 2. Summary of Specimens

	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation Ratio (%)
H10	607.5	707.1	17.2
H13	524.4	650.9	18.1
H16	490.1	584.9	18.1
H19	475.7	581.8	18.3
H22	579.6	569.2	17.3
Steel Pile	242.1	418.8	-
Steel Plate	321.4	441.5	33.7

Table 3. Summary of Specimens

Specimens	Reinforcing Type	Hollow Steel Plate
NPPT-10SB	Re-bar HD19, 8ea	-
NPPT-10PO	Hollow Steel Plate 75x800x7, 6ea	Φ25 Hollow
NPPT-10PO-S	Hollow Steel Plate 65x800x7, 6 ea	30x15 bump
NPPT-10PU	Hollow Steel Plate 65x800x7, 6 ea	40x15 side groove

3.2 실험결과 및 분석

3.2.1 거동 계측 결과

인발시험 전경은 Figure 4와 같으며 실험결과를 살펴 보면, 도로교설계기준(2009)에 의거하여 제작한 철근망 합성 실험체(NPPT-10SB 실험체)는 하중 810.9kN (=82.7tonf)에서 철근이 파단되었고, 측면 개방형 유공강관 연결재를 적용한 합성 실험체(NPPT-10PU 실험체)는 하중 851.2kN(=86.9tonf)에서 유공강관과 재하용 고정 강관 간의 용접부 파단으로 실험을 중단하였다. 그 외의 실험체는 강관의 소성변형 또는 용접부 파단이 나타나지 않았고, 가력 목표치까지 하중을 가력하여 실험을 종료 하였다.

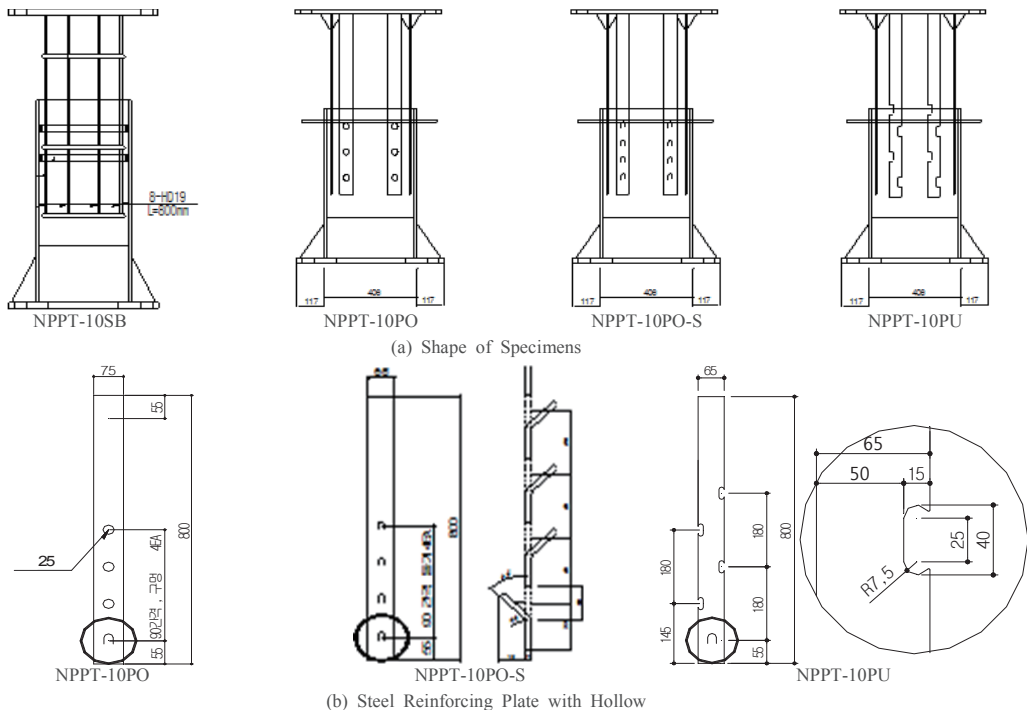


Fig. 3. The Shapes of Shear Reinforced Specimens



Fig. 4. Pullout Test

각 실험체별 하중-변위 관계곡선과 하중-변형률 관계 곡선은 Figure 5 ~ Figure 8과 같다. 여기서 변위는 유압가력기에 고정된 상부 가력판과 충전 콘크리트 표면간의 상대변위로서 충전 콘크리트에 매립된 철근 또는 강관이 인발하중에 의해 뽑혀 나오는 변위량을 의미한다. 변형률은 철근 및 강관의 노출부 중앙에 부착한 변형률 게이지로 측정한 결과이며, 인발하중에 의한 인장변형률을 나타낸 것이다.

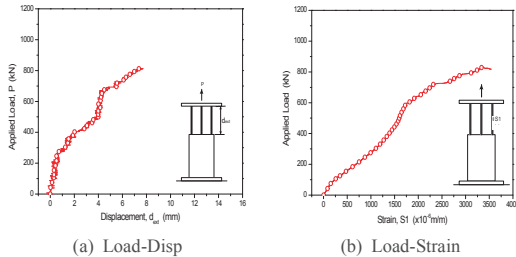


Fig. 5. Test Results of NPPT-10SB Specimen

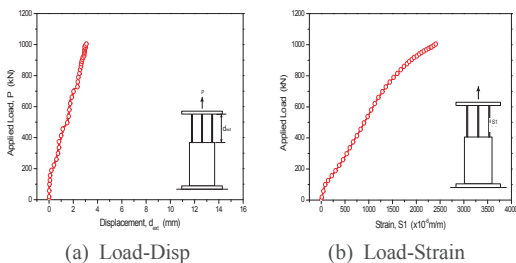


Fig. 6. Test Results of NPPT-10PO Specimen

3.2.2 계측 결과 종합

각 실험체의 항복하중 및 최대하중을 비교한 결과를 Table 4에 나타내었다. 항복하중은 변형률 0.2%에 대응하는 가력하중으로 정한 것으로서, 유공강관 연결재에

의한 말뚝머리 보강 실험체(NPPT-10PO 및 NPPT-10PO-S)가 기존 도로교 설계기준의 철근망 합성방법에 의한 실험체(NPPT-10SB)에 비하여 항복하중이 최대 약 43% 증가하는 것으로 나타났다. 항복변위도 기존 철근망 합성 보강방법(도로교설계기준 머리보강방법)에 의한 실험체가 다른 실험체에 비해 약 1.5배 큰 상대변위를 보임으로써 전단 돌기형 유공강관 연결재에 의한 합성방법이 기존 보강방법을 대체할 수 있는 인발내력을 갖는 것으로 나타났다.

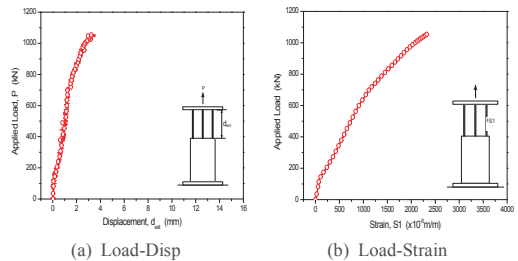


Fig. 7. Test Results of NPPT-10PO-S Specimen

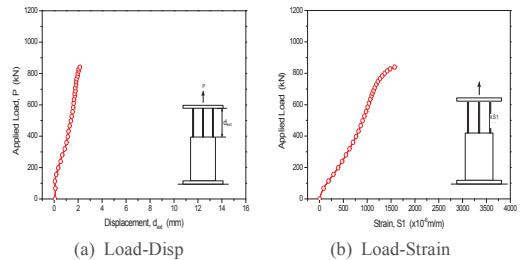


Fig. 8. Test Results of NPPT-10PU Specimen

Figure 9는 유공강관 말뚝머리 보강 인발실험체의 하중-변위 관계곡선과 하중-변형률 관계곡선을 비교한 것으로서, 재하초기에는 모든 실험체가 동일한 초기 강성을 보였으나 약 265kN 재하 이후에 기존 설계기준의 머리보강방법으로 합성 보강한 실험체(NPPT-10SB)의 변위 증가율이 크게 증가하여 인발내력이 저하되는 경향이 나타났다. 기존 철근망 합성 보강방법에 비하여 유공강관 연결재를 적용하는 경우에는 인발하중에 대한 강성이 약 2.2~2.5배 증가하는 것으로 나타났으며, 유공강관 연결재의 관통 홀 형상에 따른 강성차이는 미미하지만, 전단합성 기능을 갖는 돌기형 유공강관 연결재 보강방법 실험체(NPPT-10PO-S)의 인발강성이 상대적으로 가장 우수한 것으로 나타났다. 이는 유공강관의 보강 형상과

무관하게 모든 단순 유공강관 연결체를 적용한 실험체가 동일한 유효폭을 갖고 있지만, 원형 또는 개방형 유공강관 실험체는 관통홀에서 콘크리트 다웰의 전단지압강도와 강관 면에서 전단마찰저항으로 인발력에 저항하는 반면 전단 돌기형 전단보강 유공강관 연결체의 경우에는 강관 돌기의 쉐기효과에 의해 전단내력이 증가한 것으로 판단된다.

Table 4. Test Results

Specimens	Yield Force(kN)	Disp. (mm)	Max. Force(kN)	Disp. (mm)	note
NPPT-10SB	641.7	4.3	813.7	7.6	Rebar Fracture
NPPT-10PO	923.8	2.8	1004.4	3.2	-
NPPT-10PO-S	981.1	2.6	1055.5	3.3	-
NPPT-10PU	Fracture before yielding	-	848.4	2.2	Welding Fracture

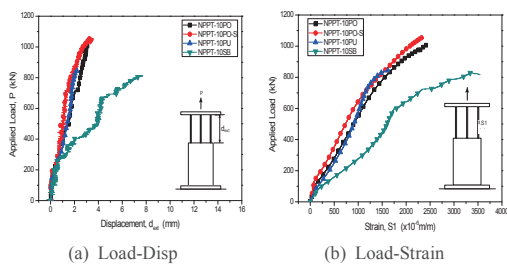


Fig. 9. Comparison of Test Results

4. 결론

본 연구에서는 건축 또는 토목구조물의 기초와 말뚝 구조물 사이의 접합성능을 향상시키는 방안 중의 하나로 유공강관 전단연결체로 보강된 강관말뚝의 인발성능 평가 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 유공강관 연결체로 보강된 말뚝머리 실험체(NPPT-10PO, NPPT-10-S)의 항복하중은 각각 923.8kN과 981.1kN으로, 기존 도로교 설계기준에 따라 제작된 실험체(NPTT-10SB)의 항복하중인 641.7kN에 비하여 약 1.44배 및 1.53배 증가하는 것을 알 수 있었다.
2. 극한하중을 살펴보면, 유공강관 연결체로 보강된

말뚝머리 실험체(NPPT-10PO, NPPT-10-S)의 극한하중은 각각 1004.4kN과 1055.5kN으로, 기존 도로교 설계기준에 따라 제작된 실험체(NPTT-10SB)의 극한하중인 813.7kN에 비하여 약 1.23배 및 1.29배 증가하는 것을 알 수 있었다.

3. 변위를 살펴보면, 유공강관 연결체로 보강된 말뚝머리 실험체(NPPT-10PO, NPPT-10-S)의 경우 항복상태 시 각각 2.8mm 및 2.6mm였으며 극한상태 시 각각 3.2mm 및 3.3mm로, 기존 도로교 설계기준에 따라 제작된 실험체(NPTT-10SB)의 항복상태 시 변위인 4.3mm에 비하여 각각 0.65배, 0.61배로 나타났으며, 극한상태 시 변위인 7.6mm에 비하여 각각 0.42배 및 0.43배로 나타났다.
4. 따라서, 유공강관 연결체로 보강된 말뚝머리 실험체의 강도는 항복상태 시 최대 1.53배, 극한상태 시 1.29배 증가되었으며, 상대변위는 각각 0.61배와 0.43배로 감소되어 기존 말뚝머리 보강방법을 대체할 수 있는 보강방법임을 알 수 있었다.

References

- [1] Machacek, J. and Studnicka, J., Perforated shear connectors, *Steel and Composite Structures*, 2(1), 51-66, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2002.2.1.051>
- [2] Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. (1992), Behaviour of perfbond rib shear connectors in composite beams: full size test, *Canadian Journal of Civil Engineering* 19(2), 224-235, 1992.
DOI: <https://doi.org/10.1139/192-028>
- [3] Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. (1994), A parametric study of perfbond rib shear connectors, *Canadian Journal of Civil Engineering* 21, 614-625, 1994.
DOI: <https://doi.org/10.1139/194-063>
- [4] Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. (1997), Numerical analysis of push-out specimens with perfbond rib connectors, *Computers & Structures* 62(4), 617-624, 1997.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(96\)00270-2](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(96)00270-2)
- [5] Sara, B.M. and Bahram, M.S. (2002), Perforbond shear connector for composite construction, *Engineering Journal*, 2-12, 2002.
- [6] Veldanad, M.R. and Hosain, M.U. (1992), Behavior of perfbond rib shear connectors : Push-out tests, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 19(1), 1-10, 1992.
DOI: <https://doi.org/10.1139/192-001>
- [7] Valente, I. and Cruz, P.J.S. (2004), Experimental analysis of perfbond shear connection between steel

and lightweight concrete, Journal of Constructional Steel Research, 60, 465-479, 2004.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(03\)00124-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00124-X)

- [8] Zellner, W., Recent designs of composite bridges and a new type of shear connectors, Engineering Foundation Conference on Composite Construction, 240-252, 1987.

이 경 훈(Kyjong-Hun Lee)

[정회원]



- 1999년 2월 : 경희대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 경희대학교 대학원 건축공학과 (공학박사)
- 2010년 3월 ~ 2011년 2월 : 성화 대학 전임강사
- 2011년 9월 ~ 2015년 5월 : 경기 도청 시설6급

- 2015년 5월 ~ 현재 : 국민안전처 중앙119구조본부 사무관

<관심분야>

건축구조, 건설안전