

급속시공용 복합신소재 교량상부구조의 구조 성능

지효선¹

대원대학교 철도건설과 부교수, 교신저자¹

Structural Performance of an Advanced Composites Bridge Superstructure for Rapid Installation

Ji, Hyo-Seon¹

¹Associate Professor, Department of Civil & Railroad Engineering, Daewon University College, Chungbuk-Do, Korea

Abstract: This paper describes the design, manufacturing process, testing, application, and assessment of capacity-ratings of the first all advanced composites bridge on a public highway system. In order to verify the bridge design prior to the field application, a sub-scale bridge superstructure was built and tested in the laboratory. The field load test results were compared with those of the finite element analysis for the verification of validity. To investigate its in-service performance, field load testing and visual inspections were conducted under an actual service environment. The paper includes the presentation and discussion for advanced composites bridge capacity rating based on the stress modification coefficients obtained from the test results. The test result indicates that the advanced composites bridge has no structural problems and is structurally performing well in-service as expected. Since these composite materials are new to bridge applications, reliable data is not available for their in-service performance. The results may provide a baseline data for future field advanced composites bridge capacity rating assessments and also serve as part of a long-term performance of advanced composites bridge.

Key Words: advanced composites, bridge superstructure, field load testing, finite element analysis, field application, stress modification coefficients, in-service performance assessments, bridge capacity rating

1. 서론

최근 교량의 공용연수 증대와 중차량 교통량의 증가에 따른 중소형교량 열화손상, 구조물의 노후화와 강재의 부식으로 인한 사용성 및 안전성의 저하는 유지보수비용과 함께 커다란 사회적 관심으로 대두하게 되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 교량유지관리는 주로 교량 상부구조물의 유지보수에 집중되어 왔으며, 상부 구조물을 보강하더라도 내하력 부족으로 인해 차량 통행이 어려워 기존의 가설된 교량을 불가피하게 모두 철거하여 신설하는 방식으로 교량을 관리하여 왔다. 이와 같이 기존의 교량을 부분적으로 보수

또는 전면적인 철거 후 재 가설하는 방법은 경제적, 시간적으로 많은 손실을 가져오고 있다.

국내의 가설된 교량 중 85%가 교량 지간이 짧은 중소형 규모의 교량으로서, 그 대부분이 콘크리트 교량으로 가설되어 있어 차량 증가에 따른 노후화가 위험 상태에 도달하고 있다. 따라서 수년 내에 이들 교량을 불가피하게 교체할 수밖에 없다. 여기서 기존의 노후화된 교량을 재 가설하는 방법에 있어서, 상부구조만 철거하고 하부구조를 재 사용한다면 적은 비용으로도 교량을 신속히 재 가설하여 차량 통행을 원활히 할 수 있으며 교량수명을 극대화할 수 있다.

이러한 사회의 요구에 부응하여 건설산업에서 복합

주요어: 복합신소재, 교량상부구조, 현장재하시험, 유한요소해석, 현장적용, 응력보정계수, 공용성평가, 교량내하력등급

Corresponding author: Ji, Hyo-Seon

Department of Civi & Railroad Engineering, Daewon University College, 274 Daehak-Ro, Jecheon-Si, Chungbuk-Do, 390-702, Korea.

Tel: +82-43-649-3266, Fax: +82-43-649-3681, E-mail:hsji@mail.daewon.ac.kr

투고일: 2010년 1월 2일 / 수정일: 2010년 2월 3일 / 게재확정일: 2010년 3월 2일

신소재의 출현과 적용은 위의 문제를 해결할 수 있는 새로운 재료로서 높은 관심을 모으고 있다. 복합신소재는 비강성, 비강도가 기존의 콘크리트나 강재에 비해 상대적으로 높고 비부식성, 경량성, 비전기성 등 재료적 장점과 방향성을 이용하여 우수한 역학적 성질을 얻을 수 있으며, 다양한 형태로 만들 수 있는 뛰어난 성형성을 가지고 있다. 복합신소재를 단순히 기존의 재료에 대한 대체 재료로서가 아니라 비등방성 재료의 특이한 물성을 응용한 구조물의 주재료로 사용하기 위하여 이론연구 및 실험자료의 축적이 필요하다.

미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서는 섬유강화 복합신소재를 교량, 건물, 관로 등의 건설분야에 응용하려는 연구가 10여년 전부터 활발히 진행되어 왔으며 최근에는 미국을 중심으로 전부 유리섬유 보강 폴리에스터와 비닐에스터 폴리머 복합신소재를 이용한 교량을 건설하게 되었다. 이처럼 복합신소재의 높은 활용 가능성과 엄청난 잠재 시장성 때문에 복합신소재산업뿐만 아니라 적용기술 개발에 많은 관심과 노력을 기울이고 있다. 미국은 ASCE에서 복합신소재 구조 설계지침서를 1984년에 제정하였으며, 유럽에서는 1996년에 복합신소재 구조물 설계, 제작, 시공법에 관한 표준지침서 (EUROCODE, 1997)를 제정하였다. 최근에 국내에서도 교량 바닥판용으로 복합신소재 바닥판이 개발되어 영구교량이 아닌 공사현장 가교에 적용하는 등 연구가 활발히 이루어지고 있다(이성우 등, 2001). 특히 교량건설에 대한 복합신소재의 응용은 이미 시작되었다.

본 논문은 복합신소재를 이용하여 교량상부구조 모델링을 통한 복합신소재의 화이버 보강각도 변화 등 다양한 변수연구와 축소실험을 통하여 복합신소재상부구조형식을 개발하였다. 그리고 복합신소재 상부구조는 비등방성 재료로서 바닥판과 주형의 기능을 갖고 있어 구조해석 시 예비해석과 상세해석으로 구분하여 구조해석을 실시하였으며 예비해석 시 비등방성 적층보이론의 사용가능여부를 확인하였다. 그리고 복합신소재 교량의 해석 및 설계, 제작, 설치 및 현장 재하시험을 통하여 얻어진 결과를 비교분석하였으며, 또한 공용상태에서 복합신소재 교량에 대한 내하력 평가를 실시하여 교량성능을 확인하였다. 이러한 자료는 향후 복합신소재를 이용한 소형 신설 및 노후교량 성능 개선공사 시 실제적으로 기초자료로 활용될 수 있도록 하고자 한다.

2. 구조해석 및 설계

복합신소재의 가장 큰 장점중의 하나는 섬유배열을 통해 부재의 물성을 사용자의 요구대로 설계(tailoring design)할 수 있다는 것이다. 복합신소재 교량의 설계

와 해석은 미시(Micro) 및 거시(Macro) 역학으로 이루어진다. 다음과 같이 그 과정을 요약할 수 있다. (1) 복합신소재 재료설계 (2) 복합신소재 적층설계 (3) 복합신소재 적층부재의 강성값 계산 (4) 복합신소재 구조 해석 및 단면설계

2.1 설계 기준

복합신소재 교량 상부구조의 설계는 처짐이 설계의 주요 제한사항이 되고 있다. 건설구조물용으로 많이 사용되는 복합신소재의 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer)는 콘크리트나 강재와 달리 비등방성(anisotropic) 재료이면서 강성이 낮아 동일한 하중에 대하여 처짐이 크게 발생하고 있다. 복합신소재 상부구조에 대한 설계기준은 미국의 AASHTO 설계시방서를 적용하여 설계하였다. 처짐 제한기준은 $L/800$ (L :교량지간)로 설정하였다. 그리고 교량설계하중의 경우 국내 도로교설계기준에 따른 DB24 하중을 고려한 교량상부구조를 설계하였다.

2.2 예비설계 및 실내실험

본 연구에서 복합신소재 교량 바닥판의 단면설계는 복합신소재의 제작공정을 고려하여 설계하였다. 여기서 복합신소재교량은 경간이 $L=10.0$ m 이고, 폭 $B=8.0$ m 의 제원을 갖는 복합신소재 단순교이며 철근 콘크리트 교대 위에 놓이게 될 것이다. 그리고 하중은 표준트럭하중 DB-24로 설계하였다. 교량 종방향으로 가장 불리한 위치에 표준트럭하중을 재하시켜 가장 큰 휨모멘트를 유발토록 하였다. 예비설계 단계에서 기본 단면의 소요 강성을 구하기 위해서 많은 시간을 요하는 유한요소 해석법을 이용하지 않고 식 (1)과 같은 간편 방법인 가상일의 원리(Principle of Virtual Work)를 사용하여 예비해석을 수행하였다.

$$\Delta \cdot E_1 I = \int_0^L M_L M_u dx \xrightarrow{\Delta = \frac{L}{800}} I_{min} = \frac{800}{L \cdot E_1} \int_0^L M_L M_u dx \quad (1)$$

여기서 M_u 은 지간 중앙점에서 단위하중에 의한 모멘트이고 M_L 은 실제 활하중에 의한 모멘트를 나타내며, E_1 은 종방향의 lamina의 탄성계수값이다. 그리고 L 은 교량 지간이며, I 는 설계교량 상부구조의 단면 2차모멘트를 나타낸다.

식 (1)에서 구한 값보다 큰 복합신소재 교량 상부구조 단면을 설계하면 된다. 복합신소재 교량 상부구조의 설계는 처짐이 설계의 주요 제한사항이 되므로 본 연구에서는 샌드위치 구조 형태로 기본단면을 가정하였다. 가정된 기본단면에 대한 단면2차 모멘트 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{section} = \frac{bt_{f,u}^3}{12} + bt_{f,u}(h - y - \frac{t_{f,u}}{2})^2 + \frac{bt_{f,l}^3}{12} + bt_{f,l}(y - \frac{t_{f,l}}{2})^2 \quad (2)$$

여기서 h 와 b 는 가정단면의 깊이와 폭이며, $t_{f,u}$ 와 $t_{f,l}$ 는 샌드위치 구조에 대한 상층 및 하층면재의 두께를 나타낸다. y 는 샌드위치 구조 하층면재로부터 도심축까지의 거리를 나타낸다. 따라서, 다음식 (3)을 만족하도록 설계를 수행하였다.

$$\frac{I_{section}}{I_{min}} \geq 1.0 \quad (3)$$

식 (3)을 만족하는 설계단면을 가정하는 데 있어서한 두 가지 모델을 고려하였는데 하나는 알루미늄 하나 코어코아로 만들어진 상층면재를 갖는 샌드위치구조 (Model A)이고 다른 하나는 라미네이트(laminate)의 상층면재를 갖는 구조(Model B)이다. 이 두가지 모델에 대한 휨 거동을 분석하기 위해 축소 시험체에 대한 실내 휨실험을 실시하였다. 시험체의 치수는 약1/10의 크기로서 L=100cm, B=43cm로 제작하였다. 모든 사용 재료는 유리섬유와 에폭시 수지를 사용하여 시험체를 제작하였다. 사용된 유리섬유와 에폭시 수지에 대한 재료의 물성치를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Properties of constituent materials ($10^9 N/m^2$)

재료	E_1	E_2	ν_{12}	G_{23}	G_{13}	G_{12}
Glass/Epoxy	36.9	10.1	0.33	2.0	2.9	2.9
Core (A/L)	0.27	0.27	0.11	0.11	0.11	0.11

그리고 예비해석에서 고려한 두가지 복합신소재 샌드위치 상부구조모델에 대한 구성요소를 Table 2, 3에 나타 내었다. Fig. 1과같이 3점 휨시험은 양단이 단순 지지 되어 있는 바닥판 시험편 중앙에 집중하중이 작용하는 형태이다. 실험결과와 타당성을 검증하고자 범용유한요소해석 프로그램인 LUSAS를 사용하여 해석을 수행하였다. 요소는 Thick Shell요소를 사용하였으며, 기하학적 비선형 해석을 수행하였다.

Table 2. Structural configurations and lay-up of Model A type

요소	적층패턴	두께	층수
Upper Facing	(0/90) ₂	0.5mm	4ply
Core	등방성재료 (알루미늄 하나컵)	10mm	1ply
Lower Facing	(0/90) ₂	0.5mm	4ply
Corrugate Web	(0/45/90/-45) _s	0.5mm	8ply
Laminate	(0/90) ₃	0.5mm	6ply

Table 3. Structural configurations and lay-up of Model B type

요소	적층패턴	두께	층수
Laminate	(0/90) ₃	0.5mm	6ply
Corrugate Web	(0/45/90/-45) _s	0.5mm	8ply
Laminate	(0/90) ₃	0.5mm	6ply

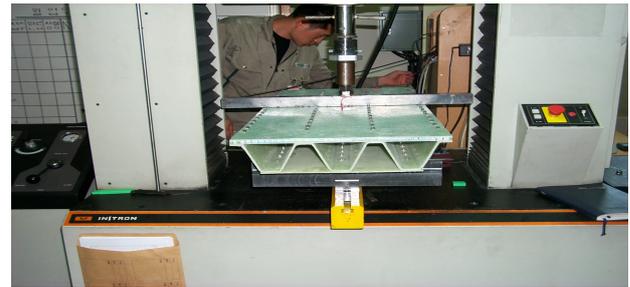


Fig. 1 Test of sub-scale specimen

Table 4. Brief summary of the sub-scale specimens' testing results

구분	Model A		Model B		비고
	실험	LUSAS	실험	LUSAS	
파괴하중	80,000N		77812.5N		LUSAS 파괴하중
처짐 (mm)	7.5	9.15	8.5	9.7	허용처짐 5.0
응력 (N/cm ²)	16092	20613	18524	23143	극한응력 67028

알루미늄 코어를 갖는 샌드위치 상부플랜지의 바닥판(Model A)과 라미네이트의 바닥판(Model B) 형식의 시험편에 대한 3점 휨시험에서 구한 하중, 처짐값 및 LUSAS 해석값의 비교를 Table 4에 각각 나타내었다. 알루미늄 코어를 갖는 샌드위치 플랜지 바닥판이 라미네이트 플랜지 바닥판 형식에 비해서 39.2%정도 내력이 강함을 알 수 있었다.

Table 4에 나타난 것처럼 실험치 처짐값이 이론상의 파괴하중을 기준하였을 때 보다 작게 나타났다. 이렇게 실험치가 더 높은 하중하에서 건디는 이유는 시험체를 만들 때 접착 및 실험의 불확실성 때문에 볼트 및 리벳 연결로 인하여 휨강성이 증대되었기 때문이며, 또한 적용한 복합신소재의 물성값이 상이하기 때문인데, 즉 이론 해석시 적용하였던 물성값은 UD (Uni-directional Ply)값이지만 실제 시험체는 보강섬유가 기지(Matrix)와 함께 합침된 구조체이므로 훨씬 더 내력이 강하게 나오는 것으로 판단된다.

2.3 상세설계

본 연구에서 제안한 복합신소재 상부구조는 복합신소재 구조물에 대한 설계관련 기준이 없으므로 처짐에 대한 안전성을 확보하기 위하여 허용처짐량을 AASHTO 기준과 같은 $L/800$ (L:교량지간)로 설정하였으며 설계하중은 국내 도로교 표준시방서에 준하면서 표준트럭하중 DB-24로 설계하였다. Fig.2은 복합신소재 대상교량의 횡단면도를 나타낸 것이다.

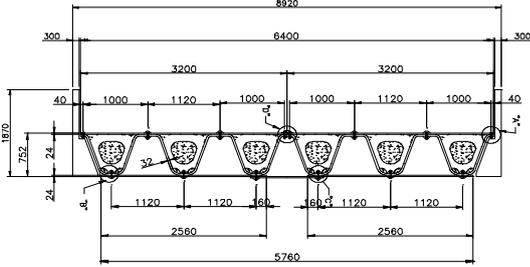


Fig. 2 Cross sections of advanced composites superstructure (all dimensions in mm)

실내 축소실험에서 나타날 수 있는 치수효과(Scale Effect)를 충분히 검토하여 웨브의 안정문제 보완설계를 충분히 하였다. 복합신소재 상부구조를 갖는 대상교량은 1등급이며, 상부는 상·하층 면재(Face)와 콜루게이트(Corrugate) 형태의 심재(Core)로 구성되어 있는 비등방성 샌드위치(Sandwich)구조이다. 본 연구에서 제안한 복합신소재 샌드위치 상부구조는 비등방성 복합면재와 전단강성이 있는 콜루게이트 심재를 갖는 샌드위치 상부구조로서 비등방성 연계성을 반드시 고려해야 한다.

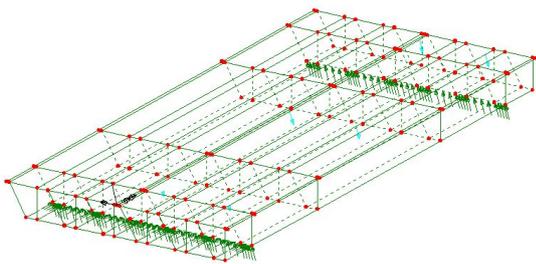


Fig. 3 Finite element model of the superstructure

Table 6에 보듯이 최대처짐이 0.9468 cm 이며, 이것은 허용처짐($L/800$)인 1.25 cm 이내로 들어움을 알 수 있다. 또한 대상모델의 최대응력은 3.156 kgf/mm^2 이다. 일반적으로 복합신소재에 대한 허용응력은 극한응력의 30~40%을 보고 있으며 허용응력 10.935 kgf/mm^2 이내로 들어움을 알 수 있다. Fig. 4는 LUSAS에 의해 해석한 대상모델의 처짐 형태를 나타

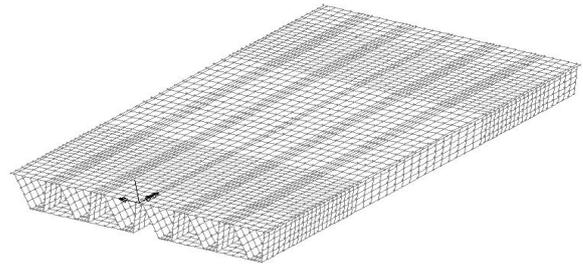


Fig. 4 Meshing of finite element model of the superstructure

낸 것이다.

본 복합신소재 대상교량 구조해석을 위해서 범용유한요소해석 프로그램인 LUSAS를 사용하였으며, 적용한 요소는 4절점 Thick Shell(QTS4) 요소이다. 요소 QTS4는 본 연구에서 수행하고자 하는 복합 적층 특성을 잘 반영해주는 요소이다(LUSAS Theory Manual, 2001). LUSAS를 사용한 이유는 복합신소재는 비등방성이므로 서로 다른 방향으로 물성값이 다르므로 각각의 적층순서대로 각 물성값을 효과적으로 입력할 수 있는 프로그램의 특성을 가지고 있기 때문이다.

해석 모델링은 Fig. 3과 같으며 상층면재의 국부좌굴 방지와 콜루게이트 거더의 간격유지를 위해 지점과 지점의 1/4, 3/4 지점에 복합신소재 횡빔을 설계하여 모델링하였다. 재료는 Glass/Vinylester로 물성치는 Table 5와 같다. 지간이 10 m 이고 DB-24 하중을 고려하였고, 자중은 1.85 tf/m^3 ($= 1850\text{ kgf/m}^3$)을 전구간에 걸쳐서 재하하였다. 이 때의 지점조건은 단순지지 즉, 한쪽은 힌지, 다른쪽은 롤러를 사용하였다. Fig. 3과 같은 모델링으로 해석을 수행하여 차량하중을 1차선과 2차선에 재하시 처짐과 응력에 대한 결과를 Table 6에 나타내었다.

Table 5. Material properties of a lamina (Glass/Vinylester, 10^9 N/m^2)

E_1	E_2	ν_{12}	G_{23}	G_{13}	G_{12}
36.9	10.1	0.33	2.0	2.9	2.9

Table 6. Comparison of predicted deflections at mid-span

재하차선	LUSAS		비등방성 Beam이론		허용처짐
	처짐 mm	응력 kgf/mm ²	처짐 mm	응력 kgf/mm ²	
1차선	4.44	2.774	4.07	1.515	12.5mm (L/800)
2차선	9.46	3.156	8.14	3.030	

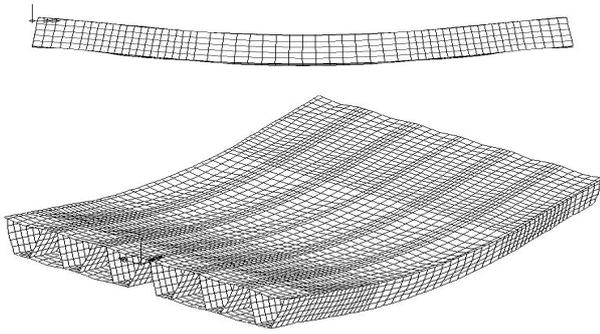


Fig. 5 Superstructure's deformation under wheel loads in FE model

Table 7. Material properties of fiber and resin

Material	E (MPa)	G (MPa)	ν	ρ (g/cm ³)
E-glass fiber	72391.35	27578.0	0.22	2.54
Vinyl ester resin	3910.26	1378.9	0.37	1.24

본 연구에서 설계된 복합신소재 샌드위치 상부구조의 면재와 심재는 유리섬유와 비닐 에스터 수지를 사용하고 있으며, 각 재료의 물성을 Table 7에 나타내었다.

구성부재에 대한 재료적 성질은 Table 4에 나타내었다. 복합신소재의 물성은 섬유와 수지의 배열에 따라 크게 좌우된다. 재료 물성을 추정하는 방법으로 많이 사용되는 재료역학적인 방법인 혼합법을 이용하였으면 사용된 식은 다음과 같다.

$$V_f = \frac{w_f}{\rho_f} \left/ \left[\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_m}{\rho_m} \right] \right. \quad (3a)$$

$$V_m = 1 - V_f \quad (3b)$$

여기서, w_f , w_m 은 섬유와 수지의 무게비를 나타내며, ρ_f , ρ_m 은 비중을 나타낸다. 혼합법을 이용하여 계산되는 Lamina의 재료물성은 식 (4)로 구할 수 있다.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m$$

$$E_2 = \frac{1}{\left[\frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \right]} \quad (4b)$$

$$G_{12} = \frac{1}{\left[\frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \right]} \quad (4c)$$

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (4d)$$

윗 식에서, E_1 , E_2 는 각각 Lamina의 섬유방향 및 섬유직각방향의 탄성계수를 말하며 G_{12} , ν_{12} 는 lamina의 면내 전단탄성계수 및 프와송 비를 나타낸다. 혼합법을 사용하여 계산된 값과 실험값의 비교를 Table 8과 같이 나타내었다.

Table 8. Properties of lamina (by simple rule of mixtures)

	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}	V_f	V_m
Calculated	30823	6222	2201	0.323	0.393	0.607
Estimated from Test	36938	10069	3344	0.325	0.413	0.587

2.4 콘크리트방호벽 및 포장 설계

교량 양단은 단순지지로 설치되었으며, 복합신소재에 대한 열팽창계수는 0.00000144/°C 이므로 신축량은 무시하였다. 따라서 교대 접속 슬래브(approach slab)와 상부구조 사이에 맹조인트로서 L형 앵글을 설치하였으며, 조인트 유간 길이는 10mm로 하였다. 접속슬래브의 두께는 일반 두께인 300mm로 하였다. 교좌장치(Shoe)는 여러가지 이점이 있는 탄성받침인 합성고무일종인 네오프레인 (Neoprene) 패드 슈(300×1000×40)를 각 교대에 4개 씩 총 8개 설치하는 것으로 설계하였다. 본 교좌장치는 연직하중에 대한 지압기능, 수평이동량에 대한 이동기능, 회전변위에 대한 변형기능을 충분히 대응할 수 있을 것으로 판단된다. 그 이유로서는 복합신소재(FRP)는 고무계열에 아주 밀착하게 접촉이 될 수 있기 때문이다. 상부구조 표면에 아스팔트 콘크리트를 50mm 타설하기전 복합신소재와 아스팔트콘크리트면 사이의 층간분리현상(delamination)을 방지하기 위하여 규사와 에폭시 수지를 이용한 아스콘 접착공법을 적용하였다. 즉, 에폭시 수지와 마찰특성이 우수한 고순도의 규사를 사용하여 강력한 접착력과 마찰력을 동시에 만족하는 기저층을 형성시켜 그 위에 아스콘을 포설함으로써 사전에 열렬현상(층간분리현상)을 방지하고자 하였다. 이전에 상부구조를 크레인으로 들기 위해 천공된 상층면재의 구멍은 에폭시로 충전시켰으며 최종 거치시 사용된 볼트는 매입용 볼트를 사용하였다. 거치 완료 후 매입용 볼트는 절단시켰다.

기 위한 것으로써 대상교량에 대해 실험차량을 실제 상황과 유사하게 재하시켜 그 때의 처짐량, 변형률 및 가속도 등을 측정하고 이론적인 계산치와 비교·검토하여 복합신소재 대상교량의 구조적 정적 및 동적응답 특성을 평가하고자 하였다. 복합신소재 교량에 대한 실험관련 자료가 거의 없으므로 사전에 충분한 자료 조사와 실험계획을 수립하였다. 이번 실험의 의의는 우선, 교량을 개통시키기 전에 복합신소재 교량의 상부구조의 강도 및 강성 등의 구조적 기능을 확인하고, 두 번째로, 교량사용 중 향후 모니터링 계측시 기준값을 정립하며, 마지막으로 계산치와 실측값과 비교함으로써 설계의 타당성을 밝히기 위함이다.

4.1 복합신소재 대상교량 및 재하차량의 제원

사용하중 상태에서 복합신소재 교량 상부구조의 거동을 파악하기 위하여 상부구조 중앙부에 설계하중(DB-24)과 동일한 내력을 발생시키는 집중하중을 재하할 수가 없어 교량설계하중의 60% 범위에서 실제 차량을 재하시킴으로서 특성을 평가하고자 하였으며 실험대상 복합신소재 교량의 현황은 Table 10과 같다.

Table 10. Type of an Advanced composites bridge

교량형식	복합신소재 콜루게이트	주형 형식	콜루게이트 거더교
교폭	8.0m	총연장	10m
차선수	2차선	설계속도	60km/hr
등급	1등급	설계하중	DB24
경간	단순교	교대	RC

4.2 현장 재하시험 및 계측위치

현장 재하시험은 Table 11에 제시된 제원을 갖는 덤프트럭을 이용하여 Fig. 8과 같이 사용하중에서 정적 및 동적주행실험을 실시하였다. 차량을 시간중앙에 좌측만 재하, 우측만 재하, 좌·우측 동시 재하실험을 실시하였고, 동적 재하실험은 주행속도 10 ~ 60km로 10km 간격으로 6회 실시하였다. 변위 및 변형률 측정 위치는 Table 12과 같다.

Table 11에 제시된 것처럼 시험차량은 적재하중 15 tonf 의 덤프트럭으로서 가능한 최대하중을 재하하기 위해 토사를 만재하여 측정된 값이며, 이를 토대로 측정 구간에서 최대응답이 발생하도록 차륜폭 등을 감안하여 복합신소재 상부구조에 차량을 재하하는 것으로 계획하였다.

Table 11. Weights of the trucks used in load tests

구분	중량 (톤)			
	전륜 (0.1W)	중륜 (0.4W)	후륜 (0.4W)	계 (1.8W)
좌측 차량	2.66	5.01	5.02	25.38
우측 차량	3.07	4.82	4.97	25.72
합계	5.73	9.83	9.99	51.1

Table 12. Location of measurement

시간	변위	변형률
L/2	좌측, 중앙, 우측	좌측, 중앙, 우측 좌우측 플랜지
L/4	좌측, 중앙, 우측	좌측, 중앙, 우측



Fig. 8 Field load testing on completed bridge

5. 현장 적용

본 연구에서 개발된 복합신소재 상부구조를 이용하여 지지 거더없이 소형교량 상부구조에 국내에서 처음으로 교량 등급 1등급으로 설계되어 현장 적용하였다. 약 1개월에 걸쳐서 상부구조 구성요소를 수직층(hand lay-up)으로 제작하여 폭이 4.0 m, 연장 10.0 m인 2개의 복합신소재상부구조로 분할 제작하여 최소의 작업 인원으로 교량건설 현장까지 운반하였다. 크레인을 이용하여 교량현장에 하차한 다음, 2개의 상부구조를 현장에서 최종 조립을 하였다. 조립을 한 후 크레인으로 한번에 기 설치된 철근콘크리트 교대 위에 거치를 하였다. Fig. 9는 복합신소재 상부구조를 갖는 교량전경이다. 복합신소재의 재료비가 고가이지만 공사기간의 획기적인 단축, 작업 노무비 및 완공 후 유지보수비용 절감 등과 같은 생애주기비용(LCC)을 고려한다면 새로운 대안 교량형식으로서 경제성을 확보할 수 있을

것으로 기대된다.



Fig. 9 Completed advanced composites bridge

6. 내하력 평가

현재 내하력 산정방법은 국내도로교표준시방서에 기술되어 있다. 기존 건설재료에 대한 공용중인 교량의 내하력 등급 평가에 대한 공용내하력(P)의 산정은 다음식과 같다.

$$P = RF \times k_s \times P_r \tag{5}$$

여기서, RF은 내하율, Ks 은 응력보정계수를 나타내며 P_r 은 설계활하중을 나타낸다. 허용응력설계법에 기초로 한 내하율 (RF) 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$RF(\text{내하율}) = \frac{\sigma_a - \sigma_d}{\sigma_l(1+i)} \tag{6}$$

여기서, σ_a 는 실측 허용응력, σ_d 는 실측 사하중에 의한 응력, σ_l 는 설계 활하중(DB, DL 하중)에 의한 응력을 나타낸다. 충격계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i = \frac{15}{40+L} (\leq 0.3) \tag{7}$$

재하시험으로부터 실측한 최대충격계수를 사용함이 원칙이나 동적재하시험을 실시하지 않은 경우 시방서에 제시한 설계충격계수를 적용한다. 응력보정계수는 다음과 같이 응답비와 충격계수비를 사용하여 두 가지 식으로 구할 수 있다.

$$k_s = \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{실측}}} \times \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}} \tag{8}$$

$$k_s = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \times \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}} \tag{9}$$

여기서, $i_{\text{계산}}$ 는 시방서에 의한 충격계수이며, $i_{\text{실측}}$ 는 동적재하시험으로부터 평가된 최대 충격계수를 나타낸다. $\epsilon_{\text{계산}}$ 는 이론적인 변형률이며, $\epsilon_{\text{실측}}$ 는 실측변형률이다. $\delta_{\text{계산}}$ 는 이론적인 변형률이며, $\delta_{\text{실측}}$ 는 실측 처짐값이다.

7. 결과 및 분석

5.1 정적실험 결과

Table 13은 재하실험을 위한 하중조건을 나타낸 것이며, 그 결과를 Fig. 10, 11 및 Table 14에 나타내었다. Fig.에서 가로축 시간은 차량을 중앙에 위치시키기 위해서 교량끝에서 중앙쪽으로 이동하는 시간을 나타내며, 중앙의 정점부근이 차량이 중앙에 위치한 경우이다. Table 12는 하중조건별 변위를 실험치와 해석치를 비교 한 것이다. 하중조건4의 경우 현장계측값과 해석결과의 오차가 14.76% 정도의 차이를 나타내고 있으나, 하중조건3의 경우는 해석치와 현장계측값이 거의 같음을 알 수 있다.

하중조건3을 제외하면 현장계측값이 더 작게 나타났다. 그 이유는 복합신소재 상부구조 제작시 접착 및 실험의 불확실성을 고려하여 체결한 볼트연결로 인한 휨강성이 증대되었기 때문이다. 또한 이론 해석시 적용하였던 물성값은 UD (Unidirectional Ply)값이지만 제작시 축방향 응력을 많이 받는 상·하층면재에서는 Bidirectional Roving과 Random Mat만을 사용하였고, 콜루게이트 웨브는 $\pm 45^\circ$ Woven Roving을 병용하여 전단력에 대한 저항력을 향상시켰기 때문에 실제 복합신소재 상부구조는 훨씬 더 내하력이 큰 것으로 판단된다. 하중조건3의 경우는 하중작용점 밑에서 변위를 측정하였으므로 국부적인 변위가 크게 발생하였기 때문에 오히려 해석치보다 크게 나타났다. 재하시험 평균 차량 하중 25.55톤으로 지간중앙에 차량 2대를 좌우측 재하하여 계측된 값이 6.87mm이며, DB-24(43.2톤)로 환산하면 11.62mm이다. 이 값은 허용처짐 12.5mm(L/800) 이내로 사용성 측면에서 구조적 안정성이 있다고 사료된다.

Table 13. Truck load configuration in load tests

하중조건	재하위치	분석항목	비고
1	지간중앙 (우측차선)	처짐, 변형율	차량1대
2	지간중앙 (좌측차선)	처짐, 변형율	차량1대
3	지간중앙 (중앙)	처짐, 변형율	차량1대
4	지간중앙 (좌우측차선)	처짐, 변형율	차량2대

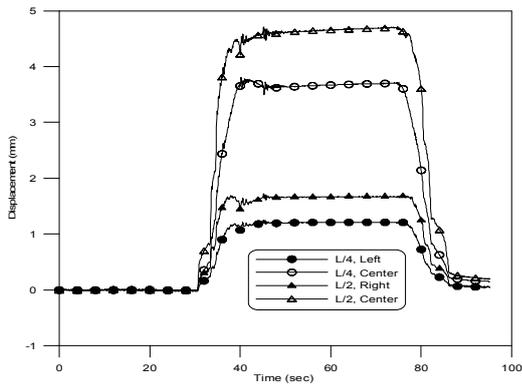


Fig. 10 Static deflections at mid-span

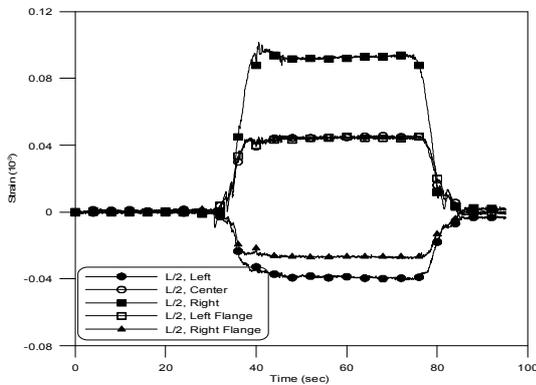


Fig. 11 Static strains at mid-span

Table 14. Comparison of experimental and predicted deflections at mid-span

하중조건	현장계측 (mm)	해석치 (mm)
1	1.12	1.76
2	1.22	1.81
3	4.72	4.70
4	6.87	8.06

5.2 동적실험 결과

복합신소재 교량 상부구조의 동적거동 특성을 확인하기 위하여 동적재하실험을 실시하였다. 주행속도는 10 ~ 60 km로 10 km 간격으로 6회 실시하였다. Fig.1 1에서 16까지는 차량하중이 중앙 재하시에 속도별 변위를 도시한 것이며, Table 13는 지간중앙점에서 현장계측의 최대동적처짐을 나타낸 것이다. Fig.에서 가로축 시간은 차량이 교량을 통과하는 시간을 나타낸다. 동적하중하에서 변형률의 측정은 정적하중 실험과 동일한 5개 위치에 대해서 분석하였으며, 차량속도 60km/hr일 때의 변형률과 가속도를 위치별로 Fig.17, 18에 나타내었다.

Table 15. Dynamic deflections at mid-span

차량속도 km/hr	10	20	30	40	50	60
동적처짐 mm	4.77	4.27	4.51	4.78	4.53	3.92

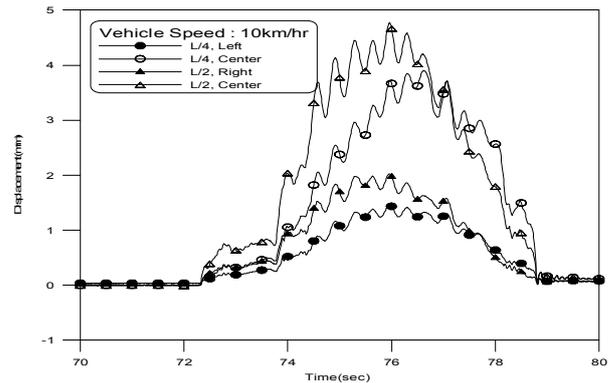


Fig. 12 Dynamic displacements at mid-span (vehicle speed 10 km/hr)

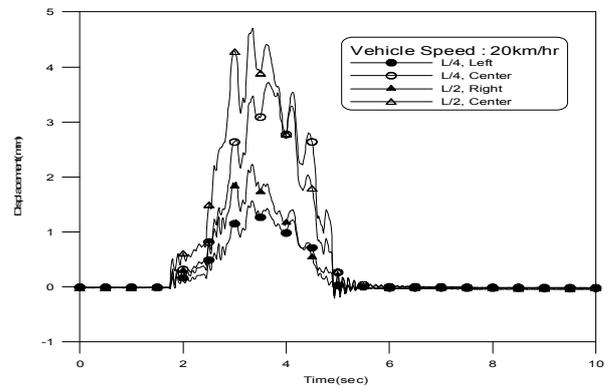


Fig. 13 Dynamic displacements at mid-span (vehicle speed 20 km/hr)

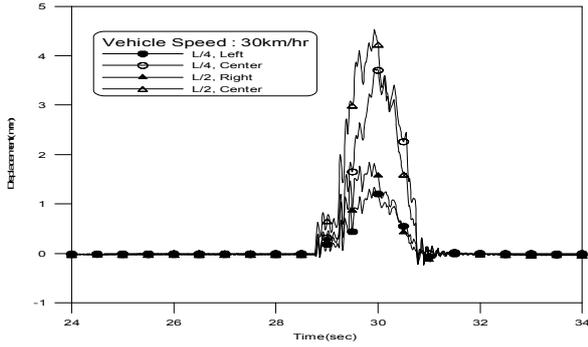


Fig. 14 Dynamic displacements at mid-span (vehicle speed 30km/hr)

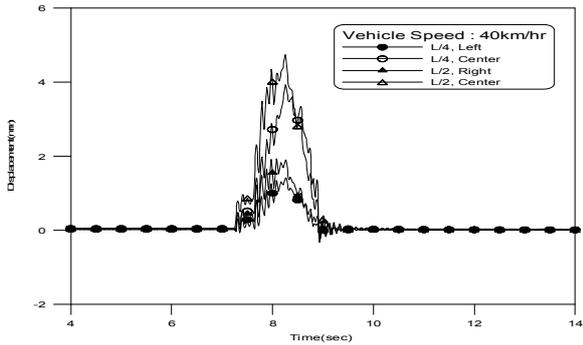


Fig. 15 Dynamic displacements at mid-span (vehicle speed 40km/hr)

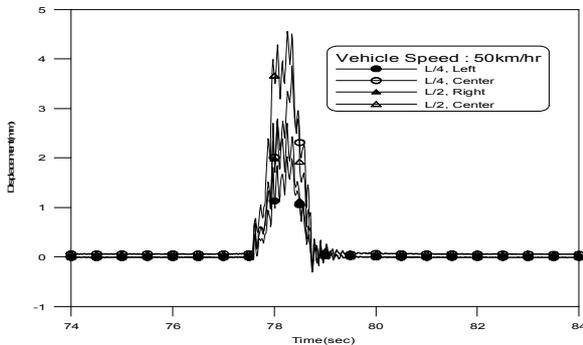


Fig. 16 Dynamic displacements at mid-span (vehicle speed 50km/hr)

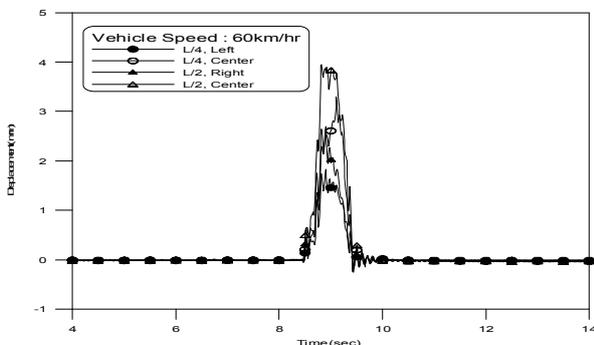


Fig. 17 Dynamic displacements at mid-span (vehicle speed 60km/hr)

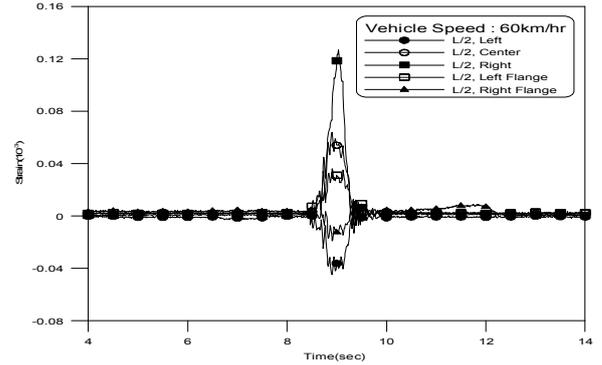


Fig. 18 Dynamic strains at mid-span (vehicle speed 60km/hr)

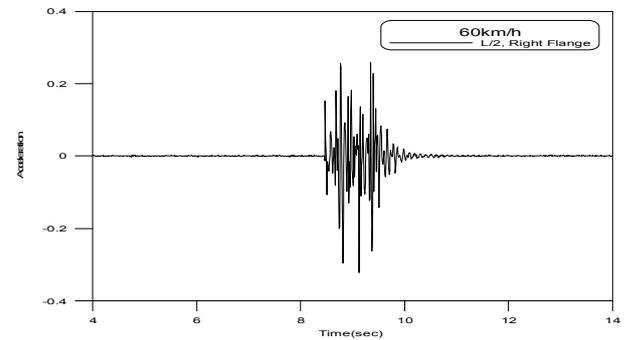


Fig. 19 Acceleration at mid-span (vehicle speed 60km/hr)

또한 복합신소재 상부구조를 갖는 교량이 보유하고 있는 고유진동수 및 진동영향을 평가하기 위하여 복합신소재 상부구조 하면 중앙부에 연직방향 가속도계를 설치하여 동적응답(Fig. 18)을 얻었으며, 그 결과 감쇠 고유진동수는 약 9.3Hz로 나타났다.

일반적으로 Paultre(1992)은 고유진동수를 예측하는 식을 $f = 82L^{-0.9}$ (L , 지간)(Paultre 등, 1992)으로 제시하였다. 이 식으로부터 예측되는 복합신소재 상부구조의 감쇠 고유진동수는 약 10.0Hz로, 측정된 값과 거의 유사한 것을 알 수 있다. 그리고 $0.5\sqrt{f}$ 곡선(Dermitz, J.R, 1999)을 사용하여 10.0Hz에 대한 가속도 응답은 $1.71 m/sec^2$ 로 나타났다. 이 수치는 Fig.19에 나타난 동적하중에 의한 측정된 가속도 응답값이 $0.021 m/sec^2$ 로 나타나서 차량하중에 의한 강제진동수와 복합신소재 교량의 고유진동수와 차이가 많이 있음을 알 수 있다.

따라서 차량진동에 의한 감쇠효과는 다소 양호하고 공명발생에 대한 가능성도 적을 것으로 기대된다. 변위는 개략적으로 비슷한 분포를 나타내고 있지만, 변형률은 동적변형률이 정적변형률보다 크게 발생하였다. 이동하중에 의해 발생하는 동적응답은 동적확대계수(DMF)로 나타내며 이는 최대 정적응답에 대한 동적

응답의 비로 정의한다.

본 연구의 DMF는 1.017 나타났다. 이처럼 충격의 영향이 도로교 표준시방서 규정보다 작은 것으로 나타났다으며, 차량속도가 40km/hr 일 때 가장 큰 충격을 주는 것으로 나타났다. 따라서 복합신소재 상부구조를 갖는 교량의 동적효과를 정적인 설계에 반영할 때 일반 교량과 동일하게 충격계수를 이용하여 적용하면 될 것으로 사료된다. 그리고 변형률에 있어서 25.9%정도 크게 나타났으며 파괴변형률(1.9317×10^{-3})의 약 7% 정도로 나타났다.

5.3 내하력 평가

위에서 언급한 대로 본 복합소재 교량에 대한 공용중의 내하력 평가를 식 (1)에서 (5)을 기초로 하여 계산하여 Table 14에 나타내었다. 상기 내하력 평가를 통하여 본 복합신소재 교량에 대한 실험 활하중 P_r 이 DB14.2임을 감안할 때 2002년에는 내하력이 DB 22.15, 2004년 DB 24.99로 나타났다. 2002년에는 시공 당시 설계활하중인 DB 24에 약간 못 미쳤으나, 국부적 처짐 등 기타 상황을 감안하여 보강한 결과 2004년에는 DB24를 넘는 값이 나타났다. 따라서, 현재 공용중인 본 복합신소재 교량은 구조성능에 이상이 없는 것으로 판단된다.

Table 16. Assessment of capacity rating

	최소 내하율 (RF)	최소 보정계수 (응답비×충격계수비)			공용내하력
		응답비*		충격계수비	
		처짐 응답비	변형률 응답비		
2002	8.78	0.23	0.30	0.77	$1.56 \times P_r$
2004		0.20	0.32	1.00	$1.76 \times P_r$

*응답비는 최소 응답비인 처짐 응답비를 사용

8. 결론

본 연구에서 제시된 복합신소재 교량 상부구조 형식에 대한 효율적인 구조해석 및 설계방법, 제작과정에 대한 연구와 현장재하시험 및 내하력 평가를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다. 국내에서 최초로 복합신소재 상부구조를 국내 법정도로 의 소형 교량구간에 현장 적용함으로써 소형 신설 및 노후교량 교체 시 상부구조의 적용가능성을 확인할 수가 있었다. 재하시험 평균 차량하중 25.55톤으로, 계측된 값이 6.87mm이며, DB-24(43.2톤)로 환산하면 11.62mm이다. 이 값은 허용처짐 12.5mm(L/800) 이내로 나타나 사용성 측면에서 구조적 안정성이 있음을 확인할 수 있었다. 처짐에 있어서 정적 및 동적시험에서 큰 값의 차이가 없었으나 변형률에 있어서는 25.9%정도 동적 변형률 값이 크며 파괴변형률(1.9317×10^{-3})의 약 7% 정도로 나타났다. 차량하중에 의한 강제진동수와 복합신소재 교량의 고유진동수와 많은 차이가 있어 차량진동에 의한 감쇠효과는 다소 양호하고 공명발생에 대한 가능성도 적을 것으로 기대된다. 또한 동적확대계수는 1.017 나타내고 있으며 이 값은 국내 도로교 표준시방서 규정보다 작은 것으로 나타났다. 따라서 복합신소재

재 상부구조를 갖는 교량의 동적효과를 정적인 설계에 반영할 때 일반 교량과 동일하게 충격계수를 이용할 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 공용중 내하력 평가결과 DB 25로 나타났다. 현재 공용중인 본 복합신소재 교량은 구조성능에 이상이 없는 것으로 판단된다. 바닥판과 주형의 기능을 갖는 복합신소재 교량 상부구조 설계, 제작, 설치, 현장재하시험 및 공용중 내하력 평가를 통하여 얻어진 기초자료는 향후 복합신소재 소형교량의 설계, 제작, 설치 및 유지 관리시 활용될 수 있을 것이다. 복합신소재의 재료비가 고가인 관계로 인하여 초기 공사비가 증가하겠지만 급속 시공과 같은 공사기간의 획기적인 단축, 유지보수비용 절감 등과 같은 생애주기비용(LCC)을 반영한다면 새로운 대안 교량형식으로서 경제성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

References

Allen, H. G. (1969). "Analysis and Design of Structural Sandwich Panels." Pergamon, Oxford.
 Clarke, J. L. (1996). Structural design of polymer composite - EUR- OCOMP design code and

handbook, E&FN Spon, London, England.

- Douglas A. Eckel II. (1998). "A Theoretical and Experimental Study on the Behaviour of Sandwich Bridge Decks Composed of Composite Material.", CCM Report 98-5, Univ. of Delaware.
- Kim, D. H. (1995). *Composite Structures for Civil and Architectural Engineering*, E&FN Spon.
- LUSAS Theory Manuel. (Ver 13.4, 2001). FEA Ltd.
- Ministry of Construction and Transportation. (MOCT). (2000). *Standards specifications for highway bridges* (in Korean), 2nd ed., Korea.
- Paultre, P., Chaallal, O., and Proulx, J. (1992). "Bridge dynamics and dynamic amplification factors-review of analytical and experimental findings." *Can. J. Civ. Eng.*, Ottawa, 19.
- Rodriguez, J. G. (1997). *Test and Evaluation Plan for the Composite Bridge*, INEL/EXT-97-00359.