

제7장

내하력 평가

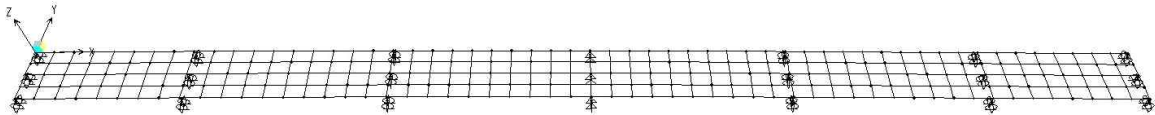
- 7.1 재하차량에 의한 구조해석
- 7.2 실측 및 해석 비교 분석
- 7.3 내하력 평가

제 7 장 내하력 평가

7.1 재하차량에 의한 구조해석

재하차량에 의한 계산응답을 구하기 위하여 공용하중에 의한 구조해석 모델링에 계량된 차량 하중을 분배하여 적용하였다.

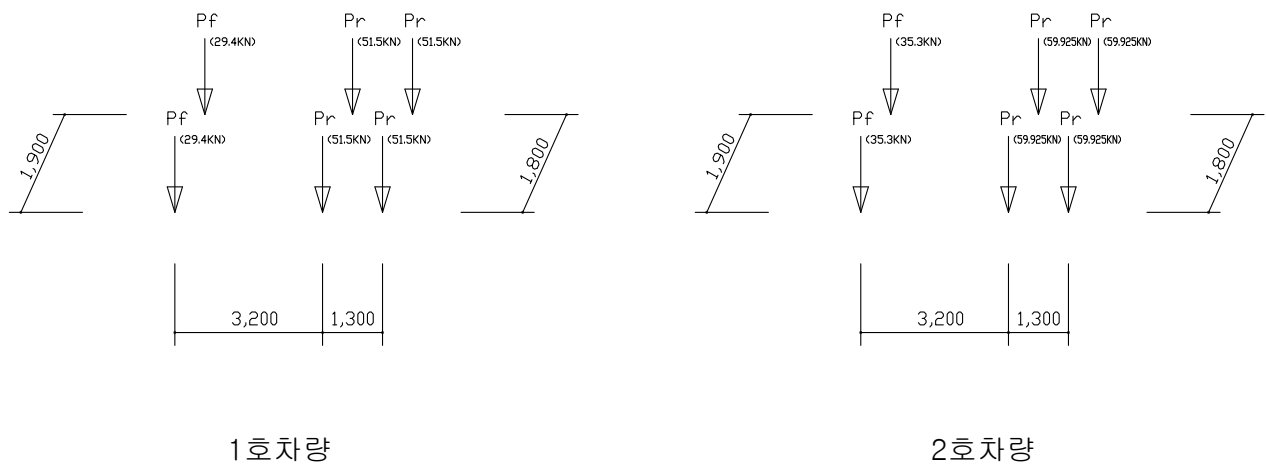
7.1.1 모델링



【그림 7.1】 해석 모델링

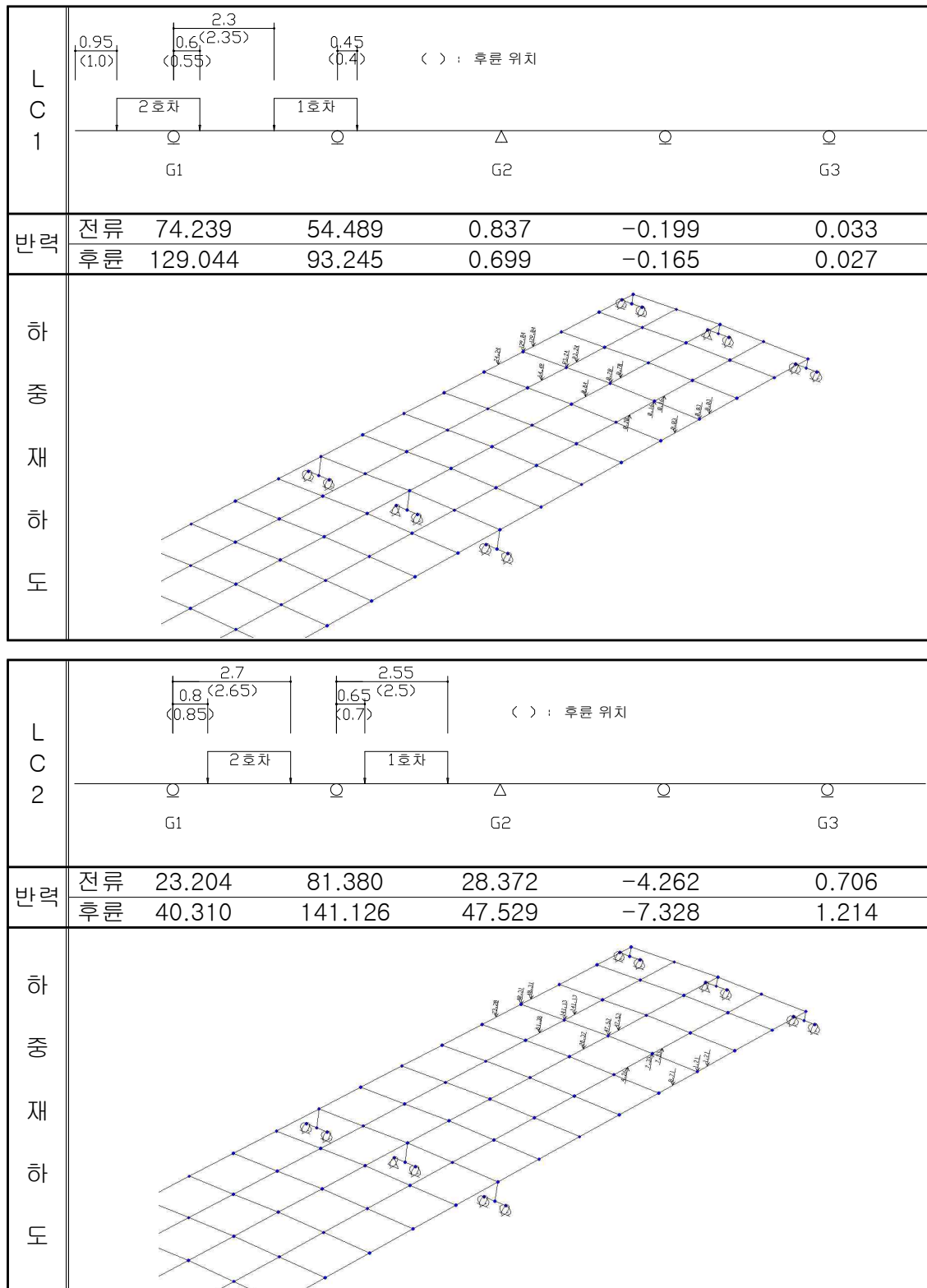
7.1.2 재하차량 하중

실물 재하차량을 다음과 같이 이상화하여 재하 하였다.



【그림 7.2】 이상화된 재하차량

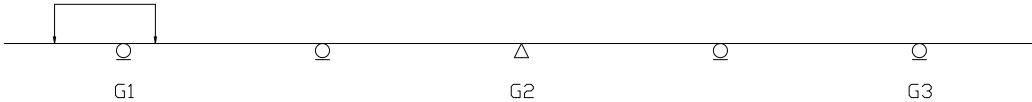
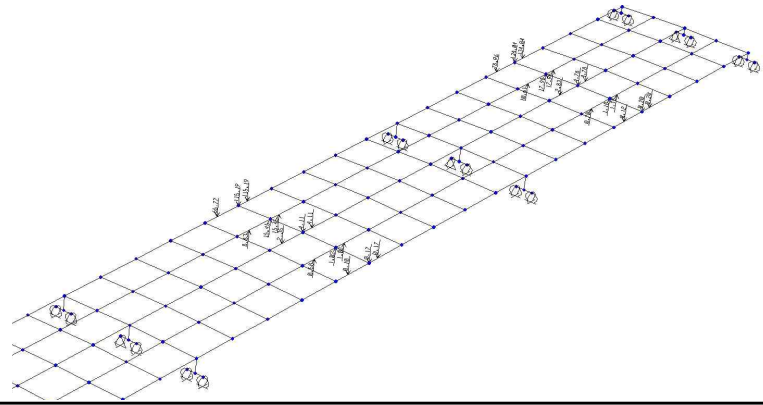
7.1.3 하중 재하도

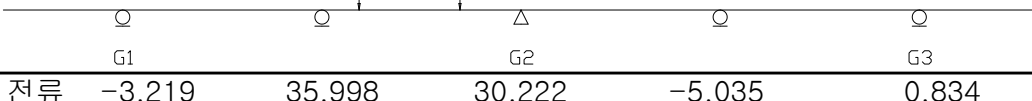
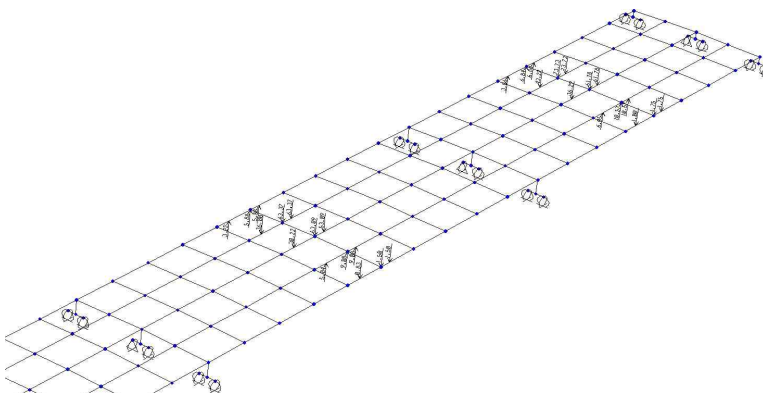


【그림 7.3】 하중재하도 - 1

L C 3	() : 후륜 위치 3.1 1.2 (3.05) (1.25) 2.95 1.05 (2.9) (1.1) 2호차 1호차 G1 G2 G3					
	반력	전류	0.484	-2.923	21.102	81.464
	후륜	0.888	-5.361	37.062	141.284	48.977
하 중 재 하 도						

【그림 7.3】 하중재하도 - 2

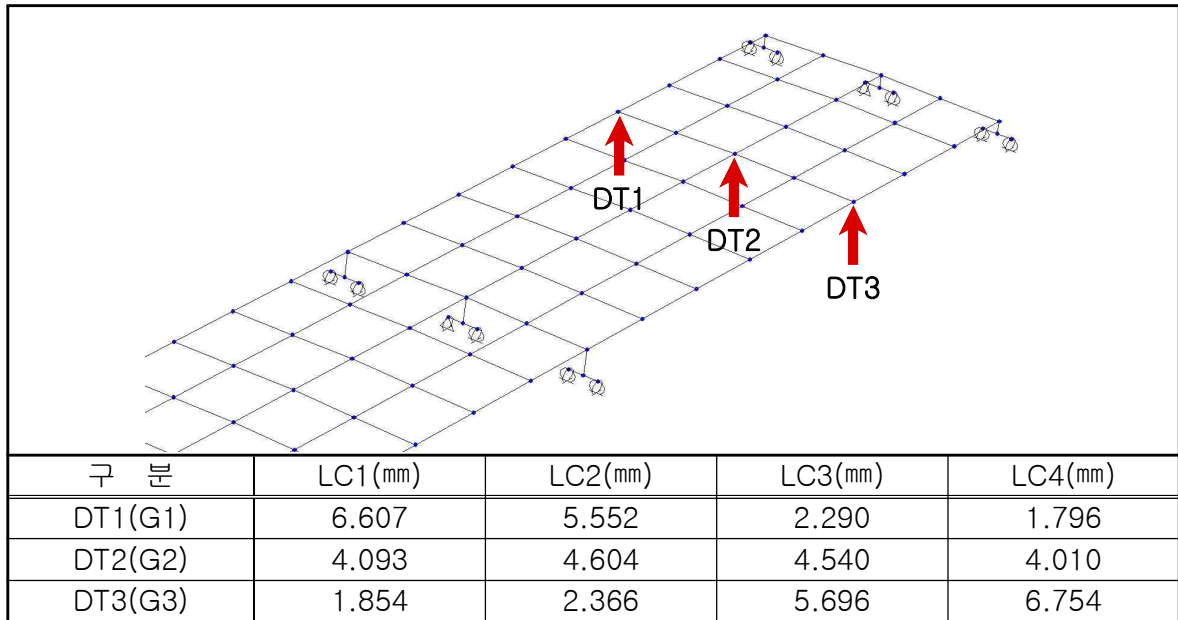
L C 5		제5경간 : 2호차, 제6경간 : 1호차					
		0.95 (1.0) 0.6 (0.55) () : 후륜 위치 					
반 력	S5	전륜	65.766	-8.835	2.355	-0.583	0.097
		후륜	115.191	-15.449	4.106	-1.017	0.168
	S6	전륜	78.964	-10.608	2.828	-0.700	0.116
		후륜	134.035	-17.976	4.778	-1.183	0.196
하 중 재 하 도							

L C 6		제5경간 : 2호차, 제6경간 : 1호차					
		2.6 0.7 (2.55) (0.75) () : 후륜 위치 					
반 력	S5	전륜	-3.219	35.998	30.222	-5.035	0.834
		후륜	-5.879	63.365	53.090	-9.080	1.504
	S6	전륜	-3.865	43.222	36.287	-6.046	1.001
		후륜	-6.841	73.731	61.775	-10.566	1.750
하 중 재 하 도							

【그림 7.3】 하중재하도 - 3

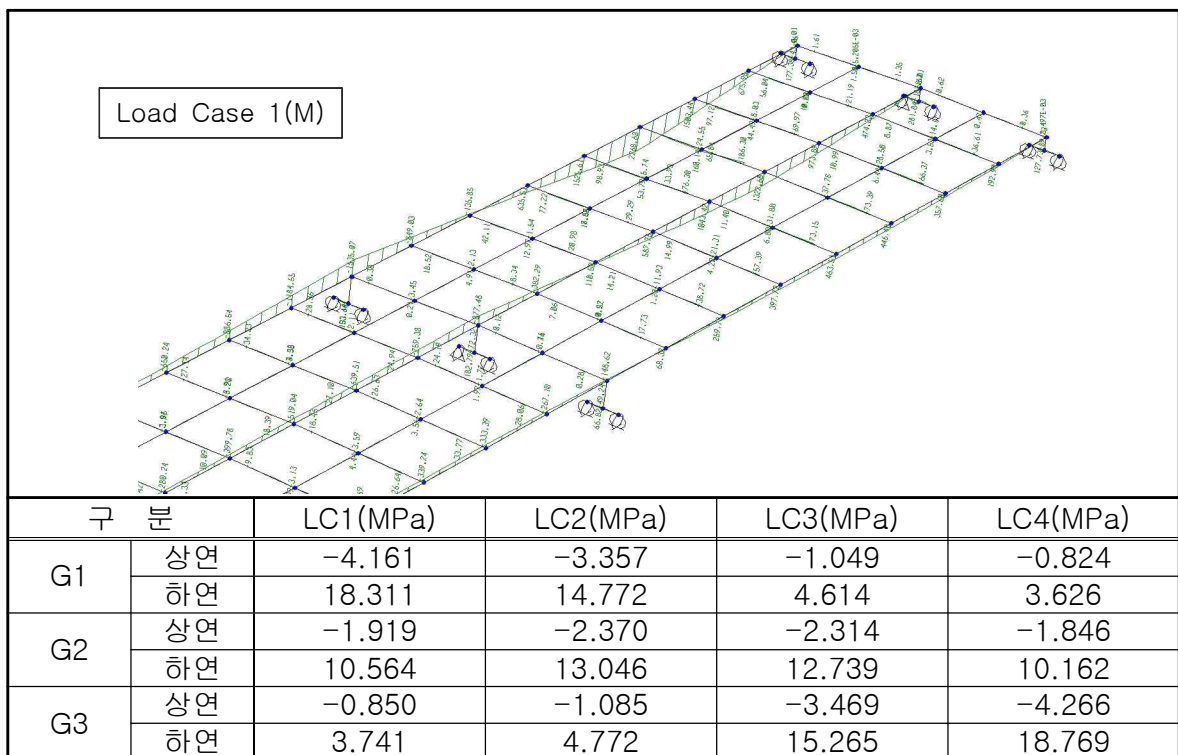
7.1.4 해석 응답

가. 정모멘트부 처짐



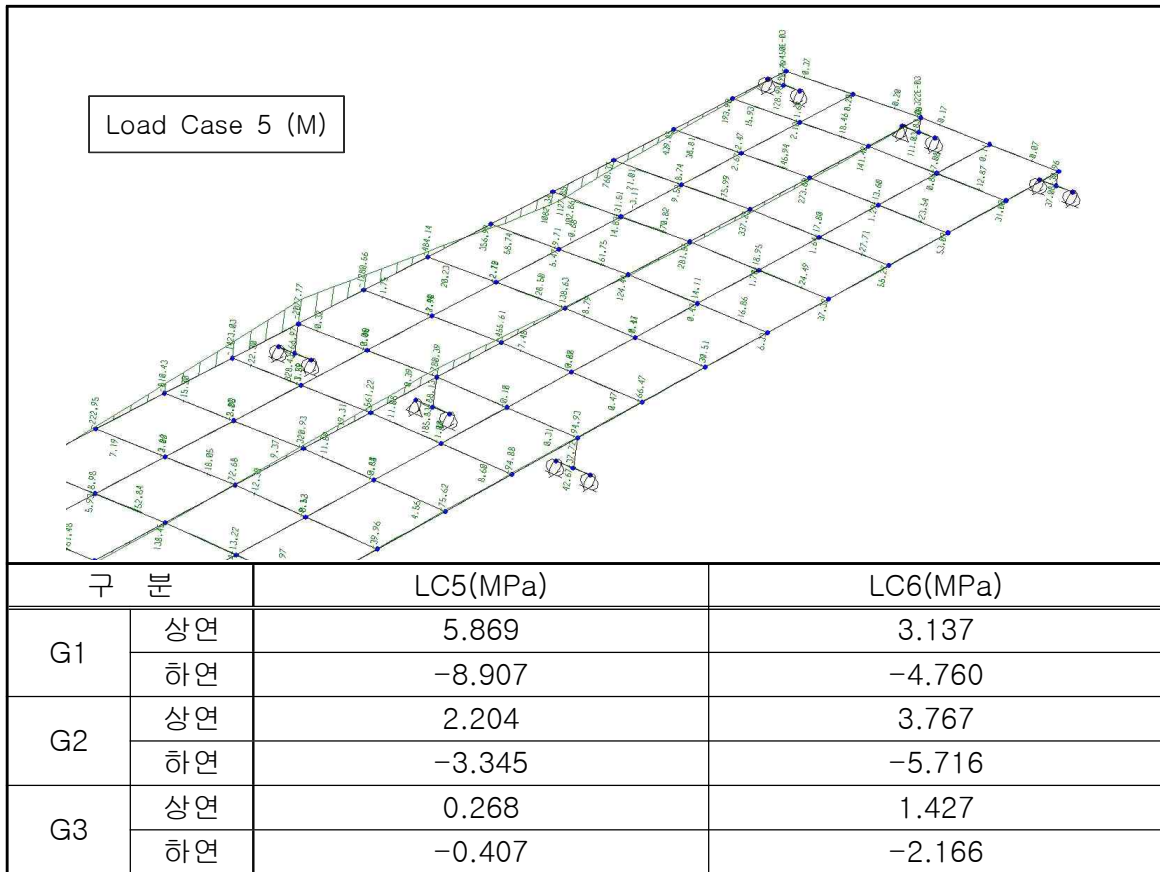
【그림 7.4】 변위도

나. 정모멘트부 응력



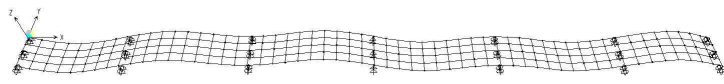
【그림 7.5】 응력분포도(정모멘트부)

다. 부모멘트부 응력



【그림 7.6】 응력분포도(부모멘트부)

라. 고유진동수

3차 모드		고유진동수(Hz)
		2.440
		고유주기(Sec)
		0.410
		연직방향 질량참여율(%)
4차 모드		고유진동수(Hz)
		3.029
		고유주기(Sec)
		0.330
		연직방향 질량참여율(%)
5차 모드		고유진동수(Hz)
		3.127
		고유주기(Sec)
		0.320
		연직방향 질량참여율(%)
6차 모드		고유진동수(Hz)
		3.337
		고유주기(Sec)
		0.300
		연직방향 질량참여율(%)
11차 모드		고유진동수(Hz)
		4.199
		고유주기(Sec)
		0.238
		연직방향 질량참여율(%)
		65.58

【그림 7.7】 고유진동수

질량참여율이 크게 시작된 모드는 11번 모드이나 실제 교량의 거동은 5번 모드와 유사한 것으로 판단된다.

7.2 실측 및 해석 비교 분석

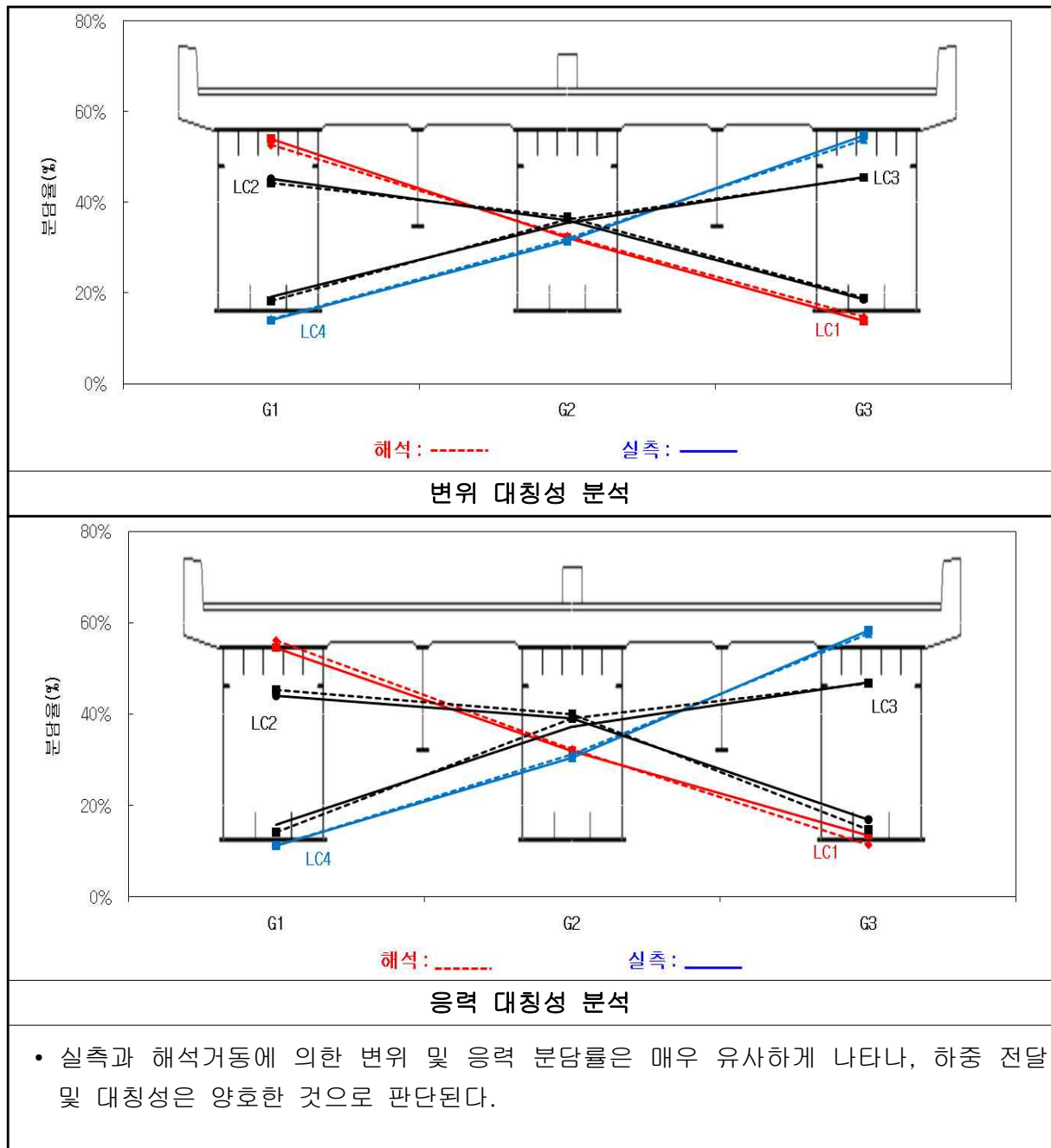
7.2.1 하중 횡분배 분석

【표 7.1】 변위 분담률

구분		실측				해석			
		G1	G2	G3	합계	G1	G2	G3	합계
LC1	처 짐(mm)	6.41	3.83	1.64	—	6.607	4.093	1.854	—
	분담률(%)	54.0	32.2	13.8	100	52.6	32.6	14.8	100
LC2	처 짐(mm)	5.18	4.14	2.14	—	5.552	4.604	2.366	—
	분담률(%)	45.2	36.1	18.7	100	44.3	36.8	18.9	100
LC3	처 짐(mm)	2.12	3.93	5.05	—	2.29	4.540	5.696	—
	분담률(%)	19.1	35.4	45.5	100	18.3	36.3	45.5	100
LC4	처 짐(mm)	1.52	3.42	5.96	—	1.796	4.010	6.754	—
	분담률(%)	14.0	31.4	54.7	100	14.3	31.9	53.8	100

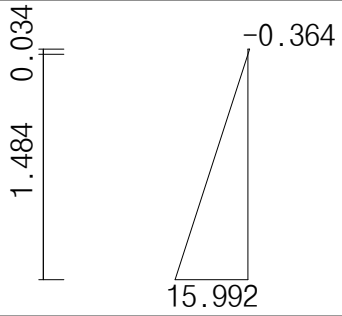
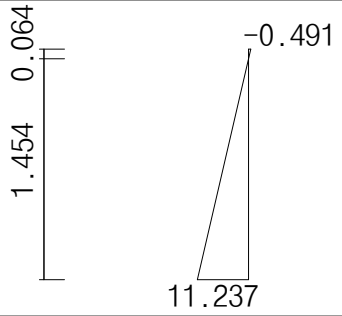
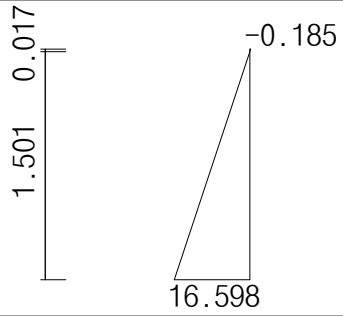
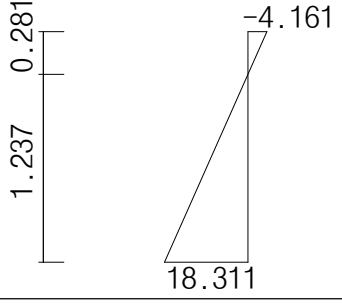
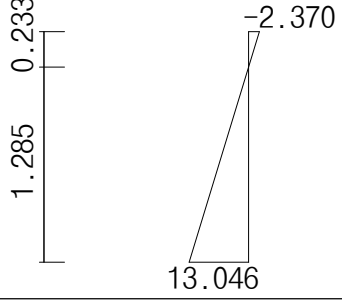
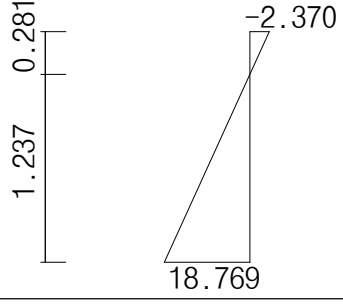
【표 7.2】 응력 분담률

구분		실측				해석			
		G1	G2	G3	합계	G1	G2	G3	합계
LC1	응력(MPa)	15.992	9.353	3.955	—	18.311	10.564	3.741	—
	분담률(%)	54.6	31.9	13.5	100	56.2	32.4	11.5	100
LC2	응력(MPa)	12.664	11.237	4.849	—	14.772	13.046	4.772	—
	분담률(%)	44.1	39.1	16.9	100	45.3	40.0	14.7	100
LC3	응력(MPa)	4.477	10.523	13.267	—	4.614	12.739	15.265	—
	분담률(%)	15.8	37.2	46.9	100	14.2	39.1	46.8	100
LC4	응력(MPa)	3.215	8.653	16.598	—	3.626	10.162	18.769	—
	분담률(%)	11.3	30.4	58.3	100	11.1	31.2	57.7	100



【그림 7.8】 대칭성 분석

7.2.2 중립축

구분	G1-LC1	G2-LC2	G3-LC4
실측			
해석			
평가	주형 상·하부에서 계측된 변형률로부터 중립축을 결정하였으며, 실측치 중립축 위치가 해석치보다 다소 상부에 위치하고 있으나 상부플랜지 경계부분에서 형성되고 있어 합성거동 상태를 보여주고 있다.		

【그림 7.9】 중립축 위치 산정

7.3 내하력 평가

7.3.1 개 요

공용내하력 산정을 위한 응답보정계수(Ks)는 재하시험 결과와 재하차량 구조해석의 처짐 및 변형률에 의한 응답비 중 불리한 계수를 적용하였으며, 콘크리트 구조물의 비선형 거동특성 및 계측오차로 인하여 변형율의 신뢰도가 부족한 Data는 제외하여 산정하였다.

7.3.2 응답보정계수(Ks) 산정

가. 산정방법

1) 변위에 의한 응답 보정계수

$$K_s \text{ (응답보정계수)} = \frac{\delta(\text{계산치})}{\delta(\text{실측치})} \times \frac{1 + i(\text{계산치})}{1 + i(\text{실측치})}$$

여기서, δ : 변 위 (mm)

i : 충격계수

2) 변형률에 의한 응답 보정계수

$$K_s \text{ (응답보정계수)} = \frac{\varepsilon(\text{계산치})}{\varepsilon(\text{실측치})} \times \frac{1 + i(\text{계산치})}{1 + i(\text{실측치})}$$

여기서, ε : 변형률 ($\mu\varepsilon$)

i : 충격계수

교량의 실측 최대 충격계수는 변위에 의한 충격계수는 0.177, 변형률에 의한 충격계수는 0.143로 측정되어 계산된 충격계수인 0.188보다 작은 값으로 측정되었다. (제 5장 재하시험 참조)

나. 응답보정계수의 산정

1) 변위에 의한 응답보정계수의 산정

응답보정계수 산출 위치는 재하점에서 먼 곳에 있는 응답은 오차의 최소화를 위하여 제외시켰다.

【표 7.3】 변위에 의한 응답보정계수 산정 결과

구분		$\delta z(\text{mm})$		Ks1	충격계수(1+i)		Ks2	응력보정계수(Ks) $K_s = K_{s1} \times K_{s2}$
		해석값	계측값		설계값	계측값		
LC1	G1	6.607	6.410	1.031	1.188	1.177	1.009	1.040
	G2	4.093	3.830	1.069				1.079
LC2	G1	5.552	5.180	1.072	1.188	1.177	1.009	1.082
	G2	4.604	4.140	1.112				1.122
LC3	G2	4.540	3.930	1.155	1.188	1.177	1.009	1.165
	G3	5.696	5.050	1.128				1.138
LC4	G2	4.010	3.420	1.173	1.188	1.177	1.009	1.184
	G3	6.754	5.960	1.133				1.143

차량 재하 위치에 따라 신뢰성 있는 Ks 값 중에서 가장 불리한 값은 LC1에서의 G1으로 Ks는 1.040이다.

2) 정모멘트부 응력(인장 변형률)에 의한 응답보정계수의 산정

【표 7.4】 응력(인장변형률)에 의한 응답보정계수 산정 결과

구분		f(MPa)		Ks1	충격계수(1+i)		Ks2	응력보정계수(Ks) $K_s = K_{s1} \times K_{s2}$
		해석값	계측값		설계값	계측값		
LC1	G1	18.310	15.992	1.145	1.188	1.143	1.039	1.190
	G2	10.564	9.353	1.129				1.173
LC2	G1	14.772	12.664	1.166	1.188	1.143	1.039	1.211
	G2	13.046	11.237	1.161				1.206
LC3	G2	12.739	10.523	1.211	1.188	1.143	1.039	1.258
	G3	15.265	13.267	1.151				1.196
LC4	G2	10.162	8.653	1.174	1.188	1.143	1.039	1.220
	G3	18.769	16.598	1.131				1.176

차량 재하 위치에 따라 신뢰성 있는 Ks 값 중에서 가장 불리한 값은 LC1에서의 G2으로 Ks는 1.173이다.

3) 부모멘트부 응력(인장 변형률)에 의한 응답보정계수의 산정

【표 7.5】 응력(인장변형률)에 의한 응답보정계수 산정 결과

구분		f(MPa)		Ks1	충격계수(1+i)		Ks2	응력보정계수(Ks) Ks = Ks1 x Ks2
		해석값	계측값		설계값	계측값		
LC5	G1	5.869	0.702	8.360	1.188	1.143	1.039	8.686
LC6	G2	3.767	0.585	6.439				6.690

차량 재하 위치에 따라 신뢰성 있는 Ks 값 중에서 가장 불리한 값은 LC6에서의 G2으로 Ks는 6.690이다.

7.3.3 허용응력법에 의한 내하력 평가

가. 평가 대상 : STEEL BOX GIRDER

나. 평가 방법

1) 내하율

$$\text{▶ 내하율 } RF = \frac{f_a - f_d}{f_l (1+i)}$$

f_a = 허용응력(MPa)

f_d = 고정하중에 의한 응력(MPa)

$f_{l(1+i)}$ = 충격을 포함한 설계 활하중에 의한 응력(MPa)

2) 내하력의 산정

$$\text{▶ 기본 내하력} () = RF \times Pr$$

RF = 내하율, Pr = 설계활하중

$$\text{▶ 공용 내하력} (P) = K \times RF \times P_r$$

K_s = 응답 보정계수

3) 적용 응답 보정 계수

【표 7.6】 허용응력법 적용시 응답보정계수 적용

구분	변위	정모멘트부 응력	부모멘트부 응력
응답보정계수(Ks)	1.040	1.173	6.690
적용	재하시험 결과와 구조해석 결과 비교를 통한 Ks값 산정 시 연직변위, 인장측 응력의 분석값을 비교한 결과 안정성을 고려하여 응답보정계수가 가장 작은 1.040을 적용하기로 한다.		

다. 기본 내하율 산정

[단면 2 G2 - 지간 중앙부]

■ 검토단면 및 조건

	주 부재 강종 : SM490B H : 1.500m B_c : 7.273m UL2 = 1.25m, UR2 = 1.25m B2 : 2.500m But = 2.700m, Blt = 2.700m 상 하 플랜지 유효 폭 Bue = 2.700m, Ble = 2.700m T_c : 0.250m T_h : 0.050m T_u : 0.020m T_l : 0.022m T_w : 0.012m U1 : 0.100m B1 : 0.100m RIBt=4-200 x 14mm, RIBl=2-200 x 14mm
--	--

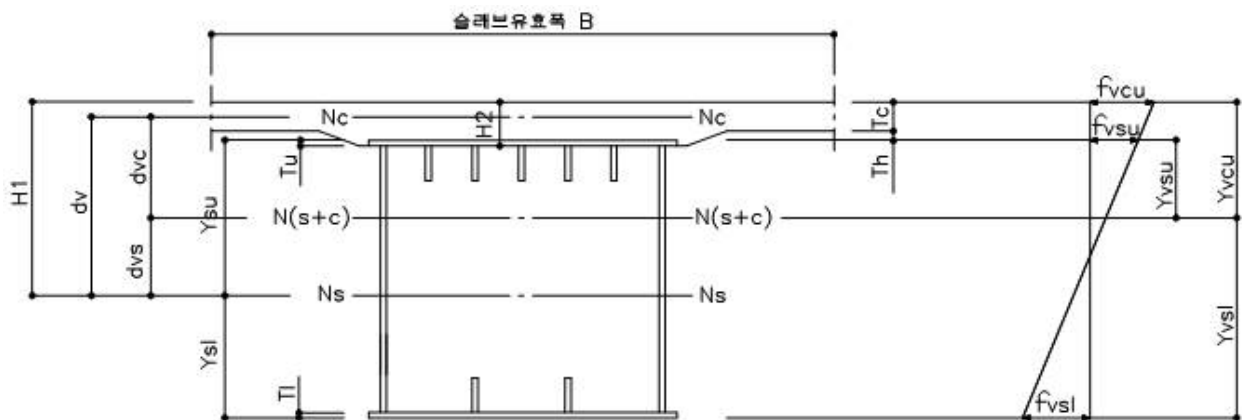
구 분	단 위	입력 DATA
Es : 강의 탄성계수	MPa	210,000
Ec : 콘크리트의 탄성계수	MPa	25,500
n : 강과 콘크리트의 탄성계수 비		8
Ms : 합성 전 고정하중에 의한 모멘트	kN·m	6347.309
Msc : 합성 후 고정하중에 의한 모멘트	kN·m	1393.652
Mv : 활하중에 의한 모멘트	kN·m	3887.581

■ 단면 제원

단 면	B(mm)	H(mm)	A(mm ²)	Y(mm)	A*Y(mm ³)	AY ² (mm ⁴)	Ix(mm ⁴)
1-UPPER FLANGE	2700.0	20.0	54000	760.0	41040000	31190400000	1800000
4-UPPER RIB	14.0	200.0	11200	650.0	7280000	4732000000	37333333.33
1-L_WEB	12.0	1500.0	18000	0.0	0	0	3375000000
1-R_WEB	12.0	1500.0	18000	0.0	0	0	3375000000
2-LOWER RIB	14.0	200.0	5600	-650.0	-3640000	2366000000	18666666.67
1-LOWER FLANGE	2700.0	22.0	59400	-761.0	-45203400	34399787400	2395800
강단면 합계			166200		-523400	72688187400	6810195800
1-RC SLAB	6150.3	250.0	1818178.7	925.0	1681815262	1555679117246	9469680529

$$A_s = 166200\text{mm}^2, A_c = 1818178.7\text{mm}^2$$

■ 응력 검토



1) 합성전

$$I_s' = A_s \cdot Y^2 + \sum I_s = 72688187400 + 6810195800.0 = 79498383200 \text{ mm}^4$$

$$\delta_s = \sum (A \cdot Y) / A_s = -523400 / 166200 = -3.149 \text{ mm}$$

$$I_s = I_s' - A_s \cdot \delta_s^2 = 79498383200 - 166200 \times (-3.149)^2 = 79496734899 \text{ mm}^4$$

$$Y_{su} = H/2 + T_u - \delta_s = 1500.0 / 2 + 20.0 - (-3.149) = 773.149 \text{ mm}$$

$$Y_{sl} = Y_{su} - (H + T_u + T_l) = 773.149 - 1542.000 = -768.851 \text{ mm}$$

$$F = b \cdot h = ((UL2 + UR2 + B2) / 2 + T_w) \cdot (H + T_u/2 + T_l/2) = 3820752.0 \text{ mm}^2$$

$$f_{su} = M_s \cdot Y_{su} / I_s = 61.731 \text{ MPa}$$

$$f_{sl} = M_s \cdot Y_{sl} / I_s = -61.388 \text{ MPa}$$

$$v = S_s / A(\text{Web}) + M_{st} / (2 \cdot F \cdot T_w) = 1.359 \text{ MPa}$$

2) 합성후

$$\begin{aligned}
 A_v &= A_s + A_c/n = 393472.3 \text{ mm}^2 \\
 I_c/n &= 1183710066 \text{ mm}^4 \\
 d_v &= Y_{su} - T_u + T_h + T_c/2 = 928.1 \text{ mm} \\
 d_{vc} &= d_v \cdot A_s / (A_c/n + A_s) = 392.0 \text{ mm} \\
 d_{vs} &= d_v - d_{vc} = 536.1 \text{ mm} \\
 Y_{vcu} &= d_{vc} + T_c/2 = 517.0 \text{ mm} \\
 Y_{vcl} &= Y_{vcu} - T_c = 267.0 \text{ mm} \\
 Y_{vsu} &= Y_{vcu} - H_2 + T_u = 237.0 \text{ mm} \\
 Y_{vsl} &= Y_{vsu} - (H + T_u + T_l) = -1305.0 \text{ mm} \\
 I_v &= I_s + I_c/n + A_s \cdot d_{vs}^2 + A_c/n \cdot d_{vc}^2 = 163379204440 \text{ mm}^4 \\
 F_v &= b \cdot h_v = ((UL_2 + UR_2 + B_2) / 2 + T_w) \cdot (H + (T_u + T_c/n)/2 + T_l/2) = 3860002.0 \text{ mm}^2 \\
 f_{vcu} &= M_{sc} \cdot Y_{vcu} / (n \cdot I_v) = 0.551 \text{ MPa} \\
 f_{vcl} &= M_{sc} \cdot Y_{vcl} / (n \cdot I_v) = 0.285 \text{ MPa} \\
 f_{vsu} &= M_{sc} \cdot Y_{vsu} / I_v = 2.022 \text{ MPa} \\
 f_{vsl} &= M_{sc} \cdot Y_{vsl} / I_v = -11.131 \text{ MPa} \\
 v &= S_{sc} / A(\text{Web}) + M_{sct} / (2 \cdot F_v \cdot T_w) = 0.409 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

3) 활하중

$$\begin{aligned}
 f_{vcu} &= M_v \cdot Y_{vcu} / (n \cdot I_v) = 1.538 \text{ MPa} \\
 f_{vcl} &= M_v \cdot Y_{vcl} / (n \cdot I_v) = 0.794 \text{ MPa} \\
 f_{vsu} &= M_v \cdot Y_{vsu} / I_v = 5.640 \text{ MPa} \\
 f_{vsl} &= M_v \cdot Y_{vsl} / I_v = -31.051 \text{ MPa} \\
 v &= S_v / A(\text{Web}) + M_{vt} / (2 \cdot F_v \cdot T_w) = 17.838 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

라. 내하력 평가

【표 7.7】 허용응력법에 의한 내하력 평가

구 분		STEEL BOX GIRDER	
		상연	하연
응력 (MPa)	허용응력(fa)	241.93	-190
	합성전고정하중(fd)	61.731	-61.388
	합성후고정하중(fd)	2.022	-11.131
	활하중 fl(1+i)	5.640	-31.051
응답보정계수(Ks)		1.040	1.040
공용하중(DB)		24	24
내하율(RF)		31.592	3.783
기본내하력		758.21	90.79
공용내하력(DB)		788.54	94.42
통과하중(kN)		13,909.85	1,665.57
평가		DB - 24 이상	

7.3.4 강도설계법에 의한 내하력 평가

가. 평가 대상 : STEEL BOX GIRDER 바닥판

나. 평가 방법

1) 내하율

$$\text{▶ 내하율 RF) = } \frac{\phi M_n - \gamma_d M_d}{\gamma_1 M_L (1+i)}$$

ϕM_n = 저항모멘트, $\gamma_d M_d$ = 고정하중에 의한 모멘트

$\gamma_1 M_{L(1+i)}$ = 충격을 포함한 활하중에 의한 모멘트

2) 내하력의 산정

$$\text{▶ 기본 내하력(P) = RF} \times P_r$$

RF = 내하율, P_r = 설계활하중

$$\text{▶ 공용 내하력(P) = } K_s \times \text{RF} \times P_r$$

K_s = 응답 보정계수

3) 응답 보정 계수 적용

허용응력설계법의 K_s 와 동일 적용

다. 내하력 평가

【표 7.8】 강도설계법에 의한 내하력 평가

구 분	바닥판	
	캔틸레버부	중앙 지간부
설계휨강도(KN·m)	132.971	105.961
고정하중에 의한 모멘트 (KN·m)	6.876	4.625
활하중에 의한 모멘트 (KN·m)	14.857	32.240
응답보정계수 (K_s)	1.040	1.040
설계하중(DB)	24	24
내 하 율 (RF)	3.883	1.442
기 본 내 하 력	93.19	34.61
공 용 내 하 력	96.92	35.99
통 과 하 중 (kN)	1,709.67	634.86
평 가	DB - 24 이상	

7.3.5 고찰

재하시험 경간에 대하여 공용내하력을 평가한 결과 모두 설계내하력 DB24 이상을 보유한 교량으로 평가된다.

【표 7.9】 내하력 평가 결과

구 분	주형	바닥판	비 고
공용 내하력	DB 94.4	DB 35.9	설계내하력 DB 24 이상
통과하중(kN)	1,665	634	