한국토목섬유학회논문집 제13권 1호 2014년 3월 pp. 33 ~ 40
J. Korean Geosynthetics Society Vol.13 No.1 March. 2014 pp. 33 ~ 40
DOI: http://dx.doi.org/10.12814/jkgss.2014.13.1.033
ISSN: 1975-2423(Print) ISSN: 2287-9528(Online)

지반조건에 따른 지중매설 연성관의 거동에 관한 연구

A Study on the Behavior of Buried Flexible Pipes with Soil Condition

이형규[1]*, 박준석[2]
Hyoung-Kyu Lee[1]*, Joon-Seok Park[2]

[1]*Member, Professor, Dept. of Civil Engineering Seoil Univ., 28, Yongmasan-Ro 90-gil, Jungnang-gu, Seoul, 131-702, Republic of Korea*
[2]*Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering Seoil Univ., 28, Yongmasan-Ro 90-gil, Jungnang-gu, Seoul, 131-702, Republic of Korea*

ABSTRACT

In general, pipes buried underground can be classified into either rigid or flexible pipe. Glass fiber reinforced thermosetting polymer plastic (GFRP) pipe can be considered as one of typical flexible pipes for which the soil-pipe structure interaction must be taked into account in the design. In this paper, we present the result of an investigation pertaining to the short-term and long-term behavior of buried GFRP pipe. The mechanical properties of the GFRP pipe produced in the domestic manufacturer are determined and the results are reported in this paper. In addition, Ring deflection is measured by the field tests and the finite element analysis. Also, the extrapolation using these techniques typically extends the trend from data gathered over a period of approximately 5,232 hours, to a prediction of the property at 50 years, which is the typical maximum extrapolation time. Therefore, it was investigated that the long-term ring deflection of GFRP pipe estimated by methods for Monod-type.

요 지

보통 지중에 매설되는 관은 강성관과 연성관으로 구분된다. 연성관 중 유리섬유강화플라스틱(Glass fiber reinforced thermosetting polymer plastic, GFRP)으로 이루어진 GFRP 관은 지중에 매설시 지반과 관의 상호관계를 고려하여 설계되어야 한다. 본 연구에서는 지중에 매설되는 GFRP 관의 장단기의 구조적 거동을 조사하고자 한다. 먼저, 국내에서 생산되는 GFRP 관의 역학적 성질조사를 하고, 현장매설실험과 유한요소해석을 수행하여 장기거동 예측에 대한 기초자료로 활용하였다. GFRP 관의 장기거동을 예측하기 위해 약 5,232시간 동안의 수직 관변형을 조사하였으며, 이를 바탕으로 최대 50년 동안의 관변형에 대하여 Monod-type 방법으로 예측하였다.

Keywords **:** GFRP pipe, Regression analysis, Finite element analysis, Short-term behavior, Long-term behavior

1. 서 론

기존 지중매설관으로 사용되고 있는 강재나 콘크리트 재질의 경우 시간이 지남에 따라 수송유체 및 지하수 등에 의한 부식으로 관의 내구성이 저하되어 구조적 안전성이 저하되고, 부분적인 파손의 위험뿐만 아니라 관의 수명이 단축되는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 섬유강화 열경화성 플라스틱(fiber reinforced thermosetting polymer plastic, FRP) 재질로 구성된 지중매설관의 적용이 활성화되고 있다. 플라스틱 재질의 지중매설관은 소구경을 주로 사용하였으나 관 재질 및 관 제조에 대한 기술의 발달로 대구경까지 다양하게 사용되고 있다(Park, 2012).

GFRP 관을 지중에 매설할 경우 강성관과 달리 지반과 상호작용하여 외부하중에 대해 저항하기 때문에 관 하부

Received *13 Dec. 2013,* ***Revised*** *14 Feb. 2014,* ***Accepted*** *17 Feb. 2014*
****Corresponding author***
Tel: +82-2-490-7442; Fax: +82-2-490-7809
E-mail address: soilgeo@seoil.ac.kr (H.-K. Lee)

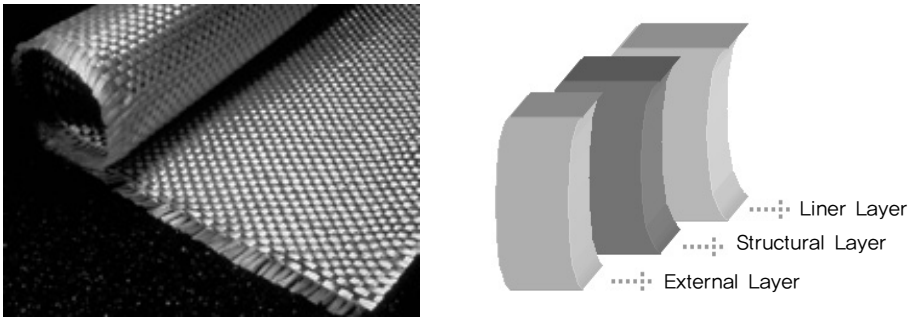


Fig. 1. Composition of GFRP

의 기초, 관 주변 토사, 되메움토의 특성, 하중 등 지중매설 상태에서 관의 구조적 거동에 미치는 영향을 모두 포함하여 설계하여야 한다. 현재 지중매설 연성관의 설계는 Korea Water and Wastewater Works(2010)에서 제시한 설계방법을 적용하고 있지만 이 설계식은 지반의 조건이 고려되지 않고 있어 지반과 관의 상호작용에 의한 구조적 거동을 고려하지 않고 있는 문제가 있다. 한편, 미국, 독일 등 기술선진국의 연성관 설계방법은 ASTM, ISO 등에서 제시한 지반조건을 고려하여 설계하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 ASTM, ISO 등에서 제시하고 있는 시험법들을 적용하여 GFRP 관에 대한 재료실험, 유한요소해석 등의 연구를 수행하여 장기거동을 예측하기 위한 기초자료를 제시하였다. 또한, 지중매설 GFRP 관에 대한 지반조사와 5.232시간의 현장매설실험 결과를 분석하여 기존 Kim (2011)이 연구한 Monod-type 관변형식을 적용으로 최대 50년 후의 장기적인 거동을 예측하였다.

2. GFRP 관의 역학적 성질

지중에 매설되는 GFRP 관의 구조적거동을 예측하기 위해서는 GFRP 관을 구성하는 재료의 역학적 성질을 파악하여야 한다. 본 연구에서는 GFRP 관을 구성하는 필라멘트와인딩 GFRP에 대한 압축강도실험 및 편평시험(parallel plate loading test)을 수행하여 GFRP 관의 역학적 성질을 조사하였다. 또한, 조사된 GFRP 관의 역학적 성질은 지중매설 GFRP 관의 단기거동 및 장기거동 예측에 기초자료로 활용하였다. GFRP 관의 역학적 성질을 조사하기 위한 시편의 구성은 Fig. 1과 같다. GFRP 관의 구조는 삼층구조로 안쪽부터 바깥쪽으로 liner layer(내식층), structural layer(보강층), external layer(외부층)로 구성된다.

2.1 GFRP 관의 축방향 압축강도실험

GFRP 관의 축방향 압축강도를 확인하기 위하여 본 연구에서는 GFRP 관을 ϕ150×300mm, 두께 6mm의 치수로 3개의 시편을 제작하여 압축실험을 수행하였다. GFRP관 압축강도실험은 100mm의 용량을 갖는 변위계(LVDT, linear variable differential transformer)를 설치하여 길이방향 압축변위를 측정하도록 하였으며, 만능재료시험기(UTM)을 이용하여 하중을 재하하였다. 하중은 변위제어 방식으로 3mm/min의 속도로 재하하였다. GFRP 원통관 압축실험 결과 모든 시편의 파괴는 섬유배치방향으로 균열이 발생하면서 파괴되었다. 실험결과는 Table 1에 정리하여 나타내었다. Table 1에서 길이방향의 탄성계수와 파괴강도는 유한요소해석에서 GFRP 관의 재료적 성질에 적용하였다.

Table 1. Compression test result of FRP

Specimen No.	Max. load (kN)		Max. displacement (mm)		Longitudinal modulus of elasticity (kPa)	Max. strength (kPa)
	Experimental	Average	Experimental	Average	Average	Average
CC-1	251.55	258.32	5.88	7.40	11,780,000	38,260
CC-2	265.73		7.77			
CC-3	257.67		8.54			

2.2 GFRP 관의 원강성실험

GFRP관 원강성시험은 KS M ISO 9969(2004)을 참고로 하여 수행하였다. 원강성시험에 사용된 시편은 내경 2,400mm, 두께 44.5mm, 폭 480mm로 제작하였다.

GFRP관 원강성시험은 100kN 용량의 원강성시험기를 이용하여 하중을 재하하였다. 시험결과 최종파괴단계에서 GFRP 관은 하중이 재하되는 부분의 외부층과 보강층이 분리되며 파괴되었다. 시험결과 주요값들은 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Table 2에서 관의 강성(pipe stiffness)은 GFRP 관의 장기거동을 예측하기위한 중요한 요소이다. ASTM D 2412 (2010)에서는 지중매설된 연성관의 관변형을 예측하기 위한 관의 강성을 식 (1)을 통해 결정하도록 제안하고 있다.

$$PS = \frac{F}{\Delta y} = 6.7\frac{EI}{r^3} \quad (1)$$

식 (1)에서 PS는 원강성시험으로부터 결정하며, 시험으로부터 5%의 관변형에 해당하는 단위길이당 힘(F)을 수직변위(Δy)로 나눈 값이다. 또한 E는 GRP관의 탄성계수, I는 GRP관의 길이방향 단위길이당 단면2차모멘트($=t^3/12$), r은 GRP관의 반경이다. 따라서, 식 (1)과 원강성시험 결과를 사용하여 원주방향의 탄성계수를 구할 수 있다. GFRP 관에 대한 원강성시험 결과를 분석하여 얻은 원주방향 탄성계수는 Table 2에 나타내었다.

3. GFRP 관의 지중매설실험

지중매설 GFRP 관의 외압하중에 대한 구조적 거동을 조사하기 위해 현장에서 GFRP 관을 매설하고 약 5,232시간 동안 시공과정 및 시공후 기간 동안 관변형을 계측한 바 있으며, 실험내용을 정리하면 다음과 같다.

3.1 지중매설실험

GFRP 관의 외압하중에 의한 구조적 거동을 조사하기 위해 GFRP 관을 지중에 설치하고 관상부에 되메움토를 16m 성토하여 시공을 수행하였으며, 시공단계부터 관변형을 측정하였다.

현장 지중매설실험은 내경 2,400mm GFRP관을 사용하였으며, 매설전경은 Fig. 2에 나타내었다. 설계에 고려된 GFRP 관은 관 길이방향으로 동일한 하중이 작용할 수 있도록 성토사면 부근 지중을 피해 16m 성토 구간에 설치하였으며, 10m길이의 관 3개를 연결하여 총 30m를 시공하였다. 성토사면 지중부근에는 관의 계측 및 진출입을 위해 내경 2,000mm GFRP관을 매설하여 내경 2,400mm관과 연결하였다.

기초지반 지지력은 평판재하시험을 통해 수행하였다. 평판재하시험은 GFRP 관을 매설하기전 기초지반을 대상으로 3개소에 대해 수행하였으며, 관의 매설위치 하부에서 관 길이방향으로 시작, 중간, 끝 부분에 대한 시험결과

Table 2. Ring stiffness test result of GFRP

Specimen No.	5% Displacement		Max. load (kN/m)	Circumferential modulus of elasticity (kPa)
	Load (kN/m)	Pipe stiffness (kPa)		
GFRP-1	74.35	619.56	1,765.88	23,000,000

Fig. 2. Construction of GFRP pipe

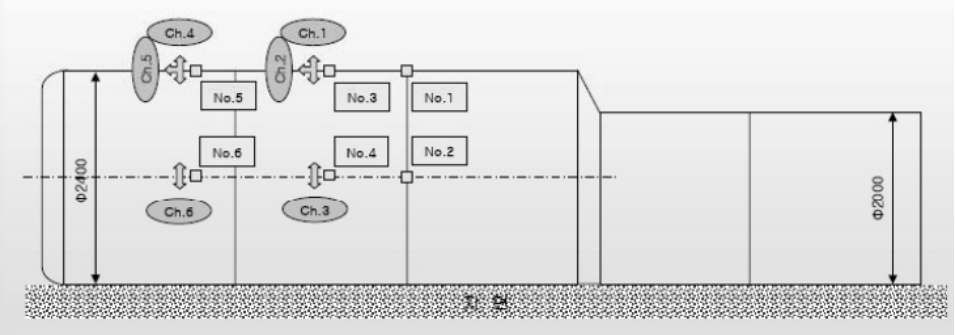


Fig. 3. Location of dial gage

이며, 383~436kPa의 지반지지력을 확보하고 있는 것으로 조사되었다. 또한, 관 상부의 되메움 토사는 약 30cm씩 층다짐하여 성토하였으며, 약 3층 단위로 들밀도시험을 수행하였다. 시험결과 GFRP관에 하중으로 작용하는 습윤단위중량(γ_t)은 약 2.019g/cm^{3}으로 조사되었으며, 다짐도는 95% 이상을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

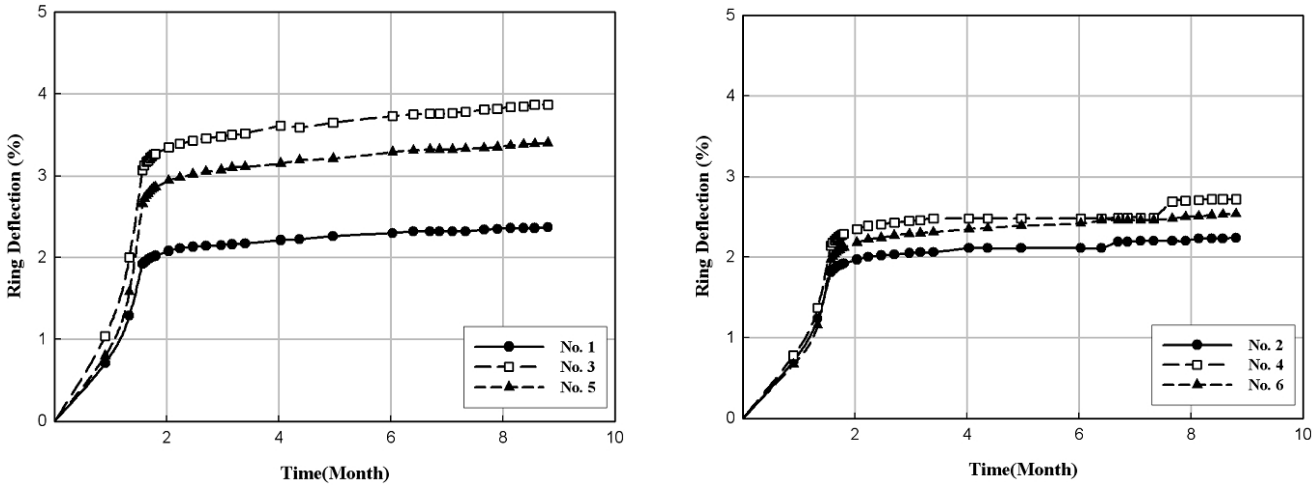
지중매설된 GFRP 관의 관변형 측정은 총 3개소에서 수행되었으며, 1개소당 수직방향과 수평방향을 측정하기 위해 6개소의 계측기를 설치하여 관변형을 측정하였다.

계측기 설치위치는 관중앙부(No. 3, No. 4), 관 연결부(No. 1, No. 2), 연결부에서 1.5m 거리(No. 5, No. 6)에 설치하였고, 계측기는 Dial gage를 사용하였다. 각 계측기의 설치위치는 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 지중매설실험 결과

GFRP 관의 지중매설실험 결과 관의 수직방향(No. 1, No. 3, No. 5)은 각각 최대 관변형 2.37%, 3.87%, 3.40%로 나타났으며, 관의 수평방향(No. 2, No. 4, No. 5)은 최대 2.24%, 2.72%, 2.54%로 각각 나타났다.

Fig. 4에서 수직방향과 수평방향 관변형은 모두 매설된 GFRP 관의 관중앙부(No. 3, No, 4)에서 가장 크게 나타나고 있다. 또한, 위치 No. 3, No, 4에서 토피고 10m에서 실험 종료시점까지의 관변형이 최대 2배가량 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 실험조건에서 관 단부가 내경 2,000mm관 및 마감처리에 의해 구속되어 있고, 관중앙부에서는 이 구속효과가 없기 때문에 비교적 큰 관변형이 발생한 것으로 판단된다. 또한, 관이 연결된 접합부(No. 1, No. 2)의 관변형이 비교적 작은 것은 연결부에서 핸드레이업 보강으로 관의 강성이 증가되어 발생한 현상이라고 판단된다. Fig. 4에서 시공초기 단계에서는 토피고가 증가하여 수직하중이 증가하기 때문에 관변형 또한 선형으로 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 16m의 성토가 종료된 시점부터는 관변형의 증가가 둔화되어 일정한 값에 수렴



(a) Vertical displacement (%)

(b) Horizontal displacement (%)

Fig. 4. Result of displacement

하는 경향을 갖는다. 이러한 현상은 관이 성토가 완료되었다고 하더라도 되메움 토사의 안정화 등에 의해 지중에서 하중의 변화가 발생하는 것으로 생각된다. 또한, 지중매설 GFRP관은 연직하중에 의해 수직방향으로 변형이 발생하고, 이 수직방향 변형(Δ_y)은 원형단면의 특성상 수평방향 변형(Δx)으로 전이되며, 수평방향 변형(Δx)은 주변 토사에 의해 구속된다. 따라서, 수직방향 변형이 모두 수평방향 변형으로 전달되지 않고 일부는 관내부에 에너지로 축적되기 때문에 일반적으로 연직하중이 재하될 경우 수직방향 변형은 수평방향 변형보다 크다(Timoshenko and Gere, 1961).

4. 지중매설 GFRP 관의 유한요소해석

본 연구에서는 지중매설 GFRP관에 대한 변수 및 단기적 거동을 분석하기 위해 MIDAS/GTS(2009)를 사용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 해석 내용 및 결과를 정리하면 다음과 같다.

4.1 지반특성

본 연구의 수치해석에 사용한 지반특성치는 시추조사자료와 현장밀도시험자료를 토대로 결정하였으며, 그 결과는 Table 3에 나타내었으며, 관 주변 기초에 대해서는 다짐상태를 반영하여 Table 4에 나타낸 바와 같은 특성치를 적용하였다.

4.2 유한요소해석

수치해석은 매설심도(5m, 10m, 16m)에 따른 GFRP 관의 거동을 분석하고 이를 현장계측결과와 비교하였다. 유한요소해석에 사용한 프로그램은 MIDAS/GTS 프로그램으로 지반해석분야에 광범위하게 사용하고 있는 해석프로그램이다. 해석모델링은 Fig. 5와 같이 GFRP 관 상부로

Table 3. Soil properties

Classification	Modulus of deformation E (kPa)	Poisson's ratio ν	Unit weight γ_t (kN/m^3)	Adhesion c (kPa)	Internal friction angle ϕ (°)
General Fill	40,000	0.30	20.19	0.0	35.0
Pipe Bedding Material	30,000	0.30	17.85	0.0	30.0
Residual soil #1	50,000	0.30	18.00	0.0	34.0
Residual soil #2	80,000	0.30	19.00	0.0	40.0
Weathered rock	15,000	0.30	20.00	30.0	35.0
Soft rock	30,000	0.25	22.00	50.0	40.0

Table 4. Soil properties of pipe bedding material

Classification	Modulus of deformation E (kPa)	Poisson's ratio ν	Unit weight γ_t (kN/m^3)	Adhesion c (kPa)	Internal friction angle ϕ (°)	Degree of compaction
PBM #1	30,000	0.30	17.85	0.0	30.0	Good
PBM #2	3,000	0.30	17.85	0.0	30.0	Poor

(a) Grid mesh (b) Modeling of GFRP pipe

Fig. 5. Modeling

Table 5. Compare of result

Embankment	Location	Result of FEM (mm)		Experimental result (mm)	
		Vertical displacement	Horizontal displacement	Vertical displacement	Horizontal displacement
5m	5m	−19.62	17.85	−17.02	17.09
	15m	−19.59	17.82	−24.88	18.71
	30m	−9.78	7.62	−19.29	16.13
10m	5m	−41.54	37.86	−31.14	29.74
	15m	−41.52	37.84	−48.04	32.80
	30m	−20.40	15.94	−37.95	27.78
16m	5m	−68.36	62.36	−46.08	43.52
	15m	−68.41	62.40	−73.79	51.33
	30m	−33.22	26.02	−63.89	47.19

5m, 10m, 16m로 단계별로 성토했을 경우 각각에 대해 모델링을 하였다. 해석에 사용한 지반특성치는 Table 4와 같으며, GRP관 주변 지반은 Pipe Bedding Material #2(Table 4 참조)의 불량한 다짐조건으로 가정하였다. 유한요소해석에 사용한 격자요소망은 Fig. 5와 같으며, GFRP 관은 Shell요소로 모델링하였으며, 해석에 사용한 GFRP 관의 재료특성치는 필라멘트와인딩 공정 특성상 GFRP관은 직교이방성(orthotropic)재료에 가깝기 때문에 이를 고려하기 위해 축방향 탄성계수와 원주방향 탄성계수의 기하평균값($E^* = \sqrt{E_x \cdot E_y}$)을 적용하였다(Kim, et al., 2012).

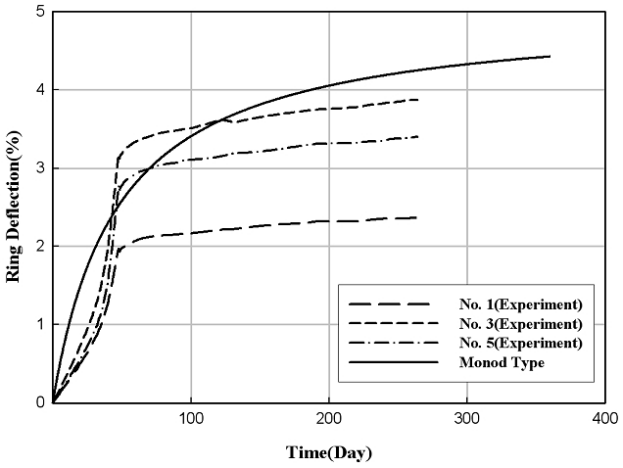
유한요소해석결과는 계측결과와 비교하여 Table 5에 나타내었다. 수치해석결과 시점부(5m 지점)와 종점부(30m 지점)에서 측정된 측정치와 해석결과의 차이가 큰 경향으로 나타났으나, GFRP 관의 중앙부에 해당하는 15m 지점에서는 계측치와 해석결과가 유사한 경향으로 나타났다. 이러한 이유는 30m 지점 단부가 마감 처리되어 구속되었기 때문에 이를 모델링에 반영한 결과이며, 5m 지점은 구속시키지 않았기 때문에 상대적으로 큰 변형이 발생한 것으로 판단된다. 또한, 관측면 되메움토의 다짐은 롤러 등을 사용하여 95%를 확보하고 있는 것으로 확인되었으나, 관에 가까울수록 다짐장비의 접근이 어렵기 때문에 헌치부에 대해서는 충분한 다짐이 이루어 지지 않아 관변형이 비교적 크게 발생한 것으로 생각된다. 따라서, 헌치부분에 대한 다짐을 철저히 관리해야 할 것이다.

5. 지중매설 GFRP 관의 장기변형 예측

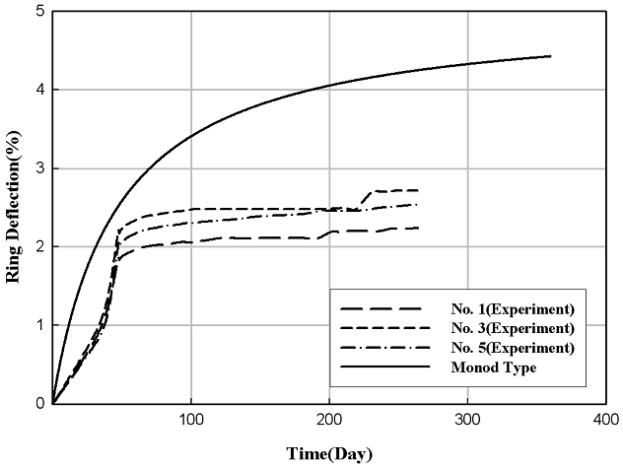
지중매설 연성관은 시공 초기단계에서의 관변형의 관리가 중요하다. 즉, 시공후 30일 이내에 측정한 관변형이 3%를 넘지 않는다면 50년 후에도 관변형은 5%를 넘지 않는 것으로 연구, 보고된 바 있다(Kim, 2011). 이러한 현상은 양질의 시공조건에서는 장기적으로 시공 초기단계 관변형의 1.5배를 넘지 않는 다는 것을 알 수 있으며, 관 주변 되메움 토사의 다짐도가 95% 이상이어야 한다. 이러한 연구자료와 실험적 연구를 통해 최근 Kim(2011)은 표준다짐 약 90% 이상의 경우 시공일수를 고려하여 Monod-type 관변형 예측식을 제안하였고, 실험결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. Kim(2011)의 연구결과를 본 연구의 현장실험결과 데이터를 적용하여 수정하면 식 (2)와 같다.

$$\mu(T) = \frac{15T}{140+3T} \tag{2}$$

식 (2)에서 μ은 시간경과에 따른 관변형이고, T는 매설 후 시간(day)을 의미한다. 또한, 식 (2)는 시공후 30일에 3%변형을 예측하고, 장기변형에 대해서는 5%에 수렴하는 수치를 제공한다. 식 (2)의 관변형 예측결과와 본 연구의 지중매설실험결과를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에서 일부 데이터가 식 (2)의 결과를 초과하는 경향을 보이고 있으나, 앞서 설명한 바와 같이 시공완료 직후에 발생한 현상으로 시공 후 1년 이내, 시공일수 약 100일을 초과하게 되면 식 (2)의 결과보다 작은 관변형이 측정되고 있다. 따라서, 50년 후 관변형은 5% 이내로 발생할 것으로 판단되며, Fig. 6(b)의 경우 계측된 관변형 데이터는 모두 식 (2)의 결과보다 작기 때문에 50년 후 5% 이내의 관변형을 예측할 수 있다.



(a) Vertical displacement



(b) Horizontal displacement

Fig. 6. Compare of prediction result

6. 결 론

본 연구는 최근 기존의 지중매설관을 대체할 수 있는 GFRP 관의 구조적 거동특성 평가, 현장매설실험 결과분석, 유한요소해석, GFRP 관의 장기변형 예측 등의 연구를 수행하였으며, 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 지중매설 GFRP 관의 관변형은 주로 원주방향 역학적 성질에 의해 결정되기 때문에 본 연구에서는 원강성 실험을 통해 GFRP 관의 원주방향에 대한 역학적 성질을 조사하였다. GFRP 관의 탄성계수 및 관의 강성을 측정한 결과 각각 23,000,000kPa, 619.56kPa으로 조사되었으며, 이 결과를 바탕으로 지중매설 GFRP 관의 유한요소해석에 적용하였다.

(2) 지중매설 GFRP 관의 구조적 거동 및 장기거동을 예측하기 위해서 약 5,232 시간의 현장매설실험을 수행하였다. 지중매설실험 현장의 지반을 조사한 결과 관 주변 되메움 토사는 SP로 분류되었으며, 다짐도는 95% 이상을 확보하고 있는 것으로 조사되었다. 또한, 현장에서 측정된 관변형은 시공초기 단계에서 토피고가 증가할수록 수직하중이 증가하기 때문에 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 토피고 16m의 성토가 완료된 시점에서 관변형 증가 경향은 둔화되었고 일정한 값에 수렴하는 현상을 나타내었다. 이러한 현상은 시간이 지남에 따라 지반이 안정화가 되고 관상부에 작용하는 하중이 관에 직접적인 영향이 둔화되는 것으로 판단된다.

(3) 지중매설 GRP관의 관변형에 대한 거동을 분석하기 위해 수치해석을 수행하였다. 해석결과 관의 강성을 감소시킨 경우 관변형의 변화는 매우 작은 것으로 평가되었으며, 관 주변 지반의 탄성계수를 감소시킨 경우 관변형이 증가하여 측정결과와 유사하게 나타났다. 따라서, 관 주변 현장토사의 다짐관리가 철저히 수행되어야 할 것으로 판단된다.

(4) 본 연구에서는 위 의 결과를 토대로 Kim(2011)이 제안한 Monod-type 관변형 예측법을 본 연구에서 수행한 지중매설실험에서 돌출한 결과를 바탕으로 수정된 식을 제안하였으며, 약 50년 후의 GFRP 관의 변형을 예측하였다. 그 결과 GFRP 관의 시공과 지반의 다짐 등 여러 변수들을 만족한다면 현재 Korea Water and Wastewater Works(2010)에서 제시하고 있는 연성관의 허용관변형인 5%의 기준을 만족하는 동시에 장기거동에 대한 예측이 가능하다고 판단된다.

Acknowledgement

The present research has been conducted by the Research Grant of Seoil University in 2012.

References

1. ASTM D 2412 (2010), *Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading*, American Society for Testing and Materials.

2. Kim, E. H. (2011), *Investigation of pipe deflection behavior and prediction of long-term ring deflection of GFRP pipe (φ 2,400mm) buried underground*, Hongik University Research Institute of Science and Technology Research Report. Seoul, Korea. (In Korean)
3. Kim, S. H., Ok, D. M., An, D. J., Hong, W. H., and Yoon, S.-J. (2012), "Prediction of long-term ring deflection of buried GFRP pipe." *The 2nd International Conference on Advanced Polymer Matrix Composites*.
4. Korea Water and Wastewater Works. (2010), *Guideline of Sewer System*, Korea. (In Korean)
5. KS M ISO 9969. (2008), *Thermoplastics pipes-determination of ring stiffness*, Korean Agency for Technology and Standards (KS), Seoul, Korea. (In Korean)
6. MIDAS/GTS. (2009), *Analysis reference*, MIDAS Information Technology Co., Ltd. (In Korean)
7. Park, J. S. (2012), *A Study on the Ring Deflection Limitation of Buried Flexible Pipes*, Ph.D Thesis, University of Hongik.
8. Timoshenko, S. P. and Gere, J. M. (1961), *Theory of Elastic Stability*, 2th Edition, McGraw-Hill, New York.