


碩士學位論文

매설형 신축이음장치의 개발 및
거동 분석



濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

洪 性 俠

2009年 2月

매설형 신축이음장치의 개발 및 거동 분석

指導教授 朴 相 烈

洪 性 俠

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 2月

洪性俠의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2009年 2月

Development and Behavior Analysis of
the New Buried Expansion Joint

Seong-Hyeop Hong
(Supervised by Professor Sang-Yeol Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for
the degree of Master of Engineering

2009. 2

This thesis has been examined and approved

Thesis director, Jung-Man Nam, Prof. of Civil & Ocean Engineering

Thesis director, Sang-Yeol Park, Prof. of Civil & Ocean Engineering

Thesis director, Sang-Jin Kim, Prof. of Civil & Ocean Engineering

February, 2009

Department of Civil & Ocean Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목 차	i
LIST OF TABLES	iv
LIST OF FIGURES	v
SUMMARY	viii
I. 서 론	1
1. 연구배경 및 목표	1
2. 연구동향	2
1) 국내기술동향	2
2) 국외기술동향	2
3) 기술동향 분석 결론	3
3. 연구방법	3
II. 신축이음장치의 개요 및 종류	4
1. 신축이음장치의 개요	4
2. 신축이음장치의 종류	4
1) 포장형(매설형) 조인트	4
2) 맞댐형 조인트	5
3) 고무판형 조인트	6
4) 강평거형, 강겹침형 조인트	6
5) 레일형 조인트	7
3. 설계 신축량 산정방법	8
1) 온도변화에 의한 신축량	9
2) 건조수축에 의한 신축량	10
3) 크리프에 의한 신축량	11

4) 지점의 회전변위에 의한 신축량	11
5) 설계 신축량 간편식	12
III. 매설형 신축이음장치의 기존 연구고찰	14
1. 매설형 신축이음장치의 개요	14
2. 매설형 신축이음장치에 대한 연구동향	15
1) 매설형 신축이음장치의 거동	16
2) 매설형 신축이음장치파괴 양상	19
3. 현장조사	21
1) 현장조사 개요	21
2) 현장조사 결과	22
IV. 새로운 매설형 신축이음장치 BFLJ의 개발	25
1. BFLJ(Buried Folding Lattice Joint)의 개요	25
2. BFLJ의 구성요소 및 사용재료	26
1) 하부 시스템	26
2) 상부 포장 혼합물	27
3. 적합한 온도 제안	30
V. 실험 계획	31
1. 실험개요	31
2. 시험체 제원	31
3. 실험변수	32
4. 변위재하 및 Data 측정	33
5. 신축량 산정	35
6. 변위 재하속도의 결정	36
7. 시험체 제작 및 사용재료	38
1) 슬래브	38
2) 아스팔트 콘크리트	39

3) 조인트	41
VI. 실험결과 및 분석	43
1. 기존 매설형 신축이음장치의 실험결과 및 분석	43
1) 기본 시험체(A0-180)	43
2) 철판 폭에 대한 영향	45
3) 상부 포장재료에 따른 영향	47
2. 새로 개발한 매설형 신축이음장치 BFLJ의 실험결과 및 분석	50
1) 기본 시험체(B0-A0)	51
2) 상부 포장재료에 따른 영향	52
3) 앵커스터드에 따른 영향	55
4) 스테드 높이에 따른 영향	59
5) 기존 매설형 신축이음장치와 새로운 매설형 신축이음장치 결과 비교	60
VII. 결론	61
VIII. 참고문헌	62

LIST OF TABLES

Table 2.1 Change of temperature range and linear expansion coefficient	10
Table 2.2 Reduction coefficient by dry shrinkage and creep of concrete	11
Table 2.3 Rotating-angle at support by loading	12
Table 2.4 Design expansion lengths for different regions and different types of bridge	13
Table 3.1 Locations of field survey	21
Table 4.1 Components of folding lattice system	27
Table 4.2 Grading of aggregate (KS F2357)	29
Table 4.3 Suggested grading of aggregate	29
Table 4.4 Suggested temperature for producing joint pavement	30
Table 5.1 Test parameters of APJ system	32
Table 5.2 Test Parameters of BFLJ system	33
Table 5.3 Mixture proportion of general asphalt concrete	39
Table 5.4 Mixture proportion of joint	41
Table 5.5 Properties of bitumens	41

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Dummy Joint	5
Fig. 2.2 Asphalt Plug Joint	5
Fig. 2.3 Strip Seal Joint	5
Fig. 2.4 Mono Cell Joint	5
Fig. 2.5 Rubber Top Joint	6
Fig. 2.6 Gai Top Joint	6
Fig. 2.7 Trans flex Joint	6
Fig. 2.8 Ace Joint	6
Fig. 2.9 Finger Plate Joint	7
Fig. 2.10 Rail Joint	8
Fig. 3.1 Asphalt Plug Joint	14
Fig. 3.2 Pavetech Horizontal Strain at 21°C (70°F)	16
Fig. 3.3 Schematic of debonding actions (Bramel et al., 1999)	17
Fig. 3.4 Schematic of standard APJ system (Reid et al., 1998)	18
Fig. 3.5 Proposed alternative APJs	18
Fig. 3.6 Geometry and notation (Qian et al., 1998)	18
Fig. 3.7 Coordinate system (a) corner A, (b) corner B	19
Fig. 3.8 Typical distress types with APJ (Partl et al., 2002)	20
Fig. 3.9 Crack locations in APJ (Bramel et al.,1999)	21
Fig. 3.10 Typical shapes of damage	23
Fig. 4.1 BFLJ(Buried Folding Lattice Joint)	25
Fig. 4.2 Folding lattice system	26
Fig. 4.3 Components and dimensions of folding lattice system	27
Fig. 4.4 Bituminous mixture of joint	28
Fig. 5.1 Dimensions of specimens	32

Fig. 5.2 Screw jack	34
Fig. 5.3 Arrangement of measuring equipments	34
Fig. 5.4 Real view of test set-up	35
Fig. 5.5 Relaxation test results of APJ at 2°C (Bramel et al., 1999)	37
Fig. 5.6 Stress-strain curves of asphalt mixture with aggregate volume fraction of 64% (Deshpande and Cebon, 2000)	37
Fig. 5.7 Manufacturing process of the test slab	38
Fig. 5.8 Manufacturing process of the test asphalt concrete	40
Fig. 5.9 Manufacturing process of joint	42
Fig. 6.1 Surface strain at 3 Cycle (A0-180)	44
Fig. 6.2 Real view of A0-180 specimen	45
Fig. 6.3 Surface strain at 1 Cycle (A0-270)	46
Fig. 6.4 Real view of A0-270 specimen	47
Fig. 6.5 Surface strain at 1 Cycle (AS-180)	49
Fig. 6.6 Surface strain at 1 Cycle (AI-180)	49
Fig. 6.7 Real view of AS-180 specimen	50
Fig. 6.8 Real view of AI-180 specimen	50
Fig. 6.9 Surface strain at 3 Cycle (B0-A0)	51
Fig. 6.10 Real view of B0-A0 specimen	52
Fig. 6.11 Surface strain at 3 Cycle (BS-A0)	53
Fig. 6.12 Surface strain at 3 Cycle (BI-A0)	54
Fig. 6.13 Real view of BS-A0 specimen	54
Fig. 6.14 Real view of BI-A0 specimen	55
Fig. 6.15 Surface strain at 3 Cycle (B0-A1)	56
Fig. 6.16 Surface strain at 3 Cycle (BS-A1)	57
Fig. 6.17 Surface strain at 3 Cycle (BI-A1)	57
Fig. 6.18 Real view of B0-A1 specimen	58
Fig. 6.19 Real view of BS-A1 specimen	58
Fig. 6.20 Real view of BI-A1 specimen	58

Fig. 6.21 Surface strain at 3 Cycle (BI-A1-60) 59

Fig. 6.22 Real view of BI-A1-60 specimen 60



SUMMARY

Asphalt Plug Joint(APJ) is a new type of expansion joint that is increasingly applied in the United States and Europe. APJ is an expansion joint that uses 20% bitumen and 80% aggregate-composed, weight proportion, that takes a form of filling the expansion gap between the packaging using bituminous mixture, and through enabling the smooth connection of expansion gap and road pavement, it secures evenness and uses the material's ductility to self-absorb the bridge board's expansion and contraction. Furthermore, APJ is not only easy to build, but costs less compared to other expansion joints.

Although APJ is designed to have a 6-7 usage lifespan, there are cases where it is damaged within the first six months. This early damaging induces traffic congestion due to frequent repair works, and the social cost due to this exceeds the installation cost of the device. For this reason, even with its superior advantages, it is not widely applied in Korea nor abroad.

So in this research, we have developed a new system of Buried folding lattice joint(BFLJ) which overcomes the disadvantages of APJ, and with experimental bodies designed, have compared and analyzed the basic system, function, and movement through experiment.

The newly developed BFLJ is developed to relieve the biggest problem of APJ, the form transformation concentration, and has an advantage of inducing an even transformation and transmitting to the asphalt mixture for induction of even transformation on the whole system through the sub system.

For the experimental variable, in the case of APJ system, it was carried out according to the effects following the type of gap plate and asphalt mixture, and in the case of BFLJ, it was carried out based on the type of asphalt mixture, the anchor stud, and stud.

As a result of the experiment, the APJ had a transformation on both ends of

the gap plate and spreading to the surface by the expansion. Because of this, we could see that the reason for early damage is the tension failure due to transformation concentration following the plate gap and asphalt mixture, and the debonding along the joint section. In contrast, the newly developed BFLJ could not only resolve APJ's biggest disadvantage of transformation concentration, but also induce even transformation on all the joint by applying high-carbon material and heightening of stud. Also, the presence of anchor stud was unnecessary in inducing the even transformation. Thus, it could be seen that the newly developed BFLJ could overcome the disadvantages of APJ and prevent early damage.



I. 서론

1. 연구배경 및 목표

교량과 고가도로 등에 적용된 신축이음장치는 콘크리트의 건조수축, 크리프, 온도변화, 활하중 등에 의한 상부구조의 변형과 변위에 의하여 구조물에 발생하는 응력을 해소하기 위하여 신축을 원활하게 하고 이음부의 연속성을 확보하기 위한 장치로 교량 구조물의 주행성을 높여 주며, 방수가 확실하고 진동을 흡수하며, 유지보수가 용이하고, 구조물의 손상을 최대한 줄여 수명을 연장 할 수 있어야 한다. 그러나 신축이음장치의 대부분을 차지하고 있는 기존 노출형 시스템은 교통량의 증가, 소홀한 시공과 유지보수 불량으로 인하여 교량구성요소 중에서 가장 파손이 빈번하게 발생하는 요소로 잦은 보수공사로 인하여 많은 유지관리비가 소요될 뿐만 아니라 교통체증을 유발시키고 있다. 또한 주행 시 소음과 충격을 발생시켜 주행성을 떨어뜨리고 있다.

한편 미국과 유럽 국가들이 많이 사용하고 있는 매설형 시스템은 기존의 노출형 시스템과 비교하여 충격, 진동, 소음이 거의 없어 우월한 평탄성을 확보 할 수 있을 뿐만 아니라 거의 완전한 방수성능을 보여줄 수 있으며 시공과 유지보수가 쉽고 비교적 비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 매설형 신축이음장치는 6~7년의 보수주기를 기준으로 설계되었지만 때때로 시공 후 6개월 이전에 파괴가 일어나는 사례가 발생하고 있다. 이러한 조기 파손문제는 잦은 보수공사로 인하여 교통체증 등을 유발하며 이로 인한 사회적 비용은 장치의 설치비용을 훨씬 능가한다. 이러한 이유로 우수한 장점에도 불구하고 우리나라뿐만 아니라 해외에서도 널리 적용하고 있지 못하고 노출형 시스템을 적용하고 있는 실정이다. 따라서 노출형 시스템보다 우수한 매설형 신축이음장치의 단점을 극복하고 장점을 향상시켜 사용성이 뛰어나고 실용적이며 경제적인 매설형 신축이음장치의 연구개발이 필요하다.

이에 본 연구에서는 기존 매설형 신축이음장치의 단점을 극복 할 수 있는 새

로운 시스템을 개발하고 실험을 통하여 교량 상부구조에 발생하는 신축에 의한 기존 시스템과 새로 개발한 시스템의 성능평가와 거동을 분석하고자 한다.

2. 연구동향

1) 국내기술동향

우리나라에서는 단경간 교량에 원시적 포장형 조인트를 일부 도입하고 있으나 균열 및 소성변형 현상에 의해 포장파손 현상이 발생하고 있다. 이에 기존 조인트의 문제점 극복하기 위한 방안들을 모색하고 있지만 새로운 매설형 신축이음장치에 대한 연구개발은 이제까지 미흡한 상태이며 매설형 신축이음부 포장에 사용할 수 있는 고탄성 포장 화합물의 연구개발도 미흡한 상태이다.

2) 국외기술동향

일본의 경우 고탄성 아스팔트를 적용한 매설형 신축이음장치를 일부 소교량에 사용하고 있으나 시스템의 한계로 여러 단점이 발생하고 있다. 유럽의 경우는 교량의 장수명화 및 유지관리의 최적화, 쾌적한 주행환경을 확보하기 위해 다양한 joint 처리 방법 및 고급 교면포장 공법을 적용 중에 있다.

한편 미국과 영국을 중심으로 매설형 신축이음장치인 Asphalt Plug Joint를 사용하고 있는데, 무수한 장점에도 불구하고 소성변형, 용기, 패임, 박리, 탈착, 균열, 누수 등의 파손으로 널리 각광받지 못하고 있다. 또한 설계와 시공도 일반적인 기준 없이 제작되고 있으며 시공업체의 경험과 기술에만 의존하고 있어 그 품질의 정도가 크게 분산되어 있는 실정이다.

3) 기술동향 분석 결론

국내 및 국외에서 매설형 신축이음장치는 상업적으로 생산되어 일부 사용되고 있으나 단점을 우려하여 그 적용을 기피함으로써 널리 활용되지 못하고 있다.

3. 연구방법

본 연구는 교량과 고가도로 등에 적용되어 있는 신축이음장치에 대한 문제점을 극복하기 위하여 새로운 매설형 신축이음장치를 개발하고, 실제의 조인트 폭을 갖는 매설형 신축이음장치 시험체를 제작하여 기존 매설형 신축이음장치와 새로 개발한 매설형 신축이음장치의 성능 평가를 위한 거동분석을 하고자 다음과 같은 방법으로 진행하였다.

- 1) 교량과 고가도로에 적용되어 있는 매설형 신축이음장치를 대상으로 기존연구 고찰과 현장조사를 통해 매설형 신축이음장치의 문제점과 파괴 양상을 분석하였다.
- 2) 기존 매설형 신축이음장치의 단점을 극복하고 장점을 향상 시킬수 있는 새로운 매설형 신축이음장치 Buried folding lattice joint(BFLJ)를 개발하였다.
- 3) 새로 개발한 시스템의 성능 및 거동 분석을 위하여 기존 매설형 신축이음장치와 새로 개발한 BFLJ의 시험체를 제작하여 신축시험을 실시하였다.
- 4) 각 변수별 시험체에 대하여 신축에 대한 조인트의 표면 변형률, 균열 양상 및 파괴 형태를 분석하여 기존 매설형 신축이음장치와 새로 개발한 신축이음장치의 성능 및 거동을 비교 분석하였다.

II. 신축이음장치의 개요 및 종류

1. 신축이음장치의 개요

교량용 신축이음장치는 교량과 고가도로 등의 온도변화에 의한 신축, 콘크리트의 크리프와 건조수축에 의한 신축량, 차량하중으로 인한 거더변형에 기인한 신축량 등을 원활하게 수용하기 위한 장치이다. 또한 신축이음장치는 교량 구조물의 이음부에 설치되어 교량 구조물의 신축을 원활하게 하여 주행성을 높여 주며, 방수가 확실하고 진동을 흡수하며, 유지보수가 용이하고, 구조물의 손상을 최대한 줄여 수명을 연장할 수 있어야 한다.

2. 신축이음장치의 종류

현재 교량과 고가도로 구조물 등의 이음부에 설치되어 있는 신축이음장치는 매우 많은 종류의 장치가 개발되어 사용되고 있지만 각 형식별 특징의 차이점 때문에 이들 종류를 분류하기는 어렵다.

국내에 적용된 신축이음장치를 크게 포장형식, 맞댐 형식, 고무판 형식, 강평거형 형식, 레일형식, 특수형식, 등으로 분류할 수 있다.

1) 포장형(매설형) 조인트

포장형 조인트는 교량 상부구조에 작용하는 신축 및 충격에 대하여 상부구조 자체에서 흡수하는 구조이며, 노면의 연속성을 확보할 수 있으므로 비교적 주행성이 우수하며 신축량이 작은 경우에 적용된다. Fig. 2.1~2는 포장조인트의 예를 나타낸 것으로 Fig. 2.1의 맹조인트 경우에는 주행성이 양호하고 설치비 및 보수비가 저렴하나 방수성이 나쁜 것으로 평가되었다. 또한 Fig. 2.2는 매설형 신축이

음장치(Asphalt Plug Joint)로 유간에 백업재와 강판을 깔고 골재와 역청으로 구성된 아스팔트 혼합물을 채우는 방식의 신축이음장치이다. 시공이 간편하고 차량 주행 시 충격이나 소음진동이 없으며 기존의 맹조인트보다 방수성이 우수하나 기존의 맹조인트와 마찬가지로 균열이나 소성변형 등이 발생할 수 있다.

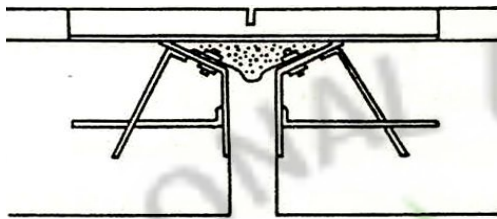


Fig. 2.1 Dummy Joint

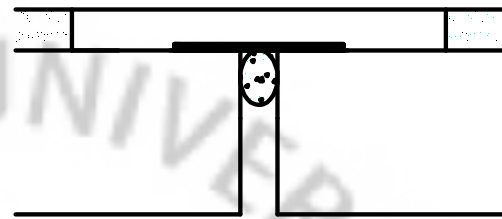


Fig. 2.2 Asphalt Plug Joint

2) 맞댐형 조인트

Fig. 2.3~6은 맞댐형 조인트를 나타낸 것으로 이음부에 줄눈재 및 씬(Seal)재를 삽입하고 필요에 따라 슬래브 단부를 형강 또는 강판으로 보강한 형식으로 신축량이 80mm이하의 소교량에 주로 사용된다. 또한 다른 형식의 조인트에 비하여 고가이며 일체시공을 원칙으로 하고 있어 보수 시 이러한 형식의 조인트를 사용하는 데에는 적용상의 문제가 발생할 수 있다.

국내에서 생산된 맞댐 형식의 신축이음장치 중에서 가장 널리 사용되는 형식은 모노셀 조인트이며 다른 조인트보다 방수성이 뛰어나나 스트립씬 조인트에 비하여 수밀성이 떨어지고 표면에 고무가 노출되어 있어 시설장비에 의하여 손상을 입을 수 있다. 가이탑 조인트는 수직형 핑거(finger) 구조로 내구성과 평탄성이 우수하나 씬재의 파손에 따른 누수문제가 발생할 수 있다.

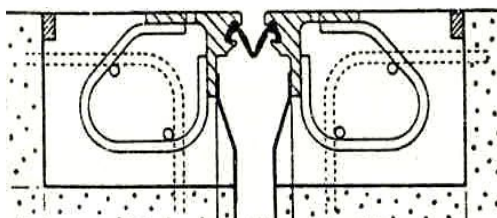


Fig. 2.3 Strip Seal Joint

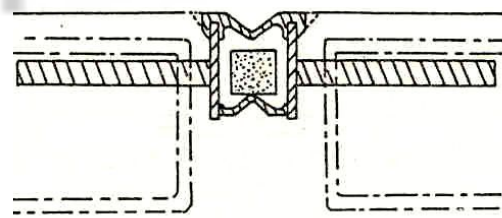


Fig. 2.4 Mono Cell Joint

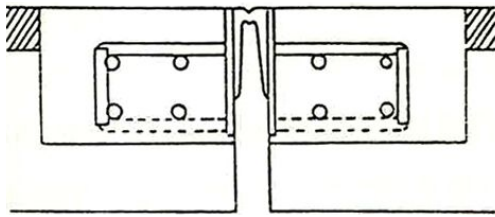


Fig. 2.5 Rubber Top Joint

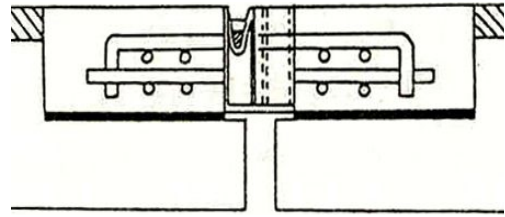


Fig. 2.6 Gai Top Joint

3) 고무판형 조인트

Fig. 2.7~8은 같은 고무판 형식의 조인트로 네오프렌 고무와 강판이 일체 구조로 제작되어 있으며 고무판의 변형으로 교량의 신축을 흡수하는 형식이다. 이 형식의 경우에 제설장비에 의하여 조인트 표면이 찢겨져 나가고 내부의 지지철판이 노출되거나 이탈되는 문제점이 있다. 그리고 정착볼트가 외부로 노출되어 있는 제품의 경우 정착볼트 풀림과 파손 등의 정착부와 관련한 문제점도 많이 발생한다. 고무판 형식 중에서 가장 많이 사용되는 제품은 트랜스 플렉스형으로서 이 조인트의 경우 신축량이 100mm이상이면 매우 정밀한 시공이 이루어져야 하며 그렇지 못한 경우 이음부가 부풀어 올라 차륜에 의하여 함몰되는 현상이 발생한다.

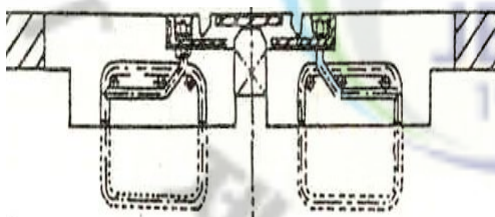


Fig. 2.7 Trans flex Joint

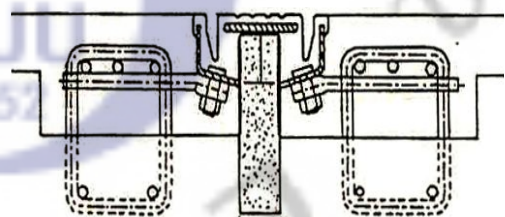


Fig. 2.8 Ace Joint

4) 강핑거형, 강꺽침형 조인트

강핑거(Finger Plate), 강꺽침(Sliding Plate) 조인트는 주로 신축량이 큰 교량에 적합한 형식이며, 내구성과 방수성이 뛰어나므로, 장기간 교량 및 연속교에 적합하다. 이형식은 방수성이 우수하나, 물받이 손상으로 인한 방수 및 배수문제와

사교에서의 적용이 어렵다는 점이다. 최근 교량이 장대화 되고 연속화 됨에 따라 신축량이 100mm 이상인 경우 적용이 권장되고 있지만 반드시 팽거의 방향이 교축방향으로 설치가 가능하여야 하며 차량하중이 직접 조인트에 작용함으로 피로에 대한 검토가 반드시 필요하다. Fig 2.9는 강팽거형 조인트의 예를 나타낸 것이다.

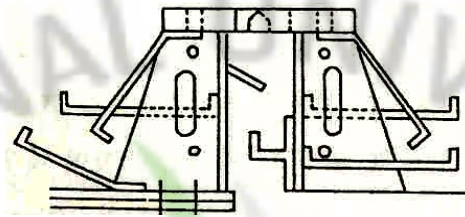


Fig. 2.9 Finger Plate Joint

5) 레일형 조인트

Fig. 2.10은 레일형 조인트를 나타낸 것으로 상부의 강재빔을 고무 셸로 연결하여 설치하고 하부는 가로보를 설치하여 분산시키는 형식이다. 이 형식은 크게 셸러(Sealer), 분리보(Seperator) 및 지지보(Supprt beam)으로 구성되어 있으며, 지지보는 스프링과 베어링으로 지지된다. 또한, 지지보의 수에 따라 단지지식과 다지지식으로 구분된다.

레일형 조인트는 분리보의 간격이 유지되어야 하며, 스프링 및 베어링의 파손 및 이탈이 없어야 하고, 분리보와 지지보에 대한 피로검토가 이루어져야 한다. 한편 레일형식은 다른 형식에 비하여 고가이고 정밀한 시공이 이루어지지 못하면 하자가 발생할 가능성이 높다. 일단 손상되면 보수가 어렵고 많은 보수비용과 시간이 소요된다.

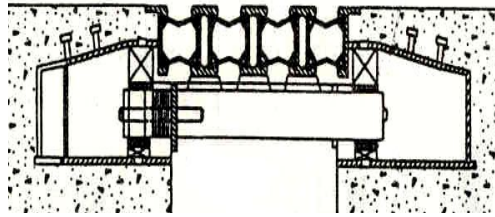


Fig. 2.10 Rail Joint

3. 설계 신축량 산정방법

신축이음의 선정과 설계의 기준이 되는 신축량의 계산은 온도변화, 콘크리트의 크리프와 건조수축, 교통하중에 의한 지점의 회전을 고려하여 계산된다. 또한 도로교 설계기준 2.4.2.2에 따라 상부구조의 온도변화, 처짐, 콘크리트의 크리프 및 건조수축, 프리스트레스에 의한 부재의 탄성변형 등에 의해 생기는 이동량(기본 신축량)에 대해서 여유 있는 구조로 하여야 한다.

설계 신축량은 신축이음의 용량을 의미하며, 신축이음의 신축량 산정에는 상기의 기본 신축량 외에 설치할 때의 오차와 하부구조의 예상 밖의 변위 등에 대처할 수 있도록 여유량을 고려하여야 한다. 이 여유량은 교량의 규모에 따라서 다른데 일반적으로 다음과 같은 값을 따른다.

- 신축장 100m 이하 : 설치여유량(기본 신축량× 20%) + 부가여유량(10mm)
- 신축장 100m 이상 : 설치여유량(10mm) + 부가여유량(20mm)

신축장은 신축하는 거더의 길이이며 일반 받침의 경우에는 교량의 중심에서부터의 거리로 본다.

교량의 신축이음장치의 설계 신축량은 Eq.(2.1)로부터 결정할 수 있다.

$$\Delta l = \Delta l_t + \Delta l_s + \Delta l_c + \Delta l_r + (\Delta l_p) + \text{여유량} \quad \text{Eq.(2.1)}$$

Δl : 설계 신축량(mm)

Δl_t : 온도변화에 의한 신축량(mm)

Δl_s : 건조수축에 의한 신축량(mm)

Δl_c : 크리프에 의한 신축량(mm)

Δl_r : 처짐에 의한 신축량(mm)

(Δl_p : 프리스트레싱에 의한 신축량)

1) 온도변화에 의한 신축량

온도변화에 의한 이동량 Δl_t 는 최저 온도 T_{\min} 과 최고 온도 T_{\max} 의 차이로부터 Eq.(2.2)와 같이 계산한다.

신축량 산정 시 Table 2.1에 제시된 온도범위는 교량상부구조의 평균온도이며, 지역구분은 최근 5년간 최저기온 및 최고기온을 참조하여 결정한 것이다.

$$\Delta l_t = (T_{\max} - T_{\min})\alpha l = \Delta T\alpha l \quad \text{Eq.(2.2)}$$

여기서, α : 선팽창계수 (Table 2.1 참고)

l : 고정받침에서 고려하는 이동단부까지의 직선거리

Table 2.1 Change of temperature range and linear expansion coefficient
(도로설계기준 2.1.12)

교량 형식	온도변화		선팽창계수 (1/°C)
	보통지방	한냉지방	
PC교, RC교	-5 ~ +35°C	-15 ~ +35°C	1.0×10 ⁻⁵
강교(상로교)	-10 ~ +40°C	-20 ~ +40°C	1.2×10 ⁻⁵
강교(하로교 및 강상판교)	-10 ~ +50°C	-20 ~ +40°C	1.2×10 ⁻⁵

신축이음장치가 설치 될 때에 예상되는 온도 T_{set} 에 대한 최대 신장량 Δl_t^+ 과 수축량 Δl_t^- 은 Eq.(2.3.a~2.3.c)과 같이 계산한다.

$$\Delta l_t^+ = (T_{\max} - T_{set})al \quad \text{Eq.(2.3.a)}$$

$$\Delta l_t^- = (T_{\min} - T_{set})al \quad \text{Eq.(2.3.b)}$$

$$\therefore \Delta l_t = \Delta l_t^+ - \Delta l_t^- \quad \text{Eq.(2.3.c)}$$

여기서, T_{set} : 신축이음장치가 설치될 때의 온도 (48시간의 평균온도)

2) 건조수축에 의한 신축량

콘크리트가 타설된 후부터 신축이음장치가 설치될 때까지의 건조수축에 의한 t 신축량은 Eq.(2.4)와 같이 계산한다.

$$\Delta l_s = -\Delta T \times a \times l \times \beta \quad \text{Eq.(2.4)}$$

여기서,

ΔT : 온도변화 (Table 2.1 참고)

α : 선팅창계수 (Table 2.1 참고)

l : 고정받침에서 고려하는 이동단부까지의 직선거리

β : 저감계수 (Table 2.2 참고)

ε_s : 극한 건조수축 변형도 (= 20×10^{-5} 또는 20°C의 온도하강)

Table 2.2 Reduction coefficient by dry shrinkage and creep
of concrete(β) (도로교 설계기준 2.4.1)

콘크리트의 재령 (월)	0.25	0.5	1	3	6	12	24
저감계수(β)	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1

3) 크리프에 의한 신축량

프리스트레스 긴장력이 도입될 때부터의 콘크리트 재령에 따라 Table 2.2의 저감계수 β 를 사용하여 크리프에 의한 신축량을 Eq.(2.5)와 같이 계산한다

$$\Delta l_c = -\frac{P_i}{E_c A_c} \phi \beta l \quad \text{Eq.(2.5)}$$

여기서,

ϕ : 크리프 계수 (=2.0)

P_i : 프리스트레싱 직후의 PS강재에 작용하는 인장력

A_c, E_c : 콘크리트의 단면적과 탄성계수

4) 지점의 회전변위에 의한 신축량

지점의 회전변위 θ_e 에 의한 단부의 수평 이동량 Δl_r 과 수직 이동량 Δv 는 각각 Eq.(2.6.a~2.6.b)와 같이 계산한다. 연속보의 중간지점에서는 그 영향이 적으므로 무시해도 좋다. 단순보의 경우에는 가동받침에 고정단에서의 회전의 영향이

가산되어 2배가 되는 것에 주의해야 한다. 일반적으로 θ_e 는 강교에서 1/150, 콘크리트교에서 1/300을 고려하면 된다.

$$\Delta l_r = -h \theta_e \quad \text{Eq.(2.6.a)}$$

$$\Delta_v = a \theta_e \quad \text{Eq.(2.6.b)}$$

여기서,

a : 받침의 중심에서 단부까지의 수평거리

h : 보 높이의 2/3

지점의 회전변위는 최대 처짐에 대한 지간의 비로 표시되는 교량의 강성(l/δ)으로부터 Table 2.3의 값을 사용하여 근사적으로 구할 수 있다.

Table 2.3 Rotating-angle at support by loading

l/δ	400	500	600	700	800	900	1,000	1,500	2,000
$\theta_e (rad)$	1/100	1/125	1/150	1/175	1/200	1/225	1/250	1/375	1/500

5) 설계 신축량 간편식

Table 2.4는 신축량 계산의 간편식을 정리한 것으로 교량 종류에 따른 신축량을 간편하게 계산할 수 있다.

Table 2.4 Design expansion lengths for different regions and different types of bridge

구분	형식	강 교		PSC 교	RC 교
		상로교	하로교, 강바닥 판교		
보 통 지 방	ΔT (온도범위)	-10 ~ +40℃	-10 ~ +50℃	-15 ~ +35℃	
	α (선팅창계수)	1.2×10^{-5}		1.0×10^{-5}	
	Δl_t (온도변화)	$\Delta l_t = \Delta T \alpha l$ = 0.6l	$\Delta l_t = \Delta T \alpha l$ = 0.72l	$\Delta l_t = \Delta T \alpha l$ = 0.4l	
	Δl_{sh} (건조수축)	-	-	$\Delta l_{sh} = 20 \alpha \beta l$ = 0.1l	
	Δl_{cr} (크리프)	-	-	$\Delta l_{cr}^* = \frac{\sigma_p}{E_c} \phi \beta l$ = 0.2l	-
	Δl_e^{**} (여유량)	$\Delta l_e = 0.6l \times 20\% + 10$ = 0.12l + 10	$\Delta l_e = 0.72l \times 20\% + 10$ = 0.14l + 10	$\Delta l_e = 0.7l \times 20\% + 10$ = 0.14l + 10	$\Delta l_e = 0.5l \times 20\% + 10$ = 0.10l + 10
	Δl (설계신축량)	$\Delta l = 0.72l + 10$	$\Delta l = 0.86l + 10$	$\Delta l = 0.84l + 10$	$\Delta l = 0.6l + 10$
한 냉 지 방	ΔT (온도범위)	-20 ~ +40℃	-20 ~ +40℃	-15 ~ +35℃	
	α (선팅창계수)	1.2×10^{-5}		1.0×10^{-5}	
	Δl_t (온도변화)	$\Delta l_t = \Delta T \alpha l$ = 0.72l		$\Delta l_t = \Delta T \alpha l$ = 0.5l	
	Δl_{sh} (건조수축)	-	-	$\Delta l_{sh} = 20 \alpha \beta l$ = 0.1l	
	Δl_{cr} (크리프)	-	-	$\Delta l_{cr}^* = \frac{\sigma_p}{E_c} \phi \beta l$ = 0.2l	-
	Δl_e^{**} (여유량)	$\Delta l_e = 0.72l \times 20\% + 10$ = 0.14l + 10		$\Delta l_e = 0.8l \times 20\% + 10$ = 0.16l + 10	$\Delta l_e = 0.6l \times 20\% + 10$ = 0.12l + 10
	Δl (설계신축량)	$\Delta l = 0.86l + 10$		$\Delta l = 0.96l + 10$	$\Delta l = 0.72l + 10$

* 여기서, $\beta = 0.5$, $f_p = 5.884MPa$, $E_c = 2.492 \times 10^4 MPa$, $\phi = 2$ 로 가정

** 포장 및 활하중에 의한 거더단부의 회전 및 시공오차로 인한 신축변화량은 여유량을 예상하여 기본 이동량의 20%에 일률적으로 10mm를 더하는 것으로 함.

III. 매설형 신축이음장치의 기존 연구고찰

1. 매설형 신축이음장치의 개요

Fig. 3.1은 현재 사용되고 있는 매설형 신축이음장치인 Asphalt Plug Joint(이하, APJ)를 나타낸 것으로 미국과 유럽 국가들이 사용하고 있는 신축이음장치의 한 종류이다. 우리나라에서는 포장형 조인트 또는 연속형 조인트로 알려져 있으며 일반적인 APJ는 무게비로 20%의 역청(Bitumen)과 80%의 골재로 구성된 유연한 아스팔트 포장혼합물로 신축이음부를 메우는 형태의 신축이음장치이다. 이러한 신축이음장치는 도로 포장과 신축이음부의 매끄러운 연결을 가능케 하여 평탄성을 확보하고 교량 상부구조에서 발생하는 신축을 상부포장 재료 자체에서 흡수하여 해소하는 조인트 시스템이다.

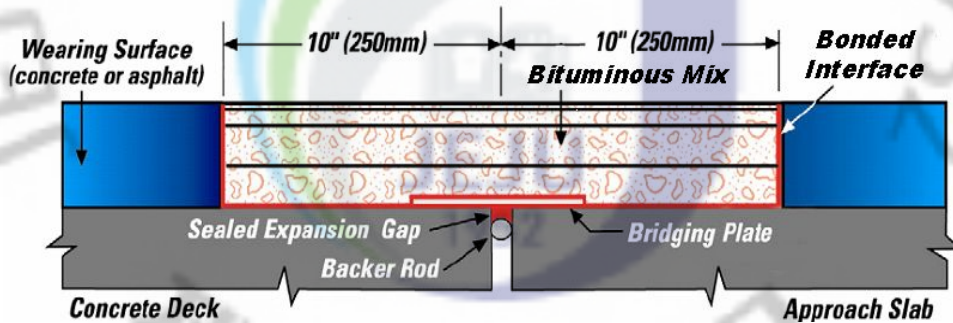


Fig. 3.1 Asphalt Plug Joint

2. 매설형 신축이음장치에 대한 연구동향

매설형 신축이음장치는 시행착오에 의해 개발되었고 그 거동에 대한 철저한 이해 없이 사용되어 왔으며, 지금까지도 매설형 신축이음장치에 대한 연구 사례는 그다지 많지 않다.

Bramel et al.(1999)은 APJ의 설계기준을 개발하기위하여 APJ에 대한 가장 포괄적인 연구를 수행하였다. Bramel et al.은 다양한 조건하에서 실제 사이즈로 테스트하고, APJ의 재료시험을 통한 APJ의 거동과 재료 특성을 조사하였다. 마찬가지로, Partl et al.(2002)은 APJ에 대한 실험 및 현장테스트를 수행하였고, APJ에 대한 새로운 스위스 지침서의 적합성을 조사했다. Bramel et al., Partl et al.의 연구는 APJ 내구성 향상이 아니라 거동을 이해함으로 전형적인 APJ의 적절한 적용에 초점을 맞추었다.

APJ의 기하학 형상을 수정함으로 응력을 더 좋게 조정하기 위한 연구는 영국의 애버딘 대학의 연구팀에 의해 수행되어졌다. Reid et al.(1998)은 2개의 대체 기하학 형상을 제안하였고 APJ와 포장 사이의 부착면적이 증가함으로 응력집중을 완화할 수 있음을 나타냈다. 또한 Qian et al.(2000)은 Reid et al.이 제안한 사다리꼴 형상의 APJ의 최적의 각을 조사했다. 비록 그들의 연구가 APJ의 내구성을 향상하는데 좋은 단서를 주었지만, 그들은 온도변화를 고려하지 않고 단지 차량 하중만 고려하였기 때문에 그들의 제안은 한계가 있다.

1) 매설형 신축이음장치의 거동

Bramel et al.은 APJ의 거동을 파악하기 위해 구조해석프로그램인 ANSYS를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 서로 다른 온도에서 제작한 재료의 실험결과를 바탕으로 응력-변형률 관계를 이용하여 신축에 대한 온도의 관계를 조사하였다. 선형탄성-완전소성해석을 수행하였으며, 인장파괴만을 고려하였다.

해석결과에 따르면 신축에 의한 매설형 신축이음장치의 변형은 일부분에서만 발생하고 있었다. Fig. 3.2는 해석결과 수평변위에 따른 변형 분포를 나타낸 것으로 매설형 신축이음장치의 변형이 전체에 분포되는 것이 아니라 받침철판 끝 부분에 집중되어 있음을 보여준다. 또한 조인트의 두께가 두꺼운 경우 파괴면은 신축이음부 바닥의 콘크리트 상단과의 경계면 또는 받침철판의 끝부분으로부터 먼 곳에서 파괴가 발생한 반면 두께가 얇은 신축이음은 철판의 바로 위쪽에서 파괴가 일어났다. 그리하여 Bramel et al.은 신축이음부의 변형이 특정 영역에 집중된다는 전제 하에 변형률이 발생하지 않는 다른 부분의 매설부를 제거하는 것이 비용이나 파손의 예방 측면에서 도움이 될 것이라고 결론지었다. 이러한 결과를 근거로 Fig. 3.3 과 같이 매설형 신축이음장치의 최적 형상을 제안하였다.

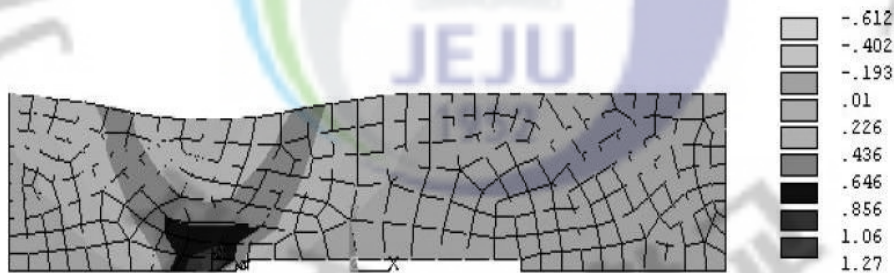


Fig. 3.2 Pavetech Horizontal Strain at 21°C (70°F)
(Bramel et al., 1999)

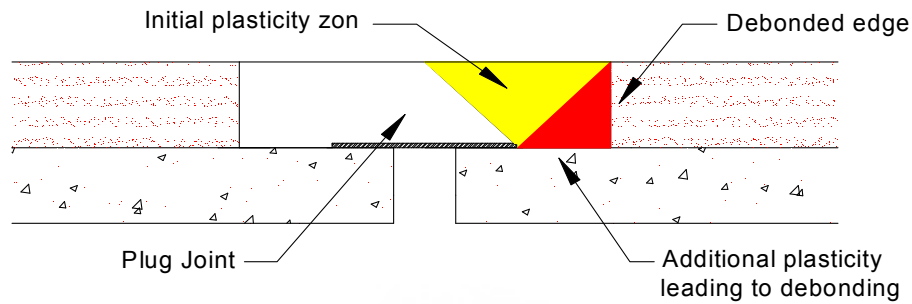


Fig. 3.3 Schematic of debonding actions (Bramel et al., 1999)

또한 Bramel et al. (1999)은 거의 실물 크기의 매설형 신축이음장치 모형을 제작하여 가속 수명 실험을 수행하였다. 이 실험은 $0.55 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ 의 신축량을 가지는 Cheyenne Wyoming에 있는 교량을 모사하였으며, 최대 일교차에 의한 신축 변형이 5년 동안 가해지는 상황을 가정하여 실험이 수행되었다. 실험결과 모든 시험체에서 심각한 피로 균열이 발견되었으며, 취약 부위는 받침철관의 모서리 또는 포장과 신축이음부 사이의 경계면 상단으로 확인되었다. 한편 아스팔트 혼합물의 복원력, 차량 통행, 그리고 기온의 상승에 따른 계절적 신축에 의한 압축력 등은 매설형 신축이음장치의 수명을 증가시키는 요인으로 추정되었다.

Partl et al.(2002)도 APJ에 대한 실험을 통해 APJ와 포장재 사이에 $2\text{N}/\text{mm}^2$ 을 한계응력으로 설정하여야 함을 주장하였고, APJ와 포장재료 사이의 접착제는 부착강도에 아무런 영향을 미치지 못한다고 하였다. 현장에서 Data를 수집한 결과 시간이 지남에 따라 탄성계수가 점점 커짐을 확인하였다. 이 값은 재료의 기후와 노화에 대한 영향을 명확히 증명하였다.

Bramel과 Partl의 연구는 APJ의 내구성 향상에 초점을 맞춘 것이 아니라 거동을 이해함으로 일반적인 APJ의 적절한 적용에 초점을 맞춘 것이었다.

Reid et al.은 조인트와 포장재 사이의 접합면적을 증가시킴으로써 접합부에서 발생하여 조기파괴를 일으키는 응력집중을 완화할 수 있을 것으로 제안하였다. Fig. 3.4는 일반적인 APJ를 나타내었고 Fig. 3.5는 접합면적을 증가시킨 2개의 시스템(사다리꼴형, 사인곡선형)을 나타내었다.

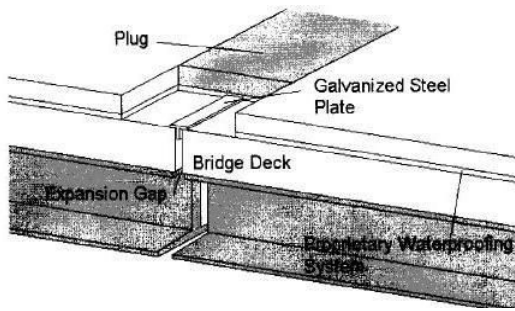


Fig. 3.4 Schematic of standard APJ system (Reid et al., 1998)

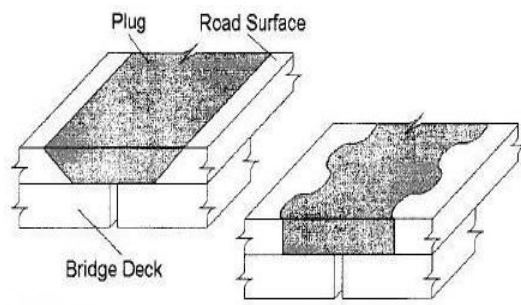


Fig. 3.5 Proposed alternative APJs (Reid et al., 1998)

이들 역시 ANSYS를 이용하여 해석하였으며 해석결과 표준형 신축이음장치에 대하여 신축 변형 및 통행 하중이 부가된 경우 최대 응력 발생 위치는 언제나 포장부와 경계면 상단부였으며, 포장과의 접합부의 면적을 증가시키면 매설형 신축이음장치에 발생하는 최대 응력이 감소하였다. 또한 통행 하중에 대한 응답은 양 경계면에서 대칭이지 않고 차량 진행 방향의 경계 상단부의 응력이 언제나 크게 나타났다.

추후 Reid에 대한 연구를 보충하여 Qian이 사다리꼴형 신축이음 형상을 최적화하기 위한 유한요소해석을 수행하여 그결과를 발표하였다. 이 논문에서는 교통 하중 하에 있는 사다리꼴형 APJ에 대해서만 다루었으며 사다리꼴 형상의 최적각을 결정하기 위한 매개변수 연구를 수행하였다.

Fig. 3.6은 사다리꼴형 APJ의 기하형상과 기호를 보여주고 Fig. 3.7은 좌표계를 나타냈다.

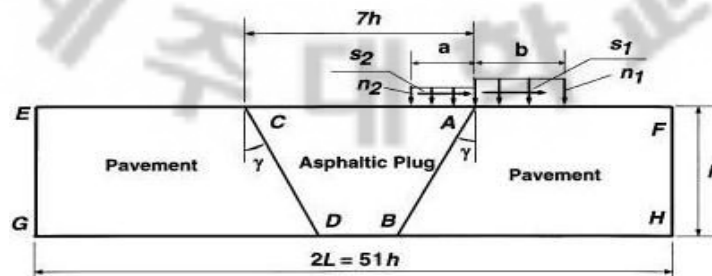


Fig. 3.6 Geometry and notation (Qian et al., 1998)

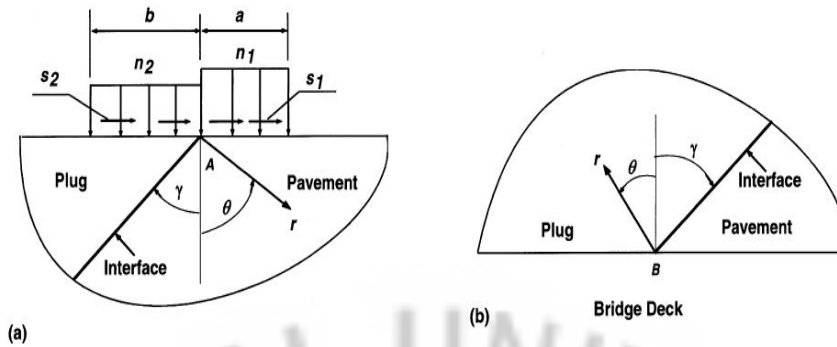


Fig. 3.7 Coordinate system (a) corner A, (b) corner B
(Qian et al., 1998)

연구 결과 경계면 각도의 증가가 응력의 집중도를 완화시키고 조인트의 각을 45°까지 증가시켜 경계형상에 적용하면 경계면의 균열이 억제된다고 결론을 내렸다. 반대로, 조인트 각의 증가에 따라 응력이 감소하는 것은 APJ의 접촉면에서 적절한 각도에 의해 debonding에 의한 파괴의 위험이 감소될 수 있다는 것을 의미한다.

Qian의 연구는 체계적이었고, 변형조건과 APJ의 기하학적 설계에 있어서의 연관성에 대한 많은 정보를 제공하였으나 이들의 연구는 교통하중에 대해서만 고려하였고, 온도에 의한 영향은 간주하지 않았기 때문에 이들이 제안한 것은 실제에 적용하기에는 한계가 있다.

2) 매설형 신축이음장치 파괴 양상

일반적인 구조재료와는 달리 매설형 신축이음장치에 사용되는 재료의 하중에 대한 반응은 시간과 온도에 대한 의존성을 가지기 때문에 매우 복잡한 양상을 띤다. 특히 매설형 신축이음장치의 재료는 제조사들의 아스팔트 혼합물에 대한 경험을 근거로 개발되어 이론적 근거가 부족하여 재료적 특성이 아직 완전히 규명되지 않고 있다(Bramel et al., 1999). 매설형 신축이음장치의 거동에 있어서 지배적인 요소인 역청은 온도에 따라 재료적 특성이 매우 심하게 변하는 특성이 있는데, 저온에서의 경우, glass transition temperature라는 특정 온도보다 낮아지면 급격히 취성을 띠면서 균열이 발생하는 등의 파괴가 진행되는 반면 고온에

서는 연성이 급격히 증가하면서 소성 변형(rutting)이 발생하기도 한다(Bramel et al., 1999). 즉, 높은 기온 하에서 연성이 급격히 증가하면서 소성변형이 발생하는 반면 저온에서는 특정 온도보다 낮아지면 급격히 취성을 띠면서 균열이 발생하는 등의 파괴가 진행된다.

문헌 조사를 통해 확인된 매설형 신축이음장치의 파괴 형태는 Fig. 3.8에서 보여주는 것과 같이 부착과 누수를 포함하는 균열과 패임, 재료의 이탈 등의 소성 변형으로 분류될 수 있다. 이러한 파괴 양상은 균열로 인한 파괴(cracking related failure, CRF)와 영구 변형에 의한 파괴(failure associated with permanent failure, PDF)의 두 가지로 재분류 될 수 있다. 균열 파괴는 주로 낮은 온도에서 발생하여 누수를 유발하며, rutting 등 영구 변형에 의한 파괴는 기온이 높은 상황에 발생하여 주행성을 악화하는 등 기능상의 파괴를 유발한다.

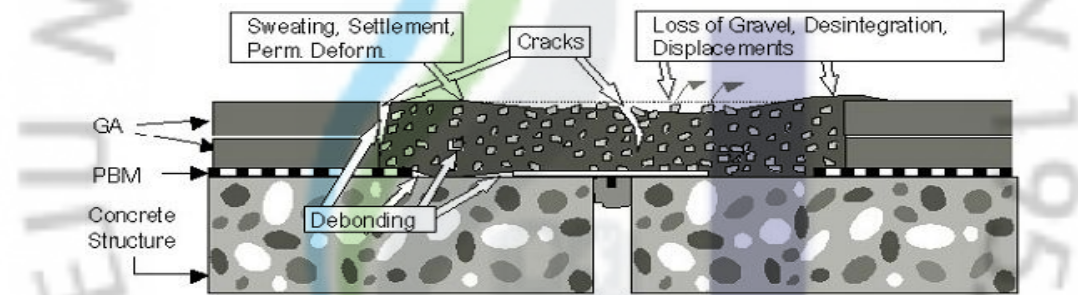


Fig. 3.8 Typical distress types with APJ (Partl et al., 2002)

Fig. 3.9는 Bramel(1999)이 수행한 실제 크기의 시험체에 반복하중을 가하는 시험 중에 발생된 균열의 위치와 형상을 보여준다. 균열은 APJ와 포장재 사이의 면 또는 바닥판의 가장자리에서부터 시작되었고, 반복하중 하에 수직방향으로 APJ를 통해 확산되었다. 높은 온도에서 APJ의 강도는 낮아지기 때문에 소성 변형은 보통 높은 온도에서 일어난다. 유한요소 해석에서 균열을 일으키는 응력집중은 본 시험에서 나타난 초기 균열 위치에서 관찰되었고, 소성변형의 분포도 확인할 수 있었다.

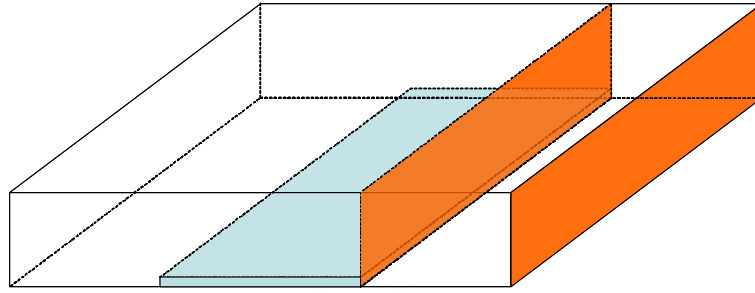


Fig. 3.9 Crack locations in APJ (Bramel et al.,1999)

3. 현장조사

1) 현장조사 개요

문헌조사를 통한 매설형 신축이음장치의 문제점과 파손형태를 파악하기 위하여 국내의 시공현장을 현장조사 하였다. 국내에서 매설형 신축이음장치를 적용한 현장은 거의 드물었을 뿐만 아니라 시공하는 업체도 얼마 되지 않았다. 현재 국내에서 시공실적이 비교적 많은 업체인 R업체와 협력하여 국내 현장 조사를 추진하였다. Table 3.1은 현장조사의 위치와 매설형 신축이음장치의 설치일자를 나타낸 것이다.

Table 3.1 Locations of field survey

교량명	위 치	설치일자	교량형식
상행 3교	올림픽대로 상	2006. 03	-
세곡 1교	강남구 세곡동	2005. 02	단경간 빔교
외동교	경부 고속도로 상행 408.0k 지점	2006. 11	2경간 라멘교
두북교	서해안 고속도로 하행 155.06k 지점	2006. 09	PC Beam 교
두북 2교	서해안 고속도로 하행 155.4k 지점	2006. 09	PC Beam 교
신송 2교	서해안 고속도로 상행	-	3경간 라멘교

2) 현장조사 결과

현재까지 신설교량에 대한 국내 매설형 신축이음장치를 사용하는 곳은 없는 것으로 간주되며, 신축이음보수나 터널 및 지하차도 조인트 보수공사에 사용되고 있는 실정이다. 매설형 조인트는 국내제품 중 R사의 S제품이 가장 많이 사용되는 것으로 확인되어서 S제품을 시공한 현장을 중심으로 조사하였다.

이 제품을 시공된 현장은 기존의 트랜스플렉스 조인트를 보수한 곳이 대부분이었다. 서울 시내와 경부선상의 교량은 라멘교이거나 오래된 교량이어서 신축량이 매우 작거나 거의 없는 것으로 판단하였으나, 서해안 고속도로 상의 두북교와 두북 2교는 PC Beam 교량으로 가드레일 부분에서 교량의 신축을 확인할 수 있었다. 본 교량은 시공한지 1년도 채 안되었기 때문에 침하, 균열 및 표면상태의 변형 등과 같은 신축에 대한 거동을 자세히 확인할 수 없었다.

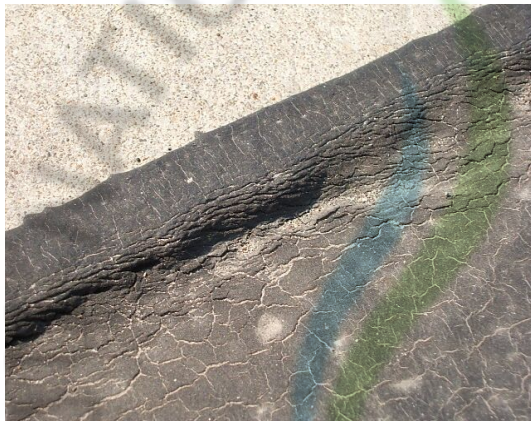
그러나 본 장치들은 문헌연구에서 언급한 바와 같이 소성변형과 접합부의 균열 등 조기파손이 발생하고 있었다. Fig. 3.10은 이런 파손형태를 나타낸 것이다. 라멘교에서의 소성변형은 차륜이 지나는 부분에서 집중적으로 발생하였고, 일부 조인트에서는 표면이 벗겨져서 골재가 드러나 있었다. 또한 신축량이 있는 두북교와 두북 2교에서는 조인트와 콘크리트 사이의 접합부에서 Debonding 및 소성변형이 발생하여 전형적인 APJ의 문제점을 확연히 보여주었다.



(a) Tensile failure or pitting



(b) Peeling



(c) Strain localization and rutting



(d) Debonding

Fig. 3.10 Typical shapes of damage

현장에서 살펴본 결과 최대골재 사이즈는 6mm(혹은 8mm)를 사용한 곳과 13mm를 사용한 현장이 있었다. 이는 기존 6mm 혼합물을 포설 다짐하여 마무리 하였으나, 현재는 13mm 혼합물을 포설 다짐 후 그 상부에 마감코팅 처리를 하는 공법으로 변경됨에 따른 결과로 판단되었다. 현장 적용 시 6mm 혼합물은 아무래도 소성변형 저항성이 떨어지는 문제를 가지고 있으므로, 골재 최대치를 크게 하거나 interlocking을 향상할 수 있는 입도 선정이 상부재료 연구에 병행되어야 할 것으로 보인다. 또한 신축량에 의한 경계면에서의 균열과 단차는 역청의 성능을 향상시키는 것으로 해결이 가능하다고 판단되며 수직 및 수평 변형률을 수용할 수 있는 역청의 개발도 조속히 이루어져야 할 것이다.

현재 국내에서는 APJ를 보수용으로만 사용하고 있다. 그렇지만 현장을 통해 확인한 결과, 보수용일 경우에는 기존 조인트에서 사용되었던 콘크리트 부분 때문에 포장재와 APJ가 연속적이지 못하여 소음이 발생하였고 주행성 또한 개선되지 못하고 있는 것으로 확인되었다. 따라서 APJ는 보수용으로 사용하기보다 신설교량에 사용해야 연속성을 확보하고 편안한 승차감을 제공할 것으로 판단된다.



IV. 새로운 매설형 신축이음장치 BFLJ의 개발

1. BFLJ(Buried Folding Lattice Joint)의 개요

현재 매설형 신축이음장치에서 상부 포장 재료의 균열, 누수, 박리, 탈착, 쪼개짐 등의 단점으로 인한 조기파손을 방지하기 위한 일환으로 조인트에 작용하는 응력을 고르게 분포시킬 수 있는 조인트의 형상에 대한 연구의 필요성이 대두되었다. 이에 본 연구에서는 기존 매설형 신축이음장치의 단점을 극복하고 장점을 향상시키기 위하여 하부 시스템의 구조를 Folding Lattice System 형식으로 제작하여 설치한 BFLJ(Buried Folding Lattice Joint)를 개발하였다.

BFLJ은 기존 매설형 신축이음장치의 가장 큰 문제점인 응력집중 해소를 목적으로 개발되었으며, 교량 상부구조에 발생하는 신축을 하부시스템을 통하여 고른 변형을 상부재료에 전달하여 시스템 전체에 고른 변형을 유도할 수 있는 장점을 가지고 있다. Fig 4.1은 새로 개발한 매설형 신축이음장치인 Buried Folding Lattice Joint System(이하, BFLJ)을 나타낸 것이다.

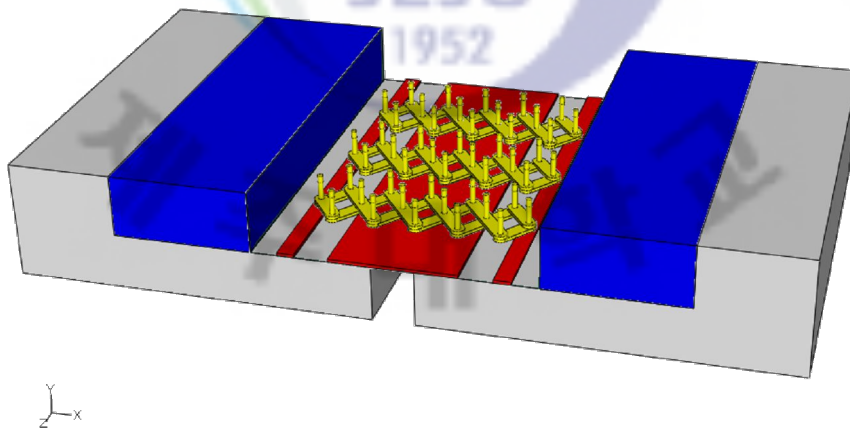


Fig. 4.1 BFLJ(Buried Folding Lattice Joint)

2. BFLJ의 구성요소 및 사용재료

BFLJ는 크게 하부 시스템과 상부 시스템으로 구분할 수 있으며, 하부 시스템은 Folding Lattice 시스템으로 구성되어 있고, 상부 시스템은 골재와 역청으로 구성된 아스팔트혼합물로 구성되어 있다.

1) 하부 시스템

BFLJ의 하부시스템은 기존 매설형 신축이음장치의 하부시스템인 받침철판위에 Fig. 4.2와 같은 Folding Lattice 시스템을 추가 제작하여 슬래브에 설치한 것이다. Folding Lattice 시스템은 Lattice와 스테드로 나눌 수 있으며, Lattice는 교량상판에 발생하는 신축을 고른 변형을 유도하여 집중변형을 해소하는 역할을 하며, 스테드는 Lattice에서 유도된 고른 변형을 상부재료에 전달하는 역할을 한다.



Fig. 4.2 Folding lattice system

본 연구의 실험에서는 Folding Lattice 시스템의 Lattice부재는 확실한 고른 변형을 유도하기 위하여 강성을 고려하여 철판을 사용하여 제작하였으며, 고른 변형 유도 시 결합부분의 유격에 의한 손실을 없애기 위하여 정밀 제작하였다. 또한 상부재료에 강제적으로 고른 변형을 전달하기 위한 스테드는 신축 시 발생하는 휨에 대한 강성을 고려하여 볼트를 사용하였고, 스테드 상부에는 나비너트를 이용하

여 표면적을 증가시켜 확실한 변형을 전달할 수 있도록 제작하였다. Fig 4.3은 BFLJ 하부시스템인 Folding Lattice 시스템 구성요소와 제원을 나타낸 것이고, Table 4.1은 하부시스템의 구성 재료를 나타낸 것이다.

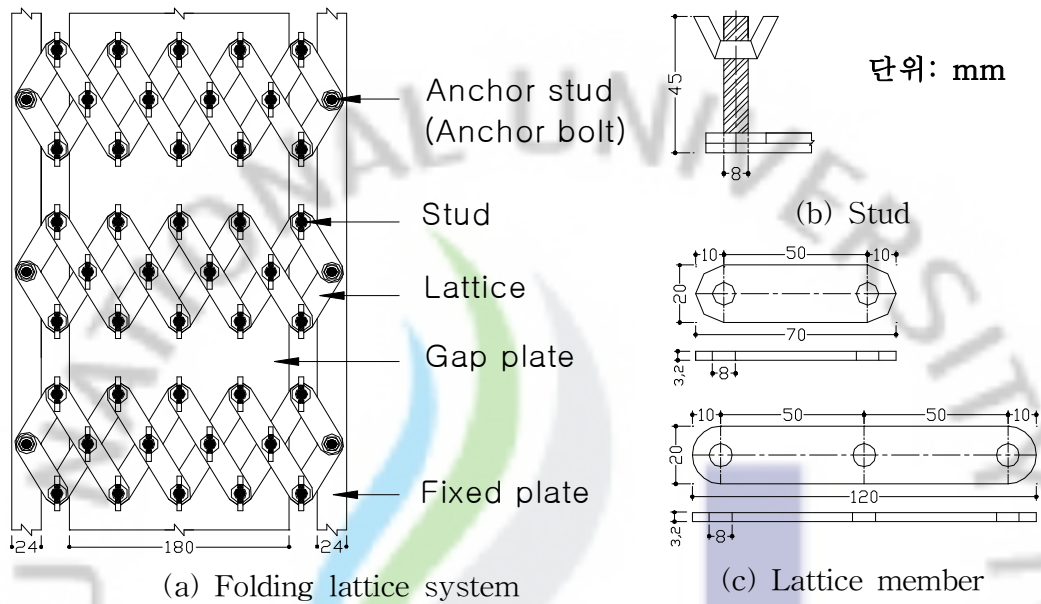


Fig. 4.3 Component and dimension of folding lattice system

Table 4.1 Components of folding lattice system

항목 구분	Lattice member	Stud		Gap plate	Fixed plate
사용 재료	SM400 (3.2mm)	볼트 (8mm)	나비너트 (8mm)	SM400 (4.5mm)	SM400 (4.5mm)
size	Fig. 4.3 참조			폭 180mm	폭 24mm

2) 상부 포장 혼합물

본 연구에서 상부 포장 혼합물은 Fig. 4.4와 같이 기존 매설형 신축이음장치에서

사용되는 것과 같은 골재와 역청(bitumen)을 혼합한 아스팔트혼합물로 구성하였다. 이러한 혼합물은 신축과 차량하중에 따른 변형을 조인트 자체적으로 원활하게 흡수할 수 있다. 골재와 역청의 역할은 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 골재의 역할 : 차량 하중으로부터 혼합물의 소성변형 저항성 향상
- 역청의 역할 : 교량 상부구조의 움직임을 흡수하여 혼합물의 균열억제

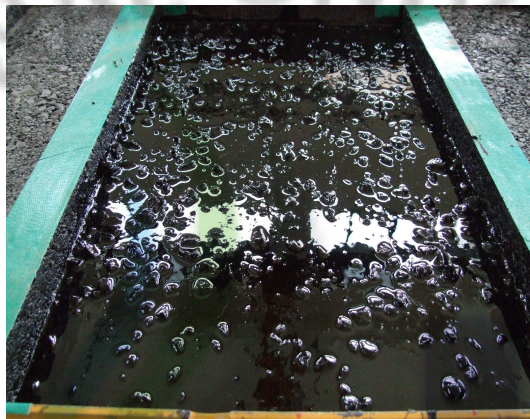


Fig. 4.4 Bituminous mixture of joint

매설형 신축이음장치에 있어 신축을 흡수할 수 있는 재료는 역청이다. 역청의 함량이 증가하면, 역청이 차지하는 비율이 높아져 교량의 신축을 원활하게 흡수할 수 있다. 그러나 역청의 함량을 너무 증가시키면 차량하중에 의한 소성변형에 대한 저항성이 떨어진다. 따라서 역청의 함량을 증가시키고 소성변형에 대한 저항성을 향상시키기 위한 골재의 입도선정이 중요하다.

역청의 함량을 증가시키기 위해서는 골재 사이의 공간을 확보해야 하며, 이는 똑같은 크기의 단입도 골재만을 사용하면 최대 33.3%의 공간을 확보할 수 있다. 게다가, 단입도 골재를 사용할 경우 골재끼리의 Interlocking 즉, 골재의 맞물림 구조를 형성시켜 상부에서 발생하는 하중을 원활하게 전달시켜 소성변형 저항성 또한 향상시킬 수 있다.

이에 본 연구에서는 혼합골재가 아닌 단입도 골재를 적용하였다. 또한 조인트 포설 시 골재 사이에 역청이 완전히 충전되지 않을 수 있음을 감안하고 상부 하중의 적절한 분포를 위하여 하부에서 큰 골재를 시작으로 상부로 갈수록 작은

골재를 선택하여 적용하여 3cm씩 3회에 걸쳐 시공하는 것으로 결정하였다.

KS F2357 골재 중 단입도 골재는 3호부터 8호까지 있으며, 이중 가장 작은 크기의 골재로는 8호 골재, 7호 골재, 6호 골재이다. 각 골재의 입도를 Table. 4.2에 나타내었다. 그러나 KS F2357의 6호 골재의 경우 20mm~10mm의 사이의 골재로 써, 10mm 이하의 골재가 최대 55%에서 최소 20%포함된다. 따라서 역청이 충전될 공간을 확보하기가 어렵다. 이에 본 연구에서는 KS F2357에서 규정한 단입도보다 더욱 엄격한 입도를 선정하였다. Table 4.3은 본 연구에서 제안한 적용입도 규격을 나타낸 것이다. 선정된 입도는 물론 향후 범용적인 적용을 위하여 현재 석산에서 생산되고 있는 입도로서, 제한적이기는 하나 쉽게 구할 수 있는 골재의 입도이다.

Table 4.2 Grading of aggregate (KS F2357)

골재 번호	체의 호칭 치수mm 입도범위mm	각 체를 통과하는 무게 백분율 %						
		25	20	13	10	5	2.5	1.2
6	20~10	100	90~100	-	20~55	0~10	0~5	-
7	13~5	-	100	90~100	40~70	0~15	0~5	-
8	10~2.5	-	-	100	85~100	10~30	0~10	0~5

Table 4.3 Suggested grading of aggregate

골재 번호	체의 호칭 치수mm 입도범위mm	각 체를 통과하는 무게 백분율 %						
		25	20	13	10	5	2.5	1.2
A6	19~14	100	90~100	5~30	0~5	-	-	-
A7	14~11	-	100	90~100	5~30	0~5	-	-
A8	11~6	-	-	100	90~100	5~30	0~5	-

3. 적합한 온도 제안

매설형 신축이음장치의 상부재료는 온도에 따라 시공성능이 달라질 수 있다. 너무 높으면 역청의 성능이 저하되어 탄성을 잃을 수 있으며, 너무 낮으면 골재 사이에 역청이 완전히 충전이 되지 않아 최종 성능이 떨어질 수 있다. 이에 본 연구에서는 매설형 신축이음장치의 상부재료의 두 가지 구성요소인 골재와 역청의 온도를 규정하였다. 물론 개발되는 역청의 성능에 따라 온도범위는 최종적으로 변동가능하다. 따라서 본 연구에서 제안하는 온도는 현 시점의 온도이다.

온도범위를 확인하기 위하여 두 가지 재료의 온도를 변화시키며 조인트를 제작하여 보았다. 현재 개발된 역청의 경우 240℃ 이상으로 온도를 증가시킬 시 연기가 발생하여 역청의 변형이 발생하므로 최대 220℃를 넘지 않을 것을 제안했다. 최저온도는 실험실 또는 현장에서 시공 시, 역청의 온도보다 골재의 온도가 급격히 저하되는 것을 감안하여 골재온도의 범위를 더욱 높게 잡아야 함을 알 수 있었다.

실내시험 결과 상부포장혼합물 생산 시 혼합물의 온도가 180℃에서 적절한 충진을 이루었으며, 150℃ 이하에서는 완벽한 충진을 보이지 않는 부분이 발생하였다. 따라서 적절한 생산온도는 180℃로 규정하되, 최저 온도는 160℃로 제한했다. 물론 180℃보다 높은 온도에서도 더 좋은 충진을 이루나 양생시간의 증가를 가져와 시공시간의 증가를 가져오므로 적절한 온도인 180℃로 생산되도록 제안한다. Table 4.4는 매설형 신축이음 제작 시 제안된 포장온도를 나타낸 것이다.

Table 4.4 Suggested pavement temperature for producing joint

구 분	골 재	역 청	상부포장 혼합물
최고온도(℃)	220	220	220
최저온도(℃)	180	160	160

V. 실험 계획

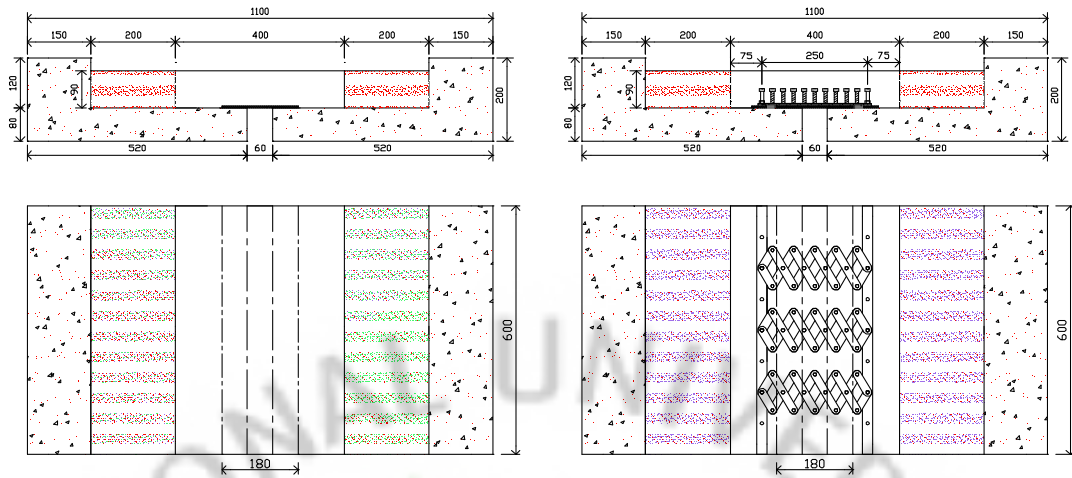
1. 실험개요

실험은 기존 매설형 신축이음장치의 문제점인 응력 집중을 해소하기 위하여 개발한 BFLJ와 기존 매설형 신축이음장치(APJ)의 성능 평가를 위한 거동분석을 위하여 시험체를 제작하여 신축 실험을 실시하였다. 실험 시 온도는 상부재료 물성치를 결정하는 중요한 변수이나 본 실험에서는 신축에 따른 거동만 분석하기 위하여 상온(20℃)에서 실험을 실시하였다.

2. 시험체 제원

Fig. 5.1은 본 실험에 사용된 기존 매설형 신축이음장치(APJ)와 새로 개발한 BFLJ 시험체의 제원을 나타낸 것이다.

시험체는 조인트의 유간을 60mm, 슬래브의 두께를 100mm로 제작하여 총 크기를 가로 1100mm×세로 600mm로 콘크리트를 타설하여 교량의 신축 이음부의 교량상판을 모사하였다. 조인트 크기는 외국의 경우 매설형 신축이음장치의 폭을 500 mm, 깊이를 100 mm로 적용하고 있으나 본 연구에서는 국내의 교량에 설치되어있는 조인트(300~400mm)의 보수 시를 고려하여 폭 400mm, 포장두께를 90mm로 제작하였다.



(a) Asphalt plug joint

(b) Buried folding lattice joint

Fig. 5.1 Dimensions of specimens

3. 실험변수

본 연구에서 제작한 시험체는 총 11개로 기존 매설형 신축이음장치인 APJ 시험체 4개와 새로 제안한 매설형 신축이음장치 BFLJ 시험체 7개에 대하여 신축 실험을 실시하였다. Table 5.1과 Table 5.2는 실험변수를 정리한 것이다.

Table 5.1 Test parameters of APJ system

실험 변수	시험체명	상부재료	철판 폭
기본시험체	A0-180	일반팔트	180 mm
철판길이	A0-180		180 mm
	A0-270		270 mm
상부재료	A0-180	슈퍼팔트	180 mm
	AS-180		
	AI-180	아이팔트	

Table 5.2 Test parameters of BFLJ system

실험 변수	시험체명	상부재료	앵커스터드	스터드 높이
기본시험체	B0-A0	일반팔트	-	1/2H(45mm)
상부재료	B0-A0	일반팔트	-	
	BS-A0	슈퍼팔트	-	
	BI-A0	아이팔트	-	
앵커스터드	B0-A0	일반팔트	-	
	B0-A1		2/3H(60mm)	
	BS-A0	슈퍼팔트	-	
	BS-A1		2/3H(60mm)	
	BI-A0	아이팔트	-	
	BI-A1		2/3H(60mm)	
스터드 높이	BI-A0	아이팔트	-	
	BI-A0-60	아이팔트	-	2/3H(60mm)

4. 변위재하 및 Data 측정

실험 시 콘크리트의 건조수축과 크리프, 온도변화, 활하중 등에 의한 상부구조의 변형과 변위에 의하여 발생하는 신축을 Fig. 5.5와 같은 스크류잭을 이용하여 재하 하였다. 스크류잭은 감속비가 1:24(10mm/24바퀴)이고 용량이 15ton이며, 자동 감속 장치를 부착하여 계산된 신축량을 바탕으로 인장(25mm) → 복원(압축)25mm → 압축 25mm → 복원(인장) 25mm 순으로 1Cycle로 정하여 3Cycle에 걸쳐 신축을 실시하였다.

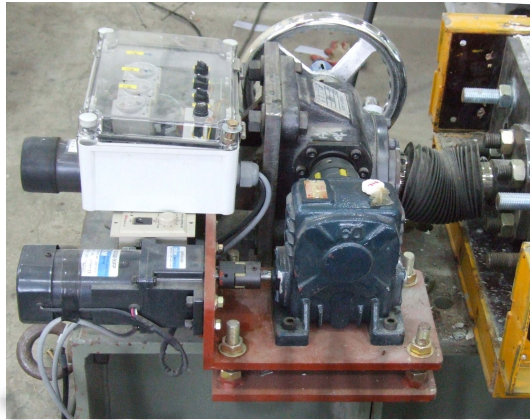


Fig. 5.2 Screw jack

Fig. 5.3은 변위 제어 장치 및 계측장비의 배치를 나타낸 것으로 변위 재하는 슬래브 제작 시 만들어 놓은 전산볼트를 스크류잭과 시험대에 고정하여 변위를 재하 하였으며, 변위재하 시 변위를 측정하기 위해 다이얼 게이지를 설치하였다. 또한 신축에 따른 기존시스템과 새로 개발한 시스템의 표면 변형률 분포를 측정하기 위하여 크랙측정용 디스크를 아스콘과 조인트를 포함한 시험체 표면에 40mm 간격으로 부착하였다. Fig. 5.4는 실험전 시험체의 모습을 나타낸 것이다.

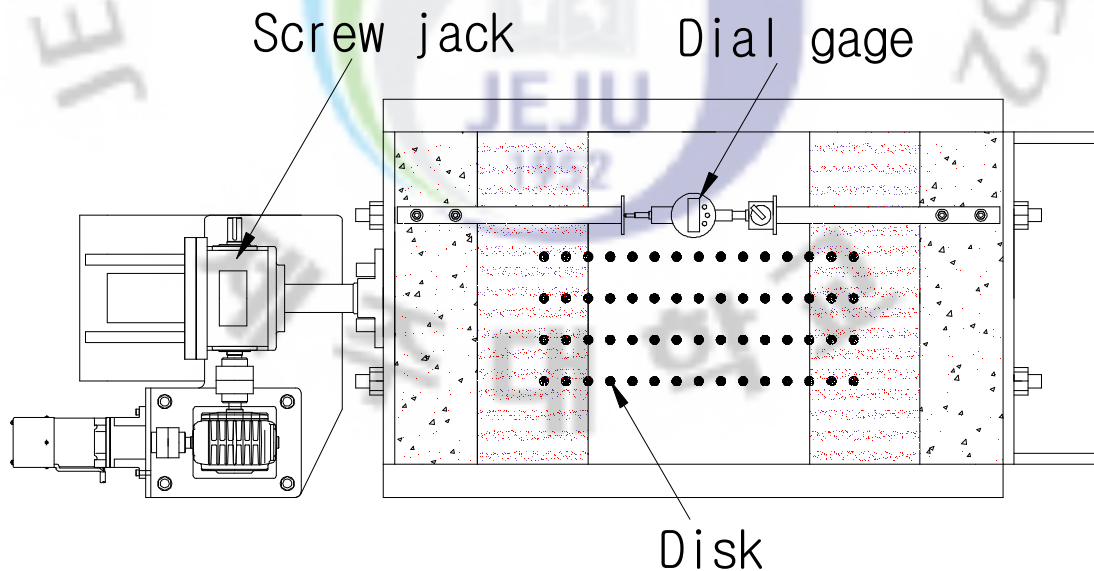


Fig. 5.3 Arrangement of measuring equipments

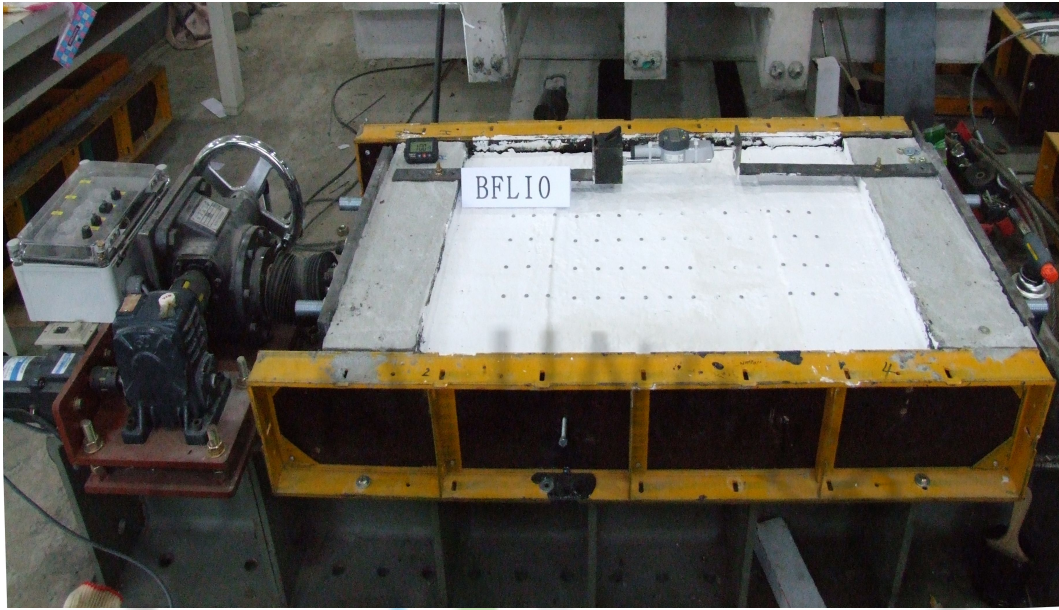


Fig. 5.4 Real view of test set-up

5. 신축량 산정

실험 시 신축량은 한냉지방의 신축장이 50m인 RC교로 가정하고 도로교 설계 기준을 바탕으로한 II.3절의 내용을 참고하여 다음과 같이 계산하였다.

ΔT : 온도범위 = 50°C ($-15 \sim +35^{\circ}\text{C}$)

a : 선팽창계수 = 1.0×10^{-5}

l : 고정받침에서 고려하는 이동단부까지의 직선거리 = 50m

β : 저감계수 : 0.5

1) 온도 변화에 의한 신축 [Eq.(2.2) 참조]

$$\begin{aligned} \Delta l_t &= (T_{\max} - T_{\min}) \alpha l = \Delta T \alpha l \\ &= 0.5 l = 0.5 \times 50 \text{ m} = 25 \text{ mm} \end{aligned}$$

2) 콘크리트 건조수축에 의한 신축량 [Eq.(2.4) 참조]

$$\begin{aligned}\Delta l_s &= \Delta T \times a \times l \times \beta \\ &= 0.1l = 0.1 \times 50m = 5mm\end{aligned}$$

3) 신축 여유량

- 신축장 100m 이하 : 설치여유량(기본 신축량× 20%)+ 부가여유량(10mm)
- 신축장 100m 이상 : 설치여유량(10mm)+ 부가여유량(20mm)

$$\begin{aligned}\Delta l_e &= (\Delta l_t + \Delta l_s) \times 20\% + 10mm \\ &= (25 + 5) \times 20\% + 10 = 16mm\end{aligned}$$

4) 설계 신축량 [Eq.(2.1) 참조]

$$\begin{aligned}\Delta l &= \Delta l_t + \Delta l_s + \Delta l_e \\ &= 25 + 5 + 16 = 36mm\end{aligned}$$

$$\therefore \Delta l = \pm 23mm \Rightarrow \text{실험시 극한치 고려: } \pm 25mm$$

6. 변위 재하속도의 결정

변위 재하 속도는 문헌조사를 통하여 Bramel의 재료실험결과(Fig. 5.5)와 Deshpande and Cebon(Fig. 5.6)의 실험 결과를 바탕으로 결정하였다.

Fig. 5.5는 미국에서 생산되고 있는 APJ 재료의 시험편들에 특정 변형을 재하한 후 시간에 따른 하중의 추이를 나타낸 것이다. Fig. 5.6은 매설형 신축이음 장치의 재료 구성비와 유사한 64%의 골재 부피 비를 갖는 아스팔트 혼합물에 대

한 응력-변형률 곡선으로 하중속도에 따른 응력 변형률 관계를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 두 그래프의 결과로부터 재하 시 변위속도는 스크류잭의 감속비와 하중속도에 따른 응력 변형률을 고려하여 25mm/1hr(0.000017361 strain/sec)로 결정하였다. 또한 재료의 Relaxation을 고려하여 변위 재하 후 15분 내에 상부 포장재료가 안정 된다고 가정하고 25mm변위 재하후 15분의 안정시간 이 경과 후 신축에 따른 데이터를 측정하는 방법으로 실험을 수행하였다.

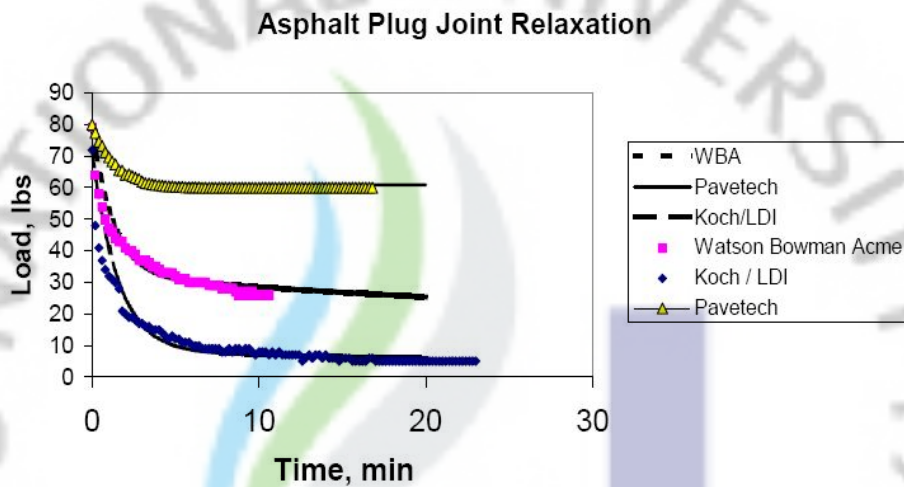


Fig. 5.5 Relaxation test results of APJ at 2°C (Bramel et al, 1999)

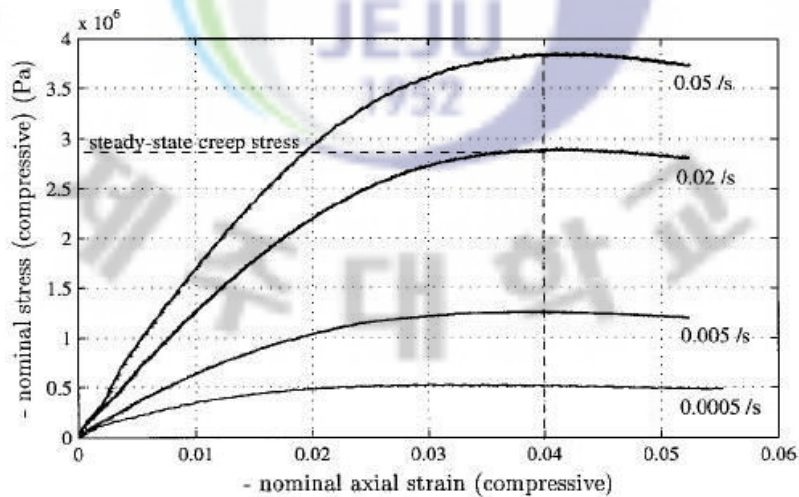


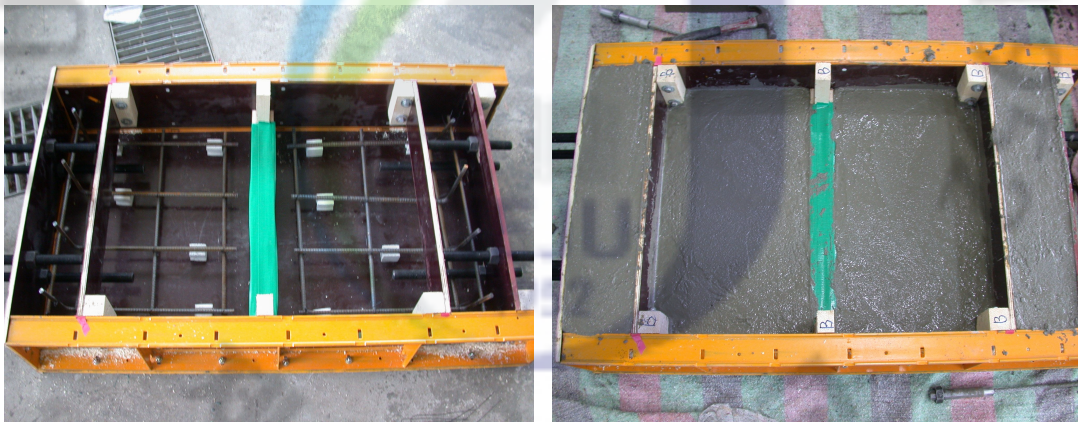
Fig. 5.6 Stress-strain curves of asphalt mixture with aggregate volume fraction of 64% (Deshpande and Cebon, 2000)

7. 시험체 제작 및 사용재료

본 연구에서는 실제 교량과 같은 폭을 갖는 시험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 시험제작 과정은 교량 상판에 해당하는 슬래브 타설, 아스콘 포설, 조인트의 하부 시스템 설치 및 상부재료의 포설 순으로 다음과 같이 제작하였다.

1) 슬래브

교량상판에 해당하는 슬래브는 콘크리트로 타설하였으며, 거푸집은 유로폼을 사용하여 제작하였다. 또한 교량 상부구조에 발생하는 신축을 모사하기 위하여 철근 배근 시 시험체 양 끝 단면에 4개의 전산 볼트를 설치하여 인위적으로 변위를 재하할 수 있도록 하였다. Fig. 5.7은 슬래브 제작 과정을 나타낸 것이다.



(a) Reinforcing bars in form

(b) Casting of concrete

Fig. 5.7 Manufacturing process of the test slab

2) 아스팔트 콘크리트

Table 5.3은 본 연구의 시험체 제작 시 사용된 아스콘 배합비를 나타낸 것으로 아스팔트는 AP-5(PG64-22)를 사용하였고, Filler는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하여 제작하였다.

Table 5.3 Mixture proportion of general asphalt concrete

구분 \ 항목	굵은 골재 (19mm)	중간 골재 (13mm)	잔골재 (8mm)	Filler (시멘트)	소 계	AP-5 (PG64-22)
하부	2%	49%	47%	2%	100%	5.6%
상부	2%	49%	47%	2%	100%	5.6%

포설 과정은 45mm씩 2층으로 나누어 골재를 배합하고, 골재와 AP를 가열하여 혼합한 후 포설하였다. 다짐은 시험체의 크기가 작아 다짐기계의 적용이 불가능하므로 햄머드릴에 다짐판을 부착하여 다짐을 실시하였다. Fig. 5.8은 아스콘 포설과정을 나타낸 것이다.



(a) Mixture of aggregate



(b) Heating of Aggregate



(c) Primer coating



(d) Heating of Asphalt



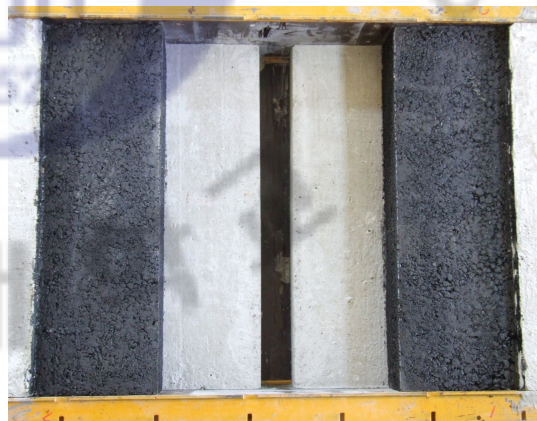
(e) Mixing of aggregate and asphalt



(f) Heating of compacting plate



(g) Placing of asphalt concrete



(h) Completed specimen

Fig. 5.8 Manufacturing process of the test asphalt concrete

3) 조인트

신축이음부의 상부포장혼합물 포설은 상기(IV.2절)에서 제안한 골재를 바탕으로 Table 5.4와 같은 배합비를 사용하여 포설하였다. 역청은 상부포장 재료에 따른 영향을 분석하기 위해 일반팔트, 슈퍼팔트, 아이팔트를 사용하였다. Table 5.5는 본 연구에 사용된 역청에 대한 물성치를 나타낸 것이다.

Table 5.4 Mixture proportion of joint

구분 \ 항목	굵은 골재 (19mm)	중간 골재 (13mm)	잔골재 (10mm)	소 계	역 청	
하부	100%	-	-	100%	25%	층별 포화
중부	-	100%	-	100%	25%	
상부	-	-	100%	100%	25%	

Table 5.5 Properties of bitumens

시험항목	일반팔트(AP-5)	슈퍼팔트	아이팔트
Performance Grade	64-22	82-22	82-22
침입도	74	53	17
연화점 (°C)	47.0	87.5	94
신도 (25°C, cm)	150	58	51
회복탄성도 (%)	1	29	14
박막가열 후 질량변화율 (%)	0.1	0	0.2
박막가열 후 침입도비 (%)	97	88.7	85.4

포설 과정은 Fig. 5.9와 같이 먼저 하부시스템을 설치하고 포장혼합물을 3층으로 나누어 층별 단입도 골재 (6 ~ 8호 골재 : 하부 19mm, 중부 13mm, 상부: 10mm)를 사용하여 골재를 가열하고 가열한 역청을 부어 메우는 방식으로 포설하였다. 타설 시 역청이 유간 사이로 흘러들어 가는 것을 방지하기 위하여 봉합재(스티로폼 및 골판지)를 유간 사이에 사용하였으며, 간극률을 유지하기 위하여 약간의 다짐만 실시하였다.

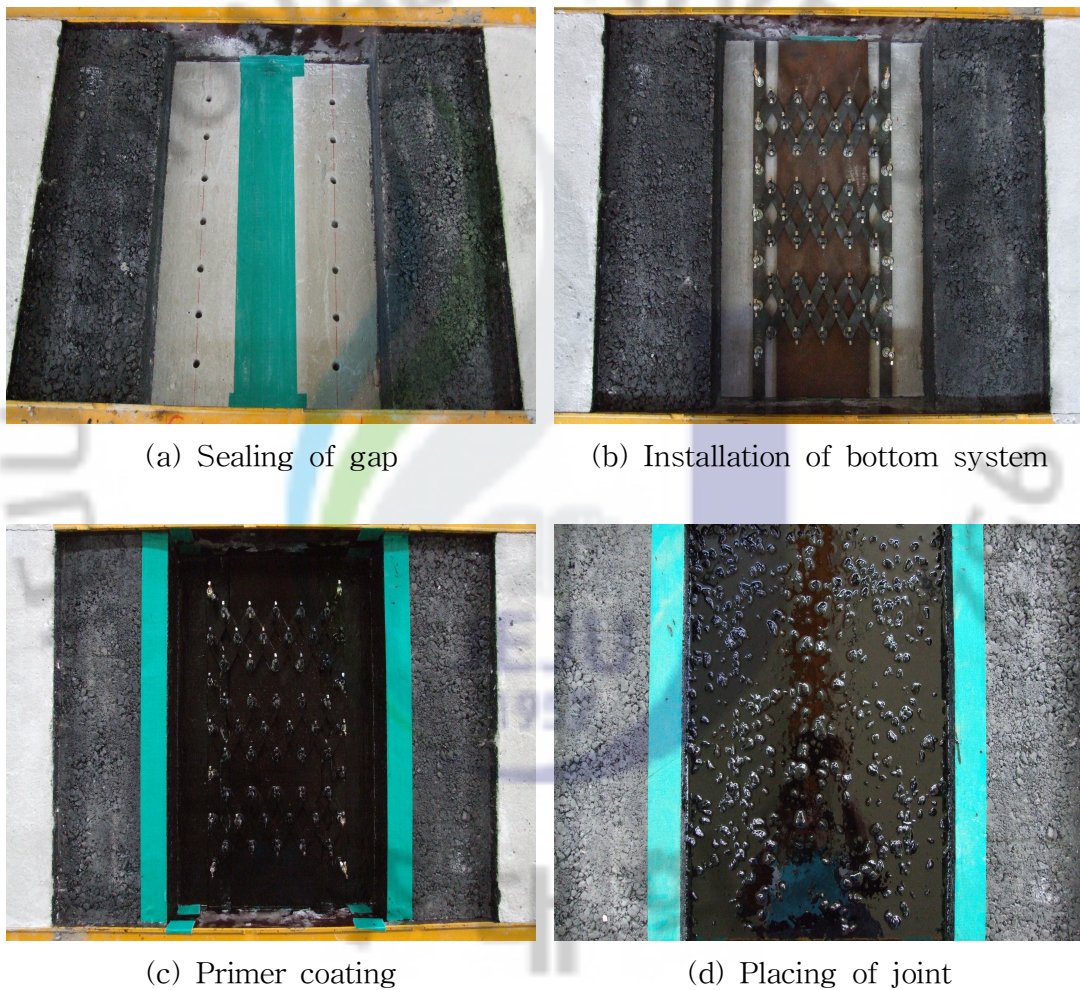


Fig. 5.9 Manufacturing process of joint

VI. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 실험을 통해 교량 상부구조에 발생하는 신축을 인위적인 변위로 재하함으로서 발생하는 시험체 표면의 구간별 표면 변형률 분포, 표면의 변형상태, 파괴형상 등에 대하여 분석하였다. 실험 분석 순서는 기존 매설형 신축이음장치의 변수별 거동분석을 하고 새로 개발한 매설형 신축이음장치 BFLJ의 변수별 거동분석을 하여 기존 매설형 신축이음장치와 새로 개발한 시스템의 성능평가를 위한 거동을 비교 분석하였다.

실험결과로부터 나타낸 그래프들은 본 연구에서 산정된 신축량 $\pm 25\text{mm}$ 를 바탕으로 인장 25mm →복원(압축 25mm)→압축(25mm)→복원(인장 25mm)에 따른 구간별 표면 변형률을 나타낸 것이다.

1. 기존 매설형 신축이음장치의 실험결과 및 분석

기존 매설형 신축이음장치의 실험은 개발된 매설형 신축이음장치인 BFLJ와 성능 평가를 정량적으로 비교분석하기 위해 하부시스템에 대하여 철판 폭의 크기 변화와 상부 포장재료의 종류에 따른 거동을 분석하였다.

1) 기본 시험체(A0-180)

본 실험에서 기존 매설형 신축이음장치를 나타낸 기본 시험체는 바닥철판의 폭을 180mm , 상부 포장재료는 현재 시공현장에서 사용하고 있는 아스콘용 일반 팔트(AP-5)를 사용하여 제작하여 실험을 실시하였다.

Fig. 6.1은 기본시험체인 A0-180 시험체의 3Cycle 시 신축에 따른 시험체 표면의 구간별 변형률을 나타낸 것이며, 또한 Fig. 6.2는 A0-180 시험체의 실험 전과 후의 표면 변형분포를 나타낸 것이다.

실험결과 기본 시험체인 A0-180은 1Cycle 인장 시 접합부에 변형집중이 발생

하였으며 Cycle이 진행됨에 따라 그래프(Fig. 6.1)와 표면 변형분포(fig. 6.2)에서와 같이 중앙부(7~9번)와 접합부(2~3번, 13~14번)에 큰 변형이 일어났다. 이러한 변형은 Bramel et al의 연구에서와 같이 신축에 대하여 철판 양끝 부분에서 발생한 변형이 45° 정도의 각을 이루며 표면으로 확산된 것이라 판단되며, 그 결과 확산된 변형은 중앙부와 접합부에 큰 변형을 유도하고 철판 끝부분의 표면에는 낮은 변형을 나타내는 것으로 판단된다.

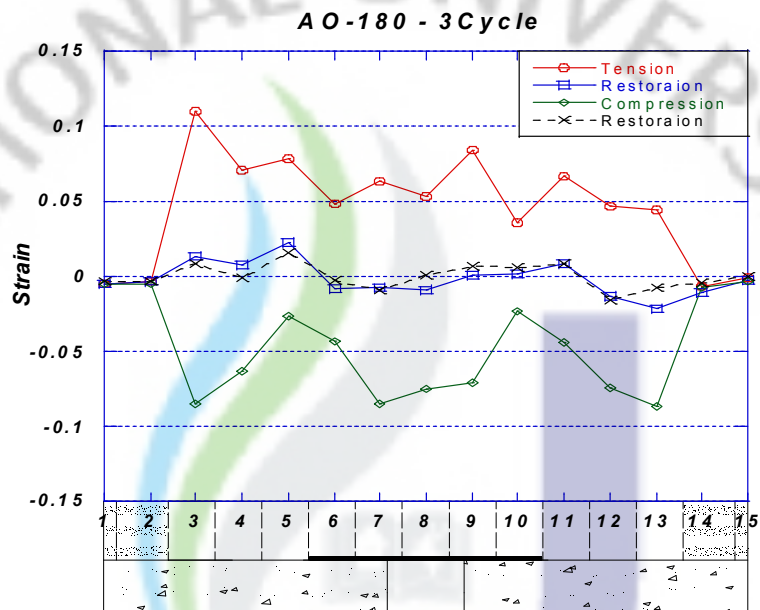
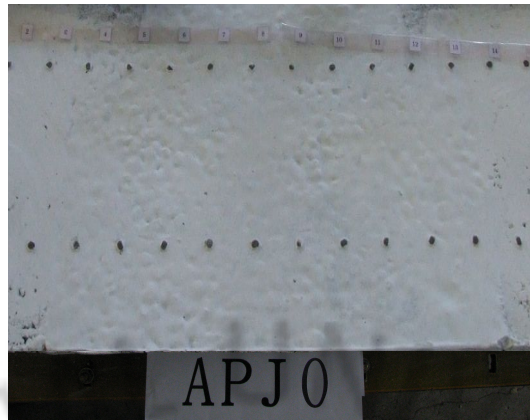
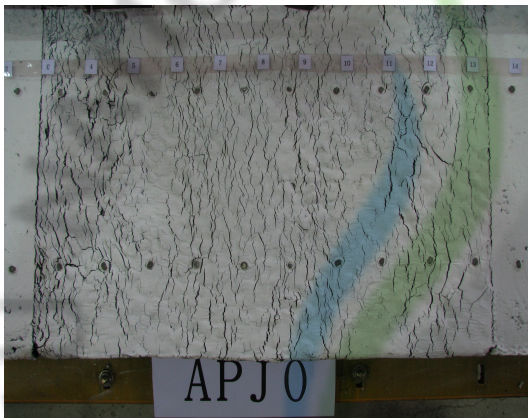


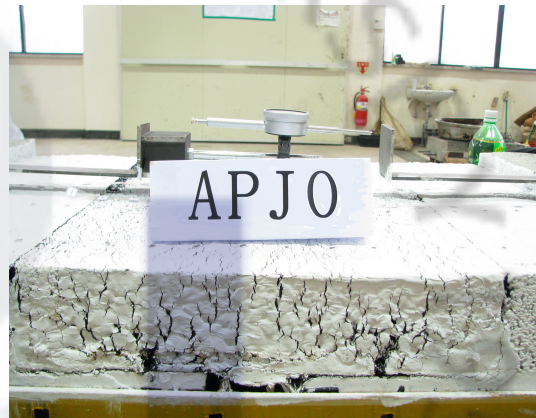
Fig. 6.1 Surface strain at 3 Cycle (A0-180)



(a) Test set-up before experiment



(b) Deformation pattern of surface



(c) Deformation pattern of cross section

Fig. 6.2 Real view of A0-180 specimen

2) 철판 폭에 대한 영향

기존 매설형 신축이음장치의 철판 폭에 따른 영향을 분석하기 위하여 기본 시험체의 철판 폭을 180mm로 정하고 철판 폭 270mm를 변수로 정하여 철판 폭에 따른 영향을 분석하기 위하여 실험을 실시하였다.

철판의 폭은 새로 개발한 BFLJ와 기존 매설형 신축이음장치의 성능평가와 거동을 비교분석하기 위해 BFLJ의 하부시스템의 철판의 폭과 고정철판을 포함한 하부시스템의 총 폭과 같은 크기로 결정한 것이다.

Fig. 6.3은 A0-270 시험체의 1Cycle 시 시험체 표면의 각 구간별 표면변형률을

나타낸 것이고 Fig. 6.4는 A0-270 시험체의 실험전과 후의 표면양상을 나타낸 것이다.

실험결과 철판의 폭을 270mm로 제작한 A0-270 시험체는 1Cycle 인장 시 기본시험체인 A0-180과 같은 경향성을 보이는 듯 했으나 2Cycle 인장 시 접합부의 변형집중으로 인하여 Debonding현상에 의해 파괴가 되었다.

기존 매설형 신축이음장치는 철판 폭에 따라 신축영역의 분포가 다르게 나타났으며, 조인트의 중앙부 보다는 접합부에 변형이 집중되었다. 이는 신축 시 철판 양끝부분에서 발생하는 변형이 좌우 45°정도의 각으로 확산되면서 접합부와 중앙부에 영향을 미치기 때문이라고 판단된다. 즉, 철판 폭이 작을수록 철판 끝과 접합부 사이의 간격이 넓어져 신축영역이 조인트 내에 존재하게 되어 접합부에 영향을 덜미치게 되고, 철판 폭이 클수록 접합부와 사이의 간격이 좁아져서 신축영역이 접합부에 영향을 미치기 때문이다. 그러므로 기존 매설형 신축이음장치의 철판의 폭은 신축영역의 범위를 결정하는 중요한 변수라 판단되며 조인트의 인장균열과 접합부의 Debonding현상을 유발하는 원인이 되는 것으로 판단된다.

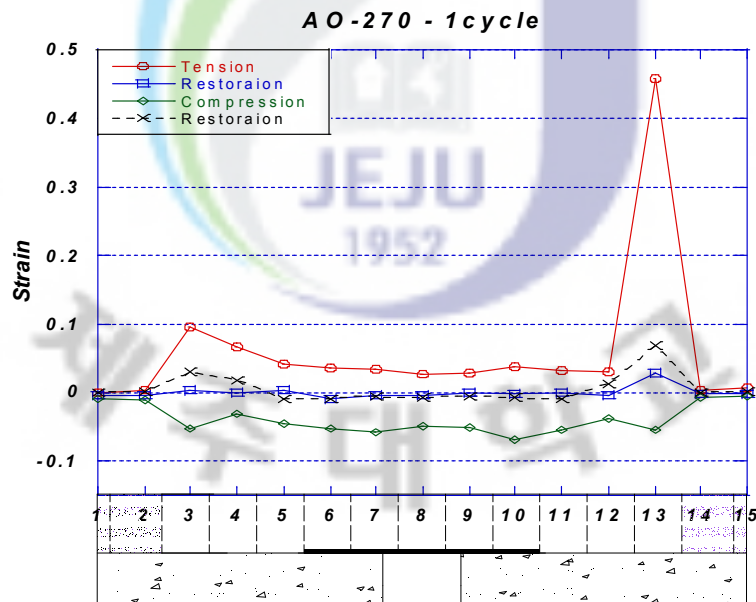


Fig. 6.3 Surface strain at 1 Cycle (A0-270)

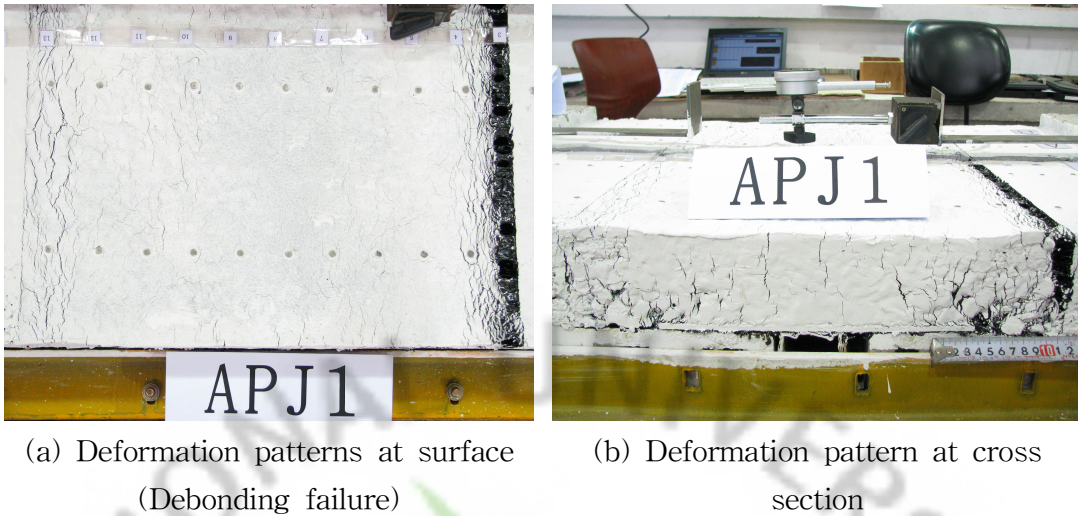


Fig. 6.4 Real view of A0-270 specimen

3) 상부 포장재료에 따른 영향

기존 매설형 신축이음장치의 상부재료에 대한 거동분석은 일반팔트를 사용한 A0-180 시험체를 기본으로 하여, 탄성을 증가시키고 침입도와 연화점을 개선하여 생산한 S사의 슈퍼팔트와 I사의 아이팔트를 사용한 AS-180 시험체와 AI-180 시험체에 대하여 실험을 실시하였다.

본 실험에 사용된 역청의 재료적인 성질은 V.7절의 Table 5.5에 나타난 물성치에서 알 수 있듯이 일반팔트의 경우 연화점이 낮고 침입도와 신도가 높아 연한 성질을 갖고 있으며 회복탄성도 또한 아주 작은 저탄성 재료이다. 반면 슈퍼팔트와 아이팔트는 침입도를 낮추고 연화점을 높여 단단한 성질을 갖고 있으며 회복탄성도 또한 아주 강한 고탄성 재료이다. I사의 아이팔트는 S의 슈퍼팔트보다 저탄성인 성질을 갖고 있으나 연화점과 침입도를 볼 때 좀 더 단단한 성질을 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6.5와 Fig. 6.6은 슈퍼팔트와 아이팔트를 사용한 AS-180과 AI-180 시험체의 신축에 대한 1Cycle 시 표면 변형률을 나타낸 것이고, Fig. 6.7과 Fig. 6.8은 실험 전과 후의 표면 변형분포를 나타낸 것이다.

실험결과 일반팔트를 사용한 기본시험체 A0-180은 신축에 대하여 철판 끝에서

발생한 변형이 표면으로 확산되어, Cycle이 진행됨에 따라 중앙부와 접합부에 신축영역이 형성되어 높은 변형이 나타났다. 반면, 슈퍼팔트를 사용한 AS-180 시험체의 경우 신축 시 상부 포장재료와 철판사이에서 Debonding이 발생하여 A0-180 시험체와 같이 철판 끝에서 발생하여 표면으로 확산되는 변형이 미미하였다. 그 결과 2Cycle 인장 시 접합부에 변형이 집중되어 Debonding현상에 의해 파괴되었다. 이는 신축 시 철판과 상부 포장 재료사이의 Debonding현상으로 인하여 접합부에 변형이 집중되어 신축을 흡수하지 못하고 접합부의 접착력의 한계를 넘어서게 되어 Debonding이 발생한 것으로 판단된다. 또한 아이팔트를 적용한 AI-180 시험체의 경우에는 신축 시 철판 끝에서 발생하는 변형이 표면으로 확산되는 듯 했으나, 신축에 의한 큰 변형을 흡수하지 못하고 철판끝 부분의 표면에서 인장균열이 발생한 것으로 판단된다.

기존 매설형 신축이음장치는 신축에 대하여 상부 포장재료에 따라 표면 변형 분포가 다르게 나타났으며, 조기파손의 원인이 되는 인장균열과 접합부의 Debonding현상을 유발할 수 있다. 상부재료는 신축이 철판 끝에서 발생한 변형의 확산영역에서만 국한되므로 큰 변형을 흡수할 수 있는 재료와 운하중에 대한 소성변형에 저항할 수 있는 단단한 재료를 선정해야 한다고 판단된다.

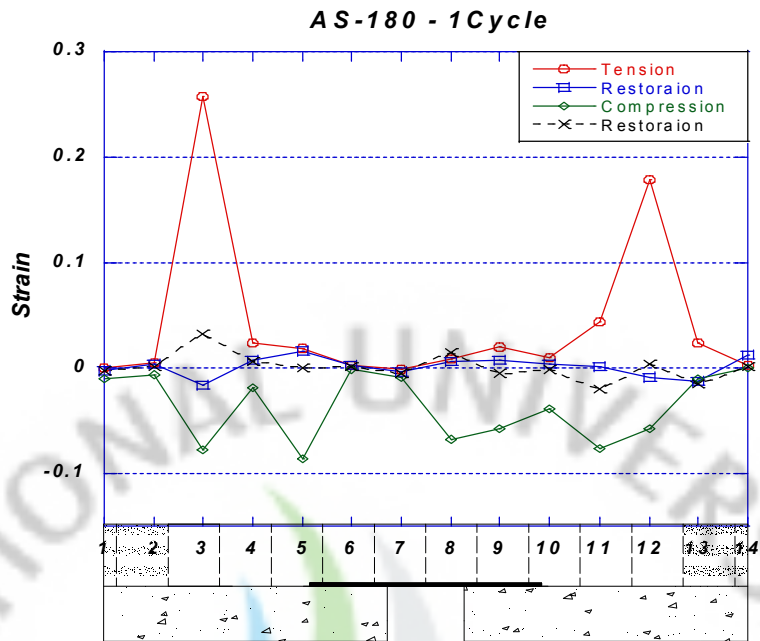


Fig. 6.5 Surface strain at 1 Cycle (AS-180)

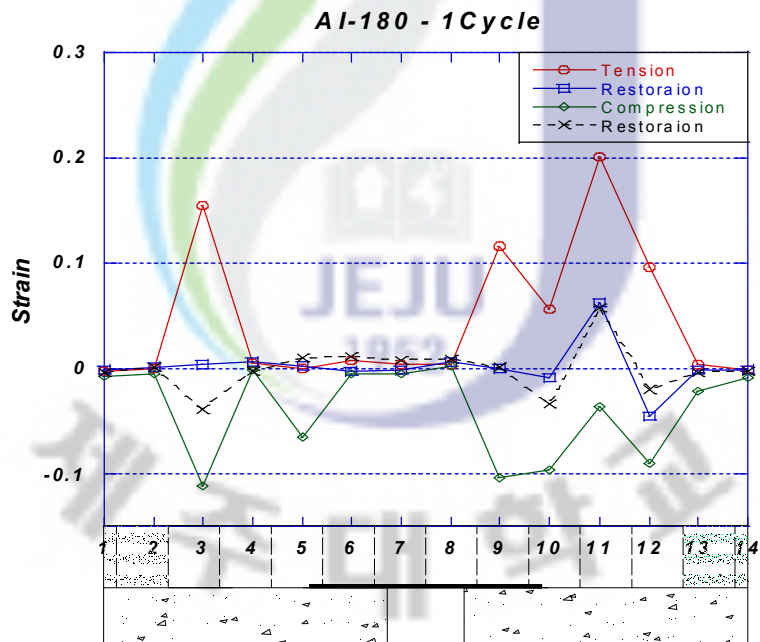
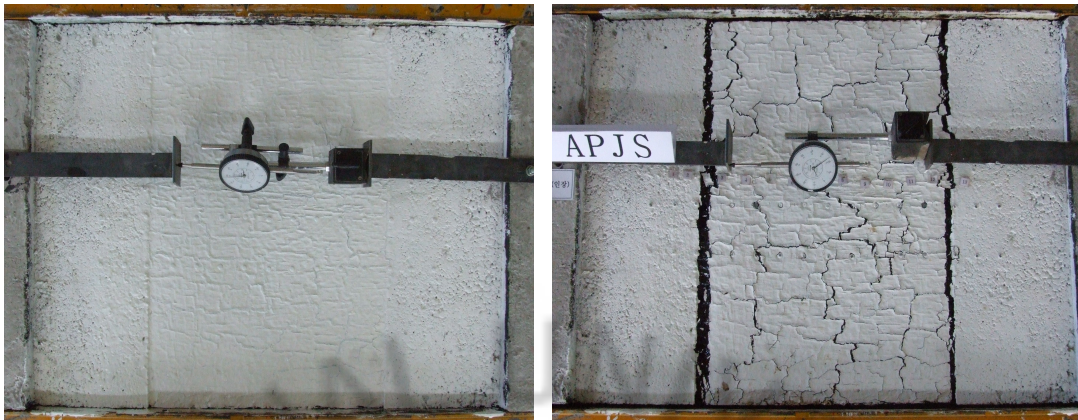
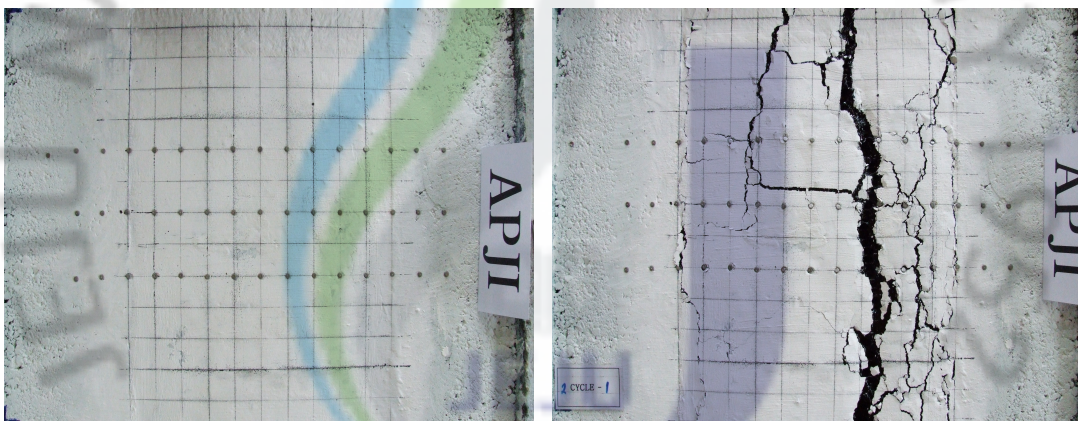


Fig. 6.6 Surface strain at 1 Cycle (AI-180)



(a) Test set-up before experiment (b) Deformation pattern at surface
(Debonding failure)

Fig. 6.7 Real view of AS-180 specimen



(a) Test set-up before experiment (b) Deformation pattern at surface
(Tensile failure)

Fig. 6.8 Real view of AI-180 specimen

2. 새로 개발한 매설형 신축이음장치 BFLJ의 실험결과 및 분석

새로 개발한 매설형 신축이음장치의 거동 분석을 위하여 기존 매설형 신축이음장치 하부에 Folding Lattice System을 설치하여 신축에 대하여 상부재료에

따른 영향, 앵커 스티드 유무에 따른 영향에 대하여 거동을 분석 하고 추가적으로 스티드의 높이에 따른 거동을 분석하였다.

1) 기본 시험체(B0-A0)

BFLJ의 거동분석을 위한 기본 시험체 B0-A0는 하부 시스템의 스티드의 높이를 포장두께의 1/2인 45mm, 상부재료를 일반팔트로 사용하여 제작하였다. Fig. 6.9는 3Cycle 시 시험체 표면의 구간별 변형률을 나타낸 것이고 Fig. 6.10은 실험 전과 후의 시험체 표면 변형분포를 나타낸 것이다.

실험결과 새로 개발한 매설형 신축이음장치 BFLJ의 기본시험체인 B0-A0는 인장과 압축 시 조인트 전체에 완만한 변형을 유도하였으며, 중앙부에는 높은 변형을 유도하고 접합부에는 낮은 변형을 유도했다. 이는 기존 매설형 신축이음장치의 철판 끝에서 발생하는 변형이 표면으로 확산되는 경향과 달리 하부시스템인 Folding lattice system의 영향으로 조인트 전체에 강제적으로 고르게 유도하여 변형을 분포시킨 것으로 판단된다.

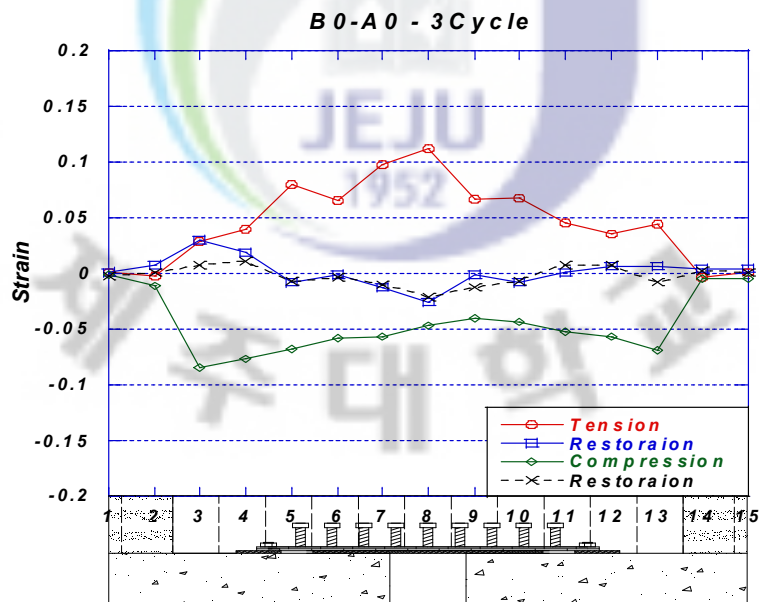
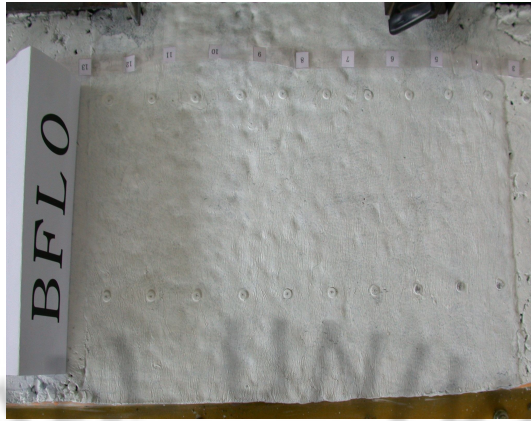


Fig. 6.9 Surface strain at 3 Cycle (B0-A0)



(a) Test set-up before experiment



(b) Deformation patterns at surface



(c) Deformation pattern at cross sections

Fig. 6.10 Real view of B0-A0 specimen

2) 상부 포장재료에 따른 영향

상부재료에 따른 새로운 신축이음장치 BFLJ의 거동은 일반팔트와 탄성을 높이고 침입도를 낮추고 연화점을 높여 생산한 S사의 슈퍼팔트와 I사에서 개발한 아이팔트를 사용하여 실험을 실시하였다.

Fig. 6.11과 Fig. 6.12는 슈퍼팔트를 사용한 시험체 BS-A0와 아이팔트를 적용한 시험체 BI-A0 시험체의 3Cycle 시 표면 변형률을 나타낸 것이고 Fig. 6.13과 Fig. 6.14는 실험 전후의 표면변형 분포를 나타낸 것이다.

실험결과 슈퍼팔트를 적용한 시험체 BS-A0 시험체의 경우 조인트 구간 내에서 전체적으로 변형이 나타났으나 Cycle이 증가할수록 중앙부가 다른 구간보다 높은 변형이 나타났다. 또한 복원 시 그래프에서 알 수 있듯이 중앙부(6~8번)에 잔류 변형이 발생하였다. 아이팔트를 적용한 시험체인 BI-A0 역시 전체적인 변형이 유도되었으나 접합부와 앵커볼트 사이 구간에서 잔류 변형이 발생하였다. 이는 BS-A0 시험체의 경우 하부시스템의 강제적인 변위유도로 인한 변위를 흡수하지 못하여 중앙에 높은 변형과 잔류 변형이 존재한 것으로 판단된다. 또한 BI-A0 시험체의 경우에는 하부시스템으로 유도된 강제적인 변위를 흡수하여 고른 변형을 유도하였으나 BS-A0 시험체 비해 회복탄성도가 부족하여 접합부와 스티드 사이구간(4~5번, 10~11번)에서 잔류 변형이 발생한 것으로 판단된다.

BFLJ는 상부재료에 관계없이 조인트 전체에 대체적으로 변형을 유도하였으나 상부재료의 특성에 따라 신축에 따른 표면 변형이 다르게 나타났다. 이에 BFLJ의 상부재료는 운하중을 고려하여 소성변형과 신축에 대하여 강제적인 변위를 흡수할 수 있는 고탄성 재료가 적합하다고 판단된다.

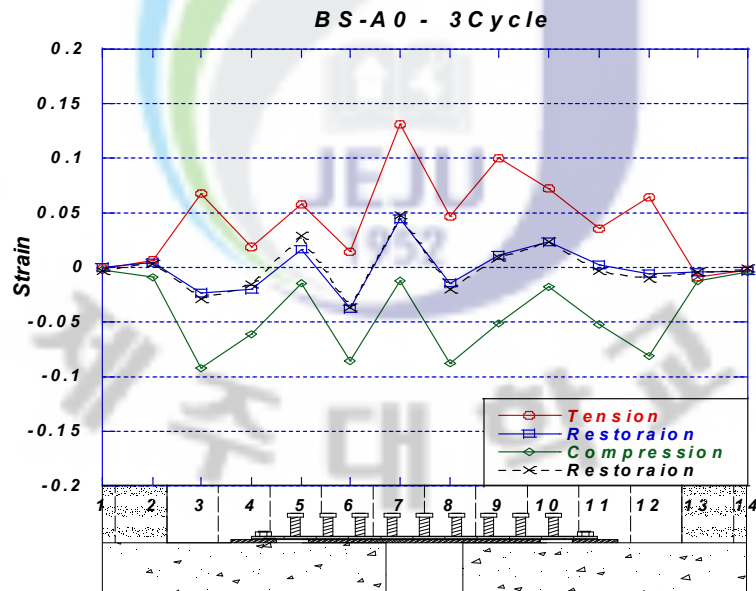


Fig. 6.11 Surface strain at 3 Cycle (BS-A0)

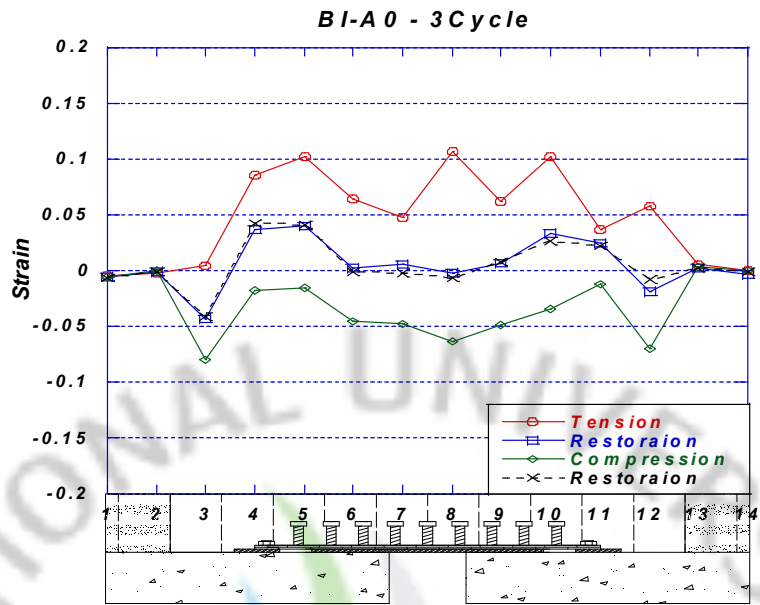
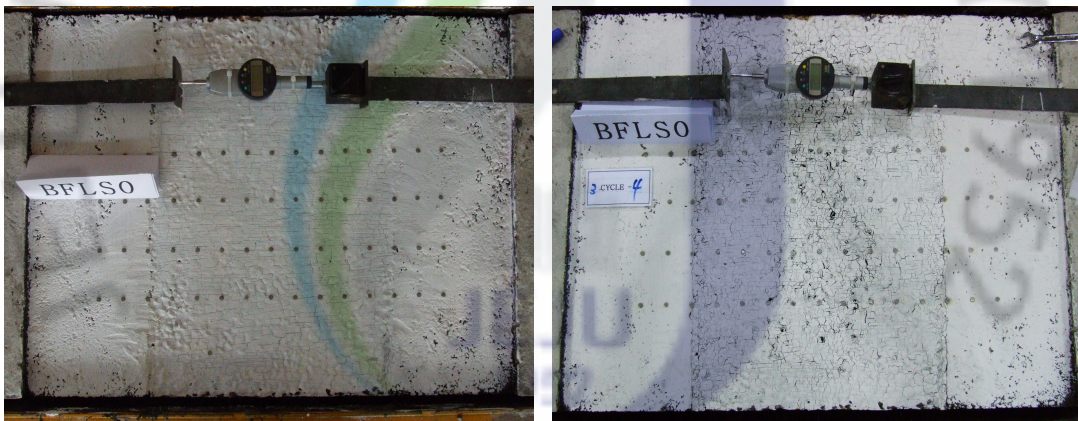
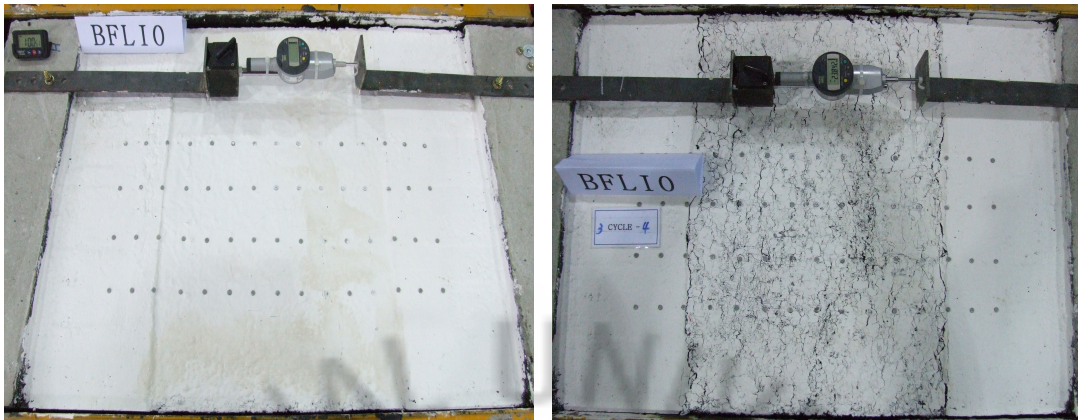


Fig. 6.12 Surface strain at 3 Cycle (BI-A0)



(a) Test set-up before experiment (b) Deformation patterns at surface

Fig. 6.13 Real view of BS-A0 specimen



(a) Test set-up before experiment (b) Deformation patterns at surface

Fig. 6.14 Real view of BI-A0 specimen

3) 앵커스터드에 따른 영향

본 실험에서는 하부시스템에 앵커스터드를 설치하여 앵커스터드의 존재 유·무에 따른 거동을 분석하였다. 또한 앵커스터드의 확실한 영향을 분석하기 위하여 앵커스터드의 길이는 스테드(45mm)보다 높은 60mm($2/3 H$)로 제작하여 실험을 실시하였다.

앵커스터드는 BFLJ의 하부시스템을 슬래브 바닥에 고정하기 위한 앵커를 상부로 연장시켜 스테드로 만든 것이다. 이러한 앵커스터드는 신축에 의해 발생하는 변형을 조인트 전체가 아닌 하부시스템이 존재하는 영역에서만 변형을 국한시켜 접합부의 Debonding현상과 변형 집중을 예방하고자 설치한 것이다.

Fig. 6.15~6.17은 상부재료에 따른 BFLJ에 앵커스터드를 설치하여 실험을 실시한 B0-A1, BS-A1과 BI-A1시험체의 3Cycle 시 표면변형률을 나타낸 것이고 Fig. 6.18~6.20은 실험 전후의 표면 변형분포를 나타낸 것이다.

실험결과 일반팔트에 앵커스터드를 설치한 B0-A1시험체의 경우 앵커스터드가 없는 시험체 B0-A0의 경우보다 넓은 범위에서 완만한 변형분포를 나타냈다. 반면 고탄성 재료인 슈퍼팔트와 아이팔트를 사용하고 앵커스터드를 설치한 BS-A1, BI-A1 시험체의 경우에는 앵커스터드가 없는 시험체와 아주 다른 변형 분포를 나타냈다. 즉, 앵커스터드가 존재하는 구간의 표면에는 높은 변형이 나타

났으며 중앙부와 접합부에는 낮은 변형분포를 유도하였다. 이는 앵커스터드는 접합부로 확산되는 변형을 해소하기 위한 목적으로 설치되었으나 인장과 압축 시에 자연스러운 변형을 억제하는 장애물 역할을 하여 앵커스터드의 표면에 높은 변형을 유도했다고 판단된다. 또한 재료적인 성질로 인하여 탄성이 약하고 단단한 재료가 탄성이 강하고 연한재료보다 앵커스터드 부분이 높은 변형이 발생할 것으로 판단된다.

앵커스터드의 존재는 조인트 전체에서 흡수하는 신축을 강제적으로 조인트 전체가 아닌 하부시스템이 존재하는 영역에서만 변형을 국한시켜 접합부의 변형을 낮출 수는 있었으나 앵커스터드의 표면에 높은 변형을 유도하여 시스템 전체의 고른 변형을 유도하는데 불필요한 요소로 판단된다.

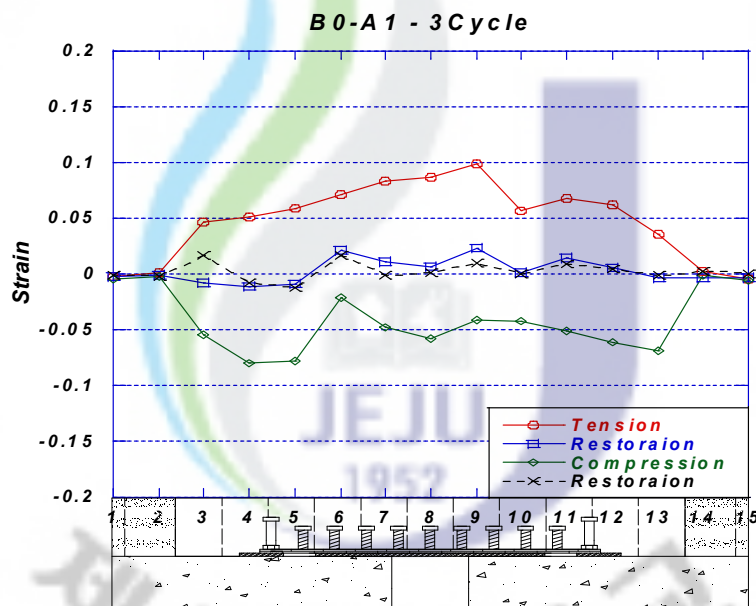


Fig. 6.15 Surface strain at 3 Cycle (B0-A1)

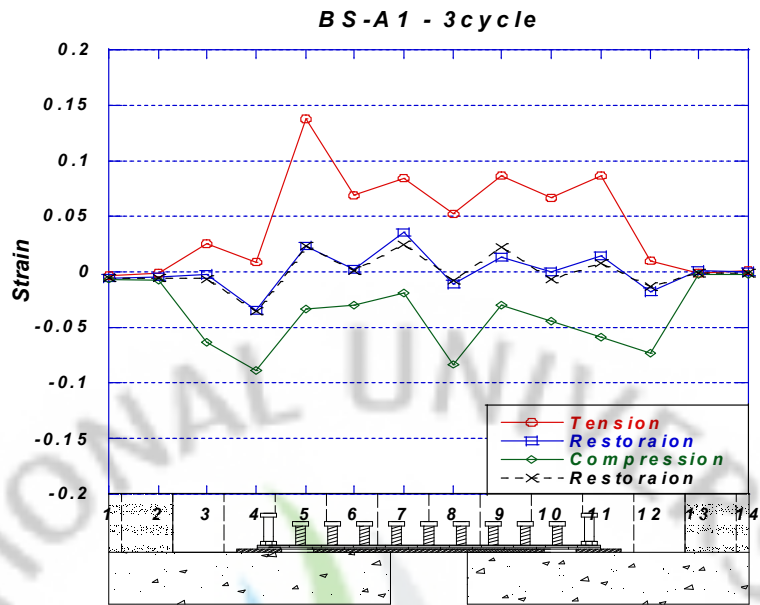


Fig. 6.16 Surface strain at 3 Cycle (BS-A1)

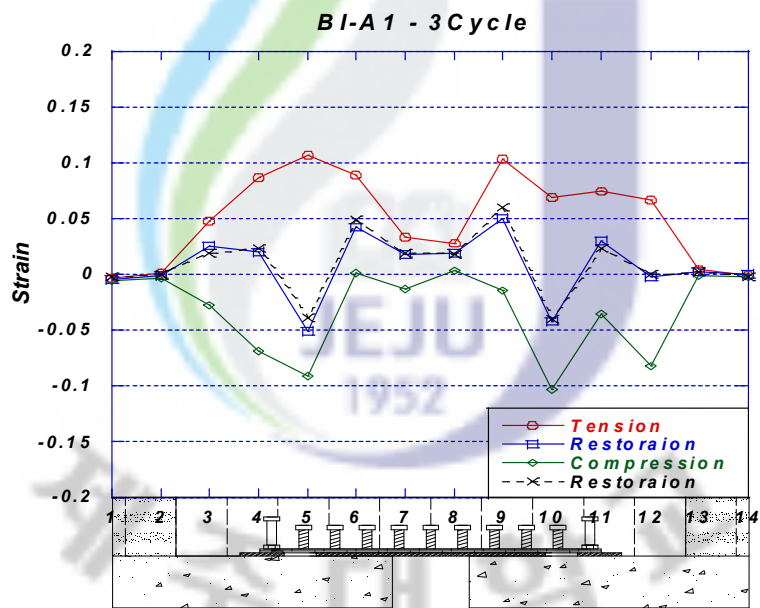
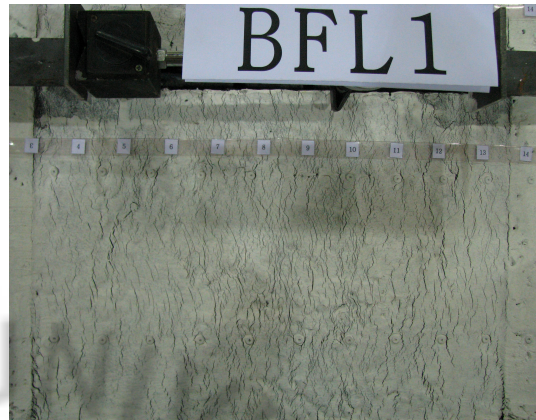
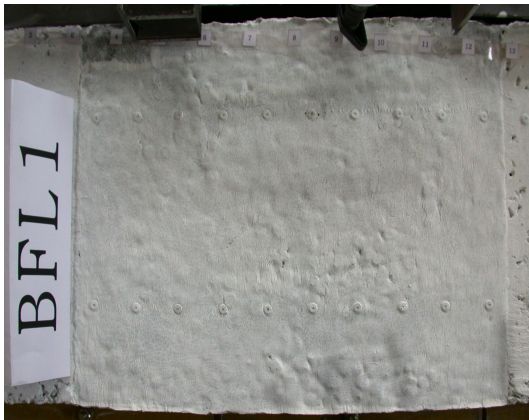
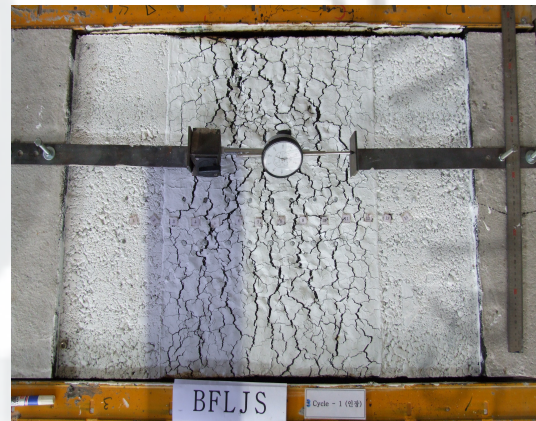


Fig. 6.17 Surface strain at 3 Cycle (BI-A1)



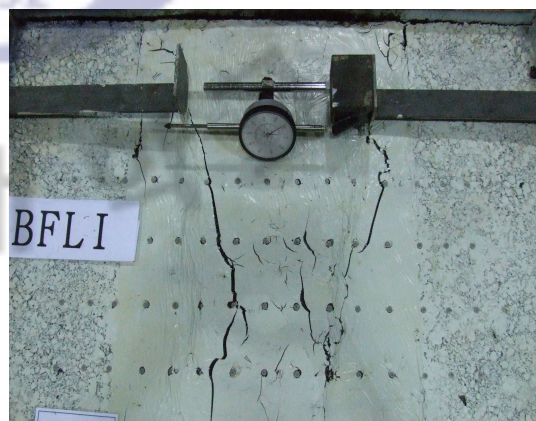
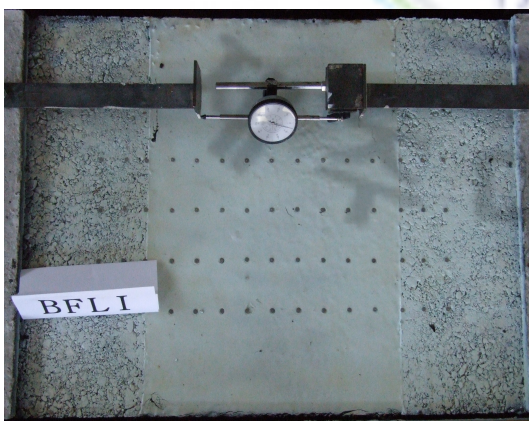
(a) Test set-up before experiment (b) Deformation pattern at surface

Fig. 6.18 Real view of B0-A1 specimen



(a) Test set-up before experiment (b) Deformation pattern at surface

Fig. 6.19 Real view of BS-A1 specimen



(a) Test set-up before experiment (b) Deformation pattern at surface

Fig. 6.20 Real view of BI-A1 specimen

4) 스테드 높이에 따른 영향

추가적인 실험으로 본 실험에서 운하중을 고려하여 연화점과 침입도를 개선하고 신축에 대하여 가장 고른 변형 분포를 유도한 아이팔트가 적용된 BI-A0시험체에 대하여 하부시스템의 스테드 높이를 45mm→60mm로 증가시켜 BI-A0-60 시험체를 제작하여 스테드 높이에 따른 거동을 분석하였다.

다음 Fig. 6.21은 BI-A0-60 시험체의 3Cycle 시 신축에 따른 표면 변형률을 나타낸 것이고, Fig. 6.22는 실험 전후의 시험체 표면변형분포를 나타낸 것이다.

실험결과 앵커스테드의 높이를 증가시킨 시험체 BI-A0-60은 조인트 전체에 고른 변형을 유도하였을 뿐만 아니라 BI-A0시험체의 잔류변형이 존재하지 않았다. 이는 스테드의 높이를 증가시킴으로써 하부시스템에서 유도되는 고른 변형이 상부 포장재료에 보다 효과적으로 전달되었기 때문이라고 판단된다.

새로 개발한 BFLJ의 스테드의 높이는 높을수록 고른 변형을 효과적으로 상부 포장재료에 전달할 수 있었다. 이에 스테드의 높이는 운하중을 고려하여 최적의 높이를 결정하여야 할 것이다.

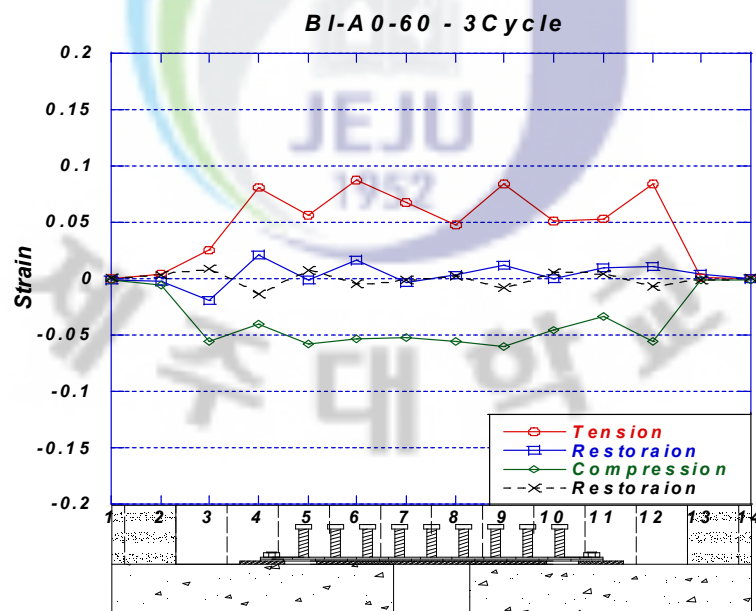


Fig. 6.21 Surface strain at 3 Cycle (BI-A1-60)



(a) Test set-up before experiment (b) Deformation patterns at surface

Fig. 6.22 Real view of BI-A1-60 specimen

5) 기존 매설형 신축이음장치와 새로운 매설형 신축이음장치 결과 비교

기존 매설형 신축이음장치는 신축에 따라 철판 끝에서 변형이 발생하여 확산되었다. 반면, 새로 개발한 매설형 신축이음장치의 경우에는 하부시스템의 역할로 시스템 전체에 변형이 일어났다. 즉, 기존 매설형 신축이음장치의 신축영역은 철판 끝에서 발생하여 표면으로 확산된 범위에서만 국한되었으며, BFLJ의 경우 시스템 전체에서 신축이 이루어진다. 또한 BFLJ는 기존 매설형 신축이음장치의 가장 문제가 되었던 접합부의 변형 집중을 해소시킬 수 있었다. 이에 기존 매설형 신축이음장치의 조기 파손 현상인 인장균열과 접합부의 Debonding 현상은 매설형 신축이음장치인 BFLJ를 개발하면서 해소할 수 있을 것이라 판단된다.

VII. 결 론

본 연구에서는 기존 매설형 신축이음장치의 단점을 극복할 수 있는 새로운 매설형 신축이음장치를 개발하고 실험을 통해 성능평가와 거동을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 새로 개발한 매설형 신축이음장치 BFLJ는 대체적으로 시스템 전체에 고른 변형을 유도하며 기존 매설형 신축이음장치에서 문제가 되었던 접합부의 변형집중을 해소시켰다.
2. 기존 매설형 신축이음장치의 신축영역은 철판 끝에서 발생하여 표면으로 확산되는 변형의 범위에서만 국한되나, BFLJ는 하부시스템인 Folding lattice system의 영향으로 시스템 전체에 강제적으로 변위를 유도시켰다.
3. 기존 매설형 신축이음장치에서 철판 폭의 크기는 신축영역의 범위를 결정하는 중요한 변수이며 폭에 따라 인장균열과 접합부의 Debonding으로 인한 조기파손이 원인이 될 수 있다.
4. 기존 매설형 신축이음장치는 상부 포장재료에 따라 표면 변형 분포가 다르게 나타났으며, 인장균열과 접합부의 Debonding현상을 유발할 수 있다.
5. BFLJ는 상부재료에 관계없이 전체적인 변형 분포를 나타내나, 하부시스템의 강제적인 변위를 흡수할 수 있는 고탄성 재료가 적합하다.
6. BFLJ에서 접합부로 확산되는 변형을 차단하고자 제작한 앵커스터드는 자연스러운 신축을 방해하는 장애물로 변형집중을 유발한다.

7. 스테르드의 높이는 상부재료의 고른 변형을 유도하기 위한 중요한 변수이며 스테르드 높이가 높을수록 보다 확실한 변형을 상부재료에 전달할 수 있다. 그러므로 윤하중을 고려하여 최적의 높이를 결정하여야 할 것이다.
8. 새로 개발한 매설형 신축이음장치인 BFLJ의 최적화를 위하여 윤하중과 온도 변화에 따른 상부 포장재료의 물성치를 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.



VIII. 참고문헌

- 한국도로교통협회, 도로교 설계기준(2005)
- 국토해양부, 도로교 설계편람 제 5편, 교량(2008년 개정판)
- 한국도로공사 도로연구소, 신축이음장치에 관한 연구(1993), pp 1-5
- 김지훈, “개질아스팔트를 이용한 연속형 신축이음장치의 거동특성연구” 석사학위 논문(2001), pp25-30
- 김지훈, 한만엽 “도로봉합제를 이용한 무조인트형 신축이음장치의 거동특성연구,” 대한토목학회 논문집 제21권 4호, 2001,
- 건설교통부(2005), 가열 아스팔트 혼합물 배합설계 지침
- Bramel, B. K., Puckett, J. A., Ksaibati, K., and Dolan, C. W. (1997). "Asphalt Plug Joint Usage and Perceptions in the United States." *Transportation Research Record 1594*, 172-178.
- Bramel, B. K., Dolan, C. W., Puckett, J. A., and Ksaibati, K. (1998). "Asphalt Plug Joint - Material Characterization and Specification." *5th International Conference on Short and Medium Span Bridges*, Calgary, Canada.
- Bramel, B. K., Dolan, C. W., Puckett, J. A., and Ksaibati, K. (1999). "Asphalt Plug Joints: Characterization and Specifications", Ph. D. Dissertation, University of Wyoming, Department of Civil and Architectural Engineering.
- Bramel, B. K. (1999). "Paper 4: Asphalt Plug Joints: Analytical Development of Design Guidelines." *Asphalt Plug Joints: Characterization and Specification*, Ph.D. Dissertation, University of Wyoming, Department of Civil and Architectural Engineering.
- Bramel, B. K. (1999). "Paper 5: Asphalt Plug Joints: Near Full Scale Validations." *Asphalt Plug Joints: Characterization and Specification*, Ph.D. Dissertation, University of Wyoming, Department of Civil and Architectural Engineering.
- Bramel, B. K., Dolan, C. W., Puckett, J. A., and Ksaibati, K. (2000). "Asphalt Plug Joint - Refined Material Tests and Design Guidelines." *Transportation Research Record*, n 1740, 126-134.
- Cheung, C. Y. and Cebon, D. (1997). "Experimental Study of Pure Bitumens in Tension, Compression, and Shear." *Journal of Rheology*, 41(1), 45-73.

- Deshpande, V. S. and Cebon, D. (2000). "Uniaxial Experiments on Idealized Asphalt Mixes." *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 12(3), 262-271.
- Partl, M. N., Hean, S., and Poulikakos, L. (2002). "Asphaltic Plug Joint Characterization and Performance Evaluation." *Proceedings of 9th International Conference on Asphalt Pavements*, ISAP, Copenhagen.
- Reid, M. D., Imbabi, M. S., and Coutellier, D. (1998). "Effects of Joint Geometry on Response of Asphaltic Plug Joints." *Journal of Transportation Engineering*, 124(4), 311-318.
- Qian, Z., Akisanya, A. R., and Imbabi, M. S. (2000). "Effects of Geometry on the Deformation of Asphaltic Plug Joints Subjected to Surface Traction." *Journal of Strain Analysis*, 35(5), 403-413.



감사의 글

어느덧 2년이란 시간이 흘러 대학원 생활을 마감할 하고 있습니다. 지난 시간을 되돌아보면 힘든 날도 있었지만 힘든 시간을 이겨낼 수 있도록 힘을 주신 분들이 많습니다. 이 자리를 빌어 도움을 주신 분께 감사의 글을 전합니다.

우선, 본 논문을 쓰기까지 대학생활 내내 아낌없는 지도와 사랑으로 보살펴 주신 박상렬 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 대학원 생활을 마치기까지 많은 가르침을 주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 남정만 교수님, 이병걸 교수님, 김상진 교수님, 이동욱 교수님, 동국대학교 유승룡 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

대학원 생활을 하면서 본 논문이 완성되기까지 같이 고민도 해주시고, 많은 조언 및 용기를 주신 정신적 지주 창훈형님께 감사의 말씀을 드립니다. 나의 대학원 생활에 있어서 잊지 못할 추억을 같이한 경남이랑 경태에게도 축하의 말과 고마움을 전합니다. 그리고 연구실 막내이자 3명의 뒷바라지하면서 싫은 소리 없이 밝은 얼굴로 도움을 준 용현에게 감사의 말을 전합니다. 그리고 멀리서 떨어져 지내지만 부족한 저를 짜증내지 않고 격려해준 성룡이형과 연구실 선배님들에게도 감사의 말을 전합니다.

2년이란 대학원 생활동안 동고동락 하면서 고민을 함께 나누는 대학원 동기인 종완이형, 응규형, 승호, 카오에게 축하의 말과 감사의 말을 전합니다, 그리고 대학원의 후배이자 생활을 같이한 승현이형, 태건, 창선, 영민, 현탁, 현철, 창림, 정우, 경훈에게 감사의 말을 전하고, 이번에 대학원에 입학한 한승, 준영, 양수에게도 축하의 말과 감사의 말을 전합니다. 그리고 학부에서부터 대학원에 이르기까지 앞으로도 친형님처럼 저를 위해 충고와 격려를 아끼지 않았던 서울학원 원장님 길용이형, 태혁이형, 현구형, 우열이형, 상봉이형에게 감사의 말을 전하고, 서울토목학원의 발전을 기원합니다.

고등학교 때부터 지금까지 항상 옆에서 언제나 힘이 되어주고 평생을 같이할 영원한 친구 근혁, 용택, 진산, 승현, 인식, 종훈, 현승, 기훈, 부현, 동화, 두영, 성수에게 미안한 마음과 감사의 말을 전합니다. 현재 자신의 목표를 위해서 열심히 매진하고있는 고등학교 동창들과 대학동기들 모두 앞으로 행복과 건강하기를 빌며 감사의 말을 전합니다.

본 논문 쓰기까지 도움을 주신 김형배 박사님, 최정근씨, 서창원 과장님, 양진석

과장님, 황보용 사장님, 장우 정밀의 김진홍 과장님께 감사의 말을 전하며 행복과 건강하기를 빕니다.

오늘이 있기까지 저를 항상 믿고, 항상 저희 편에서 많은 배려와 아낌없는 격려와 용기를 주신 아버지, 어머니께 사랑한다는 말과 감사의 말을 전하며, 저의 짜증과 잔소리를 받아주고 비유를 마춰준 하나뿐인 동생 성현에게도 고마움을 전합니다. 비록 옆에는 안계시지만 하늘나라에서 저를 위해 격려해주시는 할머니, 할아버지, 외할머니, 외할아버지에게도 감사의 말을 전합니다.

끝으로 대학원 생활을 마감하기까지 저 옆에서 이해와 배려로 항상 힘이 되어준 지현에게 진심으로 사랑한다는 말과 감사의 말을 전합니다.

2008. 12. 연구실에서

