

영진만 지오텍스타일 튜브의 현장 시공계측 및 수리모형시험을 통한 안정성분석 Construction Monitoring of Geotextile Tube at Young-Jin Bay and Stability Analysis by Hydraulic Model Tests

신은철¹⁾, Eun Chul Shin, 오영인²⁾, Young In Oh, 이명호³⁾, Lee Myung Ho

- ¹⁾ 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental System Eng., University of Incheon
²⁾ 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 박사과정 수료, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil & Environmental System Eng., University of Incheon
³⁾ 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 석사과정, M.S. Student, Dept. of Civil & Environmental System Eng., University of Incheon

SYNOPSIS : Geotextile tubes hydraulically or mechanically filled with dredged materials have been applied in hydraulic and coastal engineering in recent years (shore protection structure, detached breakwater, groins and jetty). It can also be used to isolate contaminated material from harbor, detention basin dredging, and to use this unit as dikes for reclamation work. Recently, new preliminary design criteria supported by model and prototype tests, and some stability analysis calculations have been studied. The stability analysis of geotextile tube is composed geotechnical and hydrodynamic analysis. The stability check points are sliding failure, overturning, bearing capacity failure against the wave attack. In this paper presented the construction procedure and in-situ measurement (properties of filling material, effective height variation, stress variation at geotextile tube bottom) of geotextile tube at Young-Jin Bay and stability analysis by theoretical method and hydraulic model tests

Key words : Geotextile tube, Dredging, Construction monitoring, Stability, Hydraulic model tests

1. 서론

지오텍스타일 튜브를 활용한 해안침식방지 및 토사퇴적유도를 위한 해안구조물은 크게 이안제 (Detached Breakwater), 돌제(Groin), 도류제(Jetty)등을 들 수 있다. 또한, 항구와 유수지의 준설 시 오염토사의 처리공법으로도 많이 이용되고 있다. 최근 들어, 많은 기초적 연구와 실대형 현장시험을 바탕으로 지오텍스타일 튜브의 설계 및 안정성 분석방법이 연구되고 있다. 지오텍스타일 튜브의 안정성은 지반공학적 부분과 수리동역학적 부분에 대한 복합적인 안정성분석이 수행되어야 한다. 즉, 파도에 의해 발생된 과압에 대하여 활동, 전도, 지지력에 대한 안정성을 검토하여야 한다. 본 연구에서는 해안선의 침식방지와 토사퇴적을 유도하기 위하여 국내 최초로 지오텍스타일 튜브공법이 적용된 영진만의 지오텍스타일 튜브에 대하여 시공 시 현장계측을 실시하였으며, 이론적 방법을 통한 안정성분석과 수리모형시험을 통한 안정성 검토를 실시하였다. 현장 시공계측으로는 채움토사의 특성분석, 시공과정에서의 유효높이 변화, 지오텍스타일 튜브 채움에 따른 설치지반의 응력변화 등에 대하여 계측을 실시하였으며, 수리모형시험을 통하여 지오텍스타일 튜브의 안정성과 지오텍스타일에 발생하는 변형률에 대하여 연구를 수행하였다.

2. 영진만 지오텍스타일 튜브

2.1 설계 및 시공개요

본 연구대상 지역인 영진만은 강원도 강릉시 연곡동 영진해수욕장 지역으로 만을 이루고 있어, 조수의 이동과 파도로 인하여 백사장이 해마다 침식되는 지역이다. 따라서, 해안선의 침식방지와 토사퇴적을 유도하기 위하여 테트라포트(Tetrapod)와 지오텍스타일 튜브공법이 복합적으로 설계 및 시공되었다. 그림 2.1은 영진만에 설계된 테트라포트와 지오텍스타일 튜브의 평면도를 나타낸 것으로, 설치위치는 해안선으로부터 약 100~150m 위치이다. 평균수심이 약 4.0m이며, 테트라포트 2개소, 지오텍스타일 튜브는 길이 50m, 2열 4개소를 설치하여 총 240m의 해역을 담당하도록 설계되었다. 지오텍스타일 튜브의 채움진 직경은 3.0m, 채움 후 유효높이는 1.8m이며, 지오텍스타일 튜브바닥에는 규격 20m×60m의 침식방지용 매트를 설치하도록 하였다. 그림 2.2는 지오텍스타일 튜브의 설치단면도를 나타낸 것이며, 그림 2.3은 설치 상세도를 나타낸 것이다. 지오텍스타일 튜브의 채움작업은 최대용량 50psi의 배송펌프를 장착한 준설선을 이용하였으며, 크레인작업 및 기타 효율적인 시공작업을 위하여 폭 15m, 길이 49m의 무동력식 바지선을 이용하여 채움작업을 수행하였다.

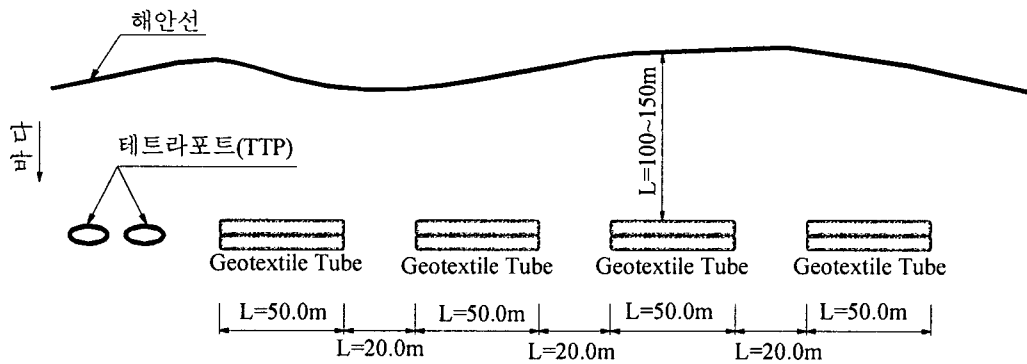


그림 2.1 영진만 지오텍스타일 튜브 설치평면도

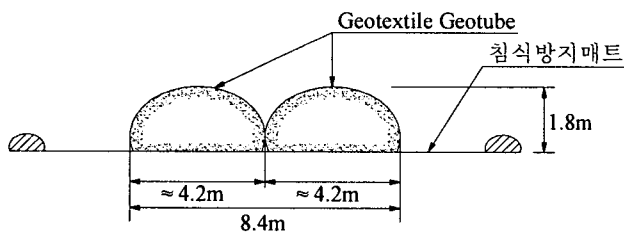


그림 2.2 지오텍스타일 튜브 단면도

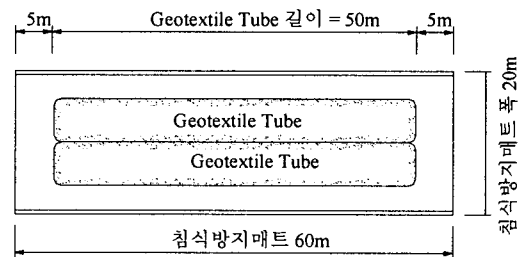


그림 2.3 지오텍스타일 튜브 설치상세도

2.2 채움토사 및 지오텍스타일

2.2.1 채움토사

지오텍스타일 튜브의 채움토사는 지오텍스타일의 배수 및 필터특성(유효입경), 시공후의 유효높이의 확보, 배송펌프의 종류를 고려하여 선정하여야 하며, 지오텍스타일 튜브공법의 최대장점인 신속한 시공을 위하여 현장 준설토사를 바로 준설하여 사용하는 것이 효율적이다. 일반적으로, 지오텍스타일의 배수 및 필터기능 만족하고 시공 후 유효높이의 변화가 거의 없는 조립질 모래가 지오텍스타일 튜브의 채움토사로 가장 효율적이다. 영진만 지오텍스타일 튜브의 채움토사는 시공현장의 인근 해저에서 준설한 모래를 사용하였으며, 준설선과 배송관을 활용하여 준설과 동시에 지오텍스타일 튜브 내부에 충전하였다. 영진만 지오텍스타일 튜브 채움토사의 공학적 특성시험 결과는 표 2.1에 나타낸 바와 같으며, 그림 2.4와 그림 2.5는 채움토사의 입도분포곡선과 다짐곡선을 나타낸 것이다.

표 2.1 채움토사의 공학적 특성

항목	특성값	항목	특성값
비중, G_s	2.64	최대건조밀도(g/cm^3)	1.672
유효입경(mm)	0.50	최적함수비(%)	14.2
균등계수	1.90	건조시 내부마찰각 ($^\circ$)	34.7
곡률계수	0.84	포화시 내부마찰각 ($^\circ$)	32.0
		투수계수(cm/sec)	5.204×10^{-2}
		USCS	SP

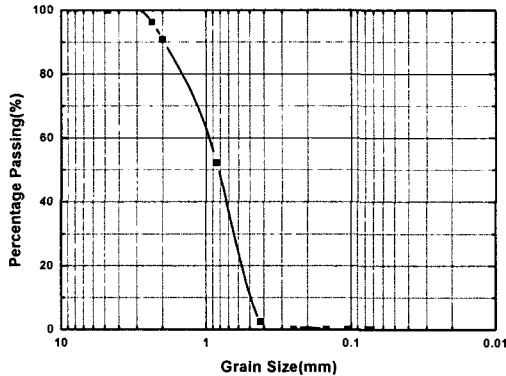


그림 2.4 채움토사의 입도분포곡선

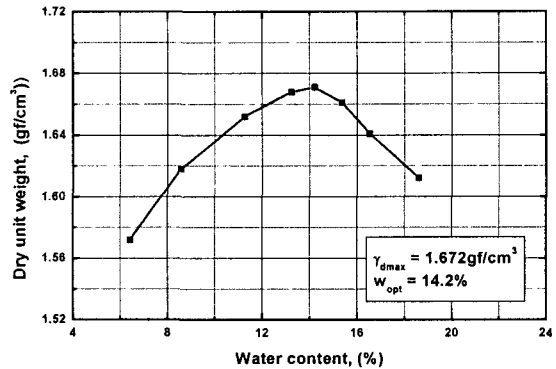


그림 2.5 채움토사의 다짐곡선

2.2.2 지오텍스타일

지오텍스타일 튜브의 섬유재료로 사용되는 재료는 일반적으로 폴리프로필렌(Polypropylene)재질과 폴리에스터(Polyester)재질의 지오텍스타일이 주로 사용된다. 지오텍스타일의 재질은 사용목적과 현장조건에 따라 효율적으로 선정하여야 하며, 특히 지오텍스타일 튜브 구조물이 자외선에 노출될 경우, 인장강도를 비롯하여 각종 공학적 특성이 저하되므로 카본블랙과 같은 안정제를 첨가한 지오텍스타일을 사용하여야 한다. 영진만 지오텍스타일 튜브에 적용된 지오텍스타일은 카본블랙을 첨가한 폴리프로필렌 재질의 지오텍스타일이다. 표 2.2는 영진만에서 사용된 지오텍스타일의 각종 특성값을 나타낸 것이다.

표 2.2 지오텍스타일 특성값

물리적 성질		시험방법	단위	최소값
재질, 무게		ASTM D-5261		PP, 20.0
광폭인장강도	Warp, Fill	ASTM D-4632, 4595	lb/in	1000
광폭신률	Warp, Fill	ASTM D-4632, 4595	%	18, 15
인열강도	Warp, Fill	ASTM D-4533	lbs	400
터짐강도		ASTM D-3786	psi	1200
깨물림 강도		ASTM D-4833	lb	350
접합강도		ASTM D-4884	lb/in	600
유효구멍크기		ASTM D-4751	US Sieve	No. 100
투수성		ASTM D-4491	sec	0.10

3. 안정성 분석 및 시공계측

3.1 이론적 안정성 분석

해안구조물로 사용되는 지오텍스타일 튜브의 안정성 분석은 외력으로 작용하는 파도에 대한 수리동역학적 파압이론과 지반공학적인 안정해석이론을 바탕으로 하여 안정성 분석을 실시한다. 본 연구에서는 이론적 방법에 의한 지오텍스타일 튜브의 안정성을 분석하였으며, 안정해석조건은 지오텍스타일 튜브의 채움 비율과 유의파고(Significant wave height)에 따른 안정성 분석을 실시하였다.

3.1.1 파압산정 및 지오텍스타일 튜브의 자중산정

지오텍스타일 튜브에 작용하는 파압의 산정방법은 해안의 소파구조물에 작용하는 파압산정이론을 바탕으로 한다. 경험적으로 가장 많이 사용되는 수리학적 파압산정이론은 Hiroi식, Minikin식, Honma식, Goda식 등이 있으며, 특히 Hiroi식은 일본과 아시아지역에서 많이 적용되며 Minikin식은 미국과 유럽에서 주로 적용된다. 본 연구에서는 다음 식 (1)과 같은 Hiroi식에 의하여 파압을 산정하였다.

$$P_w = 1.5 \times w_0 \times H_{1/3} \quad (1)$$

여기서, P_w 는 파압, w_0 는 해수의 단위중량, $H_{1/3}$ 는 유의파고를 나타낸다. 또한 지오텍스타일 튜브의 자중은 채움 후, 유효높이를 바탕으로 한 타원체의 면적을 등가의 직사각형으로 환산하여 산정한다.

3.1.2 활동과 전도에 대한 안정성

활동에 대한 안전율은 지오텍스타일 튜브 자중과 상재하중인 수직력과 외력으로 작용하는 수평파압의 비로 나타내어진다. 활동에 의한 안전율은 다음 식 (2)에 나타낸 바와 같다.

$$SF_{(sliding)} = \frac{F}{P_h} \quad (2)$$

여기서, P_h 는 수평력, F 는 수직력, P_v 는 상재하중과 지오텍스타일 자중에 의한 수직력, P_w 는 파도에 의한 파압, H_e 는 지오텍스타일 충전 후 유효높이, ϕ 는 채움토사의 포화시 내부마찰각이다. 활동에 대한 안전율은 1.0이상일 경우 안정한 것으로 판정한다. 지오텍스타일 튜브의 전도에 대한 안전율은 파도에 의한 전도모멘트와 자중에 의한 저항모멘트의 비로 나타내어지며, 다음 식 (3)에 나타낸 바와 같다.

$$SF_{(overturning)} = \frac{M_R}{M_o} \quad (3)$$

여기서, P_w 는 파도에 의한 수평력, H_e 는 유효높이, P_v 는 상재하중과 자중에 의한 수직력, B 는 지오텍스타일 튜브의 등가 직사각형 폭이다. 전도에 대한 안전율은 1.0이상일 경우 안정한 것으로 판정한다.

3.1.3 지지력에 대한 안정성

하부 지반의 지지력에 대한 안전율은 일반적인 지지력에 대한 안전율 산정방법을 사용한다. 즉, 하부 기초지반의 극한지지력과 파압에 의하여 발생하는 편심하중 작용 시 허용지지력의 비로 나타내어진다. 지지력에 대한 안전율은 다음 식 (4)에 나타낸 바와 같다.

$$SF_{(bearing\ capacity)} = \frac{Q_u}{Q_a} \quad (4)$$

$$e = \frac{P_w \times H_e}{3F}$$

여기서, c 는 하부지반의 점착력, N_c, N_v 는 포화 시 내부마찰각에 따른 지지력계수, v_s 는 하부지반의 수중단위중량, B 는 지오텍스타일 튜브의 등가직사각형 폭, e 는 파압에 의한 편심거리이다. 지지력에 대한 안전율은 1.0이상일 경우 안정한 것으로 판정한다.

3.2 이론적 안정성 분석결과

본 연구에서 수행한 영진만 지오텍스타일 튜브의 이론적 안정성 분석 결과는 그림 3.1~그림 3.3에 나타낸 바와 같다. 안정성 분석 시, 지오텍스타일 튜브의 기하학적 형태, 채움토사특성 및 하부기초지반

특성은 영진만 현장과 동일하게 하며, 내부 채움비율 및 유의파고의 크기를 변화시키며 안전율 값을 비교 분석하였다. 각각의 분석결과에서 보는 바와 같이, 지오텍스타일 튜브의 채움비율과 유의파고가 커질수록 활동, 전도, 지지력에 대한 안전율이 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 지지력에 의한 안전율은 유의파고와 채움비율에 따라 선형적인 변화를 보이나, 활동 및 전도에 의한 안전율은 유의파고, 유효높이, 지오텍스타일 튜브 등가폭 등의 복합적인 상관관계로 비선형 변화를 보인다. 영진만 지오텍스타일 튜브의 활동에 대한 안전성은 유의파고 3.0m까지는 안정성을 확보하나 유의파고 3.0m이상에서는 채움비율에 관계없이 불안정한 것으로 나타났다.

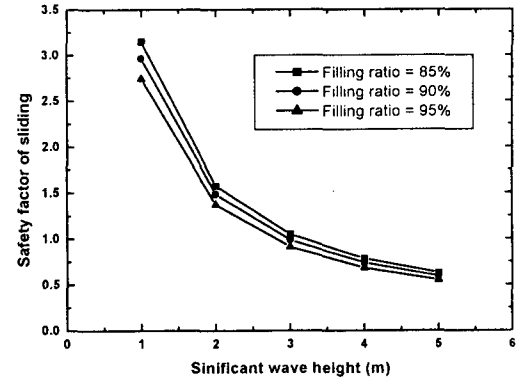


그림 3.1 활동에 대한 안전율 변화곡선

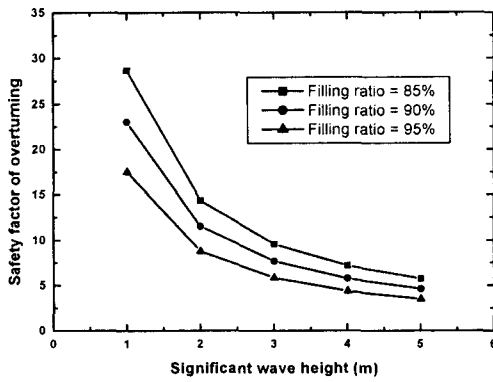


그림 3.2 활동에 대한 안전율 변화곡선

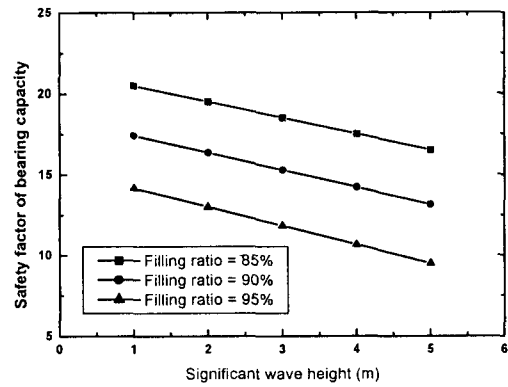


그림 3.3 활동에 대한 안전율 변화곡선

3.3 시공 시 계측결과

본 연구에서는 해안선의 침식방지와 토사퇴적을 유도하기 위하여 국내 최초로 지오텍스타일 튜브공법이 적용된 영진만의 지오텍스타일 튜브에 대하여 시공 시 현장계측을 실시하였다. 시공 시 현장계측으로는 시공과정을 비롯하여 시공 시 지오텍스타일 튜브의 거동에 대하여 연구를 수행하였다. 그림 3.4~그림 3.5는 시공장면을 나타낸 것이며, 그림 3.6과 그림 3.7은 시공 시 계측장면과 채움작업 진행에 따른 지오텍스타일 튜브 하부의 응력변화를 나타낸 것이다. 지오텍스타일 튜브의 시공은 각각의 주입구에 대한 단계별 주입으로 진행하였으며, 그림 3.7의 계측결과에서 보는 바와 같이, 채움작업 진행 및 유효높이 증가에 따라 지오텍스타일 튜브 하부에 작용하는 응력이 증가하며, 각각의 주입구의 채움작업 진행에 따라 주변으로 토사가 분산되어 채워지는 것을 알 수 있다.

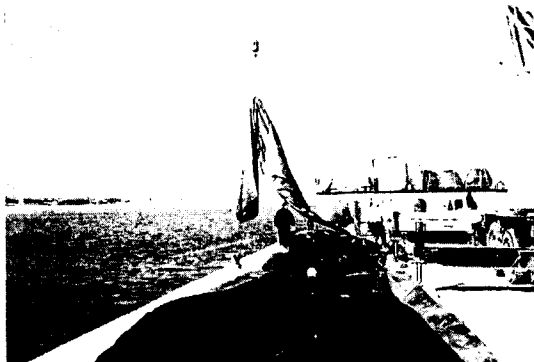


그림 3.4 지오텍스타일 튜브의 설치

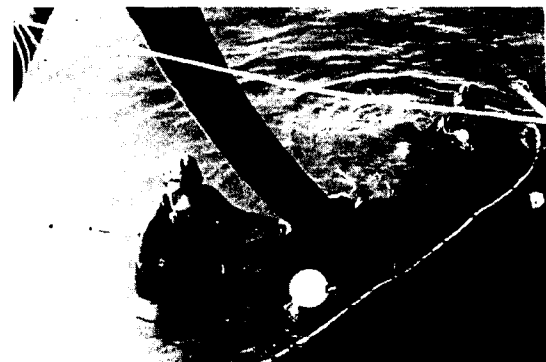


그림 3.5 주입구 고정 및 채움토사 주입



그림 3.6 지오텍스타일 튜브의 하부응력 계측

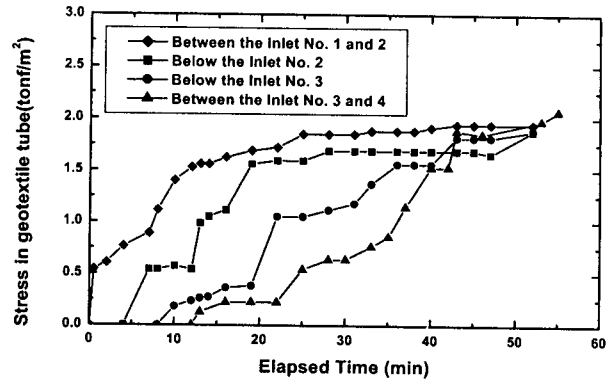


그림 3.7 채움도사 주입에 따른 응력변화

4. 영진만 지오텍스타일 튜브의 수리모형시험

4.1 수리모형시험 장비

본 연구에서 사용한 수리모형시험 장비는 국립 군산대학교의 수리모형시험 장비로 폭 7m, 길이 30m, 깊이 1.5m의 수로를 이용하였다. 조파수로는 조파기 후면과 수로 말단부에 경사식 소파장치 시설을 갖추고 있으며, 조파기는 피스톤형으로 Servo Motor 구동방식으로 작동된다. 본 시스템은 정현파와 불규칙파를 발생시킬 수 있으며, 발생파고의 결정 및 보정을 자동계측시스템을 통한 시산법을 이용하여 설계유의파고를 발생시킬 수 있다. 표 4.1은 본 연구에 사용된 수리모형시험 장비의 제원을 나타낸 것이다. 조파장치의 운전은 컴퓨터 프로그램에 의한 작성된 목적스펙트럼을 제어판으로 전송하고 컴퓨터에서 조파장치의 운전을 조절할 수 있도록 되어있다. 그림 4.1은 수리모형시험 조파장치를 나타낸 것이다.

표 4.1 수리모형시험기 제원

항목	제원
수로크기	폭 7m, 길이 30m, 깊이 1.5m
조파판의 크기	폭 7m, 높이 1.4m
최대수심	1.0m
최대파고	0.3m
주기	0.5~5.0
구동방식	AC Servo Motor 구동방식
제어방식	컴퓨터에 의한 반사파흡수식 제어
조파형식	피스톤타입의 정현파 및 불규칙파



그림 4.1 수리모형시험 조파장치

4.2 모형상사 및 시험조건

영진만 지오텍스타일 튜브의 수리모형시험의 상사는 기하학적 축척 1/50으로 축소하였으며, 중량에 대한 상사는 기하학적 상사율의 세제곱에 의하여 모형상사를 실시하였다. 시험조건은 채움비율 85%, 유의파고, 2.0~5.0m 까지 재현하여 안정성분석 및 지오텍스타일에서 발생하는 변형율을 측정하였으며, 그림 4.2는 축소모형 지오텍스타일 튜브에 파고계, 파압계, 스트레인게이지를 설치한 모습을 나타낸 것이다. 그림 4.3은 상사법칙에 의하여 재현한 2.0m~ 5.0m의 파고자료를 나타낸 것이다. 안정성분석은 유의파고 재현 후, 지오텍스타일 튜브의 변위량을 계측하였으며, 지오텍스타일의 변형율은 지오텍스타일 튜



그림 4.2 계측장치의 설치

브의 중심을 기준으로 파도의 작용방향으로 90° 위치와 45° 위치에 설치하여 직각방향과 수평방향의 변형율을 측정하였다.

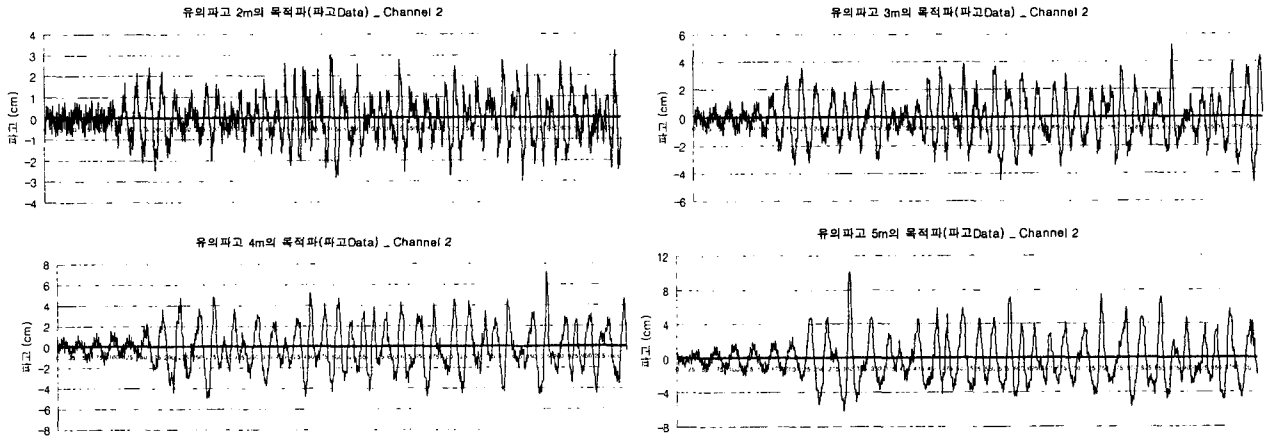


그림 4.3 유의파의 파고계측결과

4.3 수리모형시험 결과

· 수리모형시험을 통한 영진만 지오텍스타일 튜브의 안정성분석은 축소모형의 변위량을 측정하여 안정성을 검토하였으며, 그림 4.4는 유의파고 5.0m의 재현 후 변위량을 측정하고 있는 모습을 나타낸 것이다. 안정성 시험결과, 영진만의 지오텍스타일 튜브는 유의파고 4.0m까지 육안조사에 의한 변위량이 발생하지 않아 안정성을 유지하였으나, 유의파고 5.0m에서 8.0mm의 변위가 발생하였다. 유의파고 재현에 따른 지오텍스타일의 변형을 측정결과는 그림 4.5~그림 4.7에 나타낸 바와 같다. 변형을 측정결과에서 보는 바와 같이, 지오텍스타일 튜브의 부위에 따른 변형율은 90° 위치의 변형율이 45° 위치의 변형율 보다 작게 발생되었으며, 전방튜브에 비하여 후방튜브의 변형율이 크게 나타났다. 이러한 결과는 천단고의 영향과 월파에 의한 파에너지 중첩으로 인한 것으로 판단된다. 또한, 유의파고에 따른 변형율은 유의파고 증가에 따라 변형율도 증가하였으며, 직각방향의 변형율 보다 수평방향의 변형율이 크게 발생되었다.



그림 4.4 지오텍스타일 튜브 변위량 계측

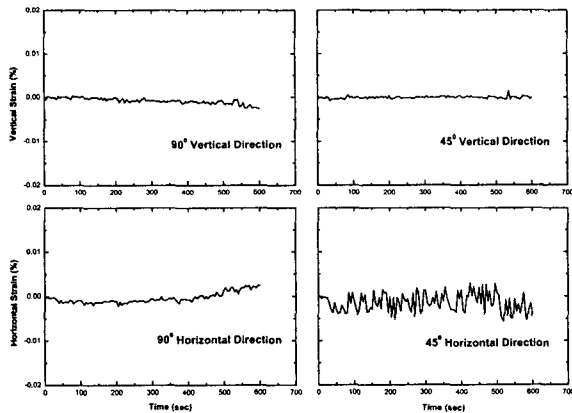


그림 4.5 유의파고 3.0m시 변형율(전방튜브)

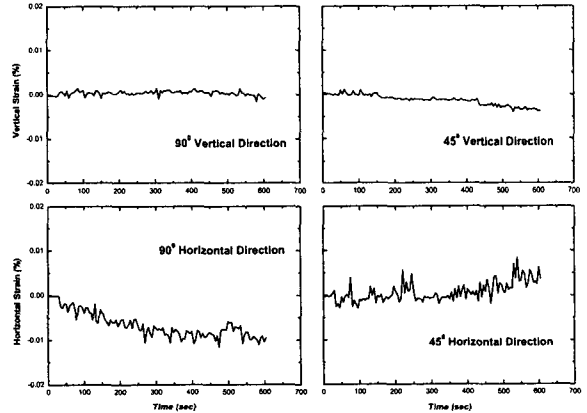


그림 4.6 유의파고 3.0m시 변형율(후방튜브)

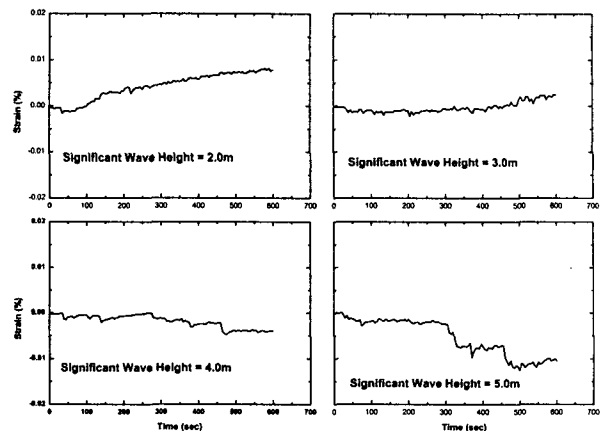
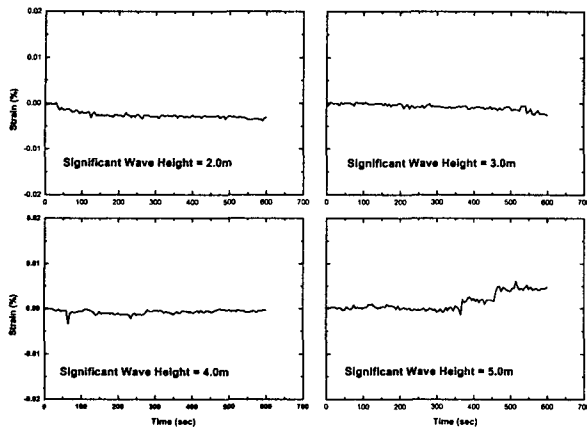


그림 4.7 유의파고에 따른 변형율(전방, 90° 직각방향) 그림 4.8 유의파고에 따른 변형율(전방, 90° 수평방향)

5. 결론

영진만 지오텍스타일 튜브의 시공 시 계측과 이론 및 수리모형시험에 따른 안정성분석 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 영진만 지오텍스타일 튜브의 이론적 안정해석 결과, 2열 배치로 인하여 전도 및 지지력에 대한 안정성은 확보하였으나, 활동에 대한 안전율은 유의파고 3.0m이상일 경우, 안정성을 상실하는 것으로 나타났다.
2. 시공 시 계측결과, 채움작업 진행 및 유효높이 증가에 따라 지오텍스타일 튜브 하부에 작용하는 응력이 증가하며, 각각의 주입구의 채움작업 진행에 따라 주변으로 토사가 분산되어 채워진다.
3. 안정성 시험결과, 영진만의 지오텍스타일 튜브는 유의파고 4.0m까지 변위량이 발생하지 않아 안정성을 유지하였으나, 유의파고 5.0m에서 8.0mm의 변위가 발생하였다.
4. 지오텍스타일 튜브의 부위에 따른 변형율은 90° 위치의 변형율이 45° 위치의 변형율 보다 작게 발생되었으며, 전방튜브에 비하여 후방튜브의 변형율이 크게 나타났다. 또한, 유의파고 증가에 따라 변형율도 증가하였으며, 직각방향의 변형율 보다 수평방향의 변형율이 크게 발생되었다.

감사의 글

이 연구의 현장계측은 성원건설(주)와 지해산업개발(주)의 연구지원으로 수행되는 “지오텍스타일의 시공 및 사후계측관리 연구”를 통하여 연구되었음을 감사 드리며 또한, 수리모형시험 시 많은 도움을 주신 국립 군산대학교 신문섭교수, 강신중, 유대성 대학원생에게 감사 드립니다.

참고문헌

1. 김남영 (1999), 소파구조물, 도서출판 과학기술, pp. 172~202.
2. Pilarczyk, K.W.(1996), Geosystems in hydraulic and coastal engineering - An overview, "Proceedings of the 1st European Geosynthetics Conference(EuropGeo)", Maastricht, the Netherlands.
3. Pilarzyk, K.W.(1998), "Stability criteria for geosystems -an overview-", 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, USA.
4. Wouter, J.(1998), "Open Taludbekledingen ; stability van geosystems(Stability of geosystems), Delft Hydraulics, Report H 1930, Annex 7.