

태풍 나비 내습시 발생한 울산항 해안시설물 피해원인 조사



고진석 >>
(주)해인이엔씨 부사장



최상철 >>
(주)해인이엔씨 횡만부 부장



엄현민 >>
(주)해인이엔씨 부설기술연구소 연구원

1. 서론

본 조사는 2005년 9월 내습한 태풍 나비(NABI)에 의해 시설물 피해를 입은 울산광역시 OO중공업내 방파호안에 대한 시설물 피해현황을 조사하고, 태풍 나비 내습시에 대한 파랑수치모형실험을 수행하여 현지조사 결과 및 설계파랑 추정결과를 토대로 시설물 피해원인을 분석하는데 그 목적이 있다.

이를 위하여 현황 및 수심측량과 사진촬영, 수중촬영의 현지조사를 실시하였으며 광역 및 상세역의 파랑 수치모형실험을 수행하였다. 그리고



기존 설계내용의 검토와 현지조사 결과 분석 및 단면 안정성 검토를 통하여 시설물 피해원인을 분석하였다.

2. 태풍 나비

태풍 나비는 2005년 8월 29일 21시경 미국의 괌

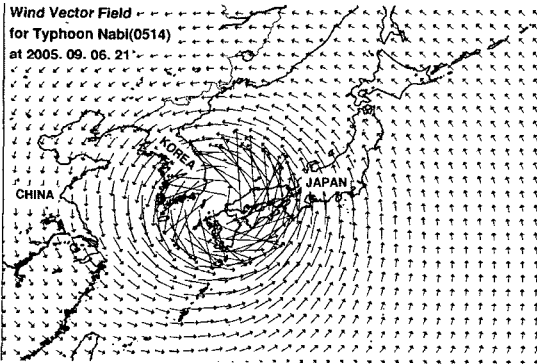
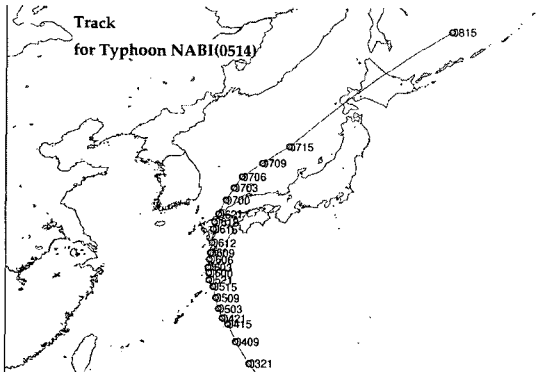


그림 1. 태풍 Nabi(0514)의 경로 및 바람 벡터도

동북동쪽 해상 1,210km 지점에서 발생하여 우리나라 동해안을 거쳐 2005년 9월 8일 15시경 소멸되었으며, 중심최대기압 925hPa, 중심최대풍속 49m/sec를 기록한 된 초강력 태풍이었다.

태풍 나비가 울산지역을 영향을 미친 기간은 2005년 9월 6일부터 2005년 9월 7일까지이며, 이 기간중에 순간최대풍속 28m/sec, 일최다강수량이 622mm를 기록하였다. 집중호우로 인하여 많은 인명과 재산 피해가 발생하였으며, 이상파랑이 내습하여 항만시설물도 곳곳에서 피해를 입었다.

3. 피해 현황 및 현장 조사

3.1 피해 현황

본 조사의 검토대상인 태풍피해구역의 위치는 울산광역시에 위치한 OO중공업내 남측매립지 방파호안이며, 내습으로 인하여 방파호안 90m 구간에 피해를 입었다. 태풍내습시 파랑의 영향으로 방파호안에 피복된 기초사석과 16톤급 T.T.P 약 340개가 유실되었으며, 기초사석 및 T.T.P가 유실되면서 상치콘크리트가 전도되어 균열되었고 배후의 배수로도 붕괴되는 피해를 당하였다.

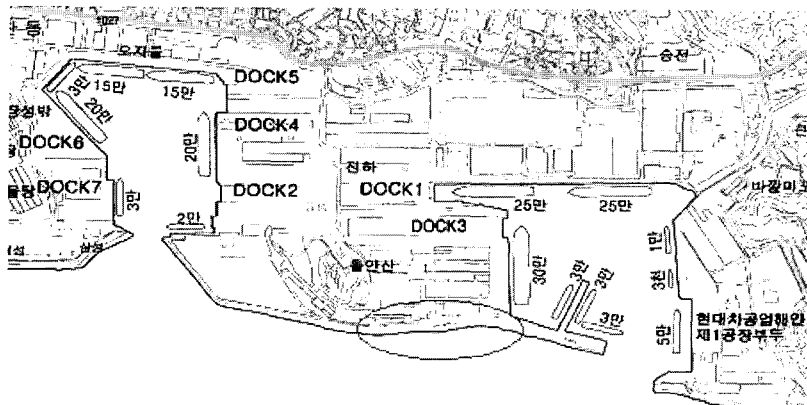


그림 2. 피해 조사 대상 지역

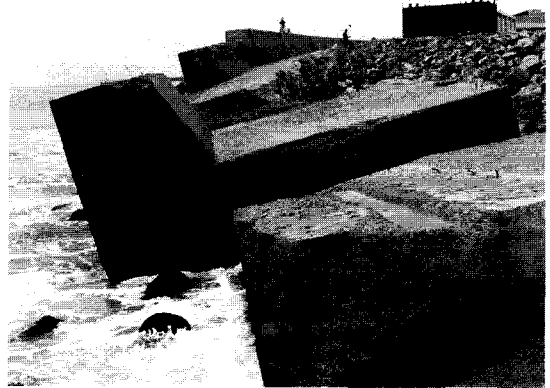
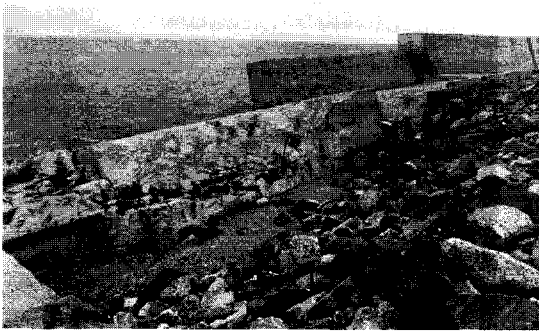


그림 3. 피해 구조물 전경

3.2 현장조사

태풍 나비에 의해 발생한 방파호안 붕괴 및 유실된 부분의 현황을 파악하기 위하여 태풍피해구역에 대하여 지형 및 수심측량, 사진측량, 수중촬영을 시행하였다.

상치콘크리트는 시공이음부(span 10m) 별로 각각 분리되어 당초 법선 전·후로 이동되거나 전도되었으며, 피해구간 90m 가운데 남측으로부터 7번째

span은 법선에 직각방향으로 균열된 곳으로 조사되었다. 상치콘크리트 하부는 기초사석이 유실되어 공극을 형성하고 있는 구간이 대부분으로서, 피해복구 시 그라우팅공법 등 속채움방법을 강구하여 기초사석부의 안정성을 확보하여야 할 것으로 사료된다. 기초사석은 대부분 유실되어 전면수역에 넓게 분포되어 있으며, T.T.P는 파손되거나 유실되어 전면수역에 기초사석과 혼합되어 있는 것으로 나타났다.

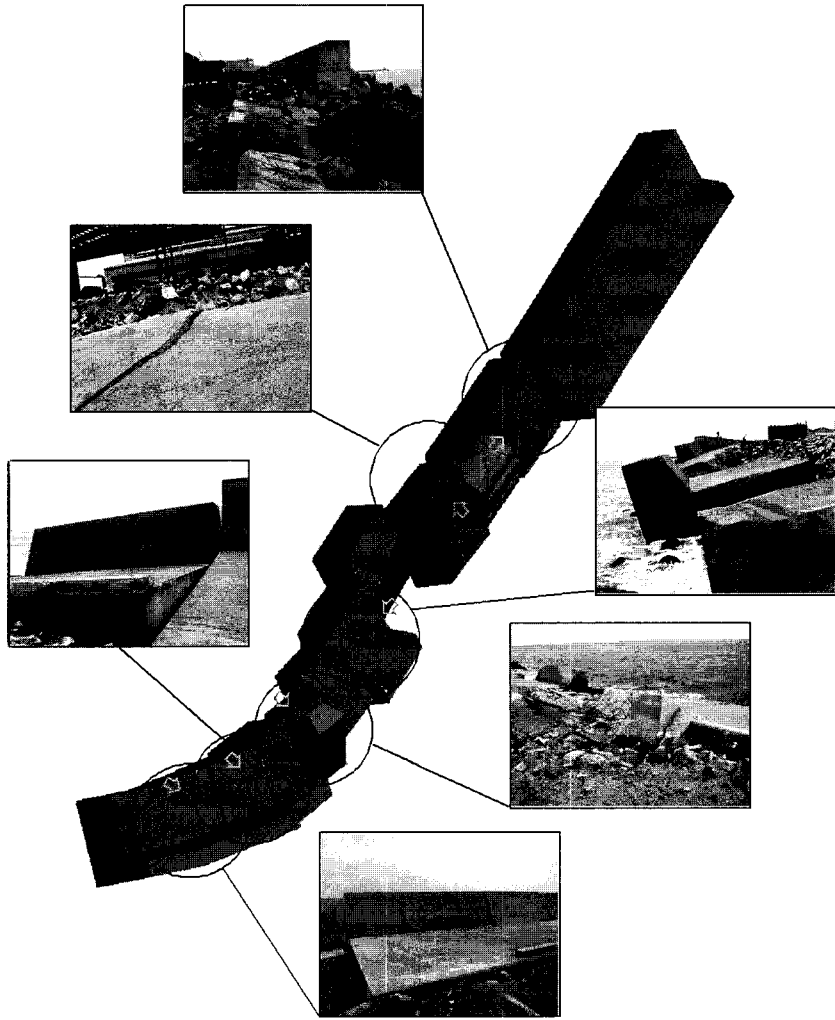


그림 4. 사진촬영 조사결과

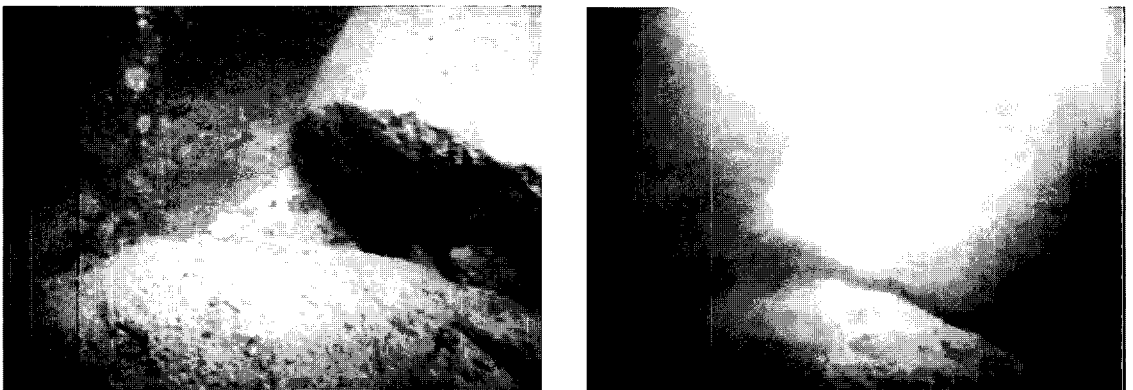


그림 5. 피해 시설을 주변해역의 파괴된 TTP

4. 파랑 변형 수치모형실험

4.1 실험 개요

본 실험의 목적은 해안시설 피해의 원인분석시 필요한 기초자료를 제공하는 것이다. 기존 설계시 적용한 기존 심해파(1988) 및 신규 심해파(2005) 제원에 대한 구조물 설계파를 산정하였으며, 2005년 내습한 태풍 나비에 대한 심해파 산정을 수행하고 이에 대한 설계파를 계산하였다. 실험에 사용된 파랑은 대상해역의 위치 및 현황을 고려하여 가장 크게 영향을 미칠 것으로 판단되는 NE, E, ESE, SE 및 SSE계열의 심해설계파를 대상으로 실험을 수행하였다. 태풍 나비 내습시의 심해설계파 추정에는 WAM 모델을 사용하였고 태풍 나비에 의한 심해설계파와 우리나라 근해에 설정된 기존 및 신규 심해설계파로부터 구조물설계파를 추정하는 데에는 SWAN모형을 사용하였다.

4.2 수치모형

4.2.1 WAM(WAVE Model) 모형

심해파를 산정하기 위해서 WAM cycle 4 모형(WAMDI Group, 1988)을 사용하였다. 이 모형은 2차원 파랑 스펙트럼의 형태에 대한 어떠한 가정없이 2

차원 파랑 스펙트럼의 변화를 파랑에너지 보존방정식으로 적분하여 계산하는 제3세대 모델이다. 이 모형은 국지적인 해역뿐 아니라 전 지구에 대하여 적용되며, 격자시스템은 위·경도와 직각좌표 체계를 임의로 선택할 수 있다. 또한, 심해와 천해 모두 적용가능하며 수심과 해류에 의한 굴절과정이 포함되어 있다.

4.2.2 SWAN(Simulation WAVes Nearshore) 모형

SWAN 모형(Booij et. al., 1999)은 수치 파랑 모델로서 주어진 바람, 해저면 및 해류 조건으로부터 연안역, 호수 및 하구의 파랑을 계산한다. 이 모델의 기본방정식은 파랑작용 평형방정식(wave action balance equation)이다. SWAN 모형에서는 Hasselmann(1974)이 제안한 표면펄스모델(surface pulse model)을 응용하여 백파에 의한 에너지 소산을 계산한다. 저면에 의한 에너지 소산은 복잡한 와류 이론에 근거한 모형을 고안한 Weber(1991)의 식을 사용하여 저면마찰 소산을 계산한다.

파랑장에서 수심에 의해 발생하는 쇄파에 의한 파랑 에너지 소산의 계산에는 파랑 스펙트럼에 비례하는 쇄파 소산 공식을 도출한 Eldeberky and Battjes(1995)의 쇄파 소산 공식을 사용한다.

심해에서 4파 비선형 상호작용(quadruplet

표 1. 파랑 수치모형실험 개요

| 모형 | 모형 범위 | 격자 간격 및 개수 | |
|------|-----------|--------------|---------------|
| WAM | 북서 태평양 해역 | 5' (480×360) | |
| SWAN | 울산항 주변해역 | 광역 | 10" (240×390) |
| | | 중간역 | 2" (300×300) |
| | | 상세역 | 5m (150×200) |

표 2. 입사파 제원 및 위치도

| 파향 | 파고(m) | 주기(sec) | 격자번호 | 비고 | |
|-----|-------|---------|------|---------|--|
| SSE | 7.2 | 11.0 | 1919 | 1988 | |
| NE | 6.8 | 11.0 | 2018 | 1988 | |
| E | 8.60 | 12.14 | 61 | 2005.12 | |
| ESE | 10.25 | 12.97 | 60 | 2005.12 | |
| SE | 10.44 | 12.91 | 58 | 2005.12 | |

wave-wave interactions)을 엄밀하게 계산하기 위해서는 매우 긴 계산 시간이 소요되므로 이산 상호작용 근사법(discrete interaction approximation)을 사용하여 해석한다. 3파 비선형 상호작용은 파랑의 에너지를 저주파 영역에서 고주파 영역으로 이동시키는 것으로 3파 비선형 상호작용에 의해서 생성되는 저주파 영역은 SWAN 모형에서는 고려하지 않는다. SWAN 모형에서 3파 비선형 상호작용을 계산하기 위해 Eldeberky(1996)이 사용한 LTA(Lumped Triad Approximation) 근사법을 선택한다.

4.3 실험 결과

기존설계상의 구조물 설계파는 1988년 설정한 심해설계파로부터 추정된 파고로서 파고($H_{1/3}$) = 5.0m, 주기($T_{1/3}$) = 11.0sec이다. 금회 실험에서 추정된 기존 심해설계파에 의한 구조물설계파 산정결과는 파고($H_{1/3}$) = 5.1m, 주기($T_{1/3}$) = 11.0sec로서 기존설계상

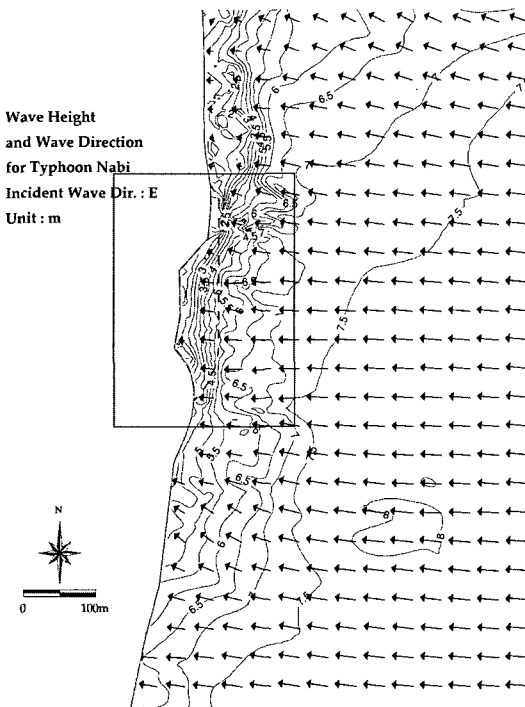


그림 6. 피해 시설물 주변에서의 파고 및 파향분포도 (파향 : E, 태풍 나비 내습시)

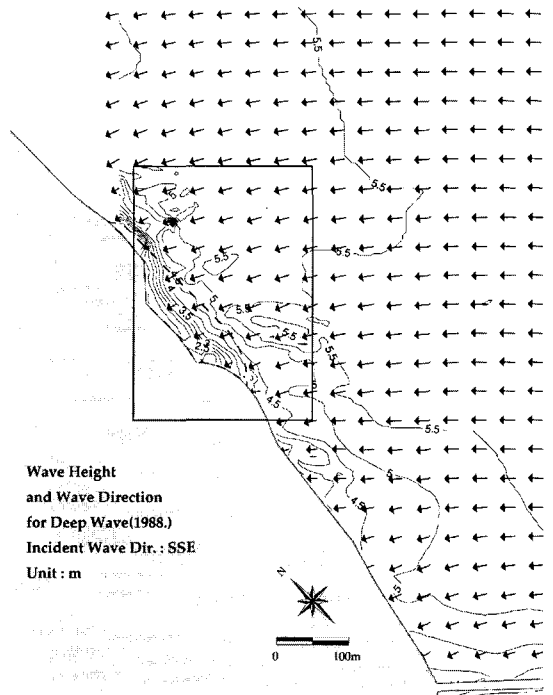


그림 7. 피해 시설물 주변에서의 파고 및 파향 분포도 (파향 : SSE, 1988)

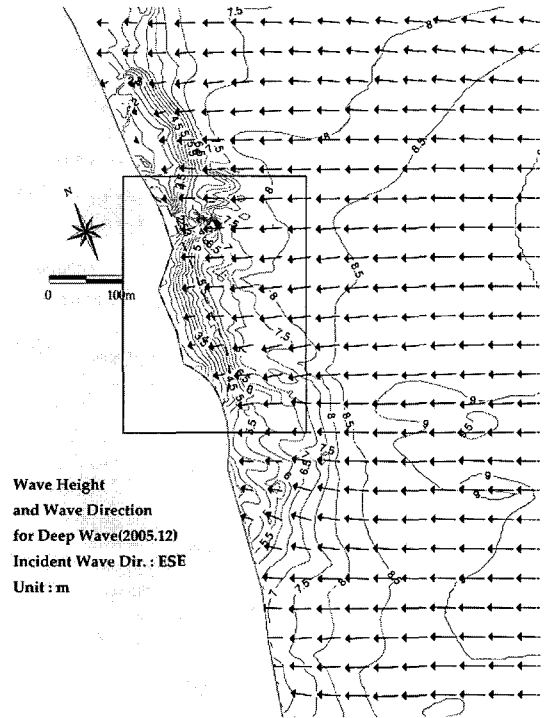


그림 8. 피해 시설물 주변에서의 파고 및 파향 분포도 (파향 : ESE, 2005. 12)

의 파고와 거의 유사한 결과를 나타내었다. 2005년 설정한 신규 심해설계파에 의한 구조물설계파 산정결과는 파고(H_설) = 5.8m, 주기(T_설) = 12.97sec로서 기존설계상의 파고보다 큰 파고를 나타내었다. 태풍 나비 내습시 심해설계파에 의한 구조물설계파 산정결과는 파고(H_설) = 5.5m, 주기(T_설) = 12.10sec로서 기존설계상의 파고보다 큰 파고를 나타내었다.

5. 태풍 피해 원인분석

5.1 현장조사

재현기간 50년 설계파를 초과하는 이상파랑이 내습하였고, 피해구간의 구조물 전면의 해저질이 모래질이므로 파랑내습시 구조물 전면에 와류가 형성되므로 이로 인해 국부세굴이 발생한 것으로 사료되며, 점진적인 전면세굴로 인해 기초사석이 침하되므로서 피복석이 흘러내리고 사석이 유실된 것으로 사료되었

다. 저면부의 기초사석 및 피복석 유실에 따라 기초마운드가 붕괴됨에 따라 사면부의 T.T.P도 침하되고, 이형블록(T.T.P)간 엇물림효과(Kd치)가 감소되므로써 안정중량이 확보되지 않아 유실이 발생된 것으로 판단되었다. 피해구간 전면에 국부적으로 천퇴(shoal)가 형성되어 있고, 피해구간의 방파호안 범선이 우각부를 형성하고 있기 때문에 진입파랑이 집중되어 파고가 다소 증폭되므로 인근지역보다 큰 파랑이 발생한 것으로 사료되었다. 근본적인 피해원인은 태풍 나비 내습시 설계당시의 적용한 50년 빈도 설계파보다 큰 이상파랑이 내습하였기 때문에 16톤급 T.T.P로는 안정성을 확보할 수 없었으며, 이로 인해 T.T.P가 유실되고 제체가 파손 및 붕괴된 것으로 판단된다.

5.2 수치모형실험

기존 구조물 설계당시 적용한 심해설계파는 1988년 해운항만청에서 제시한 해역별 심해파 산정보고서

표 3. 파랑 변형 실험 결과

| 구분 | 기존 검토 (1999) | | 금회 검토 | | |
|-----|--------------|------|------------------|--------------|---------------------|
| | 파향 | SSE | 기존 심해파 제원 (1988) | 태풍 나비 (2005) | 신규 심해파 제원 (2005.12) |
| 심해파 | 파고(m) | 7.2 | 7.2 | 9.6 | 10.25 |
| | 주기(sec) | 11.0 | 11.0 | 12.1 | 12.97 |
| 설계파 | 파고(m) | 5.0 | 5.1 | 5.5 | 5.8 |
| | 주기(sec) | 11.0 | 11.0 | 12.1 | 12.97 |

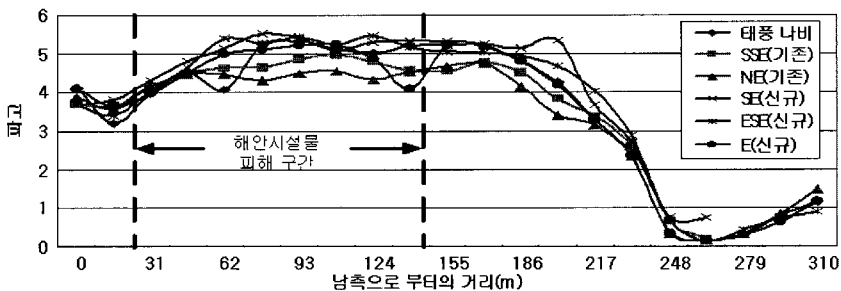


그림 9. 입사파 제원에 따른 시설물에서의 파고 변화

의 50년 빈도 심해파중 본 해역에 가장 큰 영향을 미치는 심해파를 선정하여 사용하였다. 이 심해파를 적용하여 금회 수치모형실험을 수행하여 재현하였으며, 기존설계시 적용한 설계파(5.0m)와 유사한 5.1m의 파고가 산정되어 설계파 적용은 적정한 것으로 사료된다. 태풍 나비 내습시에 대해서는 태풍 나비를 모델태풍으로 하여 심해파를 재산정하였다. 구조물 설계파를 산정한 결과 설계파고는 5.5m로 산정되었으며, 기 적용한 50년 빈도 설계파(5.1m)를 초과하는 이상파랑이 내습한 것으로 사료된다. 태풍 나비 내습시에는 이러한 이상파랑이 내습하였기 때문에 16톤급 T.T.P로는 안정성을 확보할 수 없는 것으로 판단되었다.

5.3 기존단면 안정성 검토

피해구간의 단면안정성 검토를 위해 기존설계상의 설계파와 금회 과업에서 산정한 설계파(기존 심해설계파에 의한 설계파, 신규 심해설계파에 의한 설계파, 태풍 나비 내습시 심해설계파에 의한 설계파)에 대한 피복재 소요중량을 검토하였다.

본 조사에서는 배면매립토에 의한 활동, 전도력에 대한 안정성은 충분히 확보되기 때문에 검토를 생략하였으며, 파랑에 의한 피복재 안정성에 대해서만 검토하였다. 기존 설계파에 대한 피복재 안정성 검토결과 설계당시의 설계기준(쇄파대일 경우 피복재 안정계수 8.3)으로는 소요중량이 기시공된 16톤급 T.T.P로 충분한 것으로 검토되었다. 그러나, 2005년 개정된 설계기준(쇄파대일 경우 피복재 안정계수 7.0)을 적용할 경우 T.T.P 소요중량은 20톤급으로 산정되어 16톤급으로는 중량이 부족한 것으로 나타났다. 태풍 나비 내습시 심해파에 의한 구조물설계파에 대한 T.T.P 소요중량도 25톤으로 산정되어 기 적용된 16톤급으로는 소요중량이 부족하기 때문에 금회 태풍피해는 이상파랑의 내습에 의한 자연재해로 판단하는 것이 옳은 것으로 사료된다. 신규 심해파에 의한 설계파에 대한 T.T.P 소요중량은 25톤으로 산정되어

기 적용된 16톤급으로는 소요중량이 더욱더 부족한 것으로 나타났다.

5.4 태풍 피해 원인분석

지형 및 측량, 사진측량, 잠수조사 등 현장조사 결과와 파랑변형 수치모형실험 결과를 종합분석한 결과 태풍 나비 내습시 피해원인은 다음과 같이 분석되었다.

첫째, 최근 지구온난화 등 지구환경 변화에 따른 전세계적인 기상이변에 따라 50년 빈도 설계파를 초과하는 이상파랑이 내습한 것이 근본적인 원인으로 판단된다.

- 금회 실험에서 추정된 기존 심해설계파에 의한 구조물설계파 산정결과는 파고(H_{1/3}) = 5.1m, 주기(T_{1/3}) = 11.0sec로서 기존설계상의 파고와 거의 유사한 결과를 나타내었다.

- 2005년 설정한 신규 심해설계파에 의한 구조물설계파 산정결과는 파고(H_{1/3}) = 5.8m, 주기(T_{1/3}) = 12.97sec로서 기존설계상의 파고보다 큰 파고를 나타내었다.

- 태풍 “나비” 내습시 심해설계파에 의한 구조물설계파 산정결과는 파고(H_{1/3}) = 5.5m, 주기(T_{1/3}) = 12.10sec로서 기존설계상의 파고보다 큰 파고를 나타내었다.

둘째, 피해지역의 해안선 및 해저지형 여건상 주변 지역보다 국부적인 파고증가 현상이 나타난 것으로 사료된다.

- 방파호안의 법선형태가 우각부를 형성하고 있어 파랑이 집중되는 현상이 나타나 인근지역보다 파고가 다소 증폭되는 현상이 발생하였다.

- 전면수역에 천퇴(암초지대)가 발달되어 있어 천퇴후면에서 파랑이 집중되는 현상이 나타나 인근지역보다 파고가 다소 증폭되는 현상이 발생하였다.

셋째, 방파호안이 쇄파대에 위치하고 구조물 전면의 해저질이 모래이므로 세굴에 의한 기초사석의 침

하가 발생한 것으로 사료된다.

- 쇄파대에 구조물이 위치하여 충격쇄파압이 작용하므로써 피복재의 유실에 영향을 주었다.
- 파랑내습시 구조물 전면에 와류가 발생하여 국부세굴 현상이 생기면서 기초사석이 유실되면서 연쇄적인 피해가 발생하였다.

5. 결론

태풍 나비 내습시 피해원인은 50년 빈도 설계파를 초과하는 이상파랑의 내습하여 피복재 소요중량이 부족한 것이 근본적인 원인으로 판단된다. 인접 구조물의 시공상태는 피복석의 고르기상태는 매우 불량하여 피복석이 서로 엮물려 있지 않고 느슨한 상태로 이격되어 있고 약간의 침하가 발생되어 있는 것으로 조사되었으나, 본 구조물이 완공이후 지속적으로 파랑의 영향을 받았고 금회 태풍피해구간과 인접한 구간이기 때문에 이것이 당초 시공상태라고 단정하기는 곤란한 것으로 사료된다. 방파호안의 법선형태가 우각부를 형성하고 있고, 전면수역에 천퇴(압초지대)가 발달되어 있어 파랑이 집중되는 현상이 나타나 인근지역보다 파고가 다소 증폭되는 현상이 발생하여 인근지역에서는 피해가 발생하지 않았으나 본 지역에서는 피해가 발생한 것으로 사료된다. 방파호안이 쇄파대에 위치하고 구조물 전면지역의 해저질이 모래이므로 충격쇄파압 및 국부세굴이 발생하기 때문에 기초사석부가 침하 및 유실되고 연쇄적으로 피복재가 유실되고 상치콘크리트가 전도된 것으로 사료된다.

해양수산부에서 2005년 신규 심해설계파를 제시하였는 바, 금회 피해를 입은 구간에 대해서는 신규로 설계파를 추정하여 설계파고를 상향조정하고, 최신 설계기준을 적용하여 피복재 중량을 상향시켜 보강할 것과 향후 단면설계시에는 우각부의 파랑집중현상을 고려하여 피복재 중량을 결정하고, 주변 지형여건과 해저질 등을 감안하여 세굴방지공을 설치할 것을 건의하였다. 최근 지구환경변화의 영향으로 심

해파고가 상향조정됨에 따라 구조물설계파도 증가되므로 피해구역 전면에 대한 현대중공업의 향후 매립계획을 조속히 시행하므로써 피해를 예방하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 조사는 울산지방해양수산청에서 발주한 “태풍 ‘나비’에 의한 울산항 시설물 피해원인 분석 및 파랑 수치모형실험 용역”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engrg., ASCE, 569-587.
- Battjes, J.A. and Beji, S. (1992). Breaking waves propagating over a shoal. Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Engrg., ASCE, 42-50.
- Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. J. Geoph. Research, 104, C4, 7649-7666.
- Eldeberky, Y. (1996). Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands.
- Eldeberky, Y. and Battjes, J.A. (1995). Parameterization of triad interactions in wave energy models. Proc. Coastal Dynamics Conf. '95, Gdansk, Poland, 140-148.

- Hasselmann, K. and Collins, J.I. (1968). Spectral dissipation of finite-depth gravity waves due to turbulent bottom friction. *J. Mar. Res.*, 26, 1-12.
- Madsen, O.S., Poon, Y.-K. and Graber, H.C. (1988). Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory. *Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engrg. ASCE*, 492-504.
- Shemdin, P., Hasselmann, K., Hsiao, S.V. and Herterich, K. (1978). Non-linear and linear bottom interaction effects in shallow water, in: *Turbulent Fluxes through the Sea Surface. Wave Dynamics and Prediction*, NATO Conf. Ser., V(1) 347-372.
- Vincent, C.L., Smith, J.M. and Davis, J. (1994) Parameterization of wave breaking in models. *Proc. of Int. Symp.: Waves -- Physical and Numerical Modelling*, Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada, M. Isaacson and M. Quick (Eds.), Vol. II, 753-762.
- WAMDI group (1988). The WAM model - a third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810.
- Weber, S.L. (1991) Eddy-viscosity and drag-law models for random ocean wave dissipation. *J. Fluid Mech.*, 232, 73-98.