

소파블록의 결합기술 개발

2011. 12



주 의

- 1. 이 보고서는 한국해양연구원에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
- 2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양연구원에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
- 3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.



소파블록의 결합기술 개발

2011. 12

제 출 문

한국해양연구원장 귀하

본 보고서를 “소파블록의 결합기술 개발” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2011. 12.

총괄연구책임자 : 오영민

참 여 연 구 원 : 한상훈, 오상호, 백원대,
장세철, 진재율, 한택희,
김윤철

위탁연구기관명 : 경원대학교

위탁연구책임자 : 백인열

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2010.1.1~2011.12.31	단계 구분	(해당단계) / (총단계)
연구사업명	소파블록의 결합기술 개발				
연구과제명					
연구책임자	오영민	해당단계 참여연구원수	총 : 15 명 내부 : 8 명 외부 : 7 명	해당단계 연구비	정부: 290,000 천원 기업: 천원 계: 290,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양연구원 연안개발에너지연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 : 경원대학교		연구책임자 : 백인열		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	105
<ul style="list-style-type: none"> - 지구 온난화로 인하여 설계파고 증가 - 방파제 보호용 소파블록의 피해 증대로 보수 보강 필요성 증대 - 소파블록을 상호 결합함으로써 안정성 증대 - 수리실험을 통하여 결합의 효과 검증 - 현장실험을 통하여 효과를 검증하기 위하여 강릉과 제주에서 실험 - 지속적인 모니터링으로 결합의 효과 검증이 필요 - 효율적인 결합재료의 개발 필요 - 고파랑에 의한 소파블록의 상호 충돌로 다리 부러짐 현상 발생 - 기존의 무근 tetrapod를 대체할 새로운 소파블록의 개발 필요성 증대 - 염해에 강한 FRP 철근을 삽입한 소파블록 개발 - 파괴실험을 통하여 안정성 입증 - 차후 방파제 현장에 설치하여 성능 검증이 필요 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	소파블록 결합, 현장실험, 설계파고 증가, 신형 소파블록, FRP 철근			
	영어	Binding of wave dissipating block, Field test, Design wave height increase, New type wave dissipating block, FRP steel bar			

요 약 문

I. 제목

소파블록의 결합기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- **기후변화로 인한 연안구조물의 설계파고 증가 추세**
 - 지구 온난화에 의한 수위상승 및 태풍의 강도 증가로 인해 설계파고가 종래에 비하여 커졌으며, 향후에도 증가 추세일 것으로 전망됨

- 설계파고 증가에 따른 방파제 **소파블록의 보수·신규설치의 필요성** 대두
 - 설계파고가 증가하면 방파제에 작용하는 파력을 저감시킬 목적으로 설치된 소파블록(대표적으로 Tetrapod)의 중량도 증가시켜야 함

- **기존 소파블록을 활용한 보강방법 개발의 필요성**
 - 기존 소파블록 전면 교체 시 막대한 비용이 소요될 뿐 아니라 환경적 악영향도 막대할 것임
 - 기존 소파블록을 교체 없이 활용하여 증가된 설계파고에 저항할 수 있는 보강 방안 수립이 요청되며, 본 연구에서 수행하고자 하는 소파블록 간 결합기술 개발은 매우 유용할 것으로 기대됨

- **신형 소파블록의 개발**
 - 기존에 국내에서 많이 쓰이고 있는 TTP는 64 ton 이상이면 구조적인 안정성 문제로 적용이 어려움.
 - 설계파고 증가에 따라 대형 소파블록의 필요성이 증대하여 일본 제품을 사용하고 있는 실정이라 기술료 지불이 불가피하다. 이제는 TTP를 대체할 수 있는 신형 소파블록의 자체 개발이 필요하다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

○ 소파블록의 결합기법 개발

- 소파블록 결합에 의한 효과를 검증하기 위한 수리모형실험
- 소파블록(TTP)이 설치되어 있는 현장에서 결속 실험
- 효과검증을 위한 모니터링

○ 신형 소파블록의 개발

- 친환경적인 소파블록의 설계
- 소파성능 파악을 위한 수리모형실험
- 구조체의 성능을 파악하기 위한 파괴실험

IV. 연구개발 결과

○ 소파블록의 결합기법 개발

- 소파블록을 결합하기 위한 여러 가지 방법을 사용하였다. 최종적으로 고강도 로프를 사용하여 tetrapod 2개를 서로 묶는 방법을 최선책으로 채택하였다.
- 효과를 입증하기 위하여 수리모형실험을 실시하였다. 고파랑에서 개별 tetrapod는 움직였지만 로프로 결합된 tetrapod는 움직이지 않아서 효과가 있는 것으로 판단된다.
- 강릉과 제주에서 현장실험을 실시하였다. 강릉의 강릉항 40톤, 심곡항 16톤, 해안도로 보호용 6.3톤의 tetrapod를 대상으로 2010년에 결속실험을 실시하였고, 제주의 모슬포항 16톤, 서귀포항 64톤, 성산포항 40톤에 대해서는 2011년 실시하였다.
- 결속한 이후 지금까지 tetrapod를 움직일만한 큰 파도가 내습하지 않아서 효과를 분명히 알기는 어렵지만 일부 로프가 끊어지는 등 파도에 저항하는 효과는 있는 것으로 판단된다.

○ 신형 소파블록의 개발

- 기존의 TTP는 대형화할 경우 다리가 부러지는 위험성이 높아진다. 정확한 기준은 없지만 대략 50톤 이상이면 부러질 가능성이 높아진다.
- TTP와 형상이 비슷하면서도 내부에 철근을 삽입하여 다리 부러짐을 방지할

목적으로 새로운 소파블록을 개발하였다.

- 자연 친화력을 높이기 위하여 해조류나 어류가 머물 수 있는 형상으로 개발하였으며 이름을 Eco-TTP로 하였다.
- 표면의 균열로 인한 염해를 방지하기 위하여 내부 철근은 유리섬유를 사용하였다.
- 소파블록 자체의 안정성을 조사하기 위하여 FEM 수치모델을 사용하였고 실제 형상을 대상으로 하중 재하실험을 실시하였다. 실험 결과, 자중의 5배 까지 하중을 가하여도 균열이 발생하지 않았다.
- 수리특성 실험에서는 TTP보다도 결합력(interlocking)이 좋아서 피해계수(KD)는 10.8 정도를 나타내었다. 공극률은 65%로 TTP의 50%보다도 높아서 경제성이 좋은 것으로 나타났다.

V. 연구개발 결과의 활용계획

- 방파제 유지관리를 담당하고 있는 국토해양부와 지방 어항을 관리하는 농림수산식품부와 협의하여 기존 방파제 전면에 기시공되어 있는 소파블록의 보수·보강에 적용 가능함
- TTP의 다리 부러짐이 발생할 가능성이 높은 곳에서는 내부를 유근으로 보강한 Eco-TTP를 사용한다면 소파블록의 안정성을 높일 수 있다. 또한, 어초의 역할도 수행할 수 있는 구조이기 때문에 어항의 방파제에 적용하면 효과적일 것이다.

summary

I. Title

Development of connection method of wave energy dissipating blocks

II. Objectives and necessities of the project

- Increase of design wave height against coastal structures by climate change
 - The design wave height would be increased by the water level rise and high typhoon power induced by climate change more than before and the trend would keep going on.
- Need to repair and newly build the wave energy dissipating blocks for breakwaters as the design wave height increase
 - The weight of blocks(for example tetrapod) should be increased to meet the demand of the breakwater stability against the wave height increase.
- Need of reinforcement method using existent blocks without installing new blocks
 - The replacement of blocks would not only cost too much but affect the environment maliciously.
 - It is very necessary to strengthen the breakwater without replacing the existing blocks that the binding technics would be very helpful to guarantee the stability of breakwater against the wave action.
- Development of new wave energy dissipating blocks block
 - It is no longer safe against the wave action to TTP, widely used in our country, over 64 ton weight from the view of structural stability.
 - It is so necessary to adopt the huge blocks to the breakwater according to the increase of design wave height that the Japanese made products are used to cause the payment of royalty. It is time to develop new blocks to replace the tetrapod.

III. Contents and range of the project

- Development of connection method of wave energy dissipating blocks
 - Hydraulic experiment to verify the effect of binding
 - Binding experiment in the field
 - Monitoring for the reliability check

- Development of new wave energy dissipating blocks
 - Design of environment friendly new blocks
 - Hydraulic experiment to investigate the wave dissipating function
 - Breaking test to investigate the function of structure itself

IV. Results of the project

- Development of connection method of wave energy dissipating blocks
 - We tried many ways to seek the best connection method, in the end connecting two TTP with the high strength rope was selected as the best.
 - Hydraulic experiment was executed to verify the finding. It was more effective to the bound TTP than single one under the high wave action that the connection method was turned to be useful to keep the breakwater from wave attacking.
 - Field experiment was executed in Kangneung and Jeju. It was done in 2010 for 40 ton TTP of Kangneung port, 16 ton TTP of Shimgok port, 6.3 ton TTP of coast road and in 2011 for 16 ton of Moseulpo port, 64 ton of Seokwipo port and 40 ton of Sungsanpo port.
 - It was wondered that the binding would be useful to protect the breakwater because there was no big wave surging the test however, showing the possibility from the incidence of rope cutting.

- Development of new wave energy dissipating blocks
 - The leg of TTP is subject to break by the wave action when the size becomes as large as 50 ton approximately.
 - The new block was developed to prevent it from breaking by installing fiber

bar inside, looking similar in shape with TTP.

- It was named Eco-TTP representing the eco friendly shape, giving the fish and sea weed the living space.
- The reinforcing steel bar was fiber glass material rather than steel to prevent it from corroding by the crack on the surface.
- An FEM numerical simulation was done to investigate the stability of block and load test was done with the prototype weighing 6.7 ton. In the result, it was unbroken under the load of 5 times self weight.
- It showed that the damage coefficient(KD) was 10.8 which is better than 7.8 of TTP and the porosity is 65% which is also better than 50% of TTP.

V. Application plan of the project result

- Binding technics would be available in ports and harbors managed by Ministry of maritime affairs
- Eco-TTP would be useful to increase the stability of breakwater by replacing the steel bar which is weak to corrosion with fiber glass in the area of high wave coming. It would be better in the fishing port from the characteristics of eco friendly shape.

목 차

제1장 서론	1
제1절 소파블록의 결합기술	1
제2절 신형 소파블록의 개발	2
제2장 국내외 기술개발 현황	3
제1절 소파블록의 결합기술	3
제2절 신형 소파블록의 개발	4
제3장 연구개발 수행 내용 및 결과	5
제1절 소파블록의 결합기술	5
1. 실내 실험	5
2. 현장 실험	9
가. 강릉	9
나. 제주	13
제2절 신형 소파블록의 개발	17
1. 신형 소파블록 실험체 제작	17
가. 실험체 제원	17
나. 신형소파블록 제작공정	19
다. 콘크리트 재료시험	21
2. 정착부 응력해석, 설계 및 계측센서 배치	22
가. 유한요소법을 이용한 응력해석	22
나. FRP 및 철근으로 보강한 소파블록 설계	26
다. 계측항목 및 계측센서 배치	29
3. 신형 소파블록 성능시험 및 결과분석	33
가. 소파블록 성능 시험	33
나. 결과분석	34
4. 소파블록 제원 및 계측센서 설치	41
가. 실험체 제원	41
나. 계측항목 및 계측센서 배치	43
5. 동적성능시험 및 부재응답 계측	50

가. 하중재하실험 구분	50
나. 재하바닥 구성	50
다. 하중재하실험	53
라. 부재 응답	56
마. 동적하중 산정	64
바. 실험체에 균열응력을 발생시키는 높이 산정	66
6. 수치모델 유한요소해석	68
가. 개요	68
나. 수치해석 모델의 작성 및 검증	68
다. 한계 낙하높이 산정	97
7. 결론	101
제4장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도	102
제1절 소파블록의 결합기술	102
제2절 신형 소파블록의 개발	102
제5장 연구개발결과의 활용계획	104
제1절 소파블록의 결합기술 개발	104
제2절 신형 소파블록의 개발	104
제6장 참고문헌	105

표 목 차

표 3.1.1 SuperMax의 인장강도	7
표 3.2.1 #1, #2 실험체 콘크리트 압축강도 실험 결과	21
표 3.2.2 #3 ~ #6 실험체 콘크리트 압축강도 실험 결과	21
표 3.2.3 350kN 재하시 소파블록 타입별 응력분포	24
표 3.2.4 동일한 최대인장응력(2.29MPa)이 발생하는 재하하중 (지점부 응력 제외)	25
표 3.2.5 FRP 품질시험 결과표	29
표 3.2.6 계측센서 종류 및 사양	30
표 3.2.7 계측센서의 수량	30
표 3.2.8 실험체 별 균열 유형	40
표 3.2.9 계측센서 종류	43
표 3.2.10 계측센서 사양 및 물량집계	47
표 3.2.11 변형률계 응답범위	47
표 3.2.12 계측센서 사양 및 물량집계	48
표 3.2.13 하중재하실험 경우	53
표 3.2.14 부재 응답 측정 계측 장비 사양	56
표 3.2.15 자유낙하 실험 단계별 작용 가속도	56
표 3.2.16 하중재하별 각 부위 최대 응력 : 신형 소파블록, 변형률계 NO 1 - 3	59
표 3.2.17 하중재하별 각 부위 최대 응력 : 신형소파블록, 변형률계 NO 4 - 6	59
표 3.2.18 하중재하별 각 부위 최대 응력 : 신형 소파블록, 변형률계 NO 7 - 9	60
표 3.2.19 하중재하별 각 부위 최대 응력 : 구형 소파블록, 변형률계 NO 1 - 3	62
표 3.2.20 하중재하별 각 부위 최대 응력 : 구형 소파블록, 변형률계 NO 4 - 6	63
표 3.2.21 하중재하별 각 부위 최대 응력 : 구형 소파블록, 변형률계 NO 7 - 9	63
표 3.2.22 TTP 자유낙하 실험 값	65
표 3.2.23 자유낙하 동적하중 산정 값	66
표 3.2.24 균열발생 자유낙하 높이	66

그림 3.2.21 #5실험체 하중-처짐(a), 철근게이지(b), 콘크리트 표면게이지(c), 균열사진(d)	39
그림 3.2.22 #6실험체 하중-처짐(a), 철근게이지(b), 콘크리트 표면게이지(c), 균열사진(d)	40
그림 3.2.23 TTP 제원	41
그림 3.2.24 신형 소파블록 형상	42
그림 3.2.25 신형 소파블록 보강사양	42
그림 3.2.26 센서 부착위치	43
그림 3.2.27 신형 소파블록 계측센서 전체 배치도 : 상부 시준	44
그림 3.2.28 구형 소파블록 계측센서 전체 배치도 : 상부 시준	45
그림 3.2.29 신형 소파블록 계측센서 설치전경 : 하부 시준	46
그림 3.2.30 구형 소파블록 계측센서 설치전경 : 하부 시준	46
그림 3.2.31 계측센서 설치 순서	49
그림 3.2.32 자유낙하와 회전낙하	50
그림 3.2.33 바닥 재질에 따른 재하위치 : 한국해양연구원 내부	51
그림 3.2.34 낙하하중의 지지를 위한 바닥 구성	52
그림 3.2.35 시험체 인상고리	54
그림 3.2.36 실험체의 낙하 방법과 바닥조건	55
그림 3.2.37 10cm 자유낙하실험부재의 수직방향 가속도 응답	57
그림 3.2.38 10cm 자유낙하실험부재의 분기부 응력 : 인장응력	58
그림 3.2.39 10cm 자유낙하실험부재의 분기부 응력 : 압축후 인장응력	58
그림 3.2.40 70cm 자유낙하실험부재의 수직방향 가속도 응답	60
그림 3.2.41 70cm 자유낙하실험부재의 분기부 응력 : 압축후 인장응력	61
그림 3.2.42 TTP를 콘크리트바닥에 자유낙하 시킨 경우의 가속도 시간이력	64
그림 3.2.43 구형 TTP 실험체의 균열응력 발생력 375kN에 대한 유한요소 해석	67
그림 3.2.44 신형소파블록의 균열응력 발생력 350kN에 대한 유한요소 해석	67
그림 3.2.45 TTP 3차원 수치모델	70
그림 3.2.46 바닥면 유한요소모델	71
그림 3.2.47 TTP 3점낙하 시뮬레이션 (콘크리트 바닥)	72
그림 3.2.48 콘크리트바닥 3점낙하 발생 균열도	73
그림 3.2.49 콘크리트바닥 3점낙하 발생 균열 (실험)	74
그림 3.2.50 콘크리트바닥 3점낙하 인장변형률	74
그림 3.2.51 콘크리트바닥 3점낙하 정점부 응답 시간이력	75

그림 3.2.52 콘크리트바닥 3점낙하 정점부 실측 가속도 응답 시간이력	75
그림 3.2.53 아스팔트바닥 3점낙하 발생 균열도	77
그림 3.2.54 콘크리트바닥 3점낙하 인장변형률	77
그림 3.2.55 아스팔트바닥 3점낙하 정점부 응답 시간이력	78
그림 3.2.56 콘크리트바닥 3점낙하 정점부 실측 가속도 응답 시간이력	79
그림 3.2.57 흙+강관 바닥 3점낙하 발생 균열도	81
그림 3.2.58 흙+강관 바닥 3점낙하 인장변형률	82
그림 3.2.59 흙+강관 바닥 3점낙하 정점부 응답 시간이력	83
그림 3.2.60 흙+강관 바닥 3점낙하 정점부 실측 가속도 응답 시간이력	84
그림 3.2.61 흙+강관 바닥 3점낙하 정점부 실측 가속도 응답 시간이력 비교	84
그림 3.2.62 FRP 봉의 응력-변형률선도	85
그림 3.2.63 신형 소파블록 유한요소모델	86
그림 3.2.64 콘크리트바닥 3점낙하 발생 균열도	88
그림 3.2.65 콘크리트바닥 3점낙하 인장변형률	89
그림 3.2.66 콘크리트바닥 3점낙하 정점부 응답 시간이력	90
그림 3.2.67 아스팔트바닥 3점낙하 발생 균열도	91
그림 3.2.68 아스팔트바닥 3점낙하 인장변형률	92
그림 3.2.69 아스팔트바닥 3점낙하 정점부 응답 시간이력	92
그림 3.2.70 흙+강관 바닥 3점낙하 발생 균열도	93
그림 3.2.71 흙+강관 바닥 3점낙하 인장변형률	94
그림 3.2.72 흙+강관 바닥 3점낙하 정점부 응답 시간이력	95
그림 3.2.73 흙+강관 바닥 3점낙하 정점부 실측 가속도 응답 시간이력 비교	96
그림 3.2.74 TTP 낙하높이에 따른 균열양상	98
그림 3.2.75 신형소파블록 낙하높이에 따른 균열양상	99
그림 3.2.76 신형소파블록 낙하높이에 따른 균열양상(계속)	100

제1장 서론

제1절 소파블록의 결합기술

최근에 지구 온난화의 영향으로 인한 설계파고의 증가로 인하여 방파제를 파도로 부터 보호하기 위하여 전면에 설치된 소파블록이 파손되거나 위치를 이탈하는 경향이 많이 발생하고 있다. 특히 2010년에 발생한 태풍 곤파스의 영향으로 서해안의 방파제 피해가 심각하였다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 정부에서는 전국의 국가 어항에 대하여 전면적인 보수 보강 방안을 수립하고 있는데 그 방안이라는 것이 대부분 소파블록을 좀 더 무거운 것으로 교체하거나 덧씌우는 것이어서 많은 비용이 소요된다. 한편 한국해양연구원(2005)은 심해 설계파를 재산정하여 파고를 높였는데 이로 인하여 전국의 항만과 방파제는 높아진 설계파고에 대비하여 안정성을 확보해야 하는 숙제를 안게 되었다. 설계파고가 높아짐에 따라 가장 민감하게 반응하는 부분은 방파제 전면에 설치된 소파블록이다. 국내에 설치된 소파블록은 대부분이 tetrapod(TTP)인데 이를 좀 더 무거운 것으로 교체하거나 교체가 어려울 경우에는 그 위에 덧씌우기를 하는 방법이 있는데 어느 방법을 사용하던지 막대한 비용과 시간이 소요된다는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위하여 소파블록을 결속하는 방법을 강구하였다. 소파블록을 서로 결속할 경우 이론적으로는 파도에 저항하는 무게가 두 배로 증가하게 되어 매우 안정한 것으로 판단된다.

소파블록을 결속하기 위한 방법을 연구하기 위하여 3.2톤 규모의 TTP를 실제로 구매하여 해양연구원에서 실험을 하였다. 결속하는 방법은 아마도 수십 가지는 넘을 것이다. 우선 몇 개를 서로 연결할 것인지 현장에서 복층으로 설치되어 있는 TTP를 위아래 층으로 결속할 것인지 아니면 상층만 결속할 것인지를 정해야 한다. 결속하는 방법도 두 개를 서로 한 묶음으로 할 것인지 아니면 따로따로 묶어서 연결할 것인지는도 결정해야 한다. 또한 결속재료는 stainless steel wire로 하고 U-bolt로 체결할 것인지 로프를 사용할 것인지는도 결정해야 한다. 이러한 모든 변수를 고려하여 가격과 결속방법의 편리성, 현장에서 장기간 파랑환경에 노출되었을 때의 안정성 등을 고려하여 최적의 방법을 강구하였다. 이 중에서 가장 중요한 고려 사항은 현장에서의 안정성일 것이다. 파랑하중에 쉽게 끊어진다면 아무리 작업성이 좋고 가격이 저렴해도 무용지물이기 때문이다. 이러한 관점에서 결속재료와 결속방법을 선정하여야 한다.

제2절 신형 소파블록의 개발

우리나라에서 사용하고 있는 소파블록은 거의 대부분이 tetrapod이다. 이 제품은 1950년대 개발되어 사용 초기부터 특허료가 없었기 때문에 전 세계적으로 가장 널리 쓰이고 있다. 초기에는 비교적 작은 규모의 TTP만 사용되었기 때문에 별 문제가 없었으나 항구가 대형화되고 설치 수심이 깊어짐에 따라 설계과고가 커지면서 점차 대형화되었다. TTP의 가장 큰 단점은 규모가 커지만 다리가 길어져서 부러질 가능성이 크다는 것이다. 소파블록은 자체의 무게로 파도에 저항하는 것도 필요하지만 상호 결속(interlocking)에 의하여 저항하는 효과가 크다는 것이 특징이다. 그런데 다리가 부러질 경우에는 이러한 장점이 사라지고 무게가 가벼워져서 쉽게 이탈하는 문제가 발생한다. 따라서 다리가 부러진 TTP는 신속하게 제거를 하고 새로 보강을 하여야하는데 현실은 그렇게 빨리 대응을 하지 못해 자칫 대형 사고를 초래할 수도 있다. 국내에서도 상기의 TTP의 장점 때문에 수많은 방파제 현장에서 사용되어 효과가 입증되었다. 그러나 최근에 설계과고가 커지고 대규모 태풍이 자주 발생하여 TTP의 크기도 커져서 많은 문제점이 노출되었다. 국내에는 TTP의 사용에 대한 규정이 없으나 BS(British Standard)에 의하면 30톤 이상은 사용을 하지 말 것을 권장하고 있다. 그러나 국내에서는 서귀포항에 72톤 규모의 TTP가 사용되는 등 TTP의 크기는 대부분 BS 기준을 넘어서고 있다.

항만 시설물의 안정성을 높이기 위해서는 기존의 TTP를 결속하는 방법도 중요하지만 고파랑에서 다리가 부러지는 않는 새로운 형태의 소파블록 개발이 무엇보다도 중요하다. 외국에서는 특히 일본에서는 다양한 형태의 소파블록의 개발되어 사용되고 있으나 국내의 실정은 TTP 일변도를 벗어나지 못하고 있는 실정이다. 최근에는 turnkey 제도로 인하여 특색 있는 설계를 하려는 움직임이 있어서 일본에서 사용하고 있는 sealock이나 dimple과 같은 대형 소파블록을 적용한 사례도 있으나 비싼 특허료를 지불해야 하기 때문에 우리의 기술로 만든 제품의 개발이 필요하다. 현재의 우리의 기술로 새로운 소파블록의 개발이 가능하며 상황에 맞추어서 적합한 제품을 적용해보려는 생각만 있다면 얼마든지 개발하여 적용할 수 있다. 사용해본 적이 없는 제품에 대한 두려움이나 사고가 발생할 경우의 책임문제 때문에 적용을 주저하는 우리의 풍토 때문에 개발이 되지 않고 있다.

제2장 국내외 기술개발 현황

제1절 소파블록의 결합기술

소파블록을 결합하여 높아지는 파고에 저항해보고자 하는 시도는 국내에서는 지금까지 없었다. 물론 기술자들 사이에서 이러한 아이디어는 제시된 적이 있으나 구체적으로 실친 사례는 없었다. 그 이유는 절박하지 않았기 때문인데 최근에 가거도 방파제의 연속적인 파손과 높아진 설계 파고는 어떤 형식으로든 소파블록의 보강을 필요로 하게 되었다. 외국에서도 이에 대한 연구가 활발한 것은 아니다. Sigurdarson 등(2006)은 Norway의 북부의 항구에 설치된 사석을 steel strap으로 결합한 예가 있는데 북해의 고파랑에 사석의 이탈을 막는 효과가 있는 것으로 보고되었다(그림 2.1.1. 참조). 그러나 이 방법은 철의 부식 문제 때문에 항구적인 대책이 될 수는 없고 임시방편에 머무를 것이다.

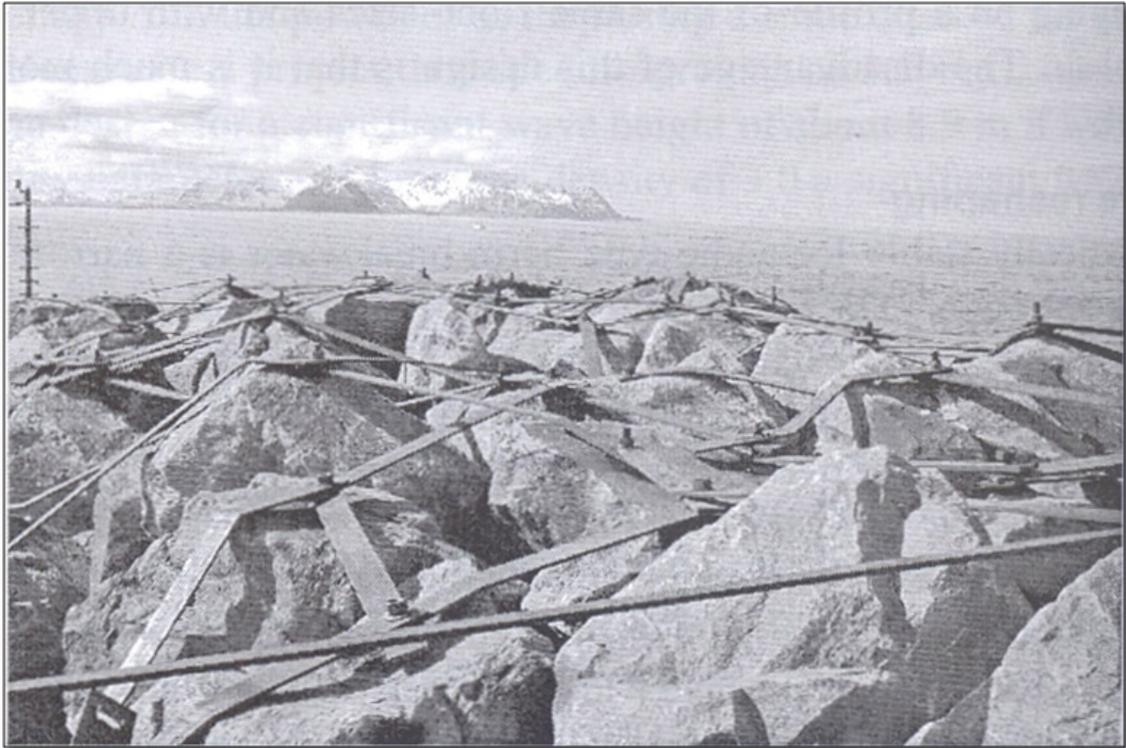


그림 2.1.1 steel strap으로 결합한 사석

소파블록의 보강 문제는 우리만의 문제는 아니고 지구 온난화에 의하여 조만간 전 세계적으로 공통된 문제가 될 것이다. 소파블록을 교체하지 않고 저렴한 비용으로 기존의 소파블록을 활용할 수 있는 방법의 개발은 매우 시급하고도 필요하다. 이 방법은 매우 단순하다고 할 수도 있지만 바다의 거친 환경에 적합한 결속 재료 개발로 접근한다면 매우 고부가 가치가 있는 연구로 발전할 수도 있다.

제2절 신형 소파블록의 개발

국내에서 신형 소파블록을 개발하고자 하는 시도는 상당히 미미하다. 여러 가지 이유가 있겠지만 개발에 상당한 시간과 비용이 소요되는데 비하여 개발 후에 현장 적용을 하기 위해서는 또 상당한 노력이 필요하기 때문이다. 그리고 국내는 거의 대부분이 TTP를 사용하기 때문에 다른 제품이 끼어들 여지가 별로 없다. TTP는 워낙 많이 사용을 해서 거푸집도 다양한 크기를 갖추고 있고 설치 노하우도 풍부하며 가격도 저렴하기 때문에 이를 극복하기가 쉽지 않다. 그러나 TTP의 최대 약점인 크기가 커질 경우 다리가 부러질 가능성이 높다는 점이 고파랑 하에서 다른 제품의 적용을 검토하게 만들고 있다. 그러나 이러한 분위기가 제품의 개발로 이어지는 않고 있으며 외국에서 개발하여 사용하고 있는 제품을 수입하는 것이 업체의 입장에서는 이익이라고 판단하기 때문에 국내에서는 개발 실적이 미미하다.

선진 외국에서는 이미 다양한 제품이 개발되어 사용되고 있다. 특히 항만 개발이 활발한 일본에서는 수많은 형태의 제품이 개발되어 사용되고 있으며 단순히 소파 기능이외에 자연과의 공생도 고려한 기능성 소파블록도 개발하고 있는 실정이다.

제3장 연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 소파블록의 결합기술

1. 실내 실험

소파블록을 결합하는 방법을 강구하기 위하여 실제 형상의 3.2톤 TTP를 구입하여 여러 가지 방법을 적용하였다. TTP 자체가 톤 단위의 무거운 물체이기 때문에 결속 재료는 인장 강도가 최소한 수십 톤 이상은 되어야 한다. 또한 바다의 험난한 환경에 적응하기 위해서 염해나 자외선에 강해야 한다는 조건도 만족해야 한다. 이러한 조건에 적합한 재료로 로프나 wire를 생각할 수 있다. 이러한 재료들을 이용하여 바다가 아닌 연구원 내부에서 실내 실험을 실시하여 가장 작업성이 우수하며 안정성이 높은 재료와 결속 방법을 연구하였다. 그림 3.1.1에서와 같이 TTP를 모두 연결하는 방법과 연결 부분을 U-bolt로 고정하는 방법을 포함하여 다양한 방법을 강구하였다. 여러 방법 중에서 작업성이나 내구성을 고려하여 최적의 방법을 선정하였다.



그림 3.3.1 tetrapod의 결합방법

로프의 경우는 가장 많이 사용하는 PP 로프는 인장강도가 보통 직경 20mm의 경우 3~4톤 정도이기 때문에 결합 재료로는 부적합한 것으로 판단하였다. 물론 굵기를 증가시키면 따라서 인장 강도도 증가하지만 작업성이 떨어지는 문제가 생긴다. 같은 이유로 wire는 같은 굵기의 로프보다는 인장 강도가 크지만 작업성이 떨어진다. 또한 결합의 마무리를 U-bolt로 해야 하는데 이 부분이 취약하여 wire 자체가 아무리 인장 강도가 높아도 제대로 기능을 발휘하지 못한다는 문제가 있다. 또한 현장에 설치할 때에는 부식에 강한 stainless 제품을 사용하게 되는데 가격이 비싸기 때문에 이를 노리는 사람들에 의하여 도난당할 가능성이 높다고 판단되었다. 그래서 인장강도가 높은 특수한 섬유로 제작한 Super-max라는 로프를 사용하기로 하였고 TTP는 두 개씩 짝을 지어 결속하는 방법이 최적이라고 결론을 내렸다. Super-max의 제원은 표 3.1.1 및 그림 3.1.2와 같다.

표 3.1.1 SuperMax의 인장강도

SuperMax® 12-Strand Braided Rope

DIA		Breaking Strength	
MM	INCH	Ton	kN
6	1/4	4.2	41.2
8	5/16	6.7	65.7
10	13/32	10.8	105.9
12	15/32	16.5	161.9
14	9/16	22.0	215.8
16	5/8	27.5	269.8
18	23/32	35.0	343.3
20	13/16	41.5	407.1
22	7/8	50.0	490.5
24	15/16	58.0	569.0
26	1-1/32	66.0	647.4
28	1-1/8	74.0	725.9
30	1-3/16	81.5	799.5
32	1-1/4	88.5	868.2
34	1-11/32	96.0	941.7
36	1-7/16	104.0	1020.2
38	1-1/2	112.0	1098.7
40	1-19/32	127.0	1245.8
42	1-21/32	140.0	1373.4
44	1-3/4	152.0	1491.1
46	1-13/16	165.0	1618.6
48	1-7/8	179.0	1755.9

- Melting point : 150°C
- Specific gravity : 0.97 (Float)
- Elongation at break : 4~5%
- Water absorption : None
- UV resistance : Good

Characteristics

- Maximum strength to weight ratio, and strength comparable to steel wire rope
- Lowest elongation
- Longer life, and easy handling
- Superior abrasion resistance
- Non-kinking, and non-rotating
- Easy to Splice

Applications

- Mooring Lines
- Anchor Lines
- Lifting Sling & Nets
- Towing Rope
- Heaving Rope
- Tug Rope

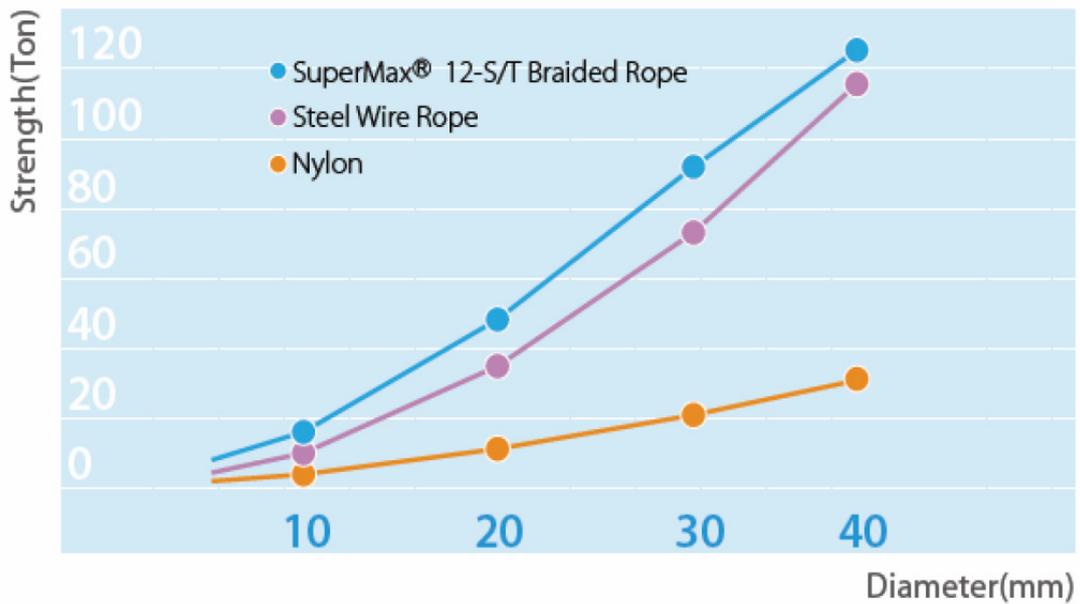
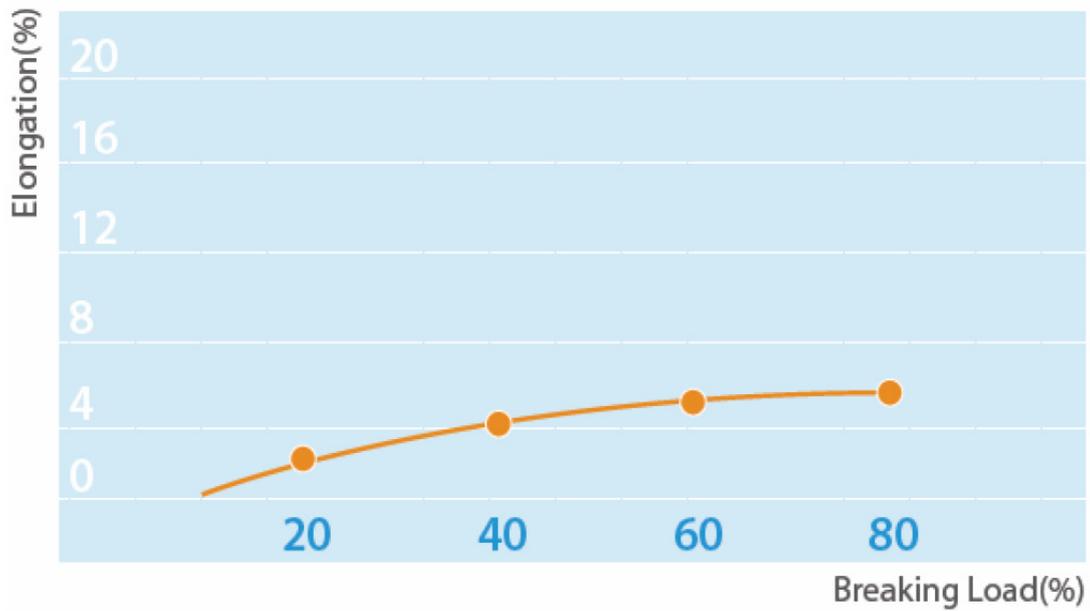


그림 4.1.2 SuperMax의 신률과 직경별 인장강도

2. 현장 실험

가. 강릉

현장실험은 강릉의 강릉항과 심곡항 그리고 부근의 해안도로의 TTP를 대상으로 하였다. 결속은 강릉항과 심곡항은 2010년 11월에 해안도로는 7월에 하였으며 2011년3월에 변화량을 비교하였다. 대상 TTP의 무게는 강릉항이 40톤, 심곡항은 16톤 그리고 해안도로는 6.3톤이다. 강릉 지역은 북서 계절풍이 강한 지역이기 때문에 많은 변화가 있을 것으로 예상하였으나 TTP의 이동은 거의 없었다. 모니터링 기간 중에 강릉에서 발생한 최대파랑은 강구항 전면 수심 15m에 설치한 파고계에 서 2011.1.1 관측된 유의파고 6.86m가 최고였다. 비록 TTP가 이동할 정도는 아니었지만 일부 로프는 절단되어 파랑 하중이 강하게 작용하였음을 알 수 있다.

모니터링은 방파제 전면에서 선박을 이용하여 사진을 찍는 방법을 사용하였는데 눈에 띄게 이동량이 많지 않으면 사진을 찍는 지점이 고정되어 있지 않기 때문에 구별하기가 매우 어려웠다. 원래 의도는 결합이 되어 있는 TTP는 이동하지 않고 주변의 미결합 TTP는 움직여서 결합의 효과를 보고자 하였으나 모니터링 기간에 이러한 변화를 발생할 정도로 큰 파도가 발생하지 않다. 아래의 그림은 세 곳에서 설치 전후의 TTP 형상을 나타낸다. 그림에서 보다시피 뚜렷한 변화는 보이지 않았으며 일부 로프는 절단되어 흔적만 남아 있었다.



그림 3.1.3 강릉항에서의 TTP 위치 변화 (a)2010.12.21 (b)2011.3.29

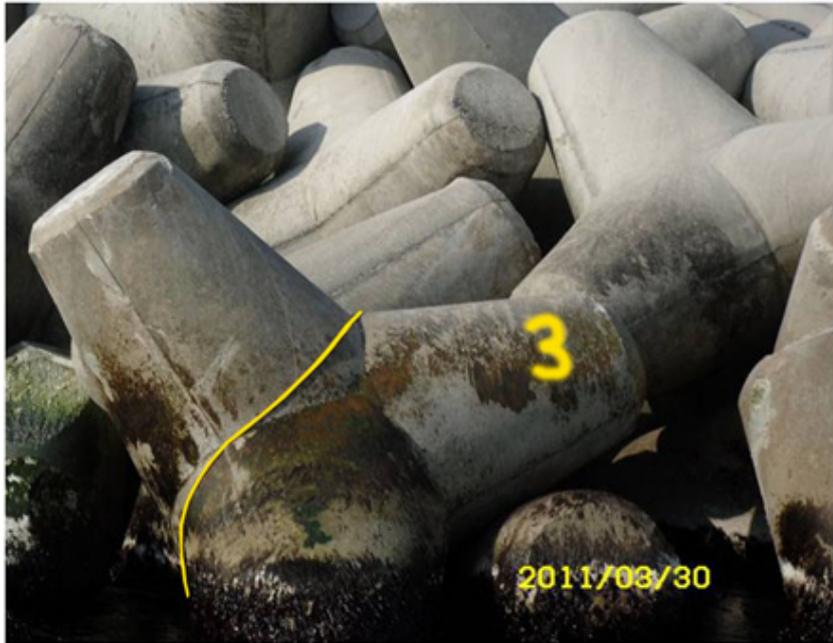


그림 3.1.4 심곡항에서의 TTP 위치 변화 (a)2010.12.21 (b)2011.3.30



그림 3.1.5 해안도로에서의 TTP 위치 변화 (a)2010.12.21 (b)2011.3.30

나. 제주

2010년에 강릉에 이어서 2011년에는 제주에서 현장실험을 실시하였다. 불행히도 강릉에서는 모니터링 기간에 큰 파도가 발생하지 않아서 결속의 효과를 보지 못했다. 그래서 국내에서 파도가 비교적 크다고 알려진 제주 해역의 세 곳에서 결속실험을 하기로 하였다. 장소는 서쪽부터 모슬포와 서귀포 그리고 동쪽의 성산을 선정하였다. TTP의 크기도 달리 하여 모슬포는 16톤, 서귀포는 64톤, 성산은 40톤을 대상으로 하였다. 실험은 2011.7.2에 실시하였는데 여름철 태풍이 오기 전에 설치하여 태풍에 의한 영향을 보고자 하였다. 그러나 불행히도 태풍이 발생하기는 하였으나 제주도로는 오지를 앓고 서해안을 관통하여 가거도항에 막대한 피해를 남겼다. 제주도에서의 실험은 내년 태풍에 대비하여 계속 모니터링을 실시할 예정이다. 아래의 그림은 세 곳의 로프 결속 상태를 보여준다.

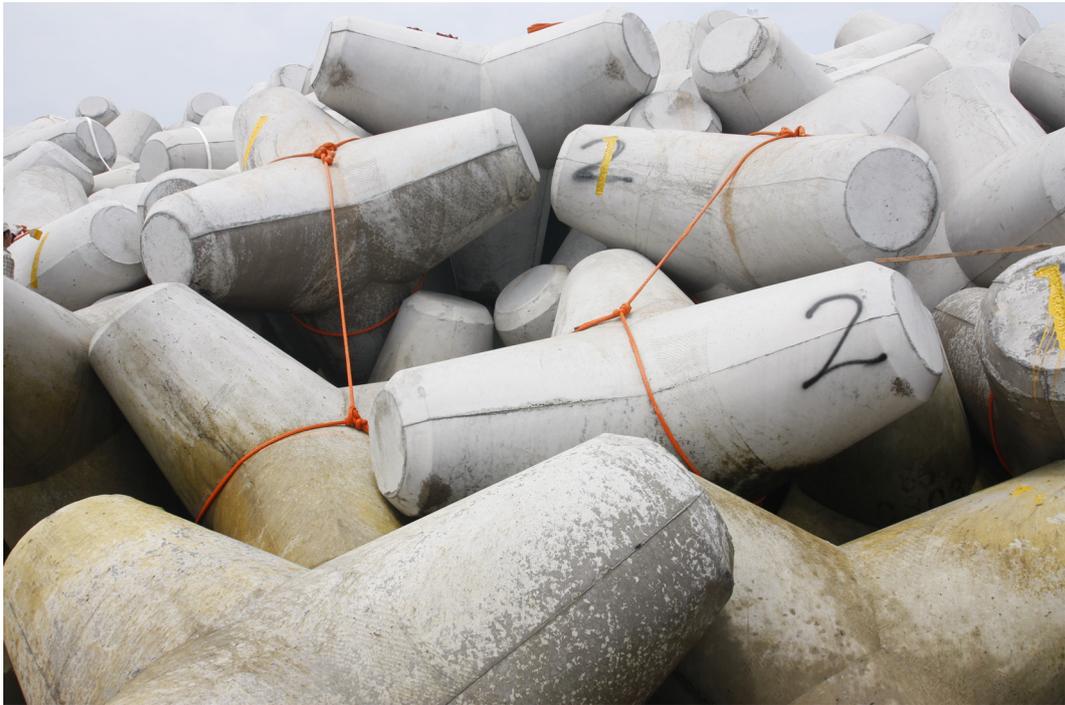


그림 3.1.6 모슬포항 로프 결속 (a)원경과 (b)근경



그림 3.1.7 서귀포항 로프 결속 (a)원경과 (b)근경



그림 3.1.8 성산포항 로프 결속 (a)원경과 (b)근경

제2절 신형 소파블록의 개발

1. 신형 소파블록 실험체 제작

가. 실험체 제원

대상 실험체는 한국해양연구원에서 제시한 기본 도면과 제원을 사용하여 해양 소파블록을 실물 크기로 모델링한다. 신형소파블록 시작용을 대상으로 실험을 통하여 역학적 성능을 측정하고, 수치모델에 대한 유한요소법 수치해석을 통하여 소파블록의 성능을 예측하였다.

- 소파블록 중량 : 61.8kN(실중량 : 56.4kN)
- 소파블록 높이 : 2.5m
- 콘크리트 설계강도 : $f_{ck} = 21\text{MPa}$

이 연구에서는 실험체를 모두 6개를 제작하며, 2차로 나누어 1차에서는 무근 실험체와 철근 실험체에 대한 실험을 수행하였고, 이를 분석한 후 2차 실험체를 설계하여 성능실험을 수행하였다.

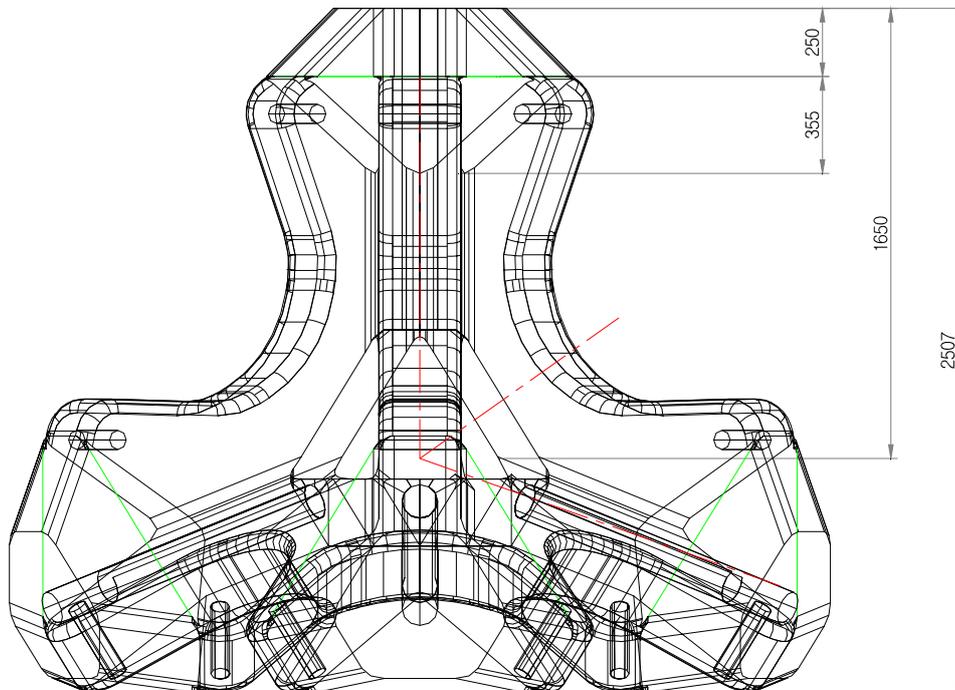


그림 3.2.1 소파블록 정면도

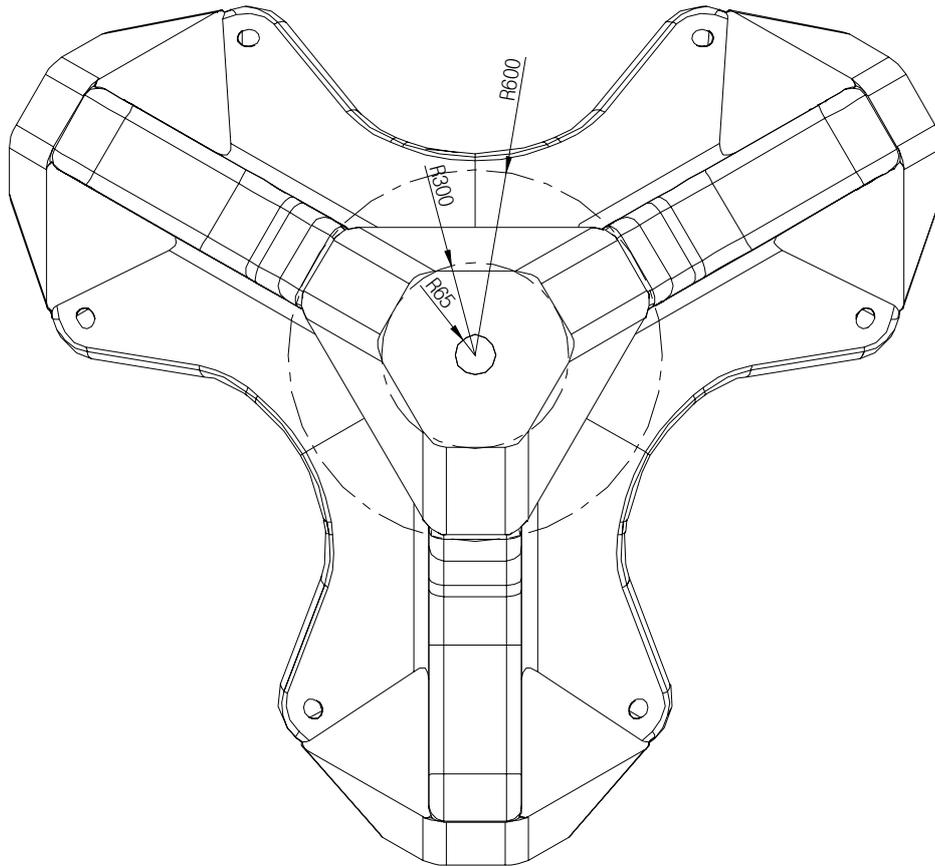


그림 3.2.2 소파블록 평면도

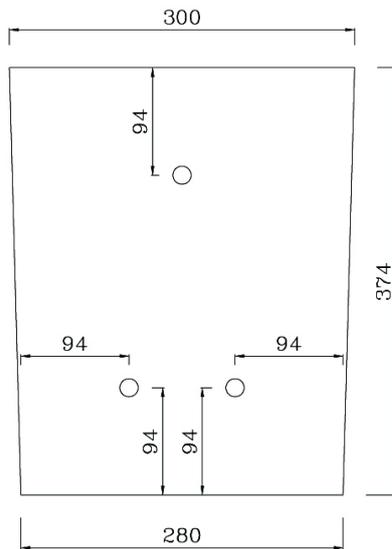


그림 3.2.3 소파블록 설계단면

나. 신형소파블록 제작공정

(1) 설계도면에 따른 보강재를 조립한다.



그림 3.2.4 소파블록 보강재 조립

(2) 측면, 상면 폼을 설치한다.



그림 3.2.5 소파블록 폼 설치

(3) 콘크리트를 타설



그림 3.2.6 콘크리트 타설

(4) 양생



그림 3.2.7 양생

다. 콘크리트 재료시험

표 3.2.1 #1, #2 실험체 콘크리트 압축강도 실험 결과

시험 결과				
시험항목	단위	구분	결과	시험방법
압축강도	MPa	1	31.7	KS F 2405 : 2005
압축강도	MPa	2	30.1	KS F 2405 : 2005
압축강도	MPa	3	28.6	KS F 2405 : 2005
압축강도	MPa	4	30.1	KS F 2405 : 2005
압축강도	MPa	5	30.5	KS F 2405 : 2005
압축강도	MPa	6	30.6	KS F 2405 : 2005
평균	MPa		30.27	

표 3.3.2 #3 ~ #6 실험체 콘크리트 압축강도 실험 결과

성과 결과							
검사 종목	검사 방법	검사 결과					
		시료 번호	기준강도 (MPa)	재령(일)	면적 (mm ²)	하중(N)	압축강도(MPa)
콘크리트 압축 강도	KS F 2405	1-1	20.59	28	7,854	239,400	30.481
		1-2				242,293	30.850
		1-3				233,996	29.793
		2-1	20.59	28	7,854	228,593	29.105
		2-2				247,098	31.462
		2-3				256,895	32.709
		평균					

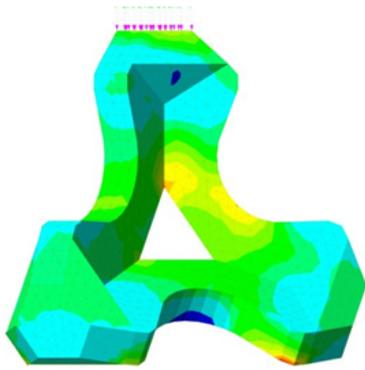


그림 3.2.9 수평방향 응력분포

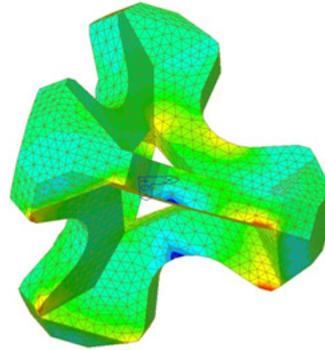
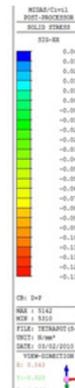


그림 3.2.10 수평방향 응력분포(저면)



- 콘크리트에 발생하는 인장응력으로 인하여 균열이 발생하는 위치 및 응력값 해석
- 수평방향 최대 인장응력은 보의 하단부에서 발생(갈은 푸른색 부분)

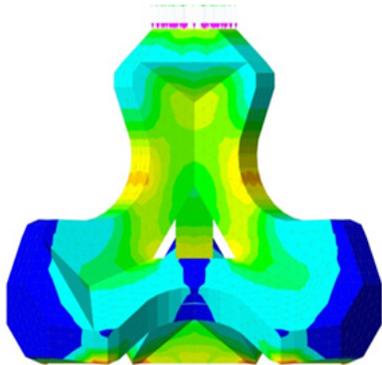


그림 3.2.11 수직축방향 응력분포

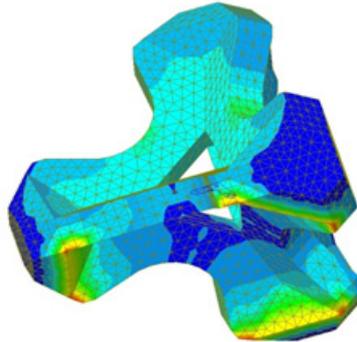
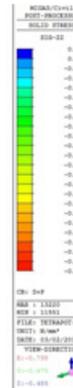


그림 3.2.12 수직축방향 응력분포(저면)



- 내부에 발생하는 수직방향응력은 콘크리트에 주로 압축응력을 발생시켜 강도에 비하여 문제가 될 만큼 큰 응력값은 발생하지 않았음.

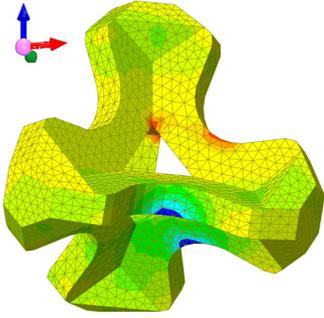
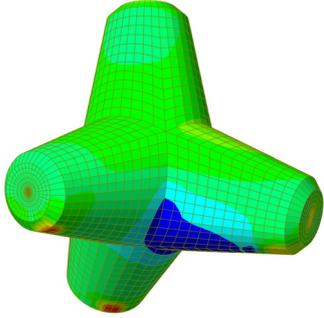
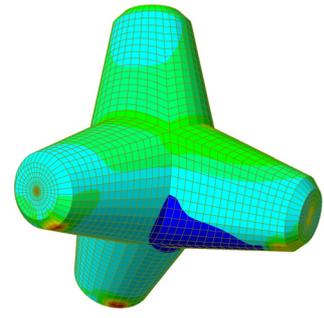
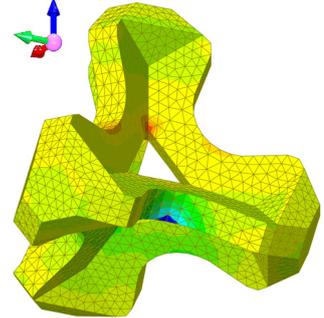
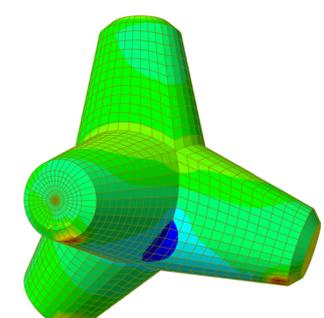
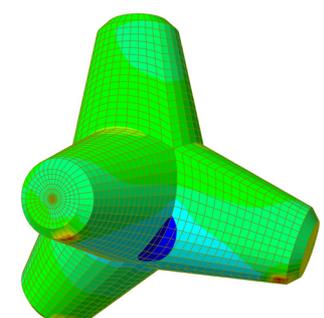
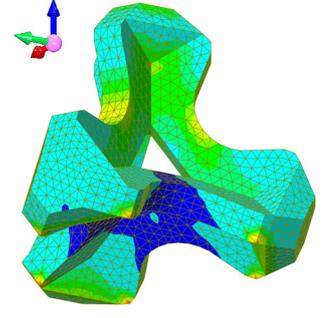
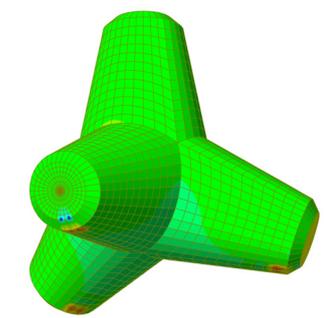
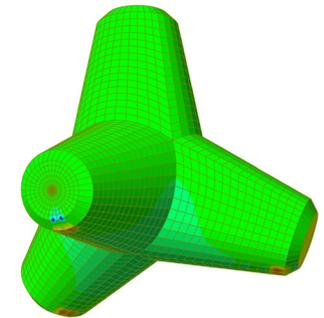
(1) 350kN 재하시 소파블록 타입별 응력분포

표 3.2.3 350kN 재하시 소파블록 타입별 응력분포

	A-Type (6.3 ton, 2.502 m)	B1-Type (6.3 ton, 2.070 m)	B2-Type (10 ton, 2.620 m)
X 축 방 향			
	인장 : 1.75 MPa 압축 : 1.74 MPa	인장 : 1.15 MPa 압축 : 3.42 MPa (지점)	인장 : 0.90 MPa 압축 : 3.18 MPa (지점)
Y 축 방 향			
	인장 : 2.29 MPa 압축 : 2.12 MPa	인장 : 1.39 MPa 압축 : 3.33 MPa (지점)	인장 : 1.08 MPa 압축 : 3.26 MPa (지점)
Z 축 방 향			
	인장 : 0.21 MPa 압축 : 3.18 MPa (지점)	인장 : 2.82 MPa (지점) 압축 : 7.80 MPa (지점)	인장 : 2.74 MPa (지점) 압축 : 7.33 MPa (지점)

(2) 동일한 최대인장응력(2.29MPa)이 발생하는 재하하중 (지점부 응력 제외)

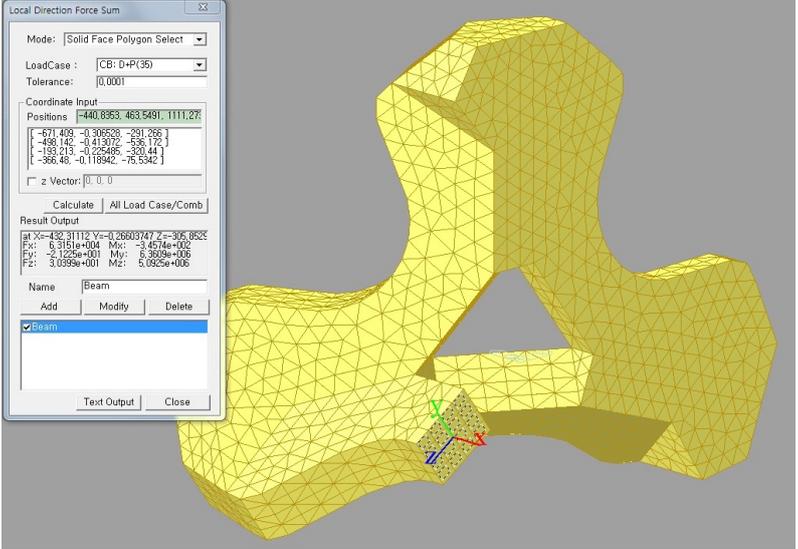
표 3.2.4 동일한 최대인장응력(2.29MPa)이 발생하는 재하하중 (지점부 응력 제외)

	A-Type 350 kN 재하	B1-Type 605 kN 재하	B2-Type 821 kN 재하
X 축 방 향			
	인장 : 1.75 MPa 압축 : 1.74 MPa	인장 : 1.89 MPa 압축 : 5.55 MPa	인장 : 1.89 MPa 압축 : 6.49 MPa
Y 축 방 향			
	인장 : 2.29 MPa 압축 : 2.12 MPa	인장 : 2.29 MPa 압축 : 5.40 MPa	인장 : 2.29 MPa 압축 : 6.66 MPa
Z 축 방 향			
	인장 : 0.21 MPa 압축 : 3.18 MPa (지점)	인장 : 4.55 MPa 압축 : 12.65 MPa (지점)	인장 : 5.57 MPa 압축 : 14.99 MPa (지점)

나. FRP 및 철근으로 보강한 소파블록 설계

(1) 설계단면에 작용하는 단면력 산정

A-Type 최대인장응력 부분의 국부좌표 힘 합계

A-Type (350 kN 재하)	
<p>요소 국부좌표계 힘 합계 산출을 위한 마이다스 사용</p>	
<p>결과값</p>	<p>----- LOCAL DIRECTION FORCE SUM RESULT -----</p> <p style="text-align: right;">unit: N, mm</p> <p>** FUNCTION NAME : Beam at X=-432.31112 Y=-0.26603747 Z=-305.85293</p> <p>Fx: 6.3151e+004 Mx: -3.4574e+002 Fy: -2.1225e+001 My: 6.3609e+006 Fz: 3.0399e+001 Mz: 5.0925e+006</p>

(2) 철근 보강 소파블록 설계

(가) 최소철근량

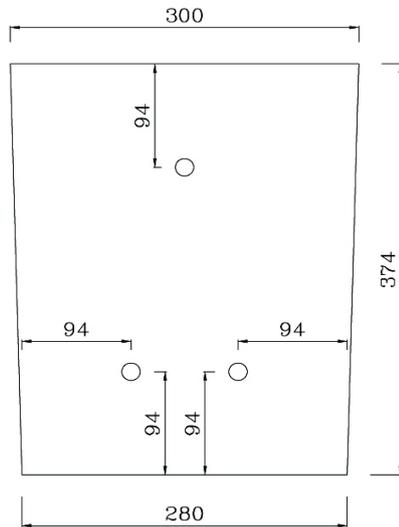


그림 3.2.13 소파블록 보의 단면
(가로축:y축, 세로축: z축)

400 MPa 철근 기준

힘 부재의 최소 철근량(mm^2) (콘크리트구조설계기준 6.3.2)	y축	284.2
	z축	269.7
벽체의 수평 최소 철근량(mm^2) (콘크리트구조설계기준 11.3)		224.4
철근 콘크리트 슬래브의 최소 철근량(mm^2) (콘크리트구조설계기준 5.7.2)		224.4

D 13	#1 실험체의 철근량(mm^2) : 3-D 13	가로축(y축)	2 - D 13 : 253.4	NG
		세로축(z축)	1 - D 13 : 126.7	NG
D 16 (400MPa)	#6 실험체의 철근량(mm^2) : 3-D 16	가로축(y축)	2 - D 16 : 397.2	OK
		세로축(z축)	1-1/2 - D 16 : 198.6+ 99.3=297.9	OK

(나) 철근 응력 계산

콘크리트 균열 발생 직후 : $P = 350kN$

$$F_x = 63.15kN, M_y = 6.36kN \cdot m, M_z = 5.09kN \cdot m$$

① 3-D13 실험체

$$A_s = 380.1mm^2(D_{13} - 3), (F_y = 300MPa)$$

	1번 철근	2번 철근	3번 철근
F_x	166	166	166
M_y	-0.34	84.4	84.4
M_z	78.2	-1.32	165.5
$F_x + M_y + M_z$	243.86	249.08	415.9* > 300

* 철근이 항복한 실험결과와 일치함 - 철근량이 부족하여 균열과 동시에 항복

② 3-D16 실험체

$$A_s = 595.8mm^2(3 - D_{16}), F_y = 400MPa$$

	①번 철근	②번 철근	③번 철근
F_x	106	106	106
M_y	8.68	61.4	61.4
M_z	40.8	13.7	67.5
$F_x + M_y + M_z$	155.48	181.1	234.9

* 최소 철근량을 만족시키며, 철근의 항복강도까지 여유가 있음.

(3) FRP 보강 소파블록 설계

표 3.2.5 FRP 품질시험 결과표

종류	지름 (mm)	시험체 NO.	면적 (cm ²)	하중 (kgf)	인장강도 (Mpa)	변형률	탄성계수 (Gpa)	
D W G R	6	1	0.2826	3532.0	1225.7	2.41	50.9	
		2	0.2826	3614.0	1254.1	2.42	51.8	
		3	0.2826	3666.6	1272.4	2.43	52.4	
	평균					1250.7	2.42	51.7
	9	1	0.6359	7816.6	1205.5	1205.5	2.30	52.4
		2	0.6359	7910.0	1220.0	1220.0	2.41	50.6
		3	0.6359	7886.0	1216.3	1216.3	2.38	51.1
	평균					1213.9	2.36	51.4
	13	1	1.2661	14568.0	1128.4	1128.4	2.20	51.3
		2	1.2661	14234.0	1102.5	1102.5	2.18	50.6
		3	1.2661	14126.0	1094.1	1094.1	2.14	51.1
	평균					1108.3	2.17	51.0

2-D 16 과 동일강도를 갖는 유리섬유 봉의 면적(mm ²)	127.0 (2-DWGR9)
--	-----------------

유리섬유 면적 DWGR9 = 63.59mm² (63.59*2=127.18)

DWGR13 = 126.61mm²

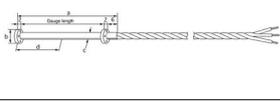
다. 계측항목 및 계측센서 배치

본 실험은 신형소파블록의 역학적인 성능을 측정하기 위한 것으로 부재의 제작 중 부재의 실험을 위한 계측센서를 설치하였다.

(1) 계측센서 종류 및 사양검토

실험부재의 응답을 측정하기 위한 계측항목별 계측센서의 분류는 다음과 같다.

표 3.2.6 계측센서 종류 및 사양

종류	이미지	사양
철근 변형률계		<ul style="list-style-type: none"> ▶ 저항치 :120Ω ▶ 사용온도 범위 : -20 ~ +80℃ ▶ 온도보상 범위 : +20 ~ +80℃ ▶ 실온에 있어서의 Strain 한계 : 3%(30000 x 10⁻⁶) ▶ 실온에 있어서의 피로한계 : 1 x 10⁻⁶(±1500 x 10⁻⁶)
		
매립형 콘크리트 변형률계		<ul style="list-style-type: none"> ▶ 몰드게이지 PM Type 은 콘크리트나 몰탈에 매설하여 내부 스트레인을 측정한다. 재하시험등의 단시간 측정에 적합하다. ▶ 저항치 : 120Ω ▶ 사용온도 범위 : -20 ~ +60℃ ▶ 실온에 있어서의 Strain 한계 : 2%(20000 x 10⁻⁶)
		
표면 콘크리트 변형률계		<ul style="list-style-type: none"> ▶ 리드선 폴리에스텔 게이지 "P" Series는 폴리에스텔 수지를 베이스로 한 선 게이지로 비닐 리드선이 부착되어 있다. 게이지 단자의 부착이나 결선이 필요하지 않기 때문에 작업시간이 단축된다. ▶ 저항치 : 120Ω ▶ 사용온도 범위 : -20 ~ +80℃ ▶ 실온에 있어서의 Strain 한계 : 2%(20000 x 10⁻⁶)
		

본 과업의 실험에 사용되는 계측센서의 수량은 다음과 같다.

표 3.2.7 계측센서의 수량

실험체	Steel Gauge		Concrete Gauge		변위계	합 계
	Beam	Column	매립 Concrete	표면 Concrete		
#1			8	8	1	17
#2	12	4		8	1	25
#3	6	2		3	1	12
#4	6	2		3	1	12
#5	3	2		3	1	9
#6	6	2		3	1	12
합 계	33	12	8	28	6	87

(2) 계측센서 설치

센서 부착 작업 사진, 계측 내부 사진 은 다음 그림 3.2.14, 3.2.15와 같다.



그림 3.2.14 철근 게이지 작업

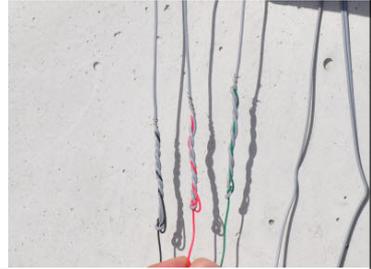
		
<p>콘크리트 게이지 선 연장 작업</p>	<p>콘크리트 매립 게이지 부착 완료 상태(1)</p>	<p>콘크리트 매립 게이지 부착 완료 상태(2)</p>

그림 3.2.15 콘크리트 게이지 작업

3. 신형소파블록 성능 실험 및 결과분석

가. 소파블록 성능 실험

(1) 유압장비



(a)



(b)

그림 3.2.16 가력 프레임 (a) 가력기 (b)

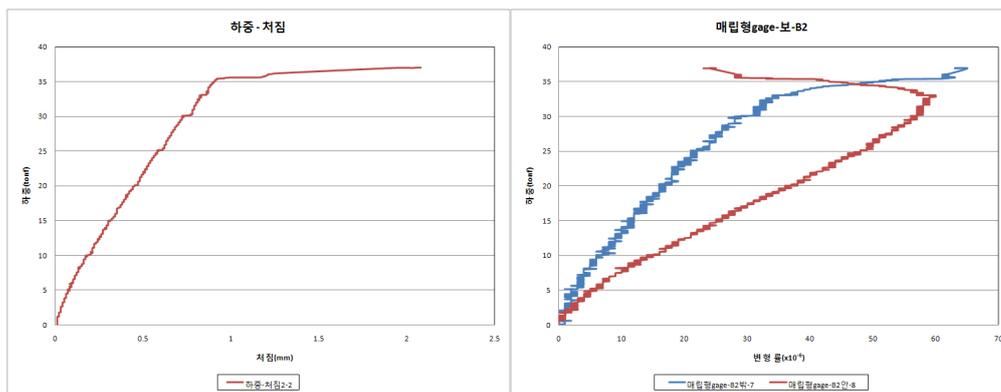
나. 결과분석

(1) 개요

재하 하중을 증가시키면서 신행 소파블록 내·외부에 설치한 센서들의 변형률 값을 계측하고 그 결과를 도시하였다.

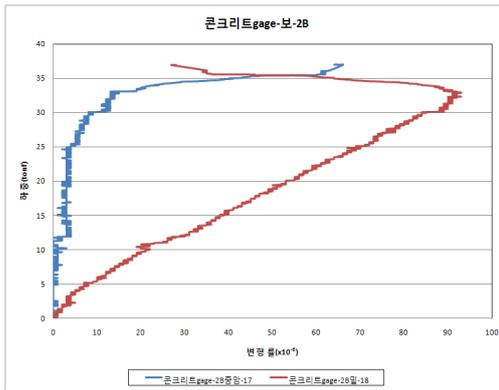
(2) 보강하지 않은 신행소파블록

보강을 하지 않은 #1 실험체에 하중을 재하하여 소파블록의 역학적 성능을 분석한다. #1실험체는 그림 3.2.17 (a)에서 보는 바와 같이 35.24tonf 의 하중을 재하 했을 때 균열이 발생하였고 그 이후 콘크리트가 인장을 받아주지 못해 하중의 증가 없이도 변형이 계속 일어남을 볼 수 있다. 콘크리트 내부의 센서도 그림 3.2.17(b)에서 보는 바와 같이 콘크리트가 균열이 일어나기 전까지 선형 변형을 일으키고 있었으나 콘크리트가 균열이 생김과 동시에 발산함을 볼 수 있다. 콘크리트 표면 센서도 콘크리트 매립형 센서와 비슷한 양상을 보임을 그림 3.2.17(c)를 통해 확인 할 수 있었다. 그림 3.2.17(d)는 콘크리트가 인장변형 최대에 도달했을 때 균열이 발생하였고 그 인장을 받아줄 보강재가 없으므로 균열이 발생하고 즉시 보를 관통함을 알 수 있다.



(a)

(b)



(c)



(d)

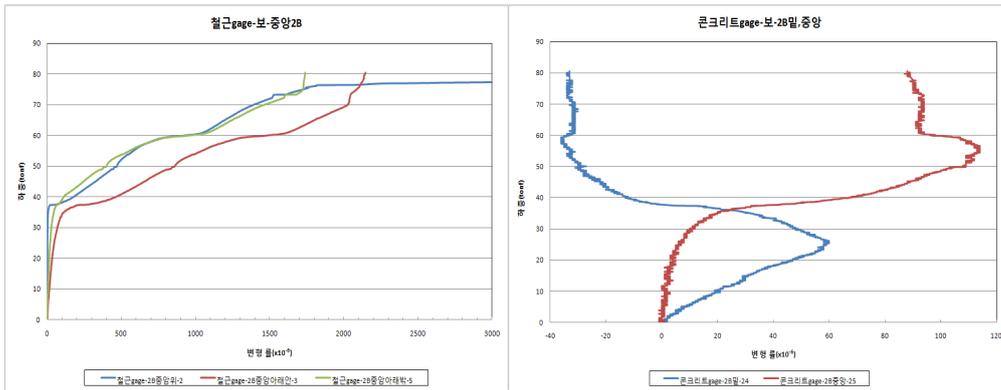
그림 3.2.17 #1실험체 하중-처짐(a), 매립형게이지(b), 표면게이지(c), 균열사진(d)

(3) 보강재의 효과

하중 재하에 대한 보강재의 효과를 분석하기 위하여, 3-D13-300MPa, 3-DWGR9, 3-DWGR9-보조철근, 1-DWGR13, 3-D16-400MPa로 보강된 실험체 2, 3, 4, 5, 6번의 결과를 비교한다.

(가) #2 실험체(3-D13-300MPa)

#2 실험체는 3.2.18(a)에서 보는바와 같이 38tonf의 하중이 재하하였을 때 균열이 발생하였고 3-D13-300MPa의 보강재가 콘크리트가 받던 인장력을 대신 받아주기 때문에 80tonf 까지 하중을 재하 할 수 있었다. 표면에 부착한 콘크리트 센서도 균열이 발생하기 전까지 선형 변형을 일으키고 있었으나 콘크리트에 균열이 발생한 후 발산함을 그림 3.2.18(b)를 통해 볼 수 있다. 콘크리트에 균열이 발생하면서 콘크리트가 받아주던 인장력을 철근이 받아주기 때문에 균열이 차츰 커지고 결국 보를 관통함을 그림 3.2.18(c)를 통해 확인할 수 있다.



(a)

(b)



(c)

그림 3.2.18 #2 실험체 철근게이지(a), 콘크리트 표면게이지(b), 균열사진(c)

(나) #3 실험체(3-DWGR9)

#3 실험체는 3.2.19(a)에서 보는바와 같이 39.45tonf의 하중이 재하하였을 때 균열이 발생하였고 3-DWGR9의 보강재가 콘크리트가 받던 인장력을 대신 받아주기 때문에 90tonf 까지 하중을 재하 할 수 있었으나 FRP보강재는 철근과 다르게 유연한 성질을 갖고 있으므로 콘크리트가 균열이 발생하고 나서 콘크리트가 받던 인장력을 FRP가 대신 받아주면서 변형이 크게 일어나는 것을 그림 3.2.19(b)를 통해 볼 수 있다. 표면에 부착한 콘크리트 센서도 균열이 발생하기 전까지 선형 변형을 일으키고 있었으나 콘크리트에 균열이 발생한 후 발산함을 그림 3.2.19(c)를 통해 볼 수 있다. 콘크리트에 균열이 발생하면서 콘크리트가 받아주던 인장력을 FRP가 받아주지만 유연한 성질 때문에 균열이 급작스럽게 보를 관통함을 그림 3.2.19(d)를 통해 확인하였다.

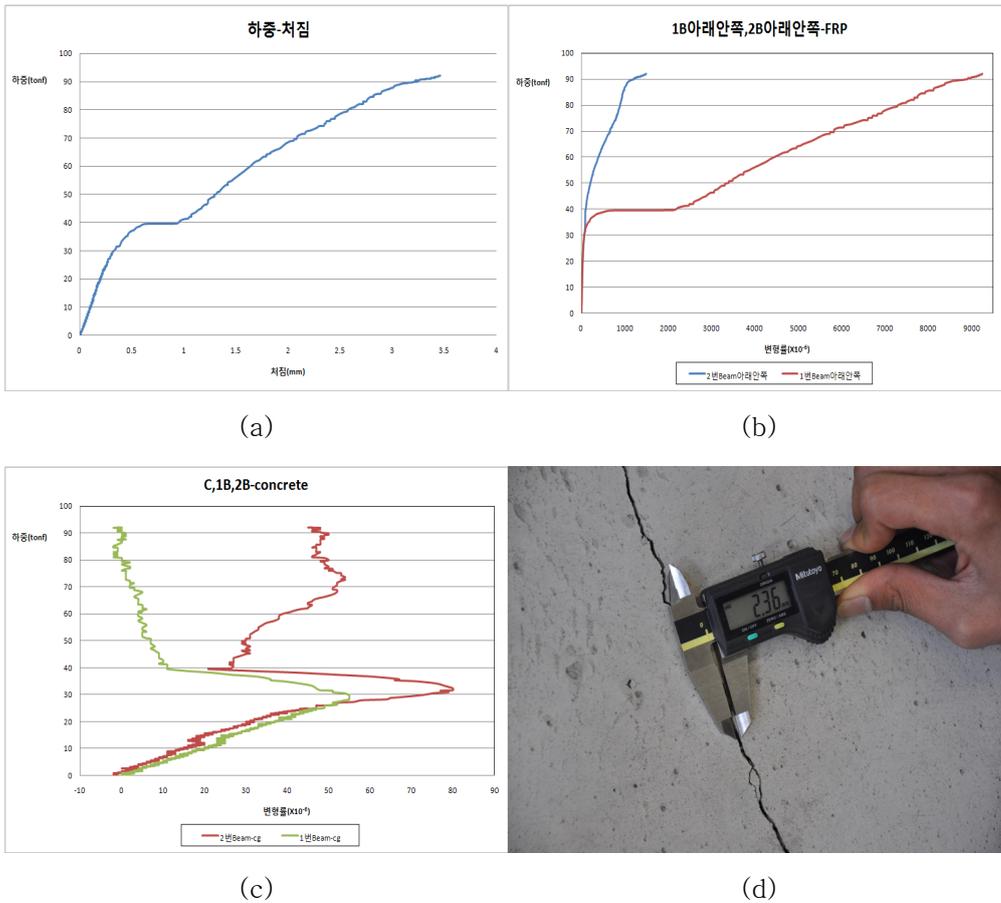


그림 3.2.19 #3 실험체 하중-처짐(a), 철근게이지(b), 콘크리트 표면게이지(c), 균열사진(d)

(다) #4 실험체(3-DWGR-보조철근)

#4 실험체는 3.2.20(a)에서 보는바와 같이 45.02tonf의 하중이 재하하였을 때 균열이 발생하였고 3-DWGR9의 보강재가 콘크리트가 받던 인장력을 대신 받아주기 때문에 90tonf 까지 하중을 재하 할 수 있었으나 FRP보강재는 철근과 다르게 유연한 성질을 갖고 있으므로 콘크리트가 균열이 발생하고 나서 콘크리트가 받던 인장력을 FRP가 대신 받아주면서 변형이 크게 일어나는 것을 그림 3.2.20(b)를 통해 볼 수 있다. 표면에 부착한 콘크리트 센서도 균열이 발생하기 전까지 선형 변형을 일으키고 있었으나 콘크리트에 균열이 발생한 후 발산함을 그림 3.2.20(c)를 통해 볼 수 있다. 콘크리트에 균열이 발생하면서 콘크리트가 받아주던 인장력을 FRP가 받아주지만 유연한 성질 때문에 균열이 급작스럽게 보를 관통함을 그림 3.2.20(d)를 통해 확인하였다.

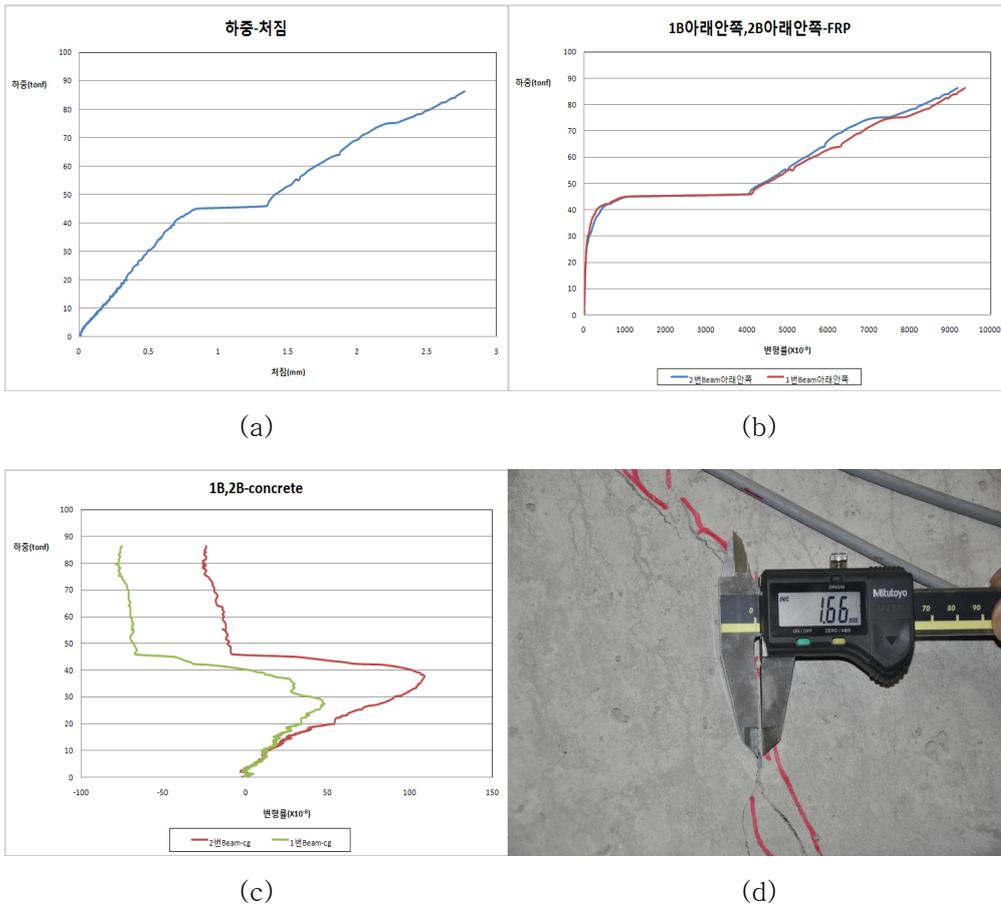
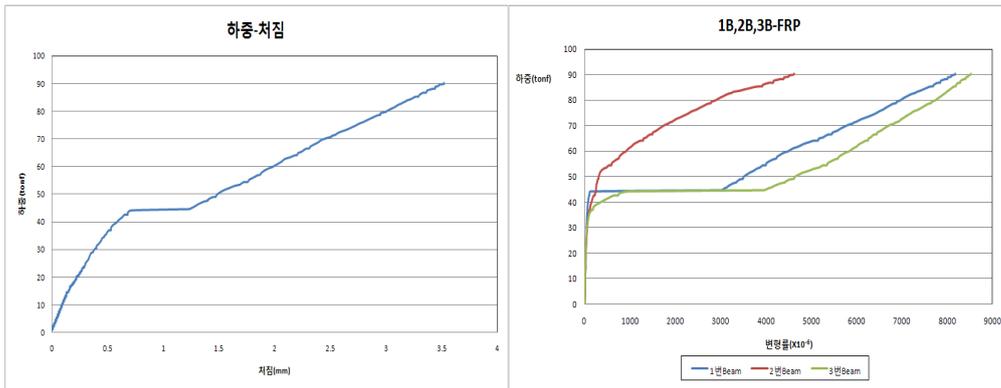


그림 3.2.20 #4 실험체 하중-처짐(a), 철근게이지(b), 콘크리트 표면게이지(c), 균열사진(d)

(라) #5 실험체(1-DWGR13)

#5 실험체는 3.2.21(a)에서 보는바와 같이 44.15tonf의 하중이 재하하였을 때 균열이 발생하였고 1-DWGR13의 보강재가 콘크리트가 받던 인장력을 대신 받아주기 때문에 90tonf 까지 하중을 재하 할 수 있었으나 FRP보강재는 철근과 다르게 유연한 성질을 갖고 있으므로 콘크리트가 균열이 발생하고 나서 콘크리트가 받던 인장력을 FRP가 대신 받아주면서 변형이 크게 일어나는 것을 그림 3.2.21(b)를 통해 볼 수 있다. 표면에 부착한 콘크리트 센서도 균열이 발생하기 전까지 선형 변형을 일으키고 있었으나 콘크리트에 균열이 발생한 후 발산함을 그림 3.2.21(c)를 통해 볼 수 있다. 콘크리트에 균열이 발생하면서 콘크리트가 받아주던 인장력을 FRP가 받아주지만 유연한 성질 때문에 균열이 급작스럽게 보를 관통함을 그림 3.2.21(d)를 통해 확인하였다. 또 FRP 보강재를 단면에 한 가닥만 넣었기 때문에 인장력은 견뎌 내지만 가장 큰 균열 폭을 보이고 있다.



(a)

(b)



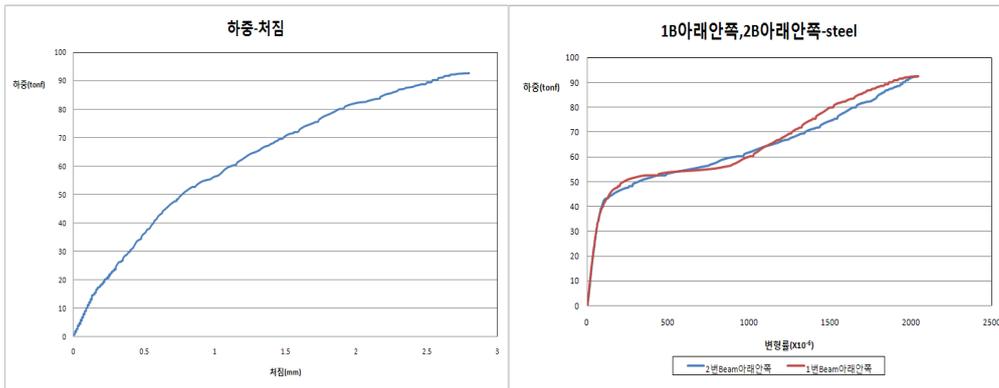
(c)

(d)

그림 3.2.21 #5 실험체 하중-처짐(a), 철근게이지(b), 콘크리트 표면게이지(c), 균열사진(d)

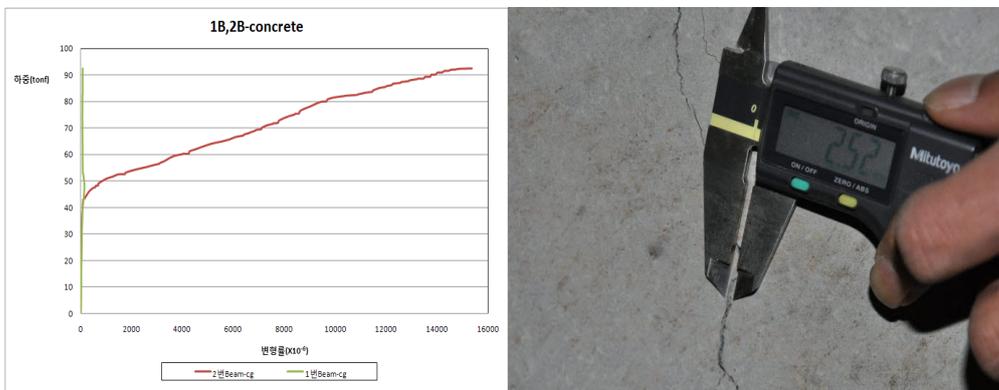
(마) #6 실험체(3-D16-400MPa)

#6 실험체는 3.2.22(a)에서 보는바와 같이 43.21tonf의 하중이 재하하였을 때 균열이 발생하였고 3-D16-400MPa의 보강재가 콘크리트가 받던 인장력을 대신 받아주기 때문에 90tonf 까지 하중을 재하 할 수 있었다. 철근은 강성이 크기 때문에 FRP보강 실험체와 다르게 균열이 발생한 뒤 급작스런 변형을 일어나지 않았다. 콘크리트가 받던 인장력을 철근이 모두 받아주기 때문에 균열이 발생한 후에 철근의 변형이 급작스럽게 일어나는 것을 그림 3.2.22(b)를 통해 알 수 있다. 표면에 부착한 콘크리트 센서도 균열이 발생하기 전까지 선형 변형을 일으키고 있었으나 콘크리트에 균열이 발생한 후 발산함을 그림 3.2.22(c)를 통해 볼 수 있다. 콘크리트에 균열이 발생하면서 콘크리트가 받아주던 인장력을 철근이 받아주기 때문에 균열이 차츰 커지고 결국 보를 관통함을 그림 3.2.22(d)를 통해 확인할 수 있다.



(a)

(b)



(c)

(d)

그림 3.2.22 #6 실험체 하중-처짐(a), 철근게이지(b), 콘크리트 표면게이지(c), 균열사진(d)

표 3.2.8 실험체 별 균열 유형

	균열 시작하중(tonf)	균열폭(mm)	보강재 최대변형률* ($\mu\epsilon$)
#1 실험체(무근)	35.34	-	-
#2 실험체(3-D13-300MPa)	38	-	2200
#3 실험체(3-DWGR9)	39.45	2.36	8900
#4 실험체(3-DWGR9-보조철근)	45.02	1.66	9600
#5 실험체(1-DWGR13)	44.15	4.83	8500
#6 실험체(3-D16-400MPa)	43.21	2.52	1950

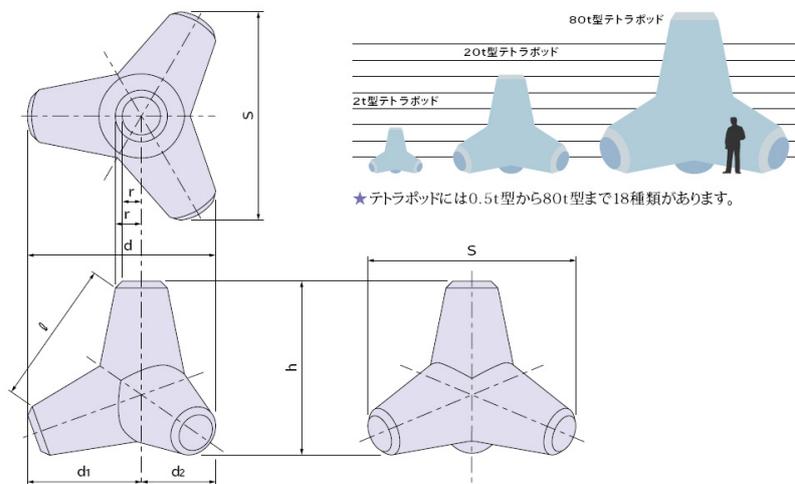
* 실험에서 최대 재하하중인 90tonf에서의 변형률이며, #2 실험체는 80tonf에서의 변형률이다.

4. 소파블록 제원 및 계측센서 설치

가. 실험체 제원

(1) 구형 소파블록(TTP)

TTP는 다음의 그림과 표에 나타난 바와 같이 다양한 종류가 존재하며, 이번 수치해석 및 실험에 사용된 형식은 공칭 3.2톤 형으로 총 중량 2.88톤, 높이 1.65m인 사양이다.

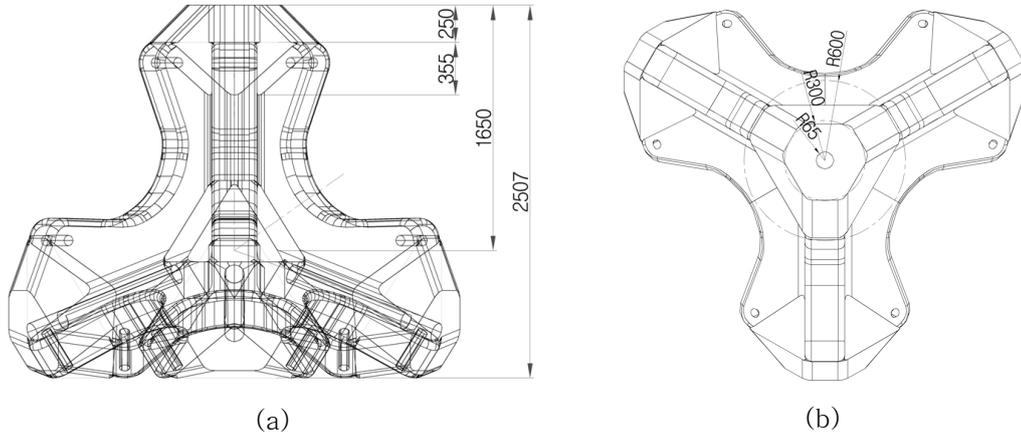


種別 (トン型)	実質量 (t)	実重量 (kN)	体積 (m ³)	型枠面積 (m ²)	h	d	d1	d2	S	2r	2r'	φ
0.5	0.46	4.51	0.2	2.18	900	967	587	380	1075	198	270	747
1.0	0.92	9.02	0.4	3.44	1130	1214	738	476	1350	248	338	937
2.0	1.84	18.04	0.8	5.42	1420	1526	927	599	1696	312	426	1178
3.2	2.88	28.24	1.25	7.32	1650	1773	1077	696	1971	362	494	1369
4.0	3.68	36.09	1.6	8.62	1790	1924	1169	755	2139	392	536	1485
5.0	4.60	45.11	2.0	10.00	1930	2074	1260	814	2306	424	578	1601
6.3	5.75	56.39	2.5	11.58	2075	2230	1355	875	2479	456	622	1722
8.0	7.36	72.18	3.2	13.74	2260	2429	1476	953	2700	496	678	1875
10.0	9.20	90.22	4.0	15.88	2430	2612	1587	1025	2903	534	728	2016
12.5	11.50	112.78	5.0	18.46	2620	2816	1711	1105	3130	576	786	2174
16.0	14.49	142.10	6.3	21.54	2830	3042	1848	1194	3381	622	848	2348
20.0	18.40	180.44	8.0	25.19	3060	3289	1998	1291	3656	672	918	2539
25.0	23.00	225.55	10.0	29.29	3300	3547	2155	1392	3943	726	990	2739
32.0	28.75	281.94	12.5	33.90	3550	3816	2318	1498	4242	780	1064	2946
40.0	37.03	363.14	16.1	40.08	3860	4149	2520	1629	4612	848	1158	3203
50.0	46.00	451.11	20.0	46.44	4155	4466	2713	1753	4965	914	1246	3448
64.0	58.88	577.42	25.6	54.59	4505	4842	2941	1901	5383	990	1350	3739
80.0	80.50	789.44	35.0	67.25	5000	5375	3265	2110	5975	1100	1500	4150

그림 3.2.23 TTP 제원

(2) 신형 소파블록

신형 소파블록은 다음 그림과 같은 형상으로 총 높이 약 2.5m, 중량은 약 6.5톤이며, 내부에 FRP 봉으로 보강이 되어있는 형태이다.



(a) (b)
그림 3.2.24 신형 소파블록 형상

다음 그림은 신형 소파블록에 일반철근을 보강하는 경우에 대한 내용으로, FRP 봉은 절곡이 되지 않아 직선배치만이 되어있으므로, 아래 그림 중 (b), (d), 및 (e)를 참고하면 된다.

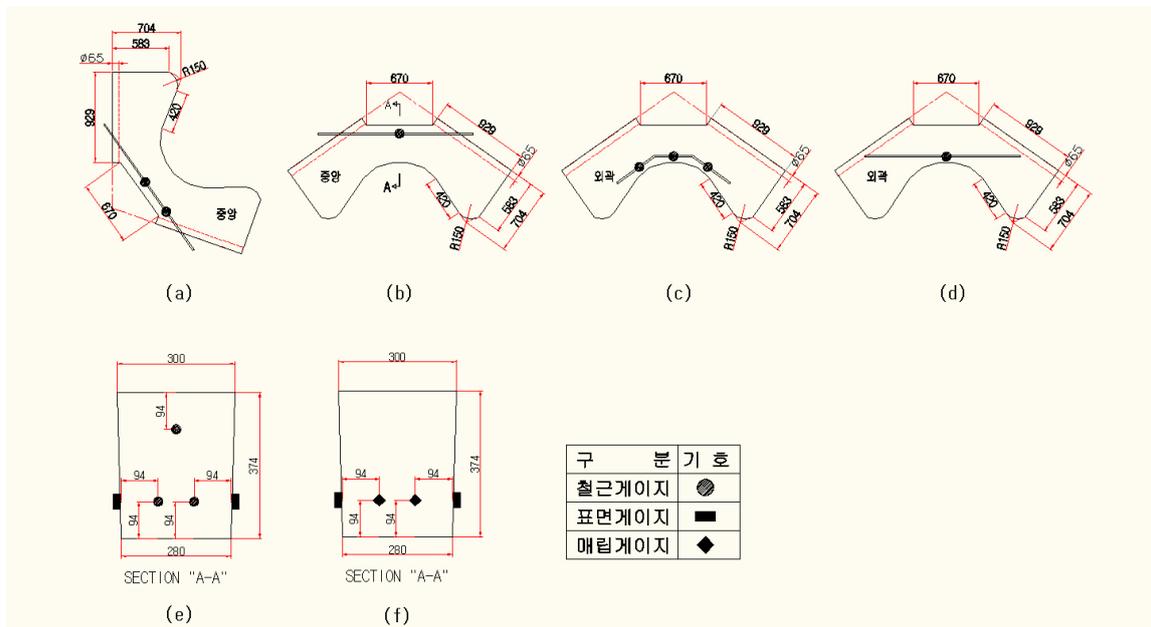


그림 3.2.25 신형 소파블록 보강사양

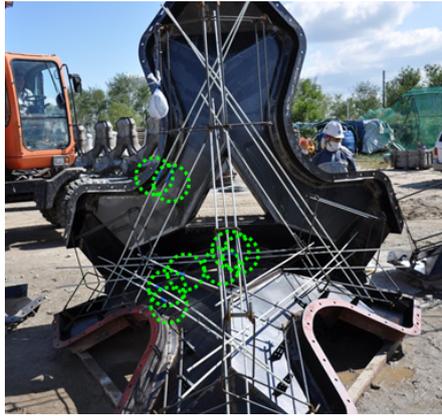


그림 3.2.26 센서 부착위치

나. 계측항목 및 계측센서 배치

본 실험은 소파블록의 동적하중에 대한 응답을 측정하기 위한 것으로 기존의 구형 소파블록과 신형 소파블록에 대하여 수행한다. 소파블록은 부재의 특성상 무근의 콘크리트로 제작되며, 부재 내부의 하중응답을 측정하기 위한 계측기기의 매립 및 임의 위치 설치가 곤란하므로 제작이 완료된 소파블록의 외부 표면에 계측센서를 설치한다.

(1) 계측센서의 종류

시험부재의 응답을 측정하기 위한 계측항목별 계측센서 현황은 다음과 같다.

표 3.2.9 계측센서 종류

종류	부재응답	측정 일반
변형률계	• 콘크리트 표면 변형률	<ul style="list-style-type: none"> • 하중의 변화에 대한 각 위치별 변형률 응답을 측정 • 자유낙하, 회전낙하시험의 각 방향 최대 응력 발생부
가속도계	• 부재의 수직 낙하 가속도	<ul style="list-style-type: none"> • 부재의 상부에서 수직 방향의 가속도 성분을 측정

각각의 부재 응답을 측정하기 위한 계측센서의 배치는 다음의 그림 3.2.27과 그림 3.2.28의 전체배치도와 같고, 실제 설치 현황은 그림 3.2.29와 그림 3.2.30과 같다.

신형 소파블럭 센서 설치 위치도

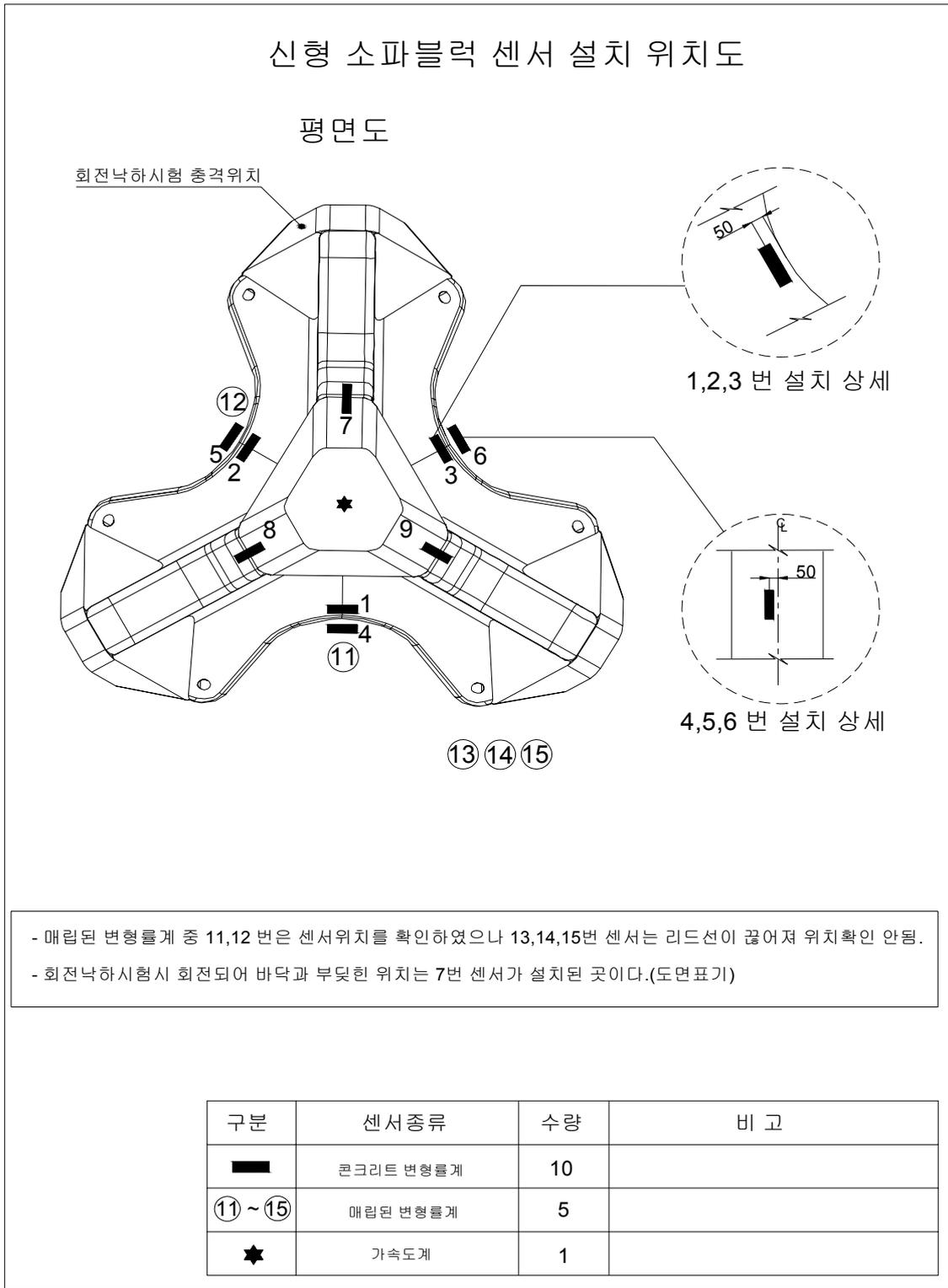
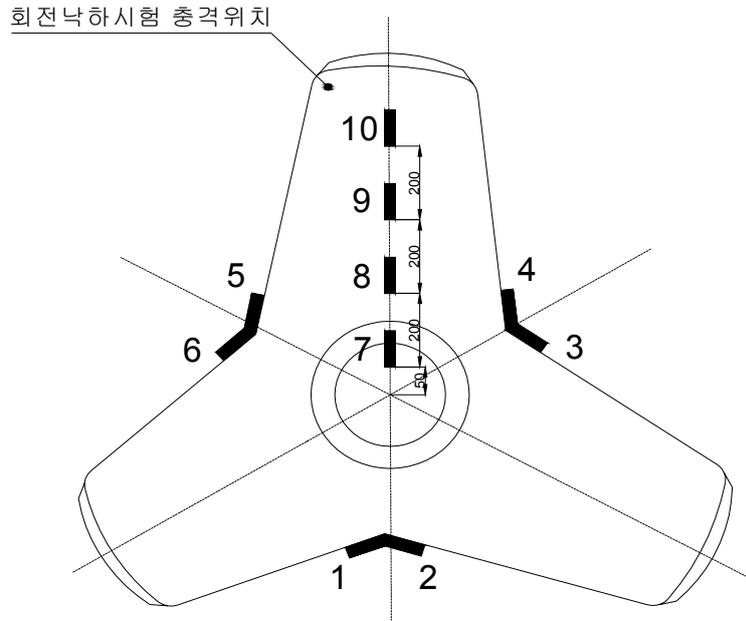


그림 3.2.27 신형 소파블럭 계측센서 전체 배치도 : 상부 시준

TTP 센서 설치 위치도

평면도



구분	센서종류	수량	비고
■	콘크리트 변형률계	10	
★	가속도계	1	

그림 3.2.28 구형 소파블록 계측센서 전체 배치도 : 상부 시준



그림 3.2.29 신형 소파블록 계측센서 설치전경 : 하부 시준



그림 3.2.30 구형 소파블록 계측센서 설치전경 : 하부 시준

본 시험에 사용되는 계측센서의 사양 및 수량은 다음과 같다.

표 3.2.10 계측센서 사양 및 물량집계

종류	부재응답	수량
변형률계	<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트 표면 변형률계 • 전기저항식 변형률계 • 측정범위 : 10,000$\mu\epsilon$ • 사용온도범위 : -10~80$^{\circ}\text{C}$ • 분해능 : 1.0$\mu\epsilon$ • 게이지 저항 : 120Ω 	<ul style="list-style-type: none"> • 신형소파블록 : 10EA • 구형소파블록 : 10EA
가속도계	<ul style="list-style-type: none"> • 부재의 수직 낙하 가속도 • Capacity type • 측정범위 : -2.0 ~ +2.0G 	<ul style="list-style-type: none"> • 1EA • 부재별 부착하여 시험 후 이설하여 사용

(2) 계측센서 사양검토

부재는 블록 전체질량의 낙하하중을 지지면과의 충격하중으로 지지한다. 무근콘크리트 부재의 특성상 압축파괴보다는 인장에 의한 균열이 지배적인 파괴모드이므로 부재 인장에 대한 계측기기의 용량 한계를 검토한다.

표 3.2.11 변형률계 응답범위

계측센서	압축변형률	인장변형률	측정 일반
콘크리트 변형률	<ul style="list-style-type: none"> • +0.003(3,000$\mu\epsilon$) 이상 	<ul style="list-style-type: none"> • 압축 변형률의 1/5 ~ 1/7 이하 	<ul style="list-style-type: none"> • 휨강보/압축강도로 콘크리트 구조설계기준의 파괴계수(modulus of rupture) 이용가능¹⁾

1) 콘크리트 구조설계 기준 제시 보통 콘크리트의 파괴계수(modulus of rupture)는 $f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}}$ 을 사용한다.

본 실험에 있어 계측기기는 소파블록의 자유낙하시험과 회전낙하시험에 대하여 낙하로 인한 충격하중에 대한 응답의 측정이 가능한 계측기기를 사용하여야 한다. 범용으로 사용되는 계측기기의 형식에 대하여 이러한 동적응답의 측정 가능성을 검토하면 다음과 같다.

표 3.2.12 계측센서 사양 및 물량집계

종류	측정일반	장점	단점	적용성
전기저항식	• 외력에 대한 감지부 저항체의 저항변화로 응답 측정	• 다수의 운영사례 • 동적 측정이 가능	• 전기적 노이즈 발생 가능	○
진동현식	• 외력에 대한 감지부 현의 긴장력 변화(진동수의 변화)로 응답 측정	• 다수의 운영사례	• 높은 빈도(동적) 측정이 곤란	×

본 실험에 있어서 계측기기는 동적 측정이 가능한 전기저항식 계측기기를 사용하고, 전기적 노이즈는 측정기기의 현장접지와 현장 측정기기와 계측센서간 케이블 포설을 최대 20m 이내로 구성함으로써 최소화 하였다.

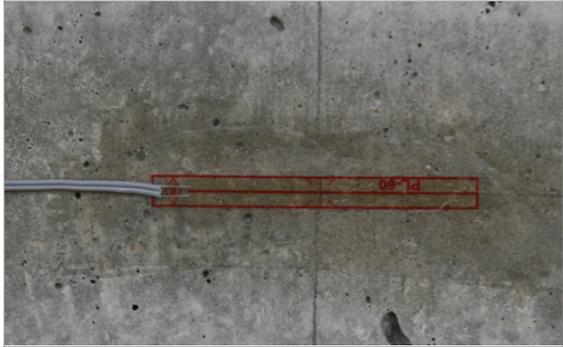
(3) 계측센서의 설치

각 부재의 표면에 설치되는 콘크리트 변형률계는 다음의 순서로 설치한다.

- ① 콘크리트 표면을 부드러운 그라인더 날로 면처리 가공하였다.
- ② 가공된 표면은 알콜 등을 이용하여 오염물질을 제거하였다.
- ③ 가공된 표면에 측정방향과 일치하도록 계측센서를 접착하였다.
- ④ 접착된 계측센서는 외부손상에 대비하여 VM 테이프로 마감처리 하였다.



(a) 콘크리트 먼정리, 설치용 보조선 표시



(b) 콘크리트 표면 1축 변형률계 설치



(c) 센서 부착 표면 정리(구형 소파블록)



(d) 센서 부착 표면 정리(신형 소파블록)



(e) 케이블 정리 후 전경(구형 소파블록)



(f) 케이블 정리후(신형 소파블록)

그림 3.2.31 계측센서 설치 순서

5. 동적성능실험 및 부재응답 계측

가. 하중재하실험 구분

실험의 구성은 자유낙하실험과 회전낙하실험에 대하여 수행하였다. 각각의 실험은 하중재하방법, 낙하위치의 선정, 데이터획득에 대한 모의 실험을 수행하여 발생 가능한 오차요인에 대하여 사전 확인 후, 본 실험을 수행하였다.

하중 재하는 소파블록의 자중을 이용하며, 다음의 그림과 같이 크레인을 이용한 인상 후 자유낙하와 위치설정 후 회전 낙하의 방법으로 충격하중을 재하하였다. 소파블록의 자유낙하 높이는 해석단계에서 소파블록의 파괴(균열)를 사전검토하고 이를 기준으로 낮은 인상 높이에서 순차적으로 증가시켜 수행하였다.

자유낙하실험과 회전낙하실험의 하중재하 개요는 다음의 그림 3.2.32와 같다.

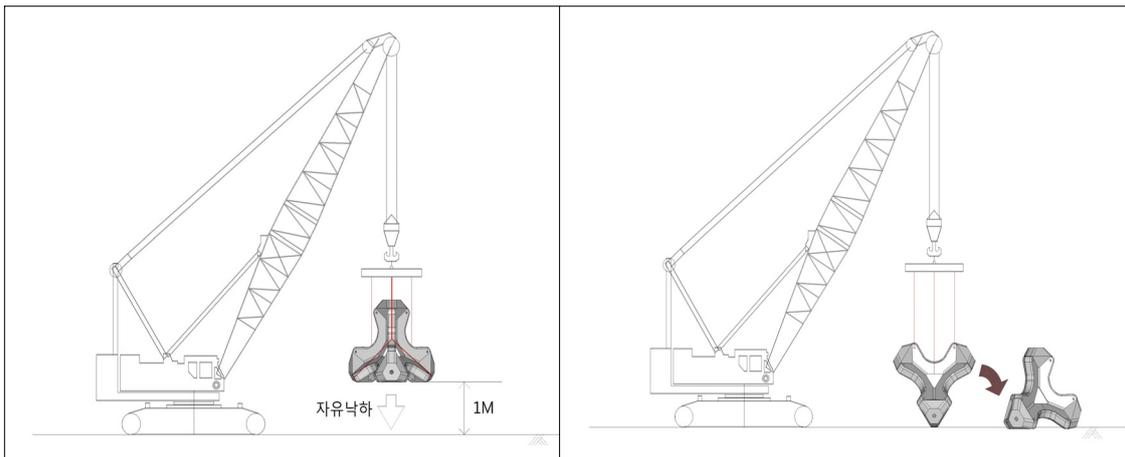


그림 3.2.32 자유낙하와 회전낙하

나. 재하바닥 구성

자유낙하 또는 회전낙하에 의한 충격하중은 재하 바닥의 강성에 따라 충격량의 크기가 변하므로, 이를 고려하여 각각 다른 강성을 갖는 바닥에 대하여 실험을 수행하였다. 실험을 위한 바닥으로는 한국해양연구원 내의 부지를 이용하였으며 각각의 재하위치는 그림과 같다.

하중재하를 위한 바닥으로는 일반 토사로 구성된 운동장과 아스팔트 포장, 콘크리트 포장 각각에 대하여 실험을 수행하였다. 일반 토사로 구성된 바닥의 경우 토사 부재의 전단강성이 매우 작으므로 선행해석상 높은 위치에서의 낙하가 필요하므로 이를 보강하기 위하여 12mm두께의 강판을 보강하여 실험을 수행하였다.



그림 3.2.33 바닥 재질에 따른 재하위치 : 한국해양연구원 내부

낙하하중의 지지를 위한 바닥의 구성은 다음과 같은 순서로 진행하였다.



- 연구동 인근에 야적된 소파블록을 실험을 위한 위치로 이동
- 부재 자중을 고려하여 자중의 2.0~2.5 배 이상의 용량을 갖는 30ton 크레인 이용



- 각각의 부재에 계측센서를 설치하고 인접 시스템까지 연결이 가능하도록 케이블을 설치
- 크레인 제어에 의한 하중 재하를 위하여 낙하 충격하중 재하 위치를 표시



- 토사바닥판의 보강을 위하여 12mm 두께의 강철판을 덧댐



- 철판 부재와 토사 바닥면 사이의 일체거동이 가능하도록 소파블록의 자중을 이용하여 2회 다짐을 실시

그림 3.2.34 낙하하중의 지지를 위한 바닥 구성

다. 하중재하실험

낙하에 의한 하중재하실험은 우선적으로 부재의 파괴가 발생하지 않는 회전낙하 실험을 수행하고 자유낙하에 대하여 부재가 파괴되는 시점까지 수행하였다. 각각의 부재에 대한 실험 경우를 정리하면 다음과 같다.

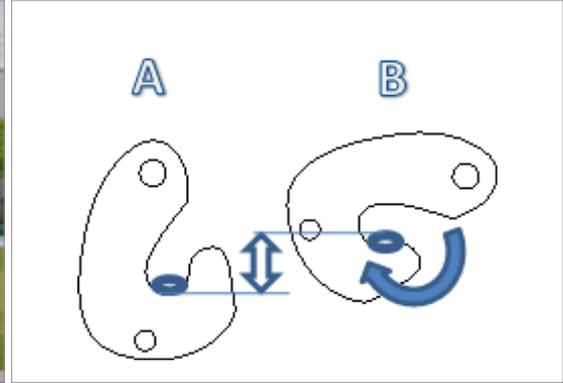
표 3.2.13 하중재하실험 경우

시험체 구분	시험 구분	번호	재하 높이(cm)				바닥 재질	데이터 파일명	비고
			1	2	3	평균			
신형 소파 블록	자유낙하 (3점)	1	11	11	5	9	토사 +12mm 강판	110214	크레인 조작 오류
		2	12	8	8	9.3		110947	
		3	9	12	8	9.7		120729	
		4	8	12	9	9.7		121344	
		5	17	16	14	15.7		130737	2번 센서 초과
	회전낙하	1				60		131505	2번 센서 초과
		2				60		131808	2번 센서 초과
		3				60		134347	2번 센서 초과
구형 소파 블록	회전낙하	1				35	143332		
		2				40	143639		
		3				49	143921		
	자유낙하 (3점)	1	30	35	25	30	144755		
		2	32	37	43	37.3	145231		
		3	66	70	73	69.7	150153		
		4	103	100	105	102.7	151049		
		5	37	43	35	38.3	아스팔트	152816	
		6	39	40	46	41.7	콘크리트	160737	
		7	101	105	109	105		162824	

부재의 낙하는 크레인의 인양고리를 회전하여 인양 로프가 인양고리에서 벗겨지도록 하여 재하하였다. 이러한 경우 아래의 그림과 같이 시험체가 인상지지된 상태(상태 A)에서 재하 높이를 측정하였으며, 실제 낙하시 인상고리의 회전(상태 B)으로 인하여 낙하높이가 증가된다. 이러한 낙하 높이의 증가는 부재의 치수를 고려하면 약 9cm가 발생된다.



인상고리(제작 사용) 형상



인상고리 회전시 부재 높이 증가

그림 3.2.35 시험체 인상고리

각각의 실험은 크레인 조작에 의한 인상과 낙하를 반복하여 실험하였으며, 각 하중 조건에 따른 시험 현황은 다음과 같다.



구형 소파블록 회전낙하

- 토사 + 12mm 강판 보강 바닥판에 재하
- 부재의 무게중심과 인상고리 회전시 추가 인상을 고려하여 35, 40, 50cm 높이에 대하여 순차적으로 수행



구형 소파블록 자유낙하(토사)

- 토사 + 12mm 강판 보강 바닥판에 재하
- 선행해석을 반영하여 30, 40, 70, 100cm 높이에 대하여 순차적으로 수행



구형 소파블록 자유낙하(아스팔트)

- 운동장 인접 아스팔트 포장에 재하
- 40cm 높이에 대하여 재하
- 충격하중에 의한 아스팔트 손상(영구손상, 패임) 우려로 1회 시험 수행



구형 소파블록 자유낙하(콘크리트)

- 운동장 인접 아스팔트 포장에 재하
- 40, 105cm 높이에 대하여 재하
- 부재의 파괴까지 재하



신형 소파블록 회전낙하

- 토사 + 12mm 강판 보강 바닥판에 재하
- 부재의 무게중심과 인양고리 회전시 추가 인상을 고려하여 최대 높이 60cm 재하



신형 소파블록 자유낙하

- 토사 + 12mm 강판 보강 바닥판에 재하
- 재하 높이 10cm에 대하여 시험 수행 후 변형률을 확인하고 15cm 재하, 2번 센서부 균열에 따른 용량 초과 확인

그림 3.2.36 실험체의 낙하 방법과 바닥조건

라. 부재 응답

(1) 계측장비

부재의 동적하중 측정을 위한 계측장비는 충격하중에 대하여 상승과 하강, 하중의 재하기간의 판별이 가능하고, 최대하중응답에 대한 데이터 획득이 가능한 데이터 로거를 사용하였다. 본 실험이 수행된 콘크리트 바닥의 충격을 고려하여 0.1sec~0.01 하중재하시간에 대하여 100~10 samples의 데이터 측정이 가능하도록 1.0kHa의 측정빈도를 갖는 계측장비의 사용을 계획하였다. 실험에 사용된 계측장비의 사양 및 측정빈도는 다음과 같다.

표 3.2.14 부재 응답 측정 계측 장비 사양

구분	이미지	사양	실 측정빈도
동적 계측장비 (Netpod)		<ul style="list-style-type: none"> • 측정빈도 : 0.1Hz~1.0kHz • AD resolution : 24bit • 채널수 : 16ch • 통신 : TCP/IP 	<ul style="list-style-type: none"> • 기본측정빈도를 1.0kHz로 측정하여 0.01sec 충격에 대하여 10samples의 계측데이터 측정

(2) 신행 소파블록 응답

(가) 가속도계

낙하에 의한 충격하중을 측정하기 위한 가속도계는 부재의 상부에 설치되어 수직 방향의 가속도 성분을 측정한다. 자유낙하실험에 의한 부재 작용 가속도는 다음과 같이 크게 4단계로 구분된다.

표 3.2.15 자유낙하 실험 단계별 작용 가속도

작용순서	구분	작용하중
1단계	인상전 중력가속도	<ul style="list-style-type: none"> • 인상전 중력을 바닥판에서 지지하는 상태 • 계측시 초기값 설정으로 0.0G로 설정
2단계	자유낙하	<ul style="list-style-type: none"> • 인상후 자유낙하로 1.0G의 하향 가속도를 받고 있는 상태
3단계	바닥판 최초 충격하중	<ul style="list-style-type: none"> • 바닥판 충격후 반발력에 의하여 튀어오르는 상태 • 충격반발로 인하여 상향 가속도 발생 • 지지 바닥판의 강성에 따라 가속도의 크기가 변화함
4단계	여진동	<ul style="list-style-type: none"> • 최초 충격 이후 튀어오른 부재의 진동이 감쇠하며 바닥판에 지진되는 상태

자유낙하실험에 의하여 부재에 발생하는 부재력은 가속도 작용의 3단계에서 가장 크게 발생된다. 각각의 자유낙하실험에서 3단계의 가속도계 크기는 부재의 인양 높이에 비례하여 발생하며 대표적인 형태를 보면 다음의 그래프와 같다.

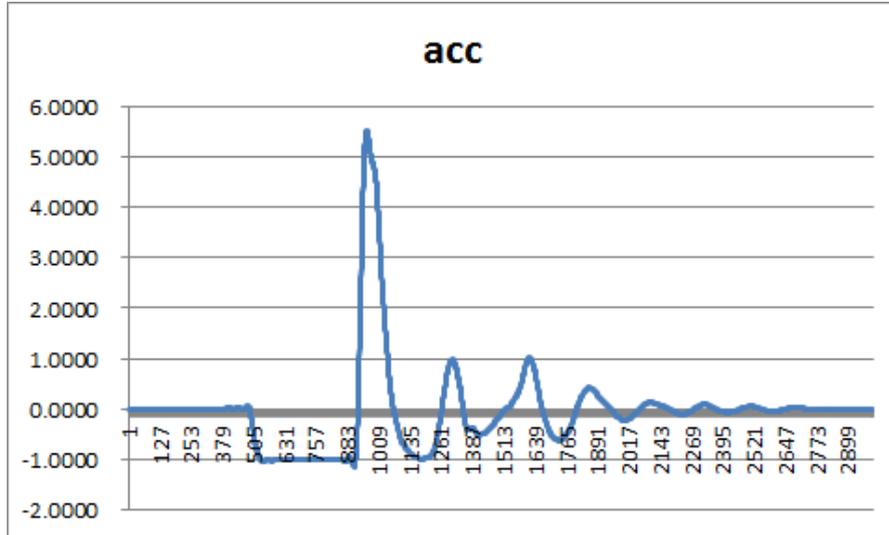


그림 3.2.37 10cm 자유낙하실험부재의 수직방향 가속도 응답

부재의 충격에 의한 상향 가속도는 10cm 자유낙하시 계측센서의 용량(-2.0G ~ 2.0G)을 초과하여 발생하며 부재의 낙하높이 증가에 따라 센서의 측정한계 이상(약 5.5G)의 응답이 발생하고 있다.

(나) 변형률계

부재의 충격에 의한 부재의 변형률은 부재의 낙하시 지면에 접촉하는 특성에 따라 다소 차이를 보인다. 이상적인 3점 낙하의 경우 소파블록의 세지점이 동시에 지면에 접촉하여야 하나 실제 자유낙하시험의 경우 1점 또는 2점이 먼저 지면과 접촉한 후 나머지 부재가 순차적으로 접촉하는 경우가 발생된다. 이러한 경우 소파블록의 응력이 집중되는 분기부의 변형거동은 인접 부재의 지점이 지면 접촉하는 경우 인장응력이 집중되며, 그 외의 분기부에서는 순간적으로 압축응력이 발생한 후 나머지 부재가 지면에 접촉함에 따라 인장응력으로 전환되는 거동을 보이고 있다.



그림 3.2.38 10cm 자유낙하실험부재의 분기부 응력 : 인장응력

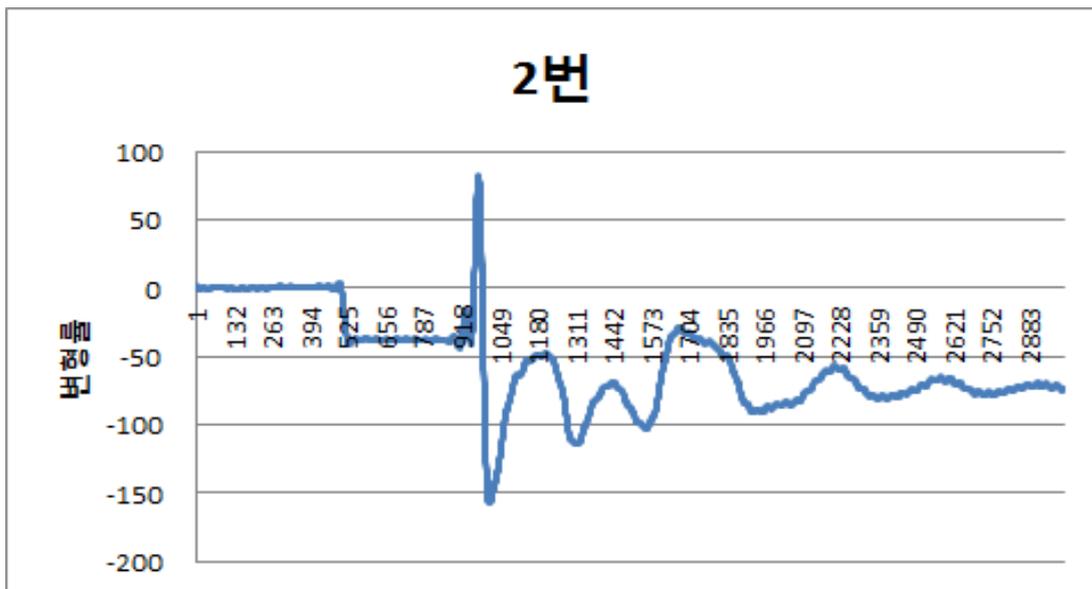


그림 3.2.39 10cm 자유낙하실험부재의 분기부 응력 : 압축후 인장응력

자유낙하실험에 의한 부재의 변형률은 바닥판과 접촉하는 3점이 이루는 각각의 분기부에서 응력 변화가 집중되어 발생하며, 회전낙하실험에 의한 부재의 변형률은 바닥판과 접촉하는 3점과 3점 이외의 부분이 이루는 분기부(계측센서 7번, 8번, 9번)에서 응력변화가 집중되어 발생한다. 각각의 측정 위치에서 발생하는 변형률의 방향별 최대값을 정리하면 다음과 같다.

표 3.2.16 하중재하별 각 부위 최대 응력 : 신형 소파블록, 변형률계 NO 1 - 3

시험체 구분	시험 구분	번호	데이터 파일명	변형률계 NO1		변형률계 NO2		변형률계 NO3	
				압축	인장	압축	인장	압축	인장
신형 소파 블록	자유 낙하 (3점)	1	110214	-					
		2	110947	15	-76	33	-186	19	-128
		3	120729	126	-46	82	-158	30	-136
		4	121344	12	-39	37	-467	3	-67
		5	130737	2	-37			14	-55
	회전 낙하	1	131505	46	-15			43	-16
		2	131808	38	-26			38	-19
		3	134347	42	-27			12	-20

표 3.2.17 하중재하별 각 부위 최대 응력 : 신형소파블록, 변형률계 NO 4 - 6

시험체 구분	시험 구분	번호	데이터 파일명	변형률계 NO4		변형률계 NO5		변형률계 NO6	
				압축	인장	압축	인장	압축	인장
신형 소파 블록	자유 낙하 (3점)	1	110214	-					
		2	110947	15	-15	29	-146	52	-88
		3	120729	15	-11	118	-129	-6	-140
		4	121344	4	-13	22	-250	-5	-52
		5	130737	-4	-18	-850	-1963	-16	-51
	회전 낙하	1	131505	5	-3	115	-2066	27	-23
		2	131808	8	-6	-200	-2887	23	-64
		3	134347	11	-4	-120	-3685	44	-73

표 3.2.18 하중재하별 각 부위 최대 응력 : 신형 소파블록, 변형률계 NO 7 - 9

시험체 구분	시험 구분	번호	데이터 파일명	변형률계 NO7		변형률계 NO8		변형률계 NO9	
				압축	인장	압축	인장	압축	인장
신형 소파블록	자유 낙하 (3점)	1	110214	-					
		2	110947	71	-29	53	-11	59	-26
		3	120729	66	-30	24	-24	44	-10
		4	121344	7	-24	13	-13	65	-12
		5	130737	18	-67	43	-11	60	-11
	회전 낙하	1	131505	95	-15	-4	-47	-5	-27
		2	131808	110	-18	9	-49	5	-30
		3	134347	138	15	7	-50	5	-33

(3) 구형 소파블록 응답

(가) 가속도계

자유낙하실험에 의하여 부재에 발생하는 부재력은 앞서 서술한대로 가속도 작용의 3단계에서 가장 크게 발생된다. 각각의 자유낙하실험에서 3단계의 가속도계 크기는 부재의 인양 높이에 비례하여 발생하며 대표적인 형태를 보면 다음의 그래프와 같다.

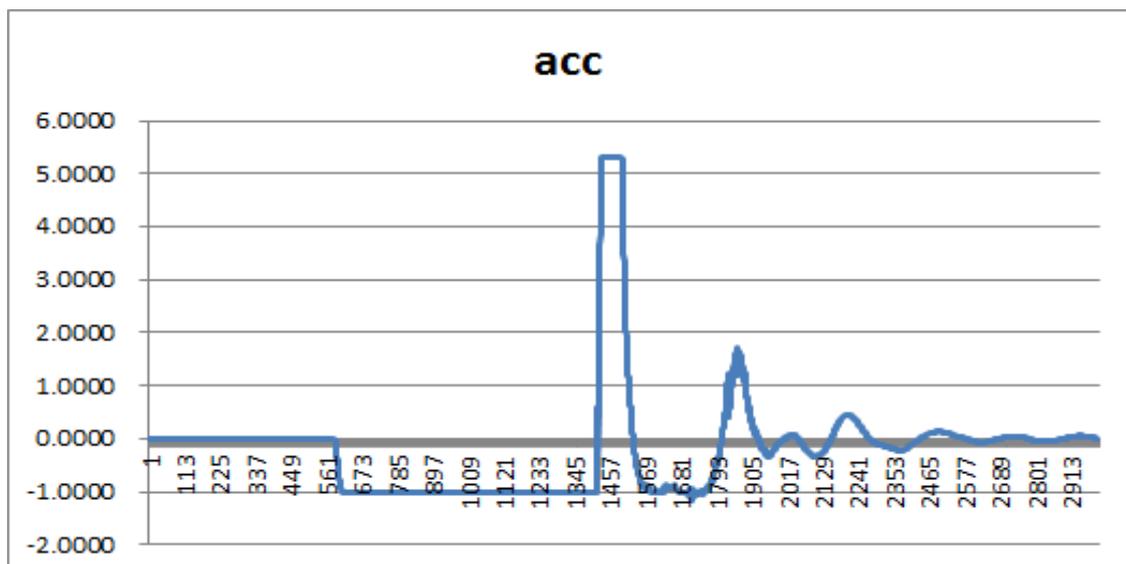


그림 3.2.40 70cm 자유낙하실험부재의 수직방향 가속도 응답

구형 소파블록의 경우 각 부재의 접합면인 중앙부위에서 집중되어 있으며, 각 부재의 크기 또한 신형에 비하여 작으므로 부재의 강성이 신형에 비하여 크다고 할 수 있다. 그러므로 부재의 충격에 의한 상향 가속도는 30cm 자유낙하시 계측센서의 용량(-2.0G ~ 2.0G)을 초과하여 발생하며 실제 위의 그래프에서와 같이 부재의 낙하높이 증가에 따라 센서의 측정한계 이상(약 5.5G)의 응답에 대하여 센서의 용량 초과로 인한 포화를 보이고 있다.

(나) 변형률계

부재의 충격에 의한 부재의 변형률은 부재의 낙하시 지면에 접촉하는 특성에 따라 다소 차이를 보인다. 이러한 경우 소파블록의 응력이 집중되는 분기부의 변형거동은 인접 부재의 지점이 지면 접촉하는 경우 인장응력이 집중되며, 그 외의 분기부에서는 순간적으로 압축응력이 발생한 후 나머지 부재가 지면에 접촉함에 따라 인장응력으로 전환되는 거동을 보이고 있다. 단 구형 소파블록의 경우 이러한 영향이 신형에 비하여 작게 발생하며, 압축응력의 거동이 매우 단기간에 발생하는 결과를 보이고 있다.

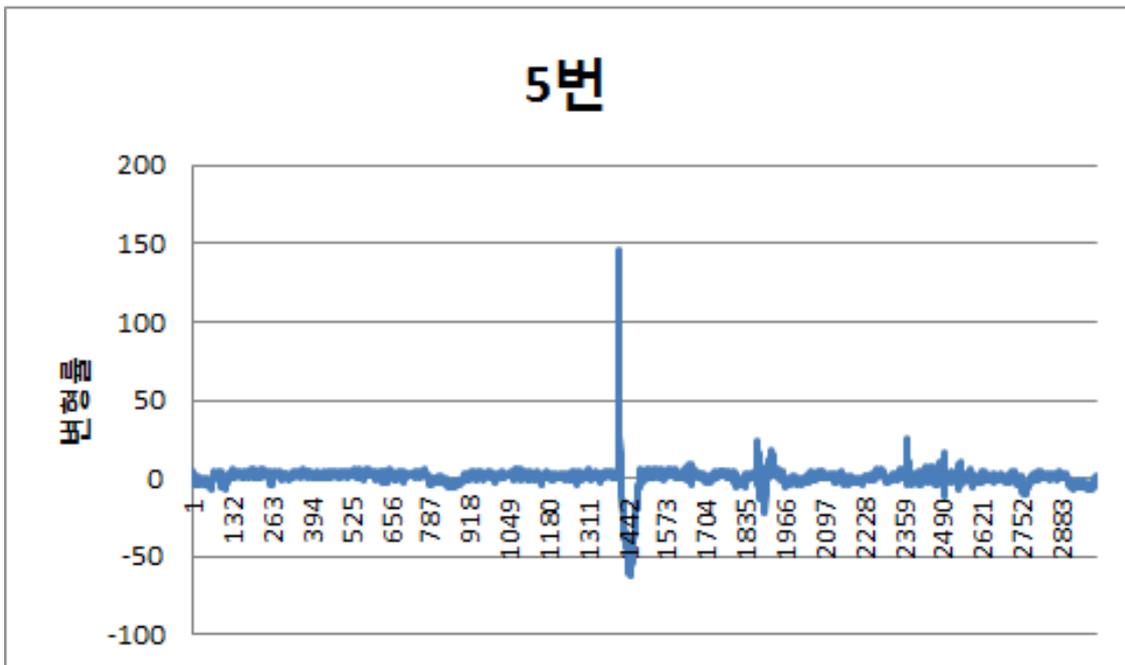


그림 3.2.41 70cm 자유낙하실험부재의 분기부 응력 : 압축후 인장응력

자유낙하실험에 의한 부재의 변형률은 바닥판과 접촉하는 3점이 이루는 각각의 분기부에서 응력 변화가 집중되어 발생하며, 회전낙하실험에 의한 부재의 변형률은

신형 소파블록과 달리 바닥판과 직접 접촉하는 지점(계측센서 9번, 10번)에서 응력 변화가 집중되어 발생한다. 각각의 측정 위치에서 발생하는 변형률의 방향별 최대 값을 정리하면 다음과 같다.

표 3.2.19 하중재하별 각 부위 최대 응력 : 구형 소파블록, 변형률계 NO 1 - 3

시험체 구분	시험 구분	번호	데이터 파일명	변형률계 NO1		변형률계 NO2		변형률계 NO3	
				압축	인장	압축	인장	압축	인장
구형 소파 블록	회전 낙하	1	143332	16	-7	15	-7	7	-15
		2	143639	15	-8	16	-8	7	-18
		3	143921	23	-8	17	-7	8	-23
	자유 낙하 (3점)	1	144755	404	-49	319	-48	14	-20
		2	145231	519	-28	419	-32	22	-20
		3	150153	358	-32	424	-32	26	-105
		4	151049	325	-40	335	-46	19	-56
		5	152816	70	-39	53	-46	24	-59
		6	160737	259	-47	246	-50	54	-48
		7	162824	340	-133			81	-95

표 3.2.20 하중재하별 각 부위 최대 응력 : 구형 소파블록, 변형률계 NO 4 - 6

시험체 구분	시험 구분	번호	데이터 파일명	변형률계 NO4		변형률계 NO5		변형률계 NO6	
				압축	인장	압축	인장	압축	인장
구형 소파블록	회전 낙하	1	143332	9	-16	9	-20	6	-11
		2	143639	6	-20	5	-27	5	-16
		3	143921	6	-22	6	-30	6	-24
	자유 낙하 (3점)	1	144755	204	-13	184	-18	124	-27
		2	145231	265	-16	238	-36	165	-32
		3	150153	57	-31	147	-62	112	-33
		4	151049	120	-39	164	-88	162	-60
		5	152816	30	-39	54	-78	29	-32
		6	160737	92	-23	128	-115	125	-21
		7	162824	94	-76	172	-94	156	-28

표 3.2.21 하중재하별 각 부위 최대 응력 : 구형 소파블록, 변형률계 NO 7 - 9

시험체 구분	시험 구분	번호	데이터 파일명	변형률계 NO7		변형률계 NO8		변형률계 NO9		변형률계 NO10	
				압축	인장	압축	인장	압축	인장	압축	인장
구형 소파블록	회전 낙하	1	143332	5	-20	8	-32	6	-36	52	-27
		2	143639	4	-24	62	18	5	-44	63	-28
		3	143921	7	-30	75	-5	6	-51	67	-37
	자유 낙하 (3점)	1	144755	148	-18	9	-21	657	-24	503	-36
		2	145231	198	-22	6	-26	816	-21	674	-18
		3	150153	14	-49	37	-64	811	-93		
		4	151049	59	-65	33	-84				
		5	152816	11	-48	8	-87				
		6	160737	71	-85	56	-144				
		7	162824	87	-153	47	-323				

마. 동적하중 산정

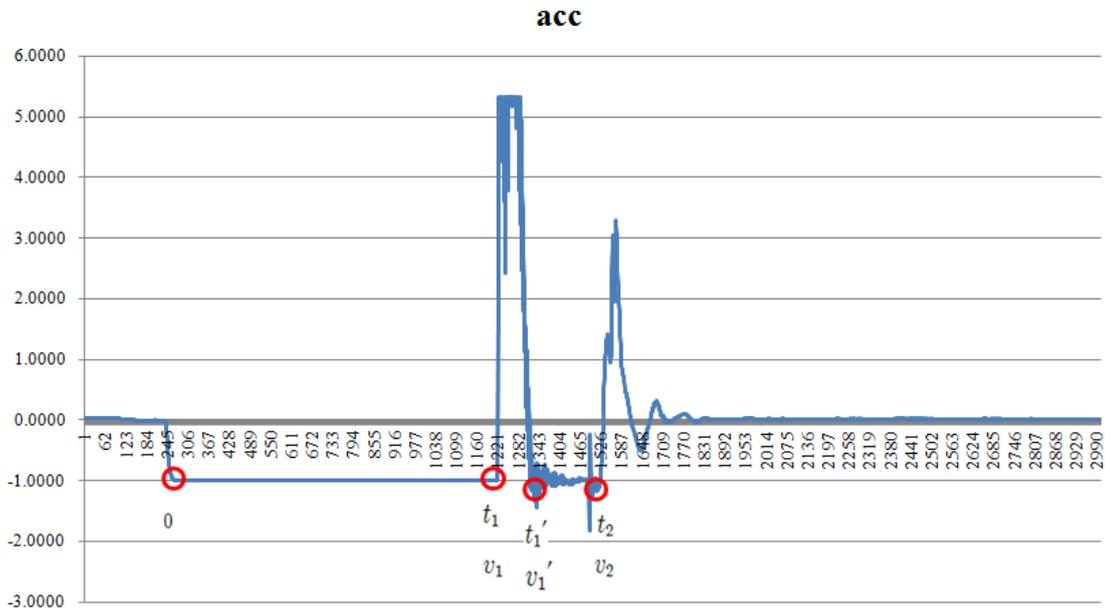


그림 3.2.42 TTP를 콘크리트 바닥에 자유낙하 시킨 경우의 가속도 시간이력

계측 데이터에서 가속도 값이 중력가속도인 g 에서 최초로 값이 변하는 시점을 지면 도달 시간으로 판단하여, 실험체가 지면에 도달했을 때의 속도(v_1)를 구한다. 등가속도 운동에 있어서 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{v_0}^v dv = g \int_0^t dt \quad \text{또는} \quad v = v_0 + gt$$

이 실험에서 초기 속도는 0 이다. 이로부터 최초 지면 충돌시 속도 v_1 및 낙하 높이 h_1 은 다음과 같이 나타낸다.

$$v_1 = gt_1 \quad h_1 = \frac{1}{2}gt_1^2$$

실험체는 지면에 최초 충돌 후 되튀기 후 다시 지면으로 떨어져 충돌하게 된다. 가속도 데이터로부터 최초 지면 충돌시간 t_1 과 두 번째 지면에 충돌한 시간 t_2 를 얻어낸다. 이로부터 충돌 후 되튀기 최고 위치 h_2 를 구한다. 즉, 최초 충돌 후 되튀어 올라가는 속도를 v_1' 라고 하면, 실험체의 위치 s 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s = \int_{v_1'}^v ds = \int_0^t (v_1' + gt) dt$$

$$s = v_1' t + \frac{1}{2} g t_1^2$$

이 식에서 다시 지면에 도달하는 시점인 시간 $t = t_2 - t_1'$ 과 높이 $s = 0$ 를 대입하여 속도 v_1' 을 구한다.

그림 3.2.42와 같은 TTP 가속도 실험결과를 적용하여 계산을 수행하면 다음과 같다.

표 3.2.22 TTP 자유낙하 실험 값

	지면 도달시간 t_1	충돌 지속 시간 Δt_1	충돌 후 지면 도달시간 $t_2 - t_1'$
t (s)	0.478	0.0343	0.105

$$v_1 = 4.68 \text{ m/s}$$

$$h_1 = 1.12 \text{ m}$$

$$h_2 = 0.0135 \text{ m}$$

$$v_1' = 0.5145 \text{ m/s}$$

실험체가 지면에 충돌할 때 지면으로부터 받는 충격력을 다음과 같이 산정한다. 실험체가 지면에 충돌하는 순간과 지면에서 되튀는 순간 사이의 충격량과 운동량 보존의 법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$\int_{t_1}^{t_1'} F dt = m \Delta v = m v_1' - m v_1$$

실험체의 질량은 $m = 2,880 \text{ kg}$ 이므로, 이를 대입하고 앞에서 구한 속도 항을 대입하면 평균 충격력 \bar{F} 는 다음과 같다.

$$\bar{F} = (m v_1' - m v_1) / \Delta t$$

$$\bar{F} = 435.8 \text{ kN}$$

또한, 충돌 시 반발계수를 구하면 다음과 같다. 즉, 낙하높이와 충돌 후 최고 높이로 반발계수를 구한다.

$$e = \frac{v_1'}{v_1} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$$

$$e = 0.1097$$

이와 동일한 과정을 수행하여, 바닥 조건이 흙+강판인 경우에 대한 TTP와 신형소파블록의 계산 결과를 종합하면 다음과 같다.

표 3.2.23 자유낙하 동적하중 산정 값

실험체	자중 [kN]	바닥조건	낙하 높이 h_1 [m]	되튐 높이 [m]	충돌시간 Δt_1 [초]	동적 하중 [kN]	반발계수
TTP	28.8	콘크리트	1.12	0.0135	0.0343	435.8	0.1097
		흙+강판	0.80	0.0140	0.0735	175.8	0.132
신형소파블록	65.0	흙+강판	0.29	0.0030	0.0860	198.7	0.101

충돌 지속 시간 Δt_1 이 작을수록 실험체에 가해지는 힘 \bar{F} 은 커진다.

충돌 후 지면 도달시간($t_2 - t_1'$)이 길어질수록 반발계수 e 가 커지고, 실험체에 가해지는 힘 \bar{F} 도 커진다.

바. 실험체에 균열응력을 발생시키는 높이 산정

TTP를 자유 낙하시킬 때 최초로 균열이 발생하는 낙하높이를 산정한다.

표 3.11의 결과에서 TTP 실험체의 콘크리트 바닥 자유낙하 실험에 대한 반발계수와 충돌시간을 이용한다. 또한, 그림 3.2.43과 같이 유한요소해석으로부터 균열 응력 2.29 MPa를 발생시키는 힘 \bar{F} 를 구하면 375kN 이다.

이들 결과를 적용하여 3.5절의 계산과정을 수행하면, 콘크리트 바닥일 때 2.88t의 자중을 가지는 TTP 실험체가 균열응력을 발생시키는 높이는 $h = 0.83m$ 로 산정된다.

동일한 과정을 거치면 (흙+강판)바닥 조건에 대하여 TTP와 신형소파블록 실험체에 균열응력이 발생하는 높이를 구할 수 있다. 결과를 정리하면 표 3.12와 같다.

표 3.2.24 균열발생 자유낙하 높이

실험체	자중 [kN]	균열발생하중 [kN]	바닥조건	낙하 높이 [m]
TTP	28.8	375	콘크리트	0.83
			흙+강판	3.65
신형소파블록	65.0	350	흙+강판	0.91

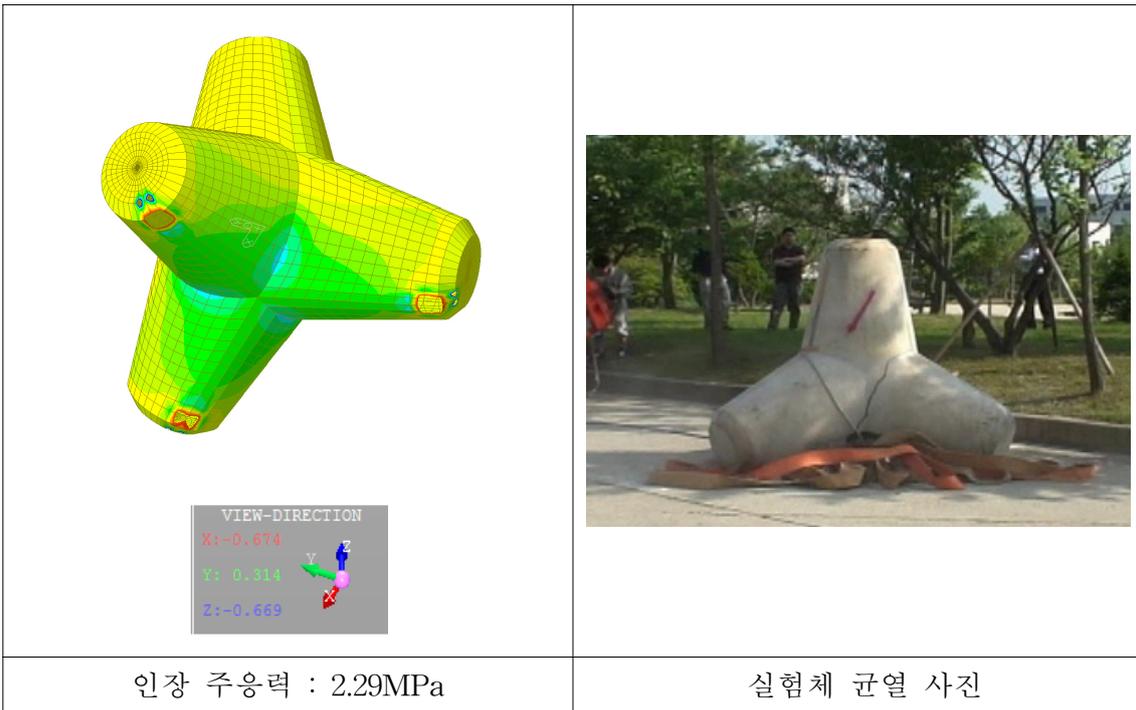


그림 3.2.43 구형 TTP 실험체의 균열응력 발생력 375kN에 대한 유한요소 해석

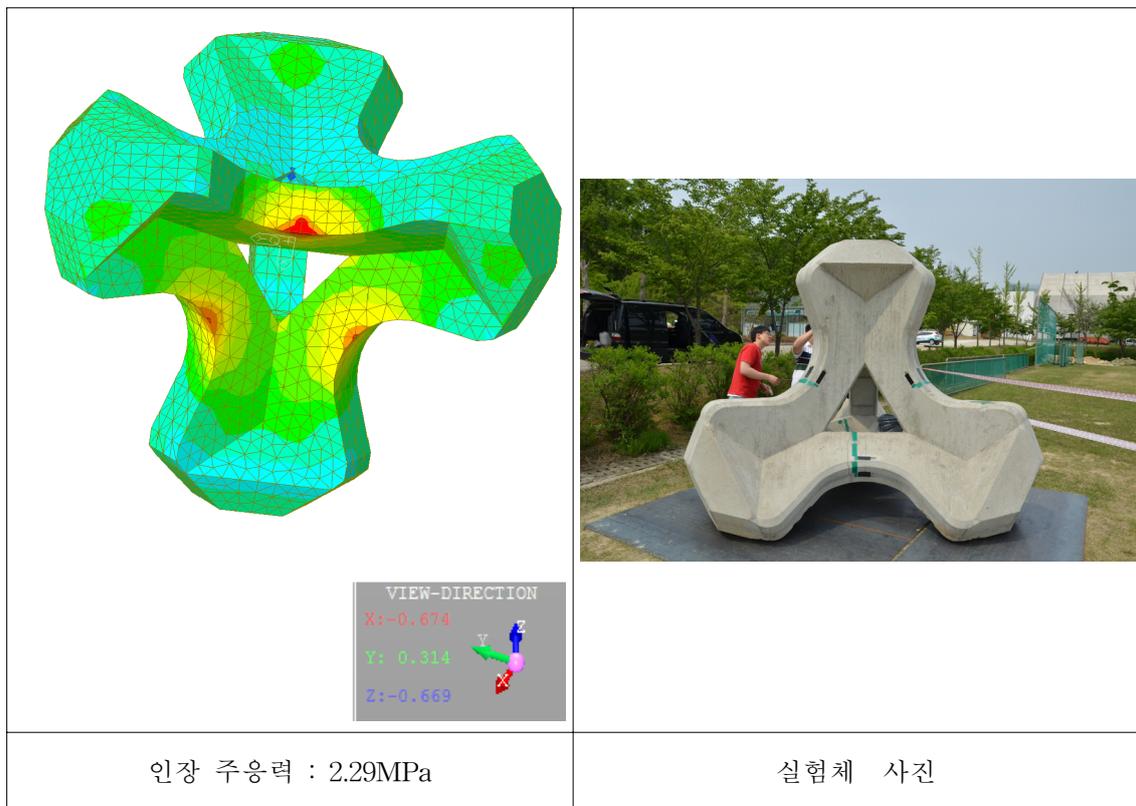


그림 3.2.44 신형소파블록의 균열응력 발생력 350kN에 대한 유한요소 해석

6. 수치모델 유한요소해석

가. 개요

본 장에서는 우선 ttp와 신형 소파블록의 낙하시험에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하여 수치모델의 타당성을 확인하고, 이 수치모델을 사용하여 두 종류의 소파블록의 한계 낙하높이를 수치해석적으로 산정하였다. 마지막으로, 두 종류의 소파블록의 경사면 낙하시뮬레이션을 통하여 방파제 위에서 발생할 수 있는 최대 응력을 비교하여 두 소파블록 형식의 성능을 비교하고자 하였다.

나. 수치해석 모델의 작성 및 검증

(1) 구형 소파블록(TTP)

(가) 수치해석 모델 작성

① TTP 제원

이 실험에서 사용한 TTP의 제원은 2.1절에 나타나 있으며, 이번 수치해석에 사용된 형식은 공칭 3.2톤 형으로 총 중량 2.88톤, 높이 1.65m인 사양이다.

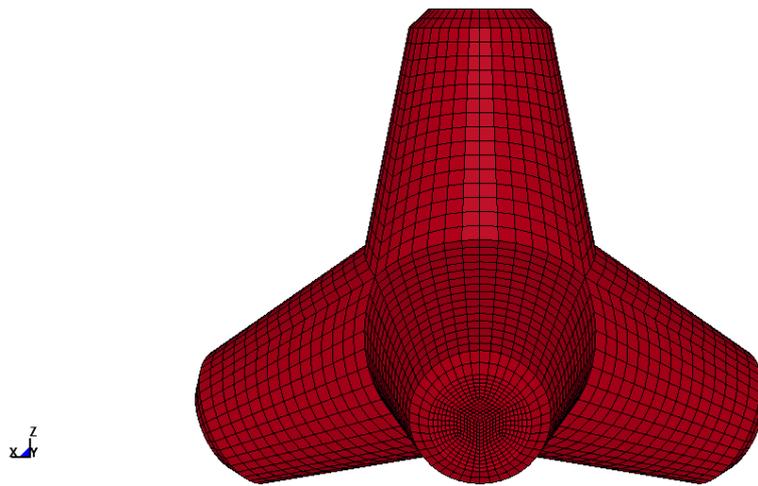
② 재료 물성

TTP의 제작에 사용되는 콘크리트는 설계압축강도 21MPa, 굵은 골치의 최대치수는 24mm 이다. 수치해석에서는 LS-DYNA 해석프로그램에 내장되어 있는 재료 모델 중 재료물성의 자동생성 기능을 갖추고 있는 콘크리트 모델인 Winfrith 콘크리트 모델(#84)을 사용하였으며, 탄성계수, 인장강도 등 해석에 필요한 여러 가지 재료의 물성치는 입력된 수치인 인장/압축강도, 초기접선탄성계수와 골재의 치수로부터 자동생성 된다. 콘크리트의 단위질량은 총질량이 2,880kg이 되도록 조절하여 2,322kg/m³ 으로 입력하였다. 다음에 콘크리트 재료의 입력 자료를 나타내었다.

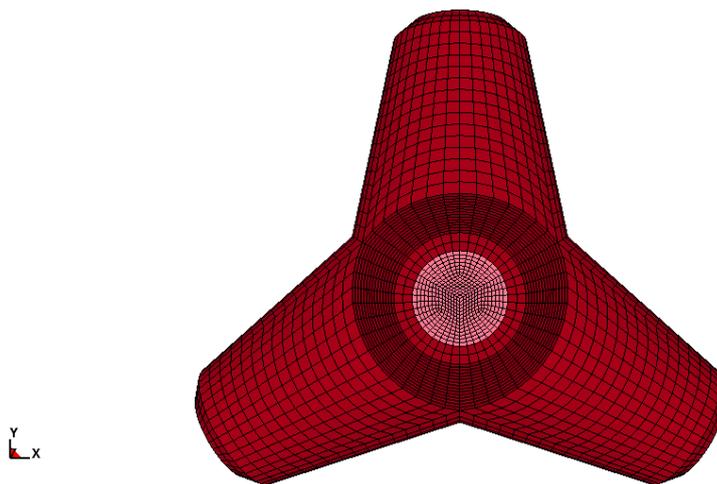
*MAT_WINFRITH_CONCRETE								
\$	mid	ro	tm	pr	ucs	uts	fe	asize
	1	2.3220E+3	26115.E+6	0.18	21.0E+06	2.10E+06	300.00	24.0E-3
\$	e	ys	eh	uelong	rate	conm	conl	cont
					0.0	1.0	1.0	1.0
\$	eps1	eps2	eps3	eps4	eps5	eps6	eps7	eps8
\$	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8

③ 수치해석 모델

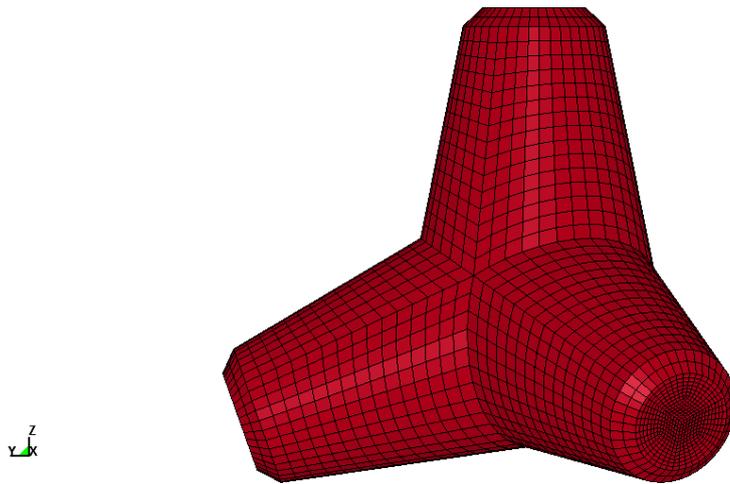
TTP의 수치해석모델은 다음 그림과 같이 8절점 solid 요소를 사용하여 작성되었으며, 요소의 변의 길이는 약 10~50mm 범위에 분포하고 있다. 전체 요소의 수는 약 3만개로 모델링 되었다.



(a) 정면도



(b) 평면도



(c) 측면도

그림 3.2.45 TTP 3차원 수치모델

(나) 수치해석결과 및 실험결과의 비교

TTP의 낙하실험은 다음 표에 정리된 바와 같이 서로 다른 세 가지 바닥면 조건에 대하여 수행되었다. 따라서 수치해석 역시 콘크리트 바닥, 아스팔트 바닥 및 12mm 강판이 덮인 지반의 세 조건에 대하여 수행하였으며, 각 경우 실험에서 측정된 정점부의 가속도 시간이력과 해석에서 얻어진 가속도 시간이력을 비교하였다.

시험종류	횟수	파일명	낙하높이(cm)			바닥면
TTP 3점낙하시험	1	144755	30	35	25	운동장 (soil + 12mm 강판)
	2	145231	32	37	43	
	3	150153	66	70	73	
	4	151049	103	100	105	
	5	152816	37	43	35	아스팔트
	6	160737	39	40	46	콘크리트
	7	162824	101	105	109	

① 콘크리트 바닥

바닥면은 다음 그림과 같이 가로 2.8m, 세로 2.8m, 두께 1.0m의 solid mesh로 모델링 하였으며, 이중 상층부 20cm는 콘크리트의 물성을, 하층부 80cm는 지반의 물성을 적용하였다. 콘크리트의 탄성계수는 $f_{ck}=21\text{MPa}$ 로 가정하여 다음 식에 의해 산출하였다.

$$E_c = 8,500 \sqrt[3]{(f_{ck} + 8)} \text{ (MPa)}$$

지반과 콘크리트 부분은 모두 선형 탄성의 재료를 적용하였으며, 최하면의 모든 자유도를 구속하였다. 수치모델에 적용된 지반과 콘크리트의 물성은 다음과 같다.

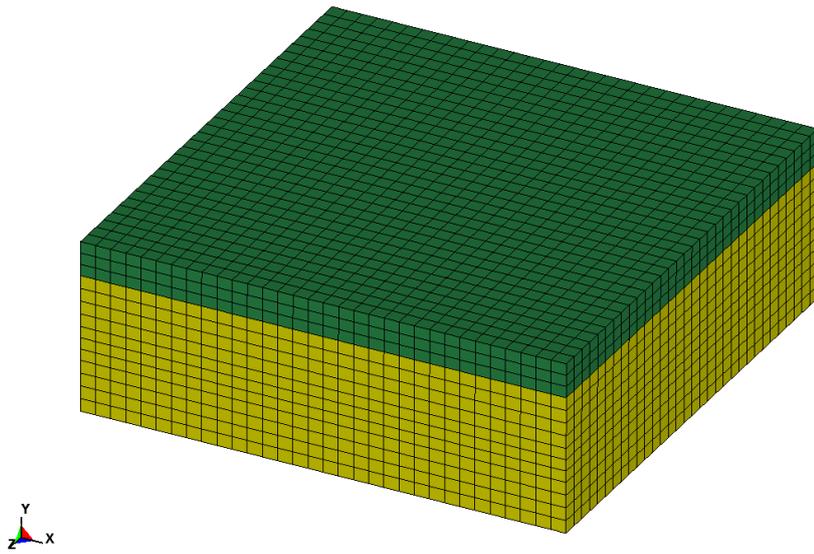
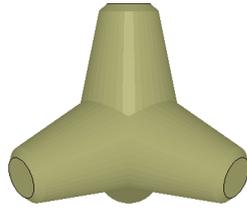


그림 3.2.46 바닥면 유한요소모델

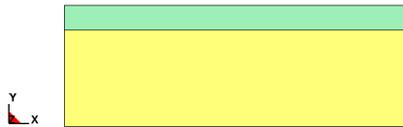
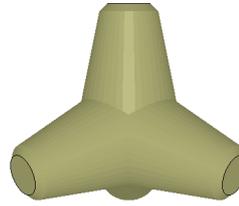
*MAT_ELASTIC							
## concrete							
##	mid	ro	e	pr	da	db	not used
	3	2.3000E+3	26115.E+6	0.180000	0.000	0.000	0
*MAT_ELASTIC							
## soil							
##	mid	ro	e	pr	da	db	not used
	4	2.0000E+3	159.00E+6	0.300000	0.000	0.000	0

콘크리트 바닥에 대한 낙하시험은 앞의 표에 나타난 바와 같이 높이 약 0.5m와 약 1.0m의 두 경우에 대하여 수행되었으므로, 수치해석 역시 낙하높이 0.5m와 1.0m에 대하여 수행하였다.

LS-DYNA user input



LS-DYNA user input



(a) 낙하높이 1.0m



(b) 낙하높이 0.5m

그림 3.2.47 TTP 3점낙하 시뮬레이션 (콘크리트 바닥)

해석결과 1) : 균열

해석에 사용된 Winfrith 콘크리트 모델의 특징 중 하나는 충돌 등에 의해 발생된 균열을 표시해 주는 기능이다. 다음 그림에 해석에 의해 얻어진 균열의 양상을 나타내었으며, 최소 균열폭 0.1mm 이상인 경우와 0.5mm 이상인 경우로 나누어 나타내었다.

다음에 수록된 1m 낙하실험 시 발생한 균열양상과 비교하면 aging 효과 등의 이유로 해석에 비해 실제 TTP의 강도가 더 높았던 것으로 판단되며, 해석과 같이 축대칭으로 균열이 발생하지 않은 것은 3점이 동시에 지면과 접촉하지 못하였기 때문인 것으로 생각된다.

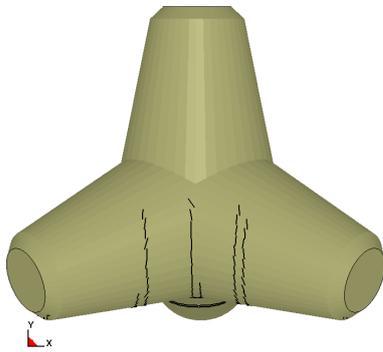
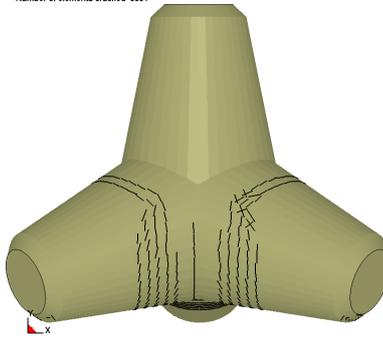
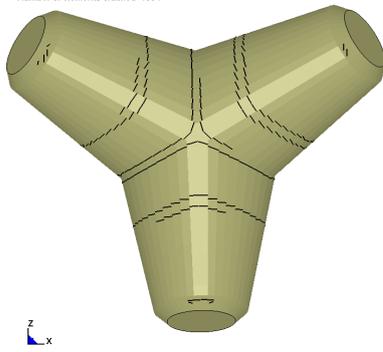
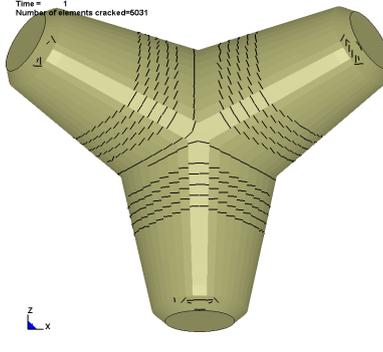
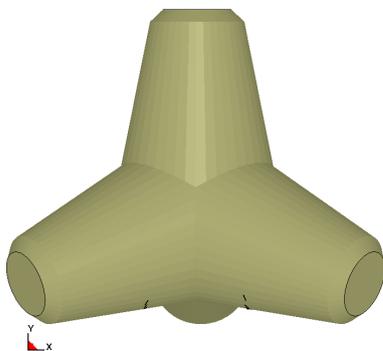
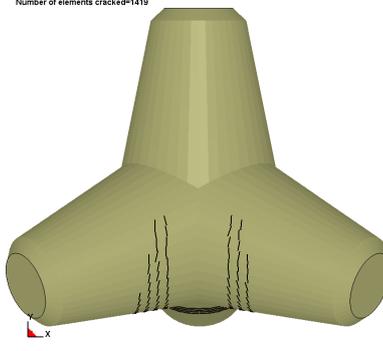
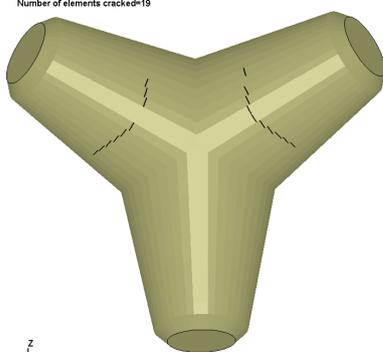
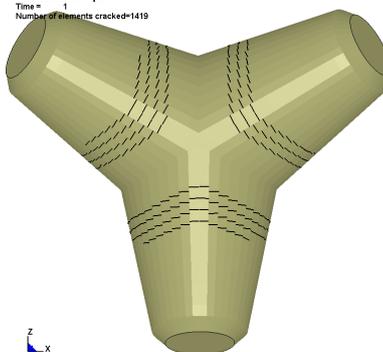
	낙하높이 0.5m	낙하높이 1.0m
균열폭 0.1mm 이상	<p>LS-DYNA user input Time = 1 Number of elements cracked=1634</p> 	<p>LS-DYNA user input Time = 1 Number of elements cracked=6031</p> 
	<p>LS-DYNA user input Time = 1 Number of elements cracked=1634</p> 	<p>LS-DYNA user input Time = 1 Number of elements cracked=6031</p> 
균열폭 0.5mm 이상	<p>LS-DYNA user input Time = 1 Number of elements cracked=19</p> 	<p>LS-DYNA user input Time = 1 Number of elements cracked=1419</p> 
	<p>LS-DYNA user input Time = 1 Number of elements cracked=19</p> 	<p>LS-DYNA user input Time = 1 Number of elements cracked=1419</p> 

그림 3.2.48 콘크리트바닥 3점낙하 발생 균열도



그림 3.2.49 콘크리트바닥 3점낙하 발생 균열 (실험)

해석결과 2) : 인장 변형률

해석에서 얻어진 인장변형률을 다음 그림에 나타내었다. 낙하 후 1초 시점에 얻어진 최대 변형률은 낙하높이 0.5m의 경우 1.237%, 낙하높이 1.0m의 경우 약 2.372%로 나타났다.

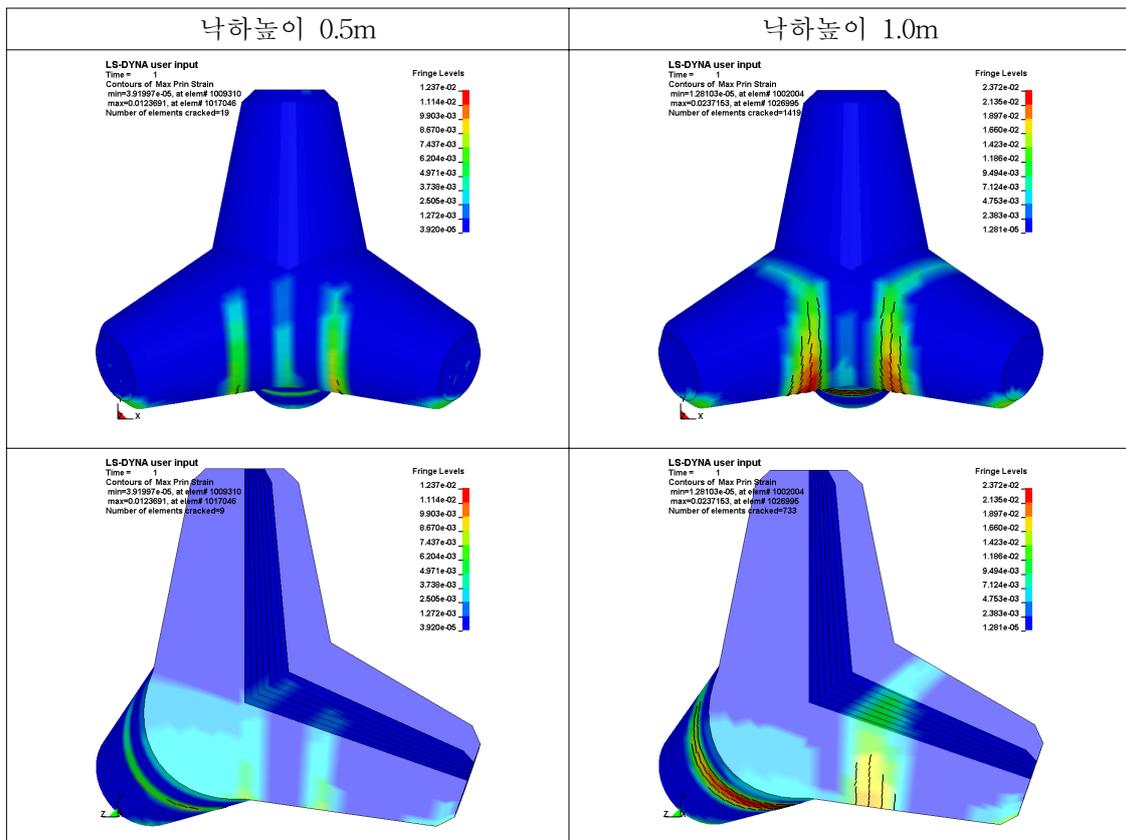


그림 3.2.50 콘크리트바닥 3점낙하 인장변형률

해석결과 3) : 가속도

낙하실험시 TTP의 최상면에 연직방향 가속도계를 설치하였으며, 이로부터 가속도 응답을 계측하였다. 이 계측결과와 비교하여 해석결과의 타당성을 확인하기 위한 작업을 수행하였으며, 그 결과를 수록하였다.

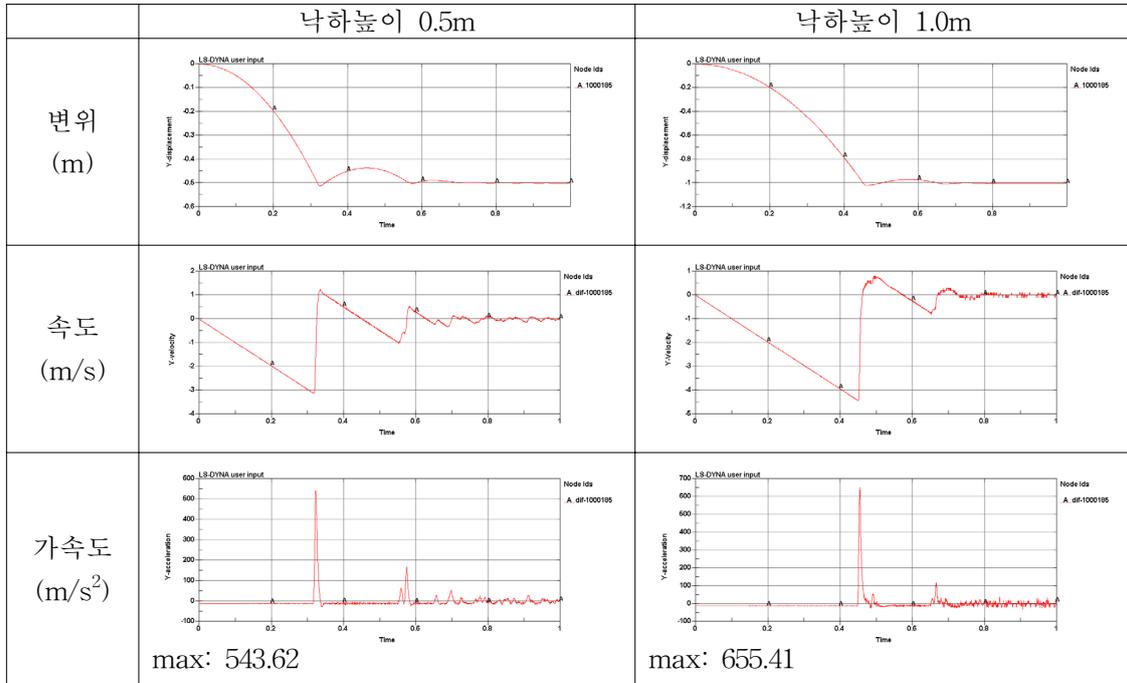


그림 3.2.51 콘크리트바닥 3점낙하 정점부 응답 시간이력

위 그림에 나타난 바와 같이 0.5m 및 1.0m 낙하 높이의 경우 발생한 최대 가속도 레벨은 약 50~70G 범위이다. 하지만 예비 계측실험에서 사용한 가속도계는 최대 5G 용량으로 발생 가속도 범위에 크게 미치지 못하는 사양이었다. 따라서 측정된 가속도응답은 다음 그림과 같으며, 해석결과와의 직접 비교는 수행할 수 없었다.

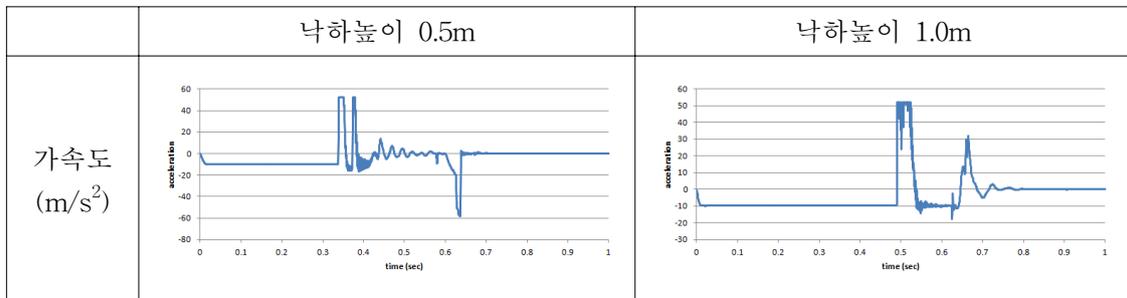


그림 3.2.52 콘크리트바닥 3점낙하 정점부 실측 가속도 응답 시간이력

② 아스팔트 바닥

아스팔트 바닥의 경우는 콘크리트 바닥의 수치모델에서 콘크리트 부분의 물성치를 아스팔트의 물성치로 대체하여 적용하였으며, 다른 모든 사항은 콘크리트 바닥의 경우와 동일하다. 수치모델에 적용된 포장용 아스팔트의 물성치는 다음과 같다.

*MAT_ELASTIC						
 \$# asphalt						
 \$#	 mid	 ro	 e	 pr	 da	 db not used
	 3	 2.350E+3	 4826.0E+6	 0.4		

콘크리트 바닥에 대한 낙하시험은 앞의 표에 나타난 바와 같이 높이 약 0.5m의 경우에 대하여 수행되었으므로, 수치해석 역시 낙하높이 0.5m에 대하여 수행하였다.

해석결과 1) : 균열

다음 그림에 해석에 의해 얻어진 균열의 양상을 나타내었으며, 최소 균열폭 0.1mm 이상인 경우와 0.5mm 이상인 경우로 나누어 나타내었다.

실험에서는 TTP에 균열이 관찰되지 않았으나, 해석결과에서는 그림과 같이 분기부에 균열이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 앞의 콘크리트 바닥 해석결과와 마찬가지로 aging 효과 등의 이유로 해석에 비해 실제 TTP의 강도가 더 높았던 것으로 생각할 수 있을 것이다.

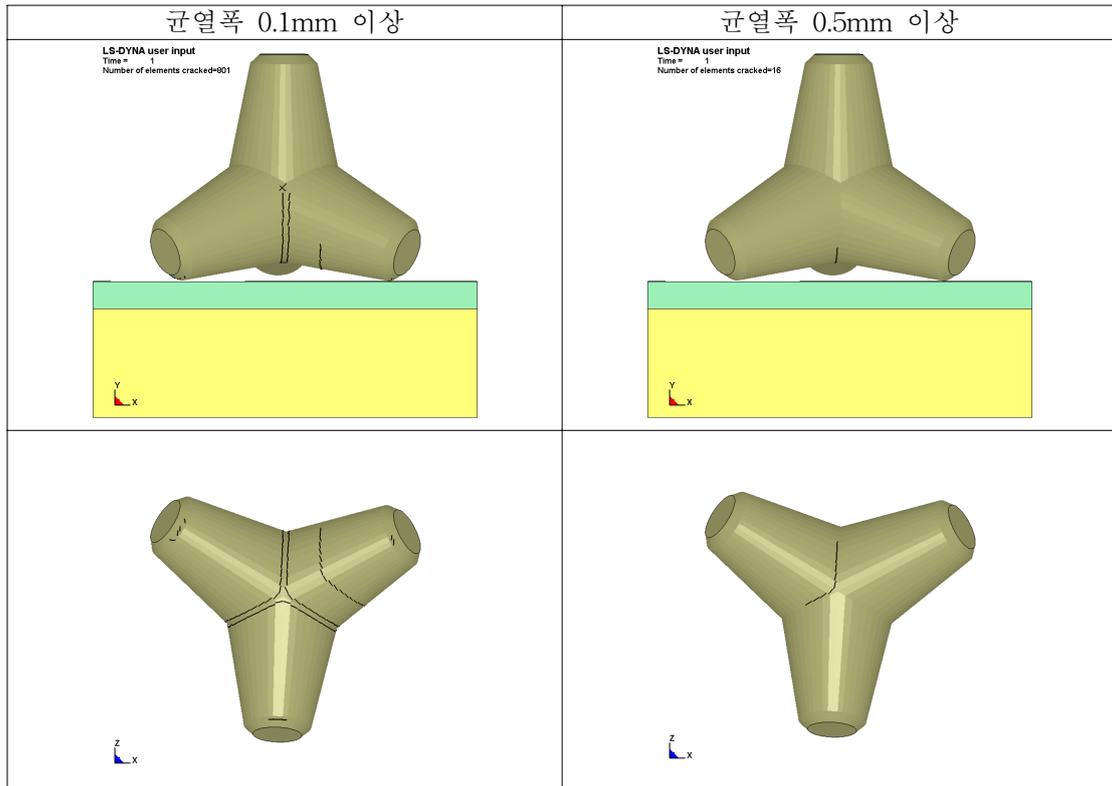


그림 3.2.53 아스팔트 바닥 3점낙하 발생 균열도

해석결과 2) : 인장 변형률

해석에서 얻어진 인장변형률을 다음 그림에 나타내었다. 낙하 후 1초 시점에 얻어진 최대 변형률은 낙하높이 0.5m의 경우 1.228%로 나타났다.

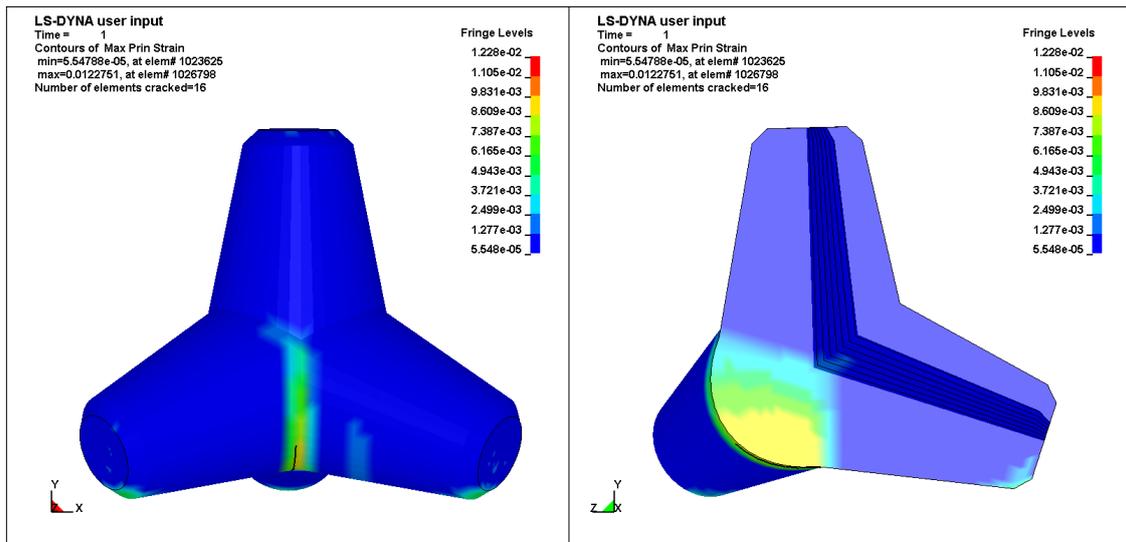


그림 3.2.54 콘크리트바닥 3점낙하 인장변형률

해석결과 3) : 가속도

다음 그림에 콘크리트 바닥에 대한 낙하높이 0.5m인 경우의 변위, 속도 및 가속도 응답의 시간이력을 나타내었다. 콘크리트 바닥에 대한 동일 낙하높이의 응답과 비교하면 바닥면의 탄성계수 등 물성차이로 인한 rebound 높이 및 2차 충격 발생 시점의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 최대 발생 가속도의 크기는 콘크리트 바닥의 경우와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. (콘크리트 바닥: 543.62 m/s², 아스팔트 바닥: 530.20 m/s²)

실측 가속도응답을 다음의 그림에 나타내었으나, 앞의 경우(콘크리트 바닥)와 마찬가지로 이유로 인하여 직접적인 비교는 수행할 수 없었다.

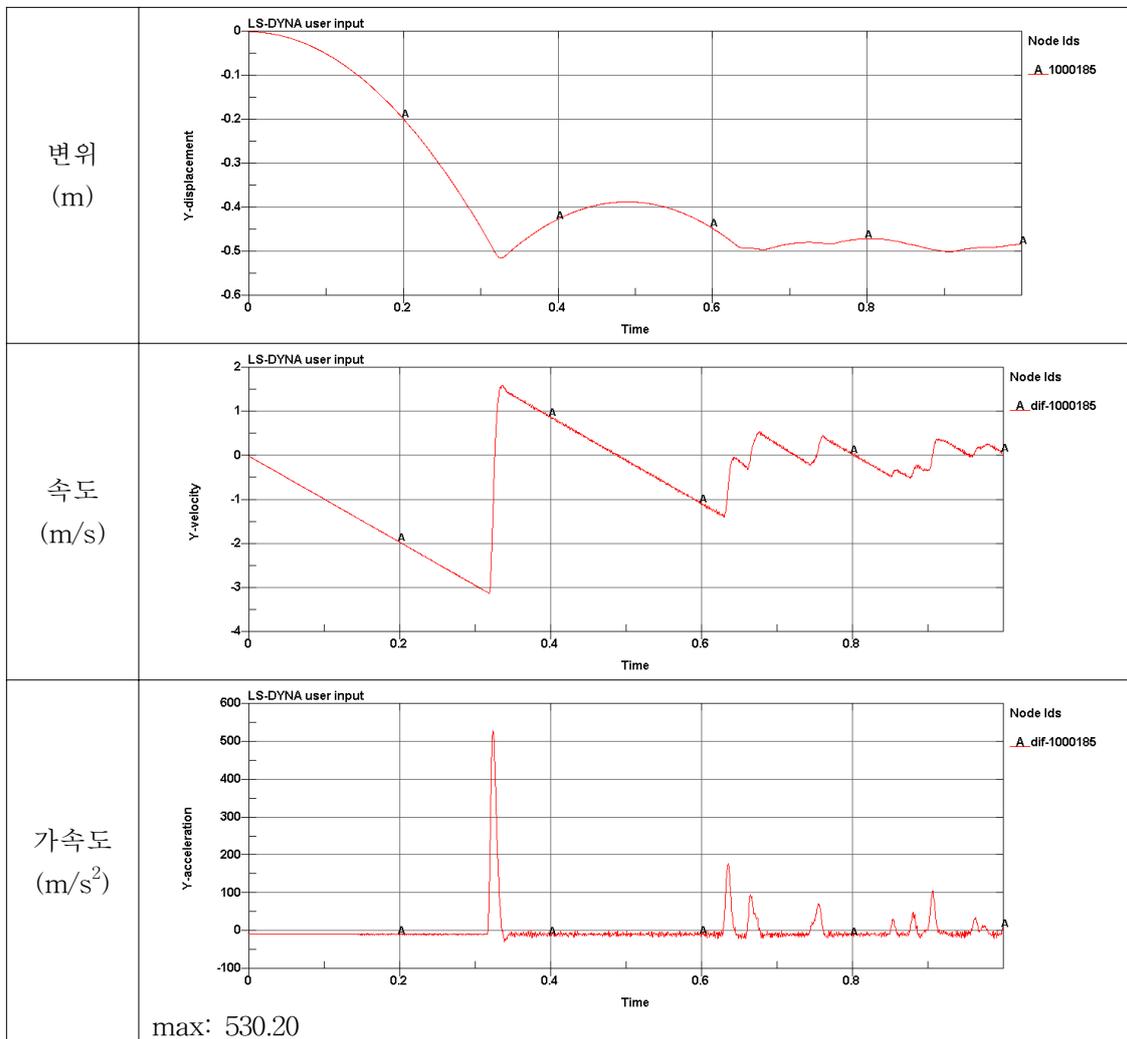


그림 3.2.55 아스팔트 바닥 3점낙하 정점부 응답 시간이력

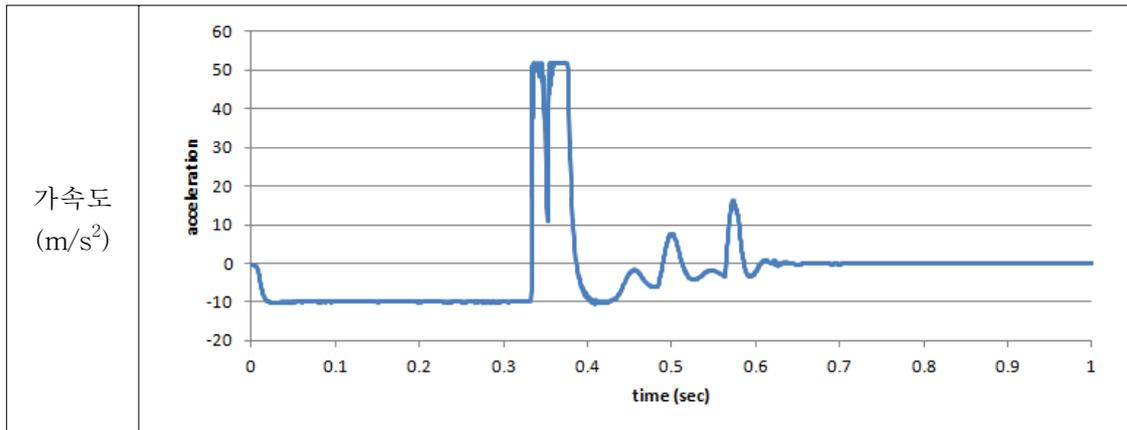


그림 3.2.56 콘크리트바닥 3점낙하 정점부 실측 가속도 응답 시간이력

③ 흙+강판(12mm) 바닥

운동장 바닥에 낙하하는 경우는 앞의 모델에서 구성한 상, 하층부의 물성을 동일한 지반의 물성으로 입력하고, 상층부 표면에 두께 12mm인 4절점 shell요소를 두어 강판의 거동을 모사할 수 있도록 하였다. 지반의 재료모델은 일반적으로 사용하는 선형탄성모델과 LS-DYNA에서 제공하는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하여 두 결과를 비교하였으며, 전단탄성계수 61MPa을 적용하였다. 지반의 전단탄성계수는 지반시험을 수행하지 않았기 때문에 정확한 값을 알 수는 없었으며, 측정 가속도와 유사한 패턴을 나타내는 값을 추정하여 사용하였다.

강판의 경우는 일반적으로 사용되는 강재의 물성치를 사용하였으며, 2중 선형 (bi-linear) 모델을 적용하였다.

다음은 수치해석모델에 입력된 지반(Mohr-Coulomb 모델) 및 강재 물성의 입력 값이다.

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_TITLE									
steel									
\$#	mid	ro	e	pr	sigy	etan	fail	tdel	
	2	7.8300E+3	210.00E+9	0.300000	245.00E+6	500.00E+6	0.000	0.000	
\$#	c	p	lcsc	lcsr	vp				
\$#	eps1	eps2	eps3	eps4	eps5	eps6	eps7	eps8	
\$#	es1	es2	es3	es4	es5	es6	es7	es8	
*MAT_MOHR_COULOMB									
soil									
\$	mid	ro	gmod	rnu	(blank)	phi	cval	psi	
	4	1.97E+3	61.0E+6	0.3		0.485	0.100		
\$	(blank)	nplanes	(blank)	lccpdr	lccpt	lccjdr	lccjt	lcsfac	
		0							
\$	gmoddp	gmodgr	lcmep	lcphiep	lcpsiep	lcmst	cvalgr	aniso	

흙+강판 바닥에 대한 낙하시험은 앞의 표에 나타난 바와 같이 다양한 높이에 대하여 수행되었으며, 이중 두 번째 케이스와 비교하기 위해 낙하높이 0.5m에 대한 수치해석을 수행하였다.

해석결과 1) : 균열

다음 그림에 해석에 의해 얻어진 균열의 양상을 나타내었으며, 최소 균열폭 0.1mm 이상인 경우와 0.5mm 이상인 경우 및 지반재료에 선형탄성모델을 사용한 경우와 Mohr-Coulomb 모델을 사용한 경우로 나누어 나타내었다.

선형탄성모델을 지반재료에 사용한 경우 균열폭 0.1mm 이상 0.5mm 미만의 균열이 분기부에 발생하는 것으로 계산되었으며, 폭 0.5mm 이상의 균열은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한 Mohr-Coulomb 모델을 사용한 경우에는 지면과 접촉하는 부위에 국부적으로 균열이 발생하는 것으로 나타났으며, 분기부 등에 인장균열은 관찰되지 않았다.

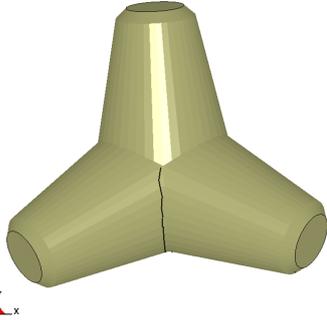
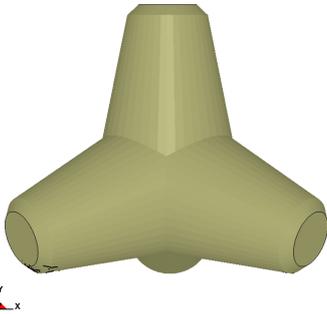
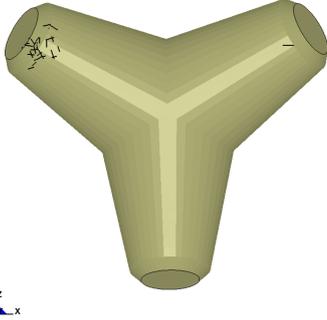
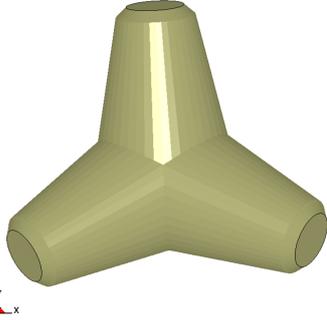
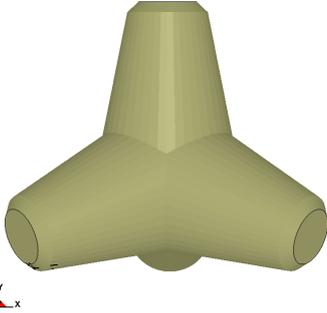
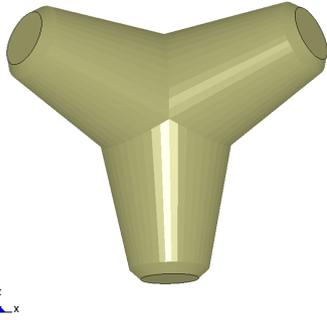
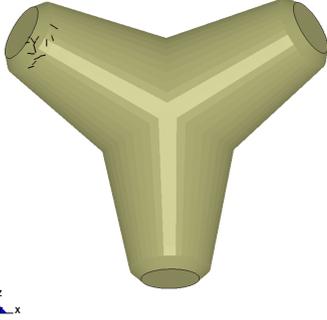
	지반: 선형탄성	지반: Mohr-Coulomb
균열폭 0.1mm 이상	Number of elements cracked=215 	Number of elements cracked=40 
	Number of elements cracked=215 	Number of elements cracked=40 
균열폭 0.5mm 이상		Number of elements cracked=24 
		Number of elements cracked=24 

그림 3.2.57 흙+강관 바닥 3점낙하 발생 균열도

해석결과 2) : 인장 변형률

해석에서 얻어진 인장변형률을 다음 그림에 나타내었다. 낙하 후 1초 시점에 얻어진 최대 변형률은 선형탄성 지반모델의 경우 0.649%, Mohr-Coulomb 지반모델의 경우 6.5%로 나타났다.

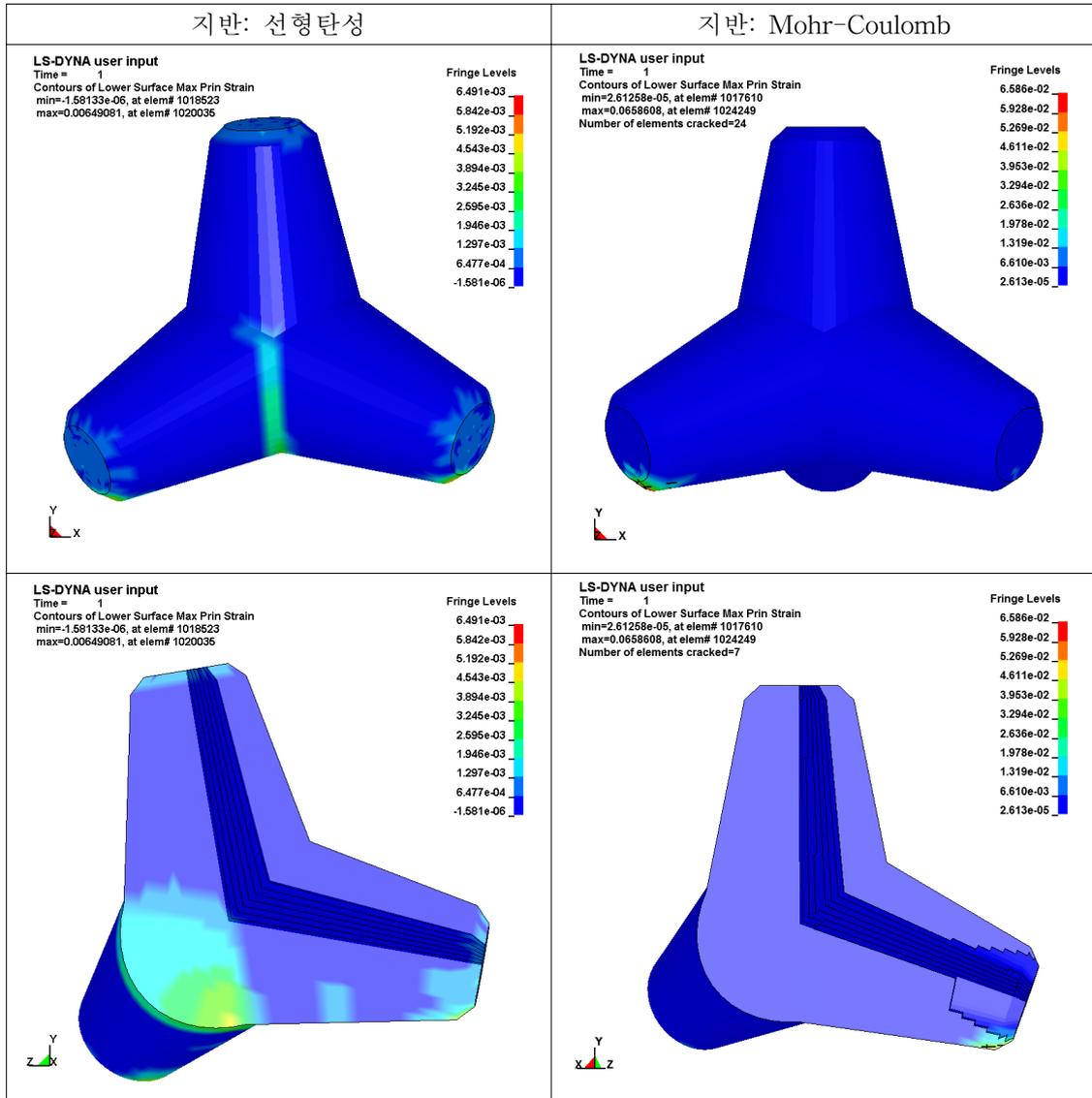


그림 3.2.58 흡+강관 바닥 3점낙하 인장변형률

해석결과 3) : 가속도

낙하실험시 TTP의 최상면에 연직방향 가속도계를 설치하였으며, 이로부터 가속도 응답을 계측하였다. 이 계측결과와 비교하여 해석결과의 타당성을 확인하기 위한 작업을 수행하였으며, 그 결과를 수록하였다.

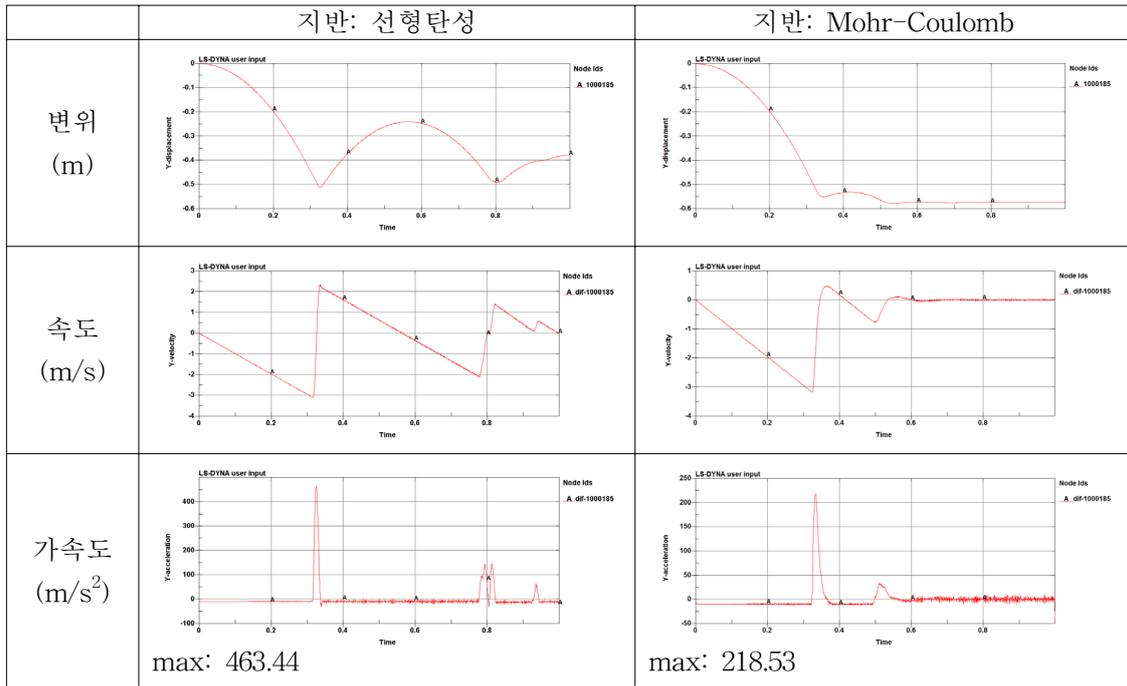


그림 3.2.59 흙+강판 바닥 3점낙하 정점부 응답 시간이력

위 그림에 나타난 바와 같이 지반에 선형탄성 모델을 적용한 경우에는 rebound 높이가 상대적으로 상당히 높으며, 이에 따라 2차 충격이 발생하는 지점도 0.8초 부근으로 늦다. 반면에 Mohr-Coulomb 모델을 사용한 경우에는 rebound 높이도 상대적으로 낮으며, 발생 가속도 파형 및 충격 지속시간이 보다 실험치와 근접하게 나타남을 알 수 있다.

다음 그림에 실측 가속도응답의 시간이력을 나타내었으며, 해석결과와 중첩하여 표시한 그래프를 그 뒤에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 선형탄성 모델을 지반에 적용한 경우에 비해 Mohr-Coulomb 모델을 적용한 경우가 보다 실험치와 근접한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

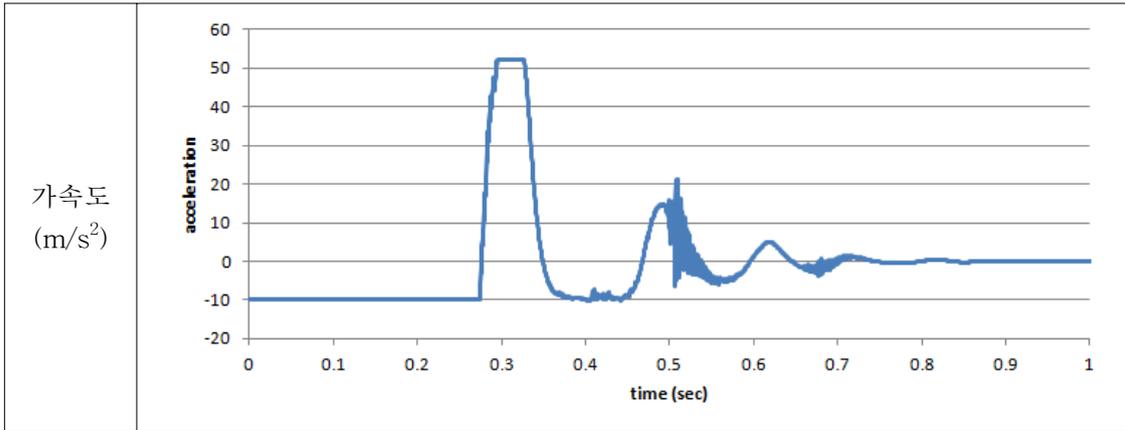


그림 3.2.60 흙+강관 바닥 3점낙하 정점부 실측 가속도 응답 시간이력

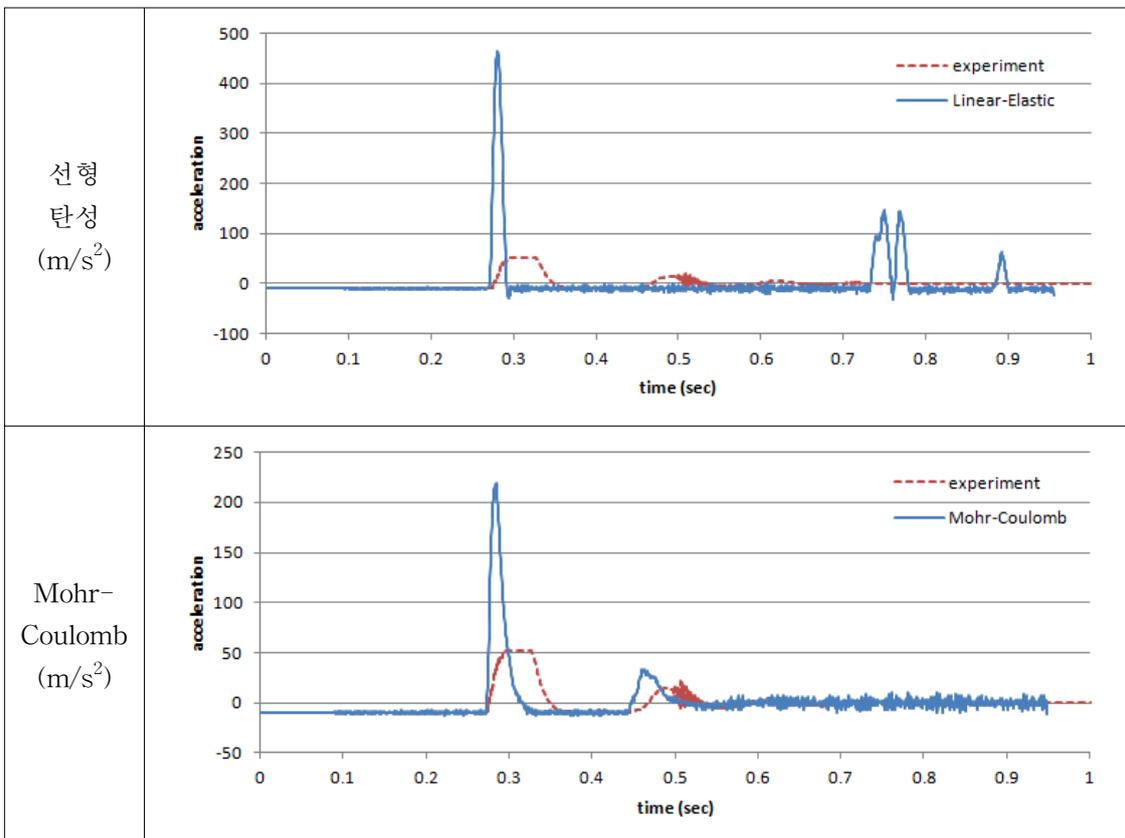


그림 3.2.61 흙+강관 바닥 3점낙하 정점부 실측 가속도 응답 시간이력 비교

(2) 신형 소파블록

(가) 수치해석 모델 작성

① 신형 소파블록 제원

신형 소파블록의 제원은 2.1절과 같이 총 높이 약 2.5m, 중량은 약 6.5톤이며, 내부에 FRP 봉으로 보강이 되어있는 형태이다.

② 재료 물성

신형 소파블록에 사용된 콘크리트는 TTP에 사용된 콘크리트와 동일하며, 수치모델에서도 동일한 모델과 입력값을 사용하였다. 다음에 콘크리트 재료의 입력값을 나타내었다.

*MAT_WINFRITH_CONCRETE								
\$	mid	ro	tm	pr	ucs	uts	fe	asize
	1	2.3220E+3	26115.E+6	0.18	21.0E+06	2.10E+06	300.00	24.0E-3
\$	e	ys	eh	uelong	rate	conm	conl	cont
					0.0	1.0	1.0	1.0
\$	eps1	eps2	eps3	eps4	eps5	eps6	eps7	eps8
\$	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8

FRP 봉은 제조사에서 제공된 응력-변형률 선도를 참고하여 모델링하였다. 다음 그림의 응력-변형률 선도에 나타난 바와 같이 FRP 봉은 파단시까지 거의 선형거동을 보이다가 급작스러운 취성파괴를 하는 것으로 나타나며, 탄성계수는 약 51.4GPa, 인장강도 1213.9MPa, 파단시 인장변형률은 약 2.36% 이다. FRP 봉의 단면적은 190.8mm² 으로 적용되었다.



그림 3.2.62 FRP 봉의 응력-변형률선도

다음은 수치해석모델에 적용된 FRP 봉의 재료물성 부분이다. 단위질량은 주어진 자료에 나타나있지 않아 강재의 단위질량과 동일하게 입력하였으나, FRP 봉의 질량이 총 질량에 비해 크지 않기 때문에 오차의 영향은 크지 않을 것으로 생각된다.

*MAT_PLASTIC_KINEMATIC							
\$#	mid	ro	e	pr	sigy	etan	beta
	2	7850.0000	51.400E+9	0.300000	1213.9E+6	0.000	0.000
\$#	src	srp	fs	vp			
	0.000	0.000	0.023600	0.000			

③ 수치해석 모델

신형 소파블록의 수치해석모델은 다음 그림과 같이 8절점 solid 요소와 2절점 beam 요소를 사용하여 작성되었으며, 요소의 변의 길이는 약 5~70mm 범위에 분포하고 있다. 전체 요소의 수는 약 43,500개이며, 이중 약 43,000개는 solid 요소, 약 500개는 beam 요소로 구성되어 있다. FRP봉 과 콘크리트의 coupling을 위해 LS-DYNA에서 제공하는*constrained_lagrange_in_solid 기능을 사용하였다.

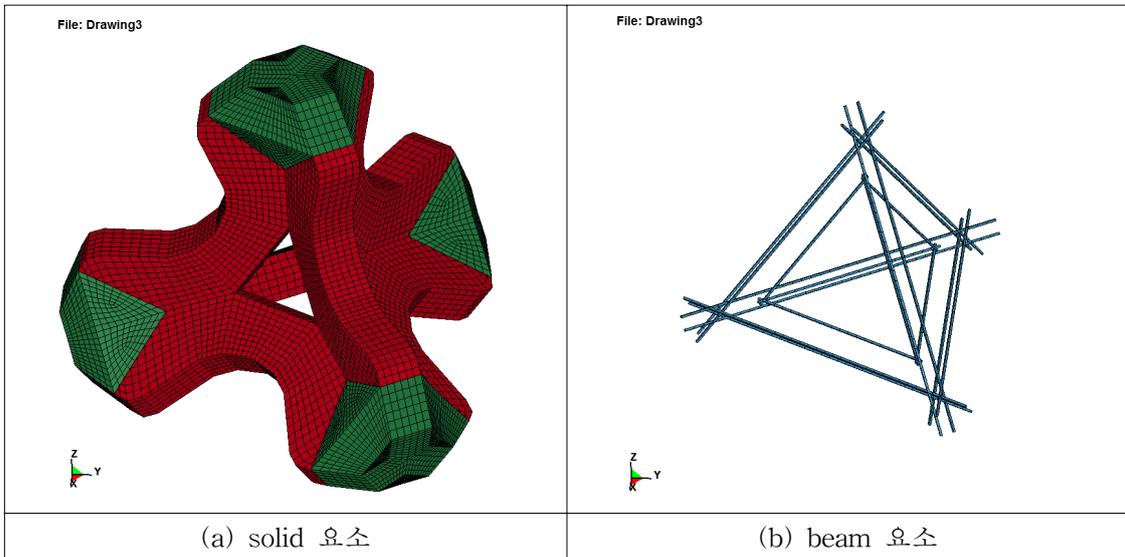


그림 3.2.63 신형 소파블록 유한요소모델

(나) 수치해석 및 실험결과의 비교

신형 소파블록의 낙하실험은 운동장 (soil+12mm 강판) 바닥조건에서만 수행되었으며, 다음 표와 같이 5회 반복 실시하였다. 이 중 첫 번째 실험은 크레인 조작오류로 분석에서 제외하고, 나머지 케이스 중 낙하높이가 가장 높은 다섯 번째 경우를 선택하여 해석결과와 비교하였다.

콘크리트 바닥 및 아스팔트 바닥에 대한 경우는 TTP의 경우와 마찬가지로 수치 해석을 수행하여 그 결과를 확인하였다.

시험종류	횟수	파일명	낙하높이(cm)			바닥면
신형소파블록 3점낙하시험	1	110214	11	11	5	운동장 (soil + 12mm 강판)
	2	110947	12	8	8	
	3	120729	9	12	8	
	4	121344	8	12	9	
	5	130737	17	16	14	

① 콘크리트 바닥

흙+강판 조건에서 수행한 낙하실험의 높이 중 가장 높은 경우가 낙하높이 약 15cm 의 경우였고, 이 높이에 크레인 조작에 의해 상승된 높이를 고려하여 수치해석시 25cm의 낙하높이를 적용하였으며, 콘크리트 바닥과 아스팔트 바닥의 경우도 동일한 낙하높이에 대한 비교를 수행하기로 하였다.

해석결과 1) : 균열

다음 그림에 해석에 의해 얻어진 균열의 양상을 나타내었으며, 최소 균열폭 0.1mm 이상인 경우와 0.5mm 이상인 경우로 나누어 나타내었다.

해석결과에서는 그림과 같이 지면과 접촉하는 부분에 0.1~0.5mm 두께의 균열이 일부 발생하는 것으로 나타났으며, 0.5mm 이상의 균열은 관찰되지 않았다. FRP 봉이 포함되지 않은 사전 해석결과에 비해 FRP 봉의 효과로 균열발생이 크게 감소한 것으로 생각된다.

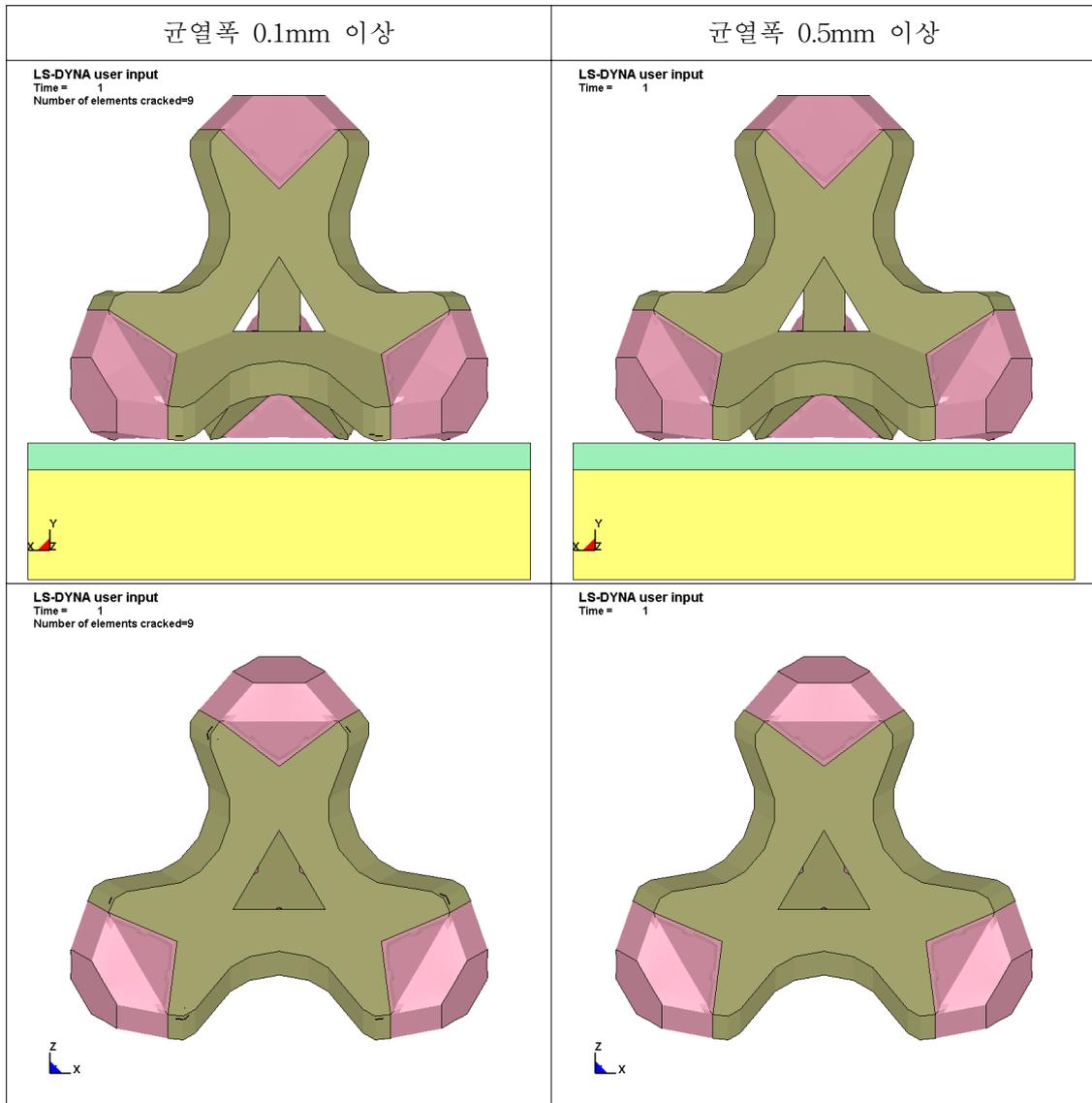


그림 3.2.64 콘크리트 바닥 3점낙하 발생 균열도

해석결과 2) : 인장 변형률

해석에서 얻어진 인장변형률을 다음 그림에 나타내었다. 낙하 후 1초 시점에 얻어진 최대 인장변형률은 약 1.363%로 나타났다. 최대 인장변형률 발생 위치는 지면과 접촉하는 cap 부분으로 확인되었다.

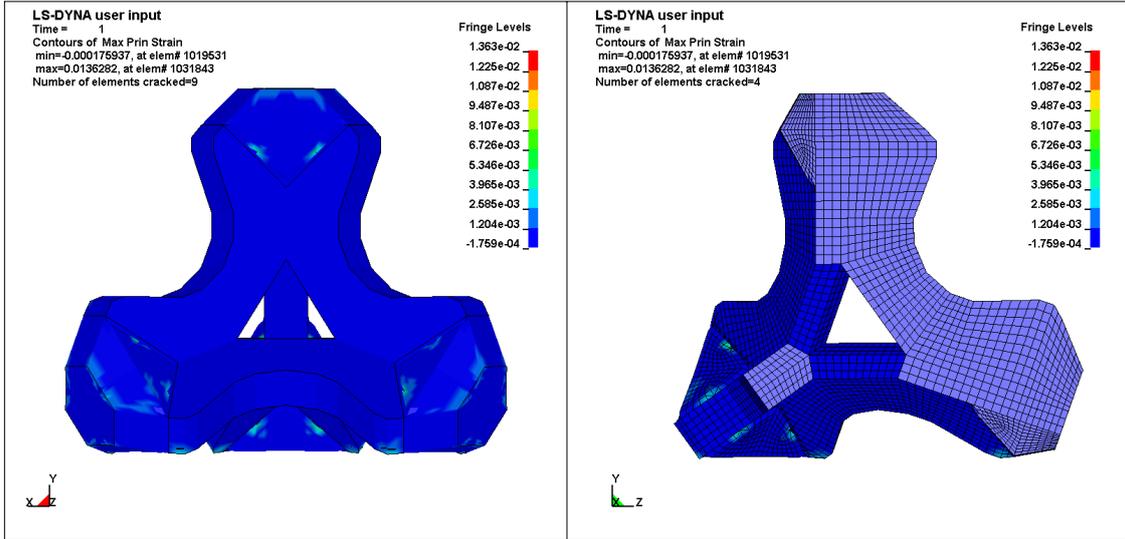


그림 3.2.65 콘크리트바닥 3점낙하 인장변형률

해석결과 3) : 가속도

다음 그림에 콘크리트 바닥에 대한 낙하높이 0.25m인 경우의 변위, 속도 및 가속도 응답의 시간이력을 나타내었다.

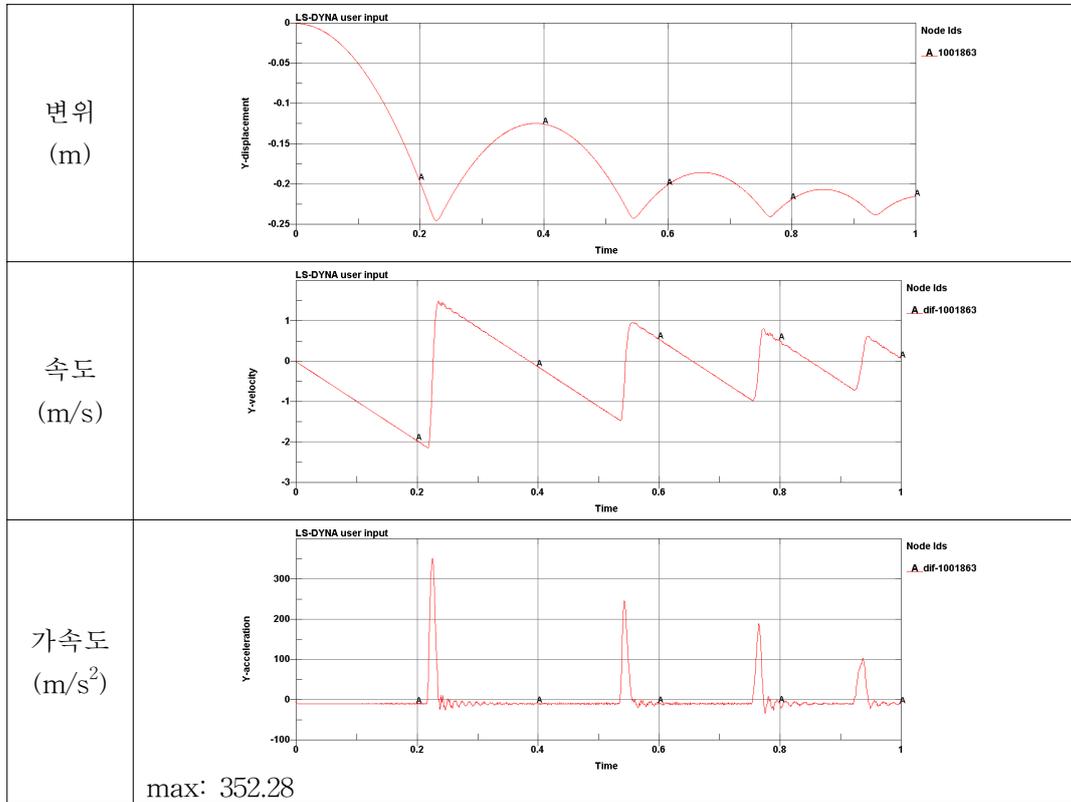


그림 3.2.66 콘크리트 바닥 3점낙하 정점부 응답 시간이력

② 아스팔트 바닥

낙하높이 25cm, 아스팔트 바닥조건에 대한 해석결과는 다음과 같다.

해석결과 1) : 균열

다음 그림에 해석에 의해 얻어진 균열의 양상을 나타내었으며, 최소 균열폭 0.1mm 이상인 경우와 0.5mm 이상인 경우로 나누어 나타내었다.

해석결과에서는 그림과 같이 보의 중앙부분 하면에 폭 0.1~0.5mm의 균열이 발생하는 것으로 나타났으며, 폭 0.5mm 이상의 균열은 관찰되지 않았다.

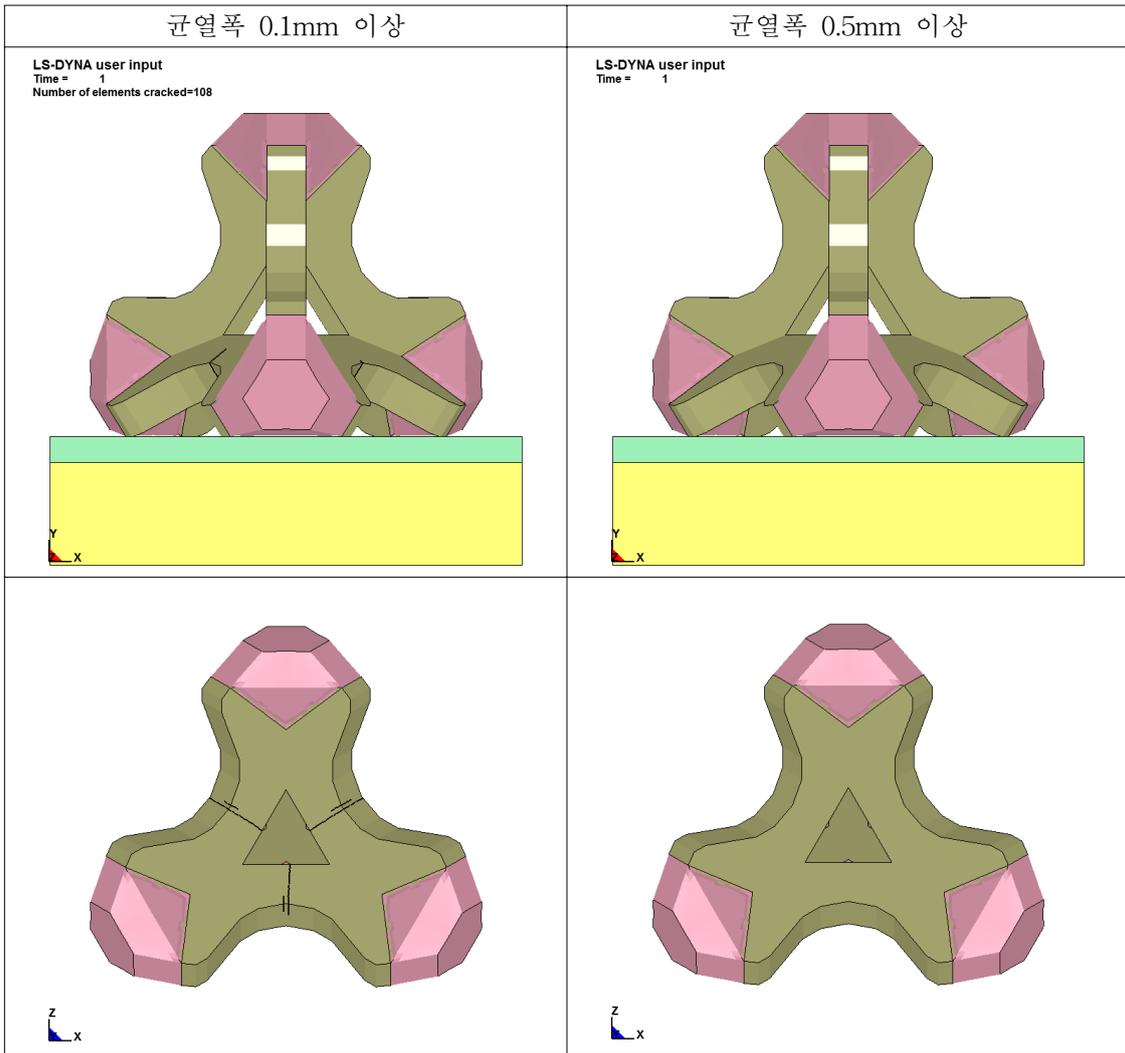


그림 3.2.67 아스팔트 바닥 3점낙하 발생 균열도

해석결과 2) : 인장 변형률

해석에서 얻어진 인장변형률을 다음 그림에 나타내었다. 낙하 후 1초 시점에 얻어진 최대 인장변형률은 약 1.356%로 나타났다. 최대 인장변형률 발생 위치는 지면과 접촉하지 않은 상부 cap 부분으로 확인되었다.

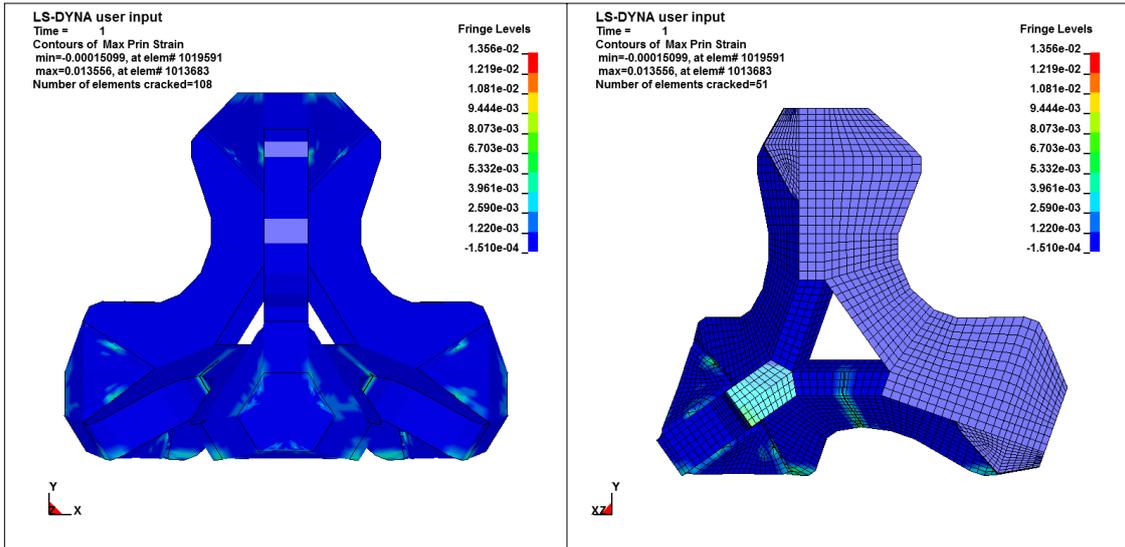


그림 3.2.68 아스팔트 바닥 3점낙하 인장변형률

해석결과 3) : 가속도

다음 그림에 콘크리트 바닥에 대한 낙하높이 0.25m인 경우의 변위, 속도 및 가속도 응답의 시간이력을 나타내었다.

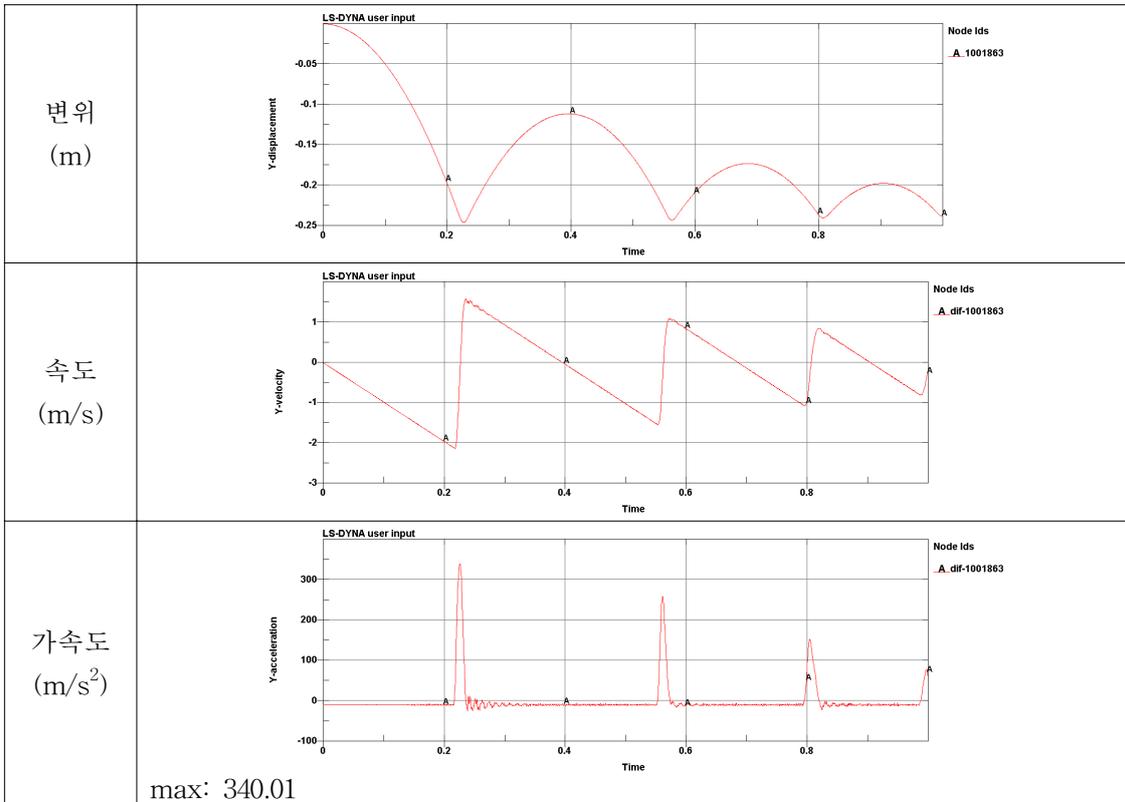


그림 3.2.69 아스팔트 바닥 3점낙하 정점부 응답 시간이력

③ 흙+강판 바닥

낙하높이 25cm, 흙+강판 바닥조건에 대한 해석결과는 다음과 같다.

해석결과 1) : 균열

다음 그림에 해석에 의해 얻어진 균열의 양상을 나타내었으며, 최소 균열폭 0.1mm 이상인 경우와 0.5mm 이상인 경우로 나누어 나타내었다.

해석결과에서는 그림과 같이 지면과 접촉하는 부분에 폭 0.1~0.5mm의 미소한 균열이 발생하는 것으로 나타났으며, 폭 0.5mm 이상의 균열은 관찰되지 않았다.

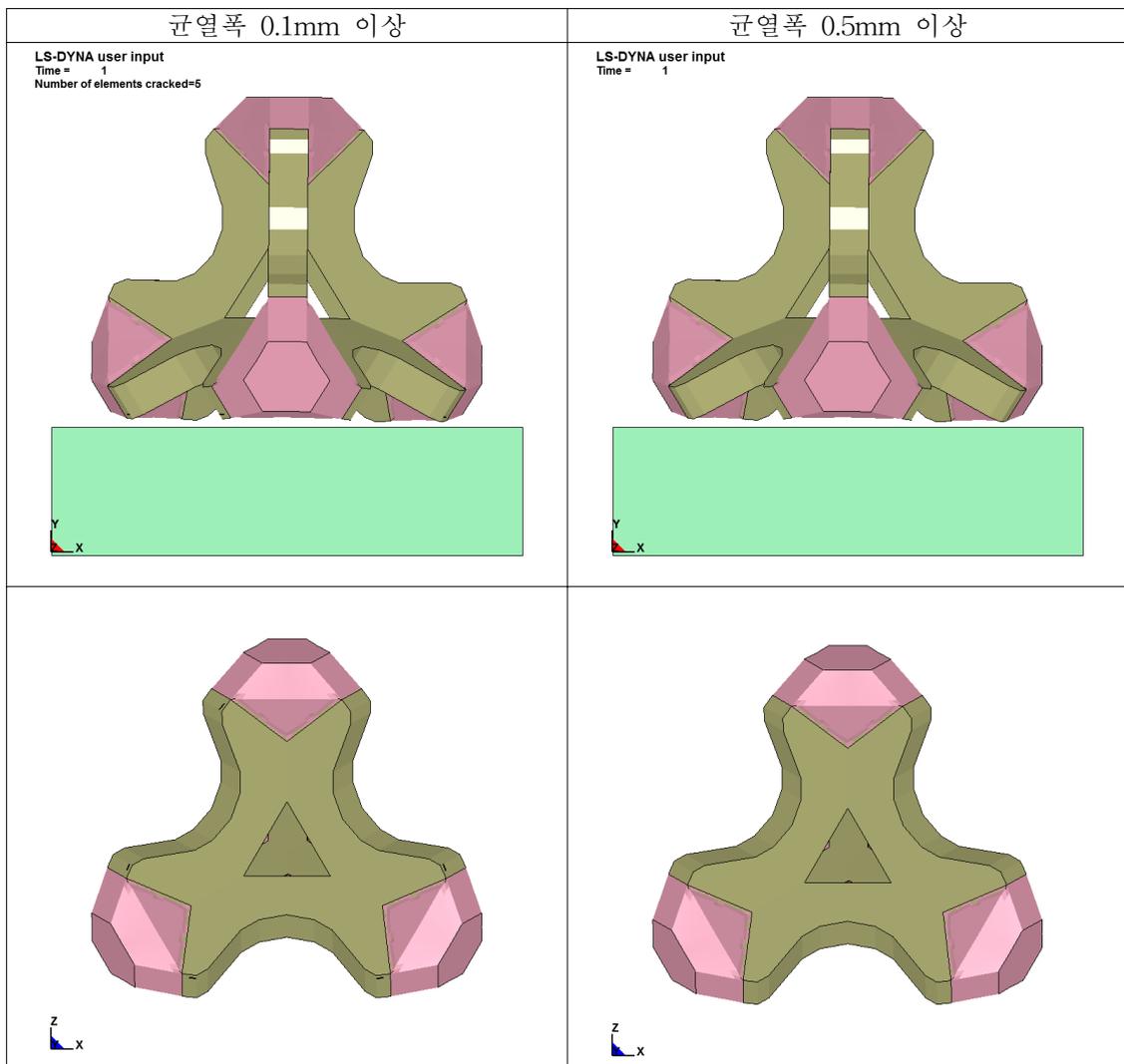


그림 3.2.70 흙+강판 바닥 3점낙하 발생 균열도

해석결과 2) : 인장 변형률

해석에서 얻어진 인장변형률을 다음 그림에 나타내었다. 낙하 후 1초 시점에 얻어진 최대 인장변형률은 약 1.559%로 나타났다. 최대 인장변형률 발생 위치는 지면과 접촉하는 cap 부분으로 확인되었다.

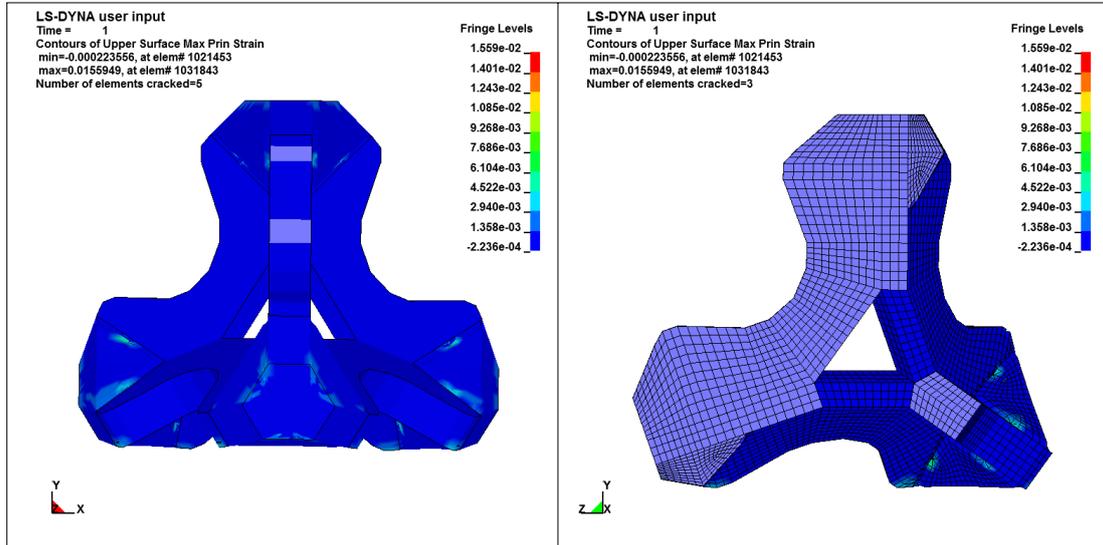


그림 3.2.71 흡+강판 바닥 3점낙하 인장변형률

해석결과 3) : 가속도

다음 그림에 콘크리트 바닥에 대한 낙하높이 0.25m인 경우의 변위, 속도 및 가속도 응답의 시이력을 나타내었다

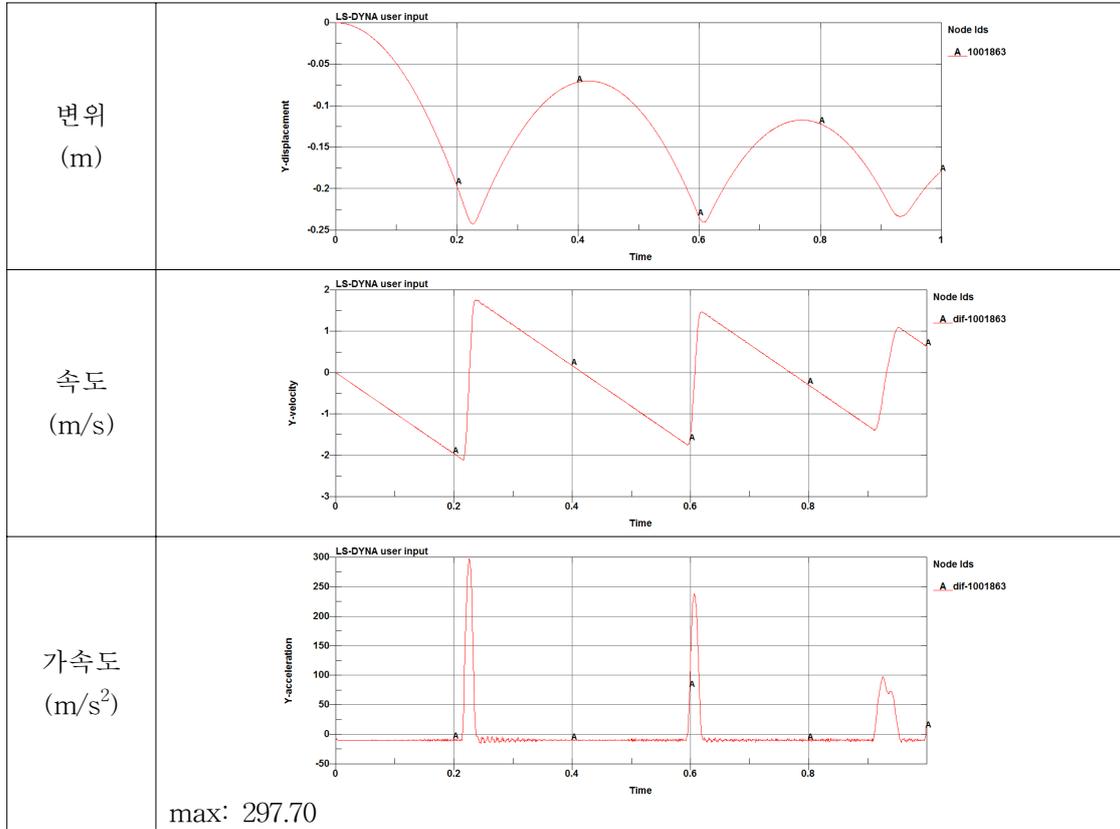


그림 3.2.72 흡+강판 바닥 3점낙하 정점부 응답 시간이력

다음 그림은 실측 가속도 신호와 해석 가속도신호를 비교하여 나타낸 것이다. 지반의 재료모델로 선형탄성 모델을 사용하여 실측 신호에 비해 충돌지속시간이 짧고 peak 가속도가 더 크게 계산된 것으로 판단되며, 이러한 차이는 앞의 TTP의 경우와 마찬가지로 Mohr-Coulomb 모델을 사용하면 개선될 수 있는 차이로 생각된다.

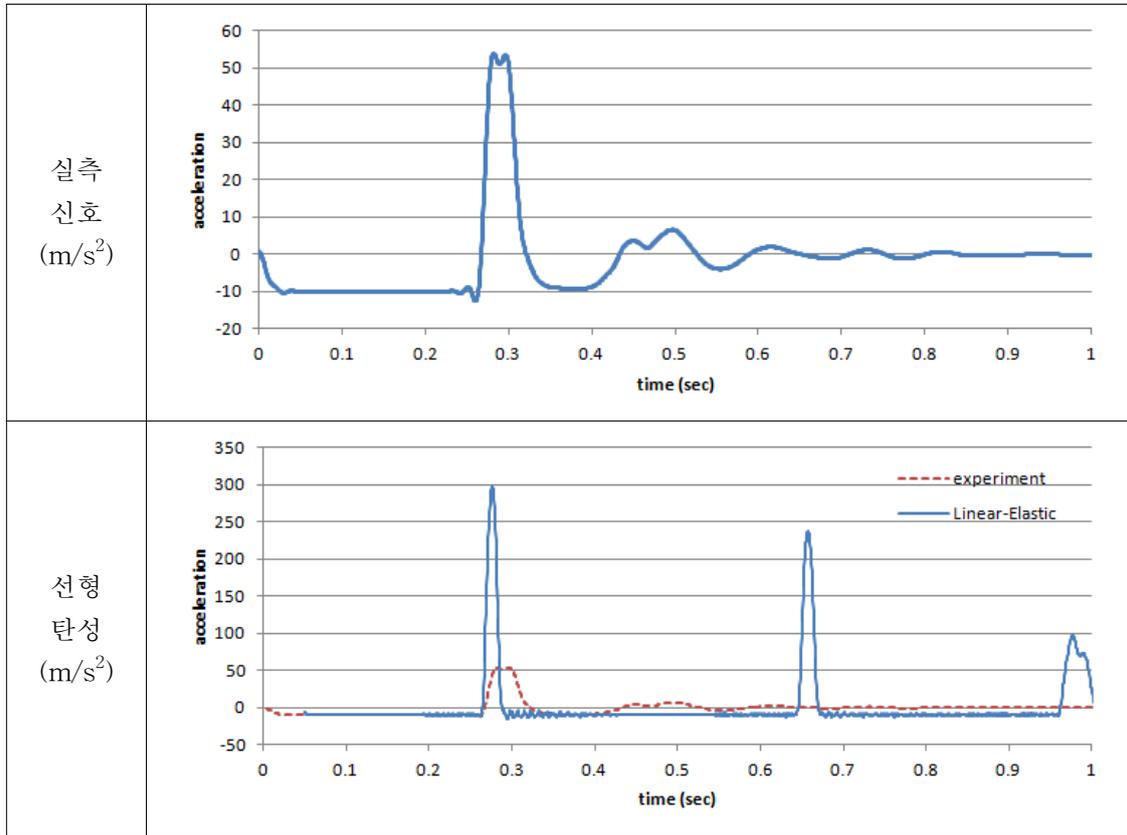


그림 3.2.73 흙+강판 바닥 3점낙하 정점부 실측 가속도 응답 시간이력 비교

다. 한계 낙하높이 산정

TTP 및 신형 소파블록이 파괴되는 최소 낙하높이를 구하기 위해 낙하 높이를 변수로 하는 해석을 수행하였다. 소파블록의 파괴는 폭 0.5mm 이상의 균열이 관통하여 소파블록의 일부분이 분리되는 경우로 정의하였다.

(1) 해석 조건

바닥면 조건은 앞의 세 가지 바닥 조건 중 콘크리트 바닥의 경우로 적용하였으며, 낙하높이는 TTP의 경우 50, 75, 100, 125cm의 다섯 가지로, 신형 소파블록의 경우는 25, 50, 75, 100, 125cm의 다섯 가지로 변화시켜가며 균열발생 양상을 검토하였다.

낙하높이가 높아짐에 따라 자유낙하하는 시간이 길어지며, 이로 인하여 불필요한 계산시간의 증가가 발생하게 된다. 이러한 비효율을 줄이기 위해 낙하높이는 지면 위 1cm로 통일시키고, 초기 속도를 변화시켜 충돌발생 이후의 거동을 위주로 계산이 이루어지도록 하였다. 충돌시 초기속도는 중력장 내에서 자유낙하하는 질량의 낙하속도 계산식으로부터 다음과 같이 계산이 가능하다.

$$v = \sqrt{2gh}$$

따라서, 낙하 높이별 초기속도는 다음 표와 같이 계산된다.

낙하높이 (cm)	초기속도 (m/s)	낙하높이 (cm)	초기속도 (m/s)
25	2.215	100	4.429
50	3.132	150	5.425
75	3.836	200	6.264
100	4.429	250	7.004
125	4.952	300	7.672

바닥면의 모델링에 사용된 재료모델은 콘크리트의 경우 선형탄성, 지반의 경우 Mohr-Coulomb 모델로 하였다.

(2) TTP 해석결과

다음 그림에 낙하높이에 따른 폭 0.5mm 이상의 균열발생 양상을 나타내었다. 출력시점은 충돌이후 0.05초 시점으로 1차 충돌직후 발생된 균열만을 표시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 낙하높이 1m 이상일 때 TTP의 하면에서 발생된 균열이 상면까지 진전하여 파괴가 발생하는 것을 알 수 있다.

낙하 높이 (cm)	정면	하면	상면
50	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050999 Number of elements cracked=34</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050999 Number of elements cracked=34</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050999 Number of elements cracked=34</p>
75	<p>LS-DYNA user input Time = 0.05 Number of elements cracked=286</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.05 Number of elements cracked=286</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.05 Number of elements cracked=286</p>
100	<p>LS-DYNA user input Time = 0.05 Number of elements cracked=3145</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.05 Number of elements cracked=3145</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.05 Number of elements cracked=3145</p>
125	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050001 Number of elements cracked=4819</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050001 Number of elements cracked=4819</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050001 Number of elements cracked=4819</p>

그림 3.2.74 TTP 낙하높이에 따른 균열양상

(3) 신형 소파블록

신형 소파블록은 내부에 보강된 FRP 봉의 영향으로 TTP에 비해 균열발생이 현저히 적은 것으로 나타났다. 따라서 낙하 높이를 1.0m부터 시작하여 균열의 발생을 관찰하였다.

낙하 높이 (cm)	정면	하면	상면
100	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050002 Number of elements cracked=93</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050002 Number of elements cracked=93</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050002 Number of elements cracked=93</p>
150	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050001 Number of elements cracked=486</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050001 Number of elements cracked=486</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050001 Number of elements cracked=486</p>
200	<p>LS-DYNA user input Time = 0.05 Number of elements cracked=3319</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.05 Number of elements cracked=3319</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.05 Number of elements cracked=3319</p>
250	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050002 Number of elements cracked=4736</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050002 Number of elements cracked=4736</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050002 Number of elements cracked=4736</p>

그림 3.2.75 신형소파블록 낙하높이에 따른 균열양상

낙하 높이 (cm)	정면	하면	상면
300	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050001 Number of elements cracked=11092</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050001 Number of elements cracked=11092</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.050001 Number of elements cracked=11092</p>
350	<p>LS-DYNA user input Time = 0.05 Number of elements cracked=14254</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.05 Number of elements cracked=14254</p>	<p>LS-DYNA user input Time = 0.05 Number of elements cracked=14254</p>

그림 3.2.76 신형소파블록 낙하높이에 따른 균열양상(계속)

위 그림에 나타난 바와 같이 낙하높이 2.5m까지 폭 0.5mm 이상의 균열은 모두 지면과 접촉하는 cap 부분에서 관찰되며, 보 또는 기둥부분의 균열은 낙하높이 3m 이상일 때 발생하는 것으로 나타났다. 하지만 FRP 봉의 작용으로 낙하높이 3.5m 까지 소파블록의 일부분이 본체로부터 분리되는 파괴는 발생하지 않는 것으로 나타났다.

7. 결 론

이 연구에서는 해양소파블록의 기술개발을 위한 성능과악 연구의 일환으로 소파블록의 동적 성능을 살펴보기 위한 실험과 해석을 수행하였다. 현재 널리 사용되고 있는 TTP와 신형소파블록을 대상으로 하여 자유낙하 실험과 회전 충돌 실험을 수행하였으며, 이러한 실험을 통하여 소파블록이 보여주는 동적 거동을 수치적으로 모델링할 수 있는 유한요소프로그램을 적용하였다.

실제 소파블록은 해양 파를 받으면서 변위가 발생하여 인접한 블록에 충돌하게 된다. 이와 같은 현상을 모사하기 위하여 소파블록이 충돌하는 면을 다양화하여, 고정된 콘크리트 바닥과 지반에 강판을 설치한 바닥에 대하여 충돌 실험을 수행하였다.

자유낙하실험에 의하여 부재에 발생하는 최대 인장응력은 TTP의 경우 각 부재의 접합면인 중앙부위에서 집중되어 있으며, 낙하시 지면에 접촉하는 특성에 따라 다소 차이를 보인다. 콘크리트 바닥에 대한 자유낙하 실험에서 낙하높이 1m 인 경우에 TTP 실험체에 균열이 발생하였으며, 이를 확인하기 위하여 계측된 변형률을 환산하여 인장응력을 구하여 보면, 약 3.47MPa로 균열응력인 2.29MPa을 초과하여 균열이 발생하였음을 알 수 있다.

계측 데이터를 활용하여 균열이 발생하는 한계높이를 구하여 보면, 콘크리트 바닥인 경우에는 약 0.83m에서 균열이 발생하며, 지반에 강판을 설치한 바닥에 대해서는 약 3.65m에서 균열이 발생하는 것으로 분석된다. 콘크리트 바닥은 거의 강체와 유사한 조건으로 실제 방파제에서 인접 소파블록에 충돌하는 조건에 비해서는 매우 강한 조건이다. 반면에 지반에 강판을 설치한 바닥은 강도를 완화시킨 조건이라 할 수 있다.

3차원 유한요소를 사용하여 소파블록과 콘크리트 바닥 및 강판이 덮인 지반을 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다. 콘크리트에 예상되는 균열도를 작성하였으며, 실험에서 계측된 가속도 시간이력을 재현할 수 있도록 수치해석 모델의 지반 특성 등 물성치를 조정하여 근접한 결과를 얻을 수 있도록 하였다.

이와 같은 정밀 수치해석을 통하여 TTP 및 신형 소파블록이 파괴되는 최소 낙하높이를 구하기 위해 낙하 높이를 변수로 하는 해석을 수행하였다. 소파블록의 파괴는 폭 0.5mm 이상의 균열이 관통하여 소파블록의 일부분이 분리되는 경우로 정의하였다. TTP는 낙하높이 1m 이상일 때 하면에서 발생된 균열이 상면까지 진전하여 파괴가 발생하는 것을 알 수 있다.

신형 소파블록은 내부에 보강된 FRP 봉의 영향으로 TTP에 비해 균열발생이 현저히 적은 것으로 나타났다. 보 또는 기둥부분의 균열은 낙하높이 3m 이상일 때 발생하는 것으로 나타났다. 하지만 FRP 봉의 작용으로 낙하높이 3.5m 까지 소파블록의 일부분이 본체로부터 분리되는 파괴는 발생하지 않는 것으로 나타났다.

제4장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

제1절 소파블록의 결합기술

연구개발 목표는 기존에 항만구조물 전면에 설치되어 있는 소파블록, 특히 tetrapod를 대상으로 안정성을 높이기 위한 최적의 상호 결합 방법을 개발하고 이를 결합하기 위한 재료를 선정한다. 이렇게 결정된 방법을 현장에 적용하여 바다의 험한 환경과 소파블록이 난적 되어있는 현실에서 제대로 적용이 되는지를 확인하는 것이 목표이다. 이러한 목표를 달성하기 위하여 실내 실험을 실시하였으며 여기서 얻어진 결과를 강릉과 제주의 현장에 적용하여 현재까지 실험이 성공적으로 진행되고 있다. 다만 현장 실험 기간에 소파블록이 이동할 정도로 큰 태풍이 오지 않아서 결합한 소파블록과 개별 소파블록간의 거동 차이를 분명하게 보지 못한 것은 아쉬운 점이다. 이러한 차이는 이 사업이 끝나더라도 큰 태풍이 해당 지역을 지나간 후에는 모니터링을 실시하여 효과를 검증할 계획이다.

현재 농림수산식품부에서는 관할 지방 어항의 방파제 보호를 위하여 전면적인 보수 보강계획을 수립하고 있다. 그런데 이 계획이라는 것이 기존의 소파블록보다 무거운 블록으로 대체를 한다 던지 아니면 그 위에 덧씌우기를 하는 것이어서 엄청난 비용과 시간을 필요로 한다. 전국에 산재한 어항의 방파제를 모두 이러한 방법으로 보수 보강한다면 재정에 엄청난 부담을 주고 즉시 실행이 되지 않기 때문에 구조물은 위험에 노출되게 된다. 그러나 현재로서는 이 방법외에 달리 뾰족한 방법이 없기 때문에 매우 곤란한 상태이다. 따라서 본 연구에서 개발한 소파블록 결합기술은 훌륭한 대안이 될 수 있다. 아직은 현장에서 적용성이 입증은 되지 않았고 로프의 수명이 얼마나 될지도 검증이 되지 않아서 구체적인 사용 지침서를 작성할 수는 없지만 지속적인 모니터링과 이러한 목적에 적합한 로프의 개발을 추진한다면 좋은 대안이 될 수 있을 것이다. 국토해양부도 사정은 마찬가지로 관할하는 항만 시설의 보수보강이 필요하므로 본 기술이 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

제2절 신형 소파블록의 개발

신형 소파블록을 개발하였다. 수치모델을 통하여 하중에 대한 안정성을 확인하였다. 수리특성을 파악하기 위하여 수리모형실험을 실시하였다. 피해계수는 10.8을 나타내어 기존의 TTP 7.8보다도 훨씬 결합력이 좋아서 경제성이 있는 것으로 판명되었다. 구조적인 안정성을 파악하기 위하여 FEM 수치모델을 수행하였다. 하중 재하

에 대한 안정성을 확인하기 위하여 무게 7톤의 실험체를 제작하여 하중을 제한한 결과, 자중의 6배 정도에서 파괴가 발생하여 현장에서 사용하는데 문제가 없는 것으로 판명되었다. 현장에서는 보통 자중의 5배 정도의 하중에 견디면 사용이 가능한 것으로 알려졌다. 또한 충격하중에 대하여 균열이 발생하였을 경우 내부의 철근이 부식되는 것을 방지하기 위하여 부식에 강한 유리섬유를 사용하여 하중 재하 실험을 실시하여 안정성을 확보하였다. 이 결과는 국내외에 논문으로 발표하였으며 특허 등록도 마쳤다.

국내에서 많이 사용하고 있는 TTP는 무게가 커지면 다리가 부러지기 쉽다는 치명적인 약점이 있다. 그래서 보통 50톤 이상은 사용하지 않는 것이 좋으나 실상은 72톤까지도 사용하고 있다. 이로 인하여 다리가 부러지고 무게가 가벼워진 TTP가 고파랑에 쉽게 이동하는 위험성이 상존하고 있다. 설계파고가 커진 현재 TTP를 대체할 새로운 소파블록의 개발이 절실한 상황이며 본 연구에서 개발한 제품의 적용 가능성이 매우 높다. 특히 본 제품은 내부에 유리섬유 철근을 삽입하여 다리 부러짐을 방지하였다. 현재는 일부 방파제에서 일본에서 개발한 소파블록을 사용하고 있는데 막대한 특허료를 지불해야 하는 문제가 있다. 현재 본 제품은 신안군 상태도에 설치가 되고 있기 때문에 내년도에 완공이 되면 모니터링을 실시할 계획이다. 경제성은 기존 TTP보다 우수하기 때문에 안정성만 확인된다면 대형 소파블록이 필요한 현장에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

제5장 연구개발결과의 활용계획

제1절 소파블록의 결합기술 개발

이 기술은 현재 특허출원이 되었으며 등록이 진행 중이다. 기존의 방파제 전면에 설치되어 있는 소파블록이 설계파고의 증가에 따라 보수 보강이 필요한 상태인데 현재로서는 좀 더 큰 소파블록으로 대체하거나 덧씌우기를 하는 방법 이외에는 대안이 없는 상태이다. 따라서 본 기술이 적용될 수 있는 가능성은 매우 높다. 전국에 산재해 있는 어항이나 항만에는 모두 소파블록이 있으며 이들 모두 설계파고의 증가에 대비한 보수보강이 필요하다. 연구 기간 동안에 큰 태풍이 발생하지 않아 본 기술의 효과를 볼 수 있는 기회가 없었으나 과제 종료 후에도 지속적인 모니터링으로 효과를 검증하여 소파블록의 안정을 확보할 수 있는 기반기술로 사용하고자 한다.

제2절 신형 소파블록의 개발

신형 소파블록은 연구를 통하여 안정성이 검증이 되었다. 실내 실험을 통하여 수리특성을 검토하였고 하중재하실험을 통하여 구조적 안정성이 검증되었다. 이제는 현장에 적용하여 소파성능을 검증하는 과제가 남았는데 이것이 제대로 완수되면 기존의 소파블록과 같이 사용될 수 있는 기반은 갖추었다. 이러한 성과를 바탕으로 현재 신안군 상태도에 방파제 소파블록으로 채택되어 설치 공사가 진행 중이다. 이곳에서의 성과에 따라서 국내의 다른 현장에 적용 가능성이 높아질 것이며 해외 수출도 가능할 것이다.

제6장 참고문헌

- S. Sigurdarson, O.B. Smarason, G. Viggosson, and S. Bjordal, 2006, Wave height limits for the statistically stable icelandic type berm breakwater, Coastal Engineering, Vol.5, pp.5046-5058.
- S. Noboru, M. Iwanami, M. Yamamoto and I. Nishiwaki, 2008, Structural performance evaluation of new type wave dissipating concrete block, Coastal Engineering, Vol.4, pp.3436-3448.
- 국토해양부, 200,. 콘크리트구조설계기준. 한국콘크리트학회.
- Burcharth, H. F., Howell, G. L. and Liu, Z. ,1991, On the determination of concrete armour unit stresses including specific results related to Dolosse. Coastal Engineering, 107 - 165.
- LSTC ,2007, LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 971., Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, May.
- MIDAS IT ,2010, MIDAS/CIVIL User's Manual. MIDAS Information Technology Co. Ltd.
- Zwamborn, J. A. and Scholtz, J. D. P. ,1986, Dolos armour design considerations. Coastal Engineering, 2420-2434.