

# 응답면 기법에 의한 아치교량 시스템의 붕괴 위험성평가(I) : 요소신뢰성

조태준<sup>†</sup> · 방명석<sup>\*</sup>

한국철도시설공단 KR기술연구소 · <sup>\*</sup>충주대학교 안전공학과  
(2006. 7. 20. 접수 / 2006. 12. 14. 채택)

## Risk Assessment for the Failure of an Arch Bridge System Based upon Response Surface Method(I): Component Reliability

Taejun Cho<sup>†</sup> · Bang, Myung Seok<sup>\*</sup>

Korea Rail Network Authority, KR Technical Research Institute

<sup>\*</sup>Department of Safety Engineering, Cheongju University

(Received July 20, 2006 / Accepted December 14, 2006)

**Abstract :** Probabilistic Risk Assessment considering statistically random variables is performed for the preliminary design of a Arch Bridge. Component reliabilities of girders have been evaluated using the response surfaces of the design variables at the selected critical sections based on the maximum shear and negative moment locations. Response Surface Method(RSM) is successfully applied for reliability analyses for this relatively small probability of failure of the complex structure, which is hard to be obtained by Monte-Carlo Simulations or by First Order Second Moment Method that can not easily calculate the derivative terms of implicit limit state functions. For the analysis of system reliability, parallel resistance system composed of girders is changed into parallel series connection system. The upper and lower probabilities of failure for the structural system have been evaluated and compared with the suggested prediction method for the combination of failure modes. The suggested prediction method for the combination of failure modes reveals the unexpected combinations of element failures in significantly reduced time and efforts compared with the previous permutation method or system reliability analysis method.

**Key Words :** arch bridge, risk assessment, system reliability, response surface method

### 1. 서 론

건설공사는 공사종류별로 다른 공정과 관리계획 때문에 공사 중 위험성평가와 대책수립에 어려움이 많다. 우리나라처럼 구조물의 규모와 기능이 준공시 마다 새로운 기록을 수립하는 특이한 경우에는 시공 경험 및 기존자료의 부족 때문에 전문가의 지식과 판단에 의존해야 하므로, 계획 및 설계단계에서 이를 정량화하여 위험성을 평가하고 안전관리계획을 수립해야 할 필요성이 더욱 크다. 과거 1970년대에 핵발전소의 위험도 분석을 위해서 도입한 파괴모드 결과분석법(FMEA, Failure Mode and Effect Analysis), 위험조정법(HOM, Hazard Operability Method), 사건수 분석법(ETA, Event Tree Analysis) 등의 여러 방

법들이 위험도평가를 위하여 사용되어 왔다. 그중에서도 귀납적 분석방법 중의 하나인 사건수분석법(ETA, Event Tree Analysis)이 가장 대표적인 위험도 분석기법으로 사용되어 왔다<sup>1)</sup>. 설계단계에서는 설계 하중 및 저항에 관련된 기하학적 또는 재료학적 변수의 확률 분포를 합리적으로 가정 또는 확보할 수 있으므로 통계학적 파괴확률의 평가가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 아치교량의 건설에서 발생 가능한 사건 중 설계, 재료, 시공 상의 오류가 있을 경우, 시스템의 붕괴를 유발할 수 있는 중요한 사건들에 대해서 최종 설계단계의 무작위 변수들을 이용하여 정량적인 위험도 평가에 관한 연구를 수행하고, 응답면기법(RSM, Response Surface Method)<sup>2)</sup>에 의한 시스템신뢰성 해석을 통하여 시공 전에 발생 가능한 위험도를 파악하고 손실을 최소화할 수 있는 방법을 연구하고자 한다.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
cho\_taejun@hanmail.net

## 2. 구조물의 신뢰성평가

구조신뢰성은 크게 요소신뢰성(Component Reliability)과 체계신뢰성(System Reliability)의 두 가지로 분류될 수 있다. 요소신뢰성해석에서는 한계상태함수의 형태나 확률변수의 특성 등에 따라 정식화기법, 해석방법 등이 다양하게 적용된다. 한계상태함수가 음함수(Implicit Function)인 경우 이를 정식화하는 방법에는 응답면기법과 확률유한요소법(Probabilistic Finite Element Method) 등이 사용될 수 있다. 이와 같이 정식화된 한계상태함수의 파손확률을 해석하는 방법으로는 근사해석법으로서 제 1계 2차모멘트방법인 FOSM방법 그리고 Monte-Carlo Simulation 기법 등이 있다. 구조물 시스템은부재간의 연결을 독립관계로 가정한다면 가장 약한 부재의 파손으로 시스템의 붕괴를 일으키는 직렬연결구조와 가장 강한 부재의 파손으로 시스템의 붕괴를 일으키는 병렬저항 연결구조로 분류할 수 있다. 병렬연결구조는 연성재료와 취성재료 사이에 상이한 저항 구조를 갖는다<sup>3)</sup>. 또한 각 연결구조는 요소간의 상관관계에 따라서 완전 비상관 관계(독립관계), 완전상관관계 또는 그 중간관계를 갖게 된다.

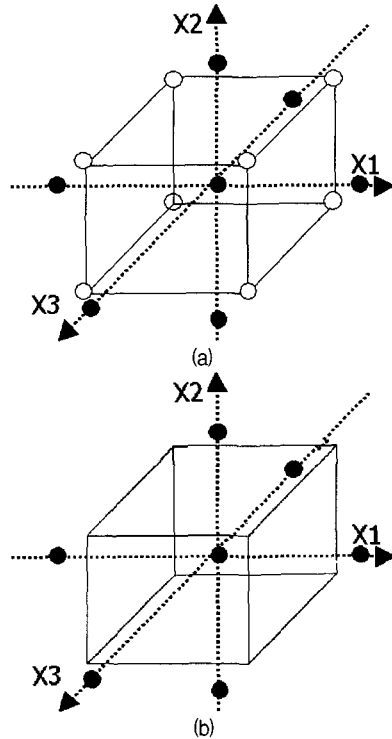


Fig. 1. Central and Axial Points in Central Composite Design (a) and Bucher-Bourgund Method (b).

### 2.1. 응답면 분석기법에 의한 요소신뢰성평가

Leve II의 모멘트법은 구조물의 안전성을 평가하기 위한 한계상태식이 확률변수들의 양함수(Explicit Function) 형태로 정의될 때 사용이 가능한 반면, 확률유한요소법이나 응답면기법은 구조물 응답의 변동특성을 파악하거나 음함수적인 한계상태식에 대한 파괴확률을 산정하는데 유용하게 이용될 수 있다<sup>2,4,5)</sup>. 이 기법은 근사화의 정확도, 근사화를 위해 필요한 구조해석의 횟수, 그리고 구조해석을 수행하여야 할 표본점의 선정이 중요하며, 표본점의 선정은 각 확률변수의 중심점을 정하여 그 주변으로 일정거리만큼 떨어져 있는 점을 취하는 방법 등이 제안되었다. 응답면 기법 중 중심합성계획법(Central Composite Design, Fig. 1(a))은 응답면을 연성항(Cross-coupled Term)이 포함된 2차 다항식으로 표현함으로써 회귀방정식이 직교성, 회전성, 정도의 균일성이라는 통계적 성질을 갖도록 하는 방법이며, Bucher-Bourgund<sup>6)</sup>법은 연성항이 없는 이차 다항식으로 근사식을 표현하여 표본점의 수를 줄일 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 Bucher-Bourgund법을 이용하여 중심점(무작위 변량의 평균값)과 중심점에서 표준편차 만큼 떨어진 3개의 축점을 선정하여 응답함수를 구성하였다(Fig. 1 (b)).

## 3. 응답면 기법에 의한 신뢰성 평가 및 검증

### 3.1. 휨파괴에 대한 응답면 분석기법의 검증

사하중과 활하중이 작용할 때의 유한요소해석결과로부터 최대 정모멘트 및 부모멘트가 발생하는 위치에서의 단면 깊이 400mm인 연속 캔틸레버빔의 휨파괴에 대한 최대 위험단면인 고정지점에 대한 극한 휨강성과 최대발생모멘트를 이용하여 한계상태 방정식을 구성하였다.

RSM + AFOSM(Rackwitz-Fiessler Method<sup>7)</sup>)방법을 사용할 경우:

$$g(\cdot) = M_{G_s} \cdot N_{G_{MR}} - \left\{ a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i + \sum_{i=4}^6 a_i (x_i)^2 \right\} \quad (1)$$

MCS 또는 AFOSM 방법을 사용할 경우:

$$g(\cdot) = M_{G_s} \cdot N_{G_{MR}} - M_{G_{MI}} \cdot N_{G_{MI}} - M_{G_{LU}} \cdot N_{G_{LU}} \quad (2)$$

여기서,  $g(\cdot)$ 은 한계상태함수로서 0보다 작은값을 보이면 단면의 항복을 의미한다.  $N_{G_{MR}}$ 은 단면의 극

한저항강도( $M_G$ )에 대한 공칭비,  $a_i$ 는 무작위 변량에 대한 응답면계수이다. 극한저항강도( $M_G$ )는  $8.96\text{kN} \cdot \text{m}$ 로서 주철근  $A_s$ 가  $87.972\text{mm}^2$  보다 클 경우 극한외력모멘트  $7.3\text{kN} \cdot \text{m}$ 보다 크다.

한계상태방정식의 입력변수제원은 Table 1과 같고, 극한저항강도는 첫 번째 변수인  $x_1$ 이 Table 2와 같이 87.972에서  $351.90\text{mm}^2$ 까지 변화할 때 각각 Table 2의 우측열의 극한저항강도와 같이 변화한다. 7회의 입출력 변수에 대한 응답면 회귀분석을 통해서 7가지의 계수가 Table 2의 하단과 같이 결정된다. 결정된 계수를 이용한 한계상태 방정식은 MCS, AFOSM으로 등가 정규분포에 대한 파괴확률을 구하여 Table 3과 같이 비교하였다.

세 가지 계산방법의 비교결과, 사용 주철근이 늘어나면서, 응답면기법으로 계산된 신뢰성지수가 약간 작아졌을 보여주며 오차율은 1-6%를 보여준다.

Table 1. Statistical values for the considered random variables (Unit N-mm)

Random Variables	Name	Mean	Bias Factor	C.O.V.	Distribution Type
Area of Reinforcement	$X_1$	87.97-351.90	1.000	0.120	Normal
Yield Strength of Reinforcement	$X_2$	300	1.050	0.015	Normal
Depth	$X_3$	400	1.050	0.058	Normal
Resistant Moment	$X_4$	$8.96e6-3.57e7$	1.050	0.150	Normal

### 3.2. 응답면기법에 의한 대상 아치교량의 위험도 평가

#### 3.2.1. 대상아치교

본 연구에서 적용 예로 사용된 교량은 기본설계가 완료된 실 교량으로 왕복2차선의 교폭 14.3m, 전체길이 360m의 강재 아치교로 극한 한계상태에 대한 저항을 검토하도록 설계되었다. 각 하중조합에서의 부재력을 구하기 위한 유한요소해석 모델은 Fig. 2와

Table 2. Coefficients of RSM for 3 cases with varying the area of reinforcements(N-mm)

Cases of analyses	Random Variables(N-mm)					$A_s = 87.972$	$A_s = 175.944$	$A_s = 351.9$
	$x_1$	$x_1$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$M_{N1}$	$M_{N2}$	$M_{N3}$
CASE1	87.972	175.94	351.90	300	400	8.95863E+06	1.78882E+07	3.56616E+07
CASE2	89.292	178.58	357.18	300	400	9.09279E+06	1.81557E+07	3.61930E+07
CASE3	86.652	173.31	346.62	300	400	8.82447E+06	1.76208E+07	3.51301E+07
CASE4	87.972	175.94	351.90	317	400	9.47734E+06	1.89222E+07	3.77157E+07
CASE5	87.972	175.94	351.90	283	400	8.43983E+06	1.68539E+07	3.36059E+07
CASE6	87.972	175.94	351.90	300	406	9.09323E+06	1.81574E+07	3.62000E+07
CASE7	87.972	175.94	351.90	300	394	8.82404E+06	1.76191E+07	3.51232E+07
Coefficients of the response surfaces for the limit state	a0					-1.810E+07	-3.574E+07	-7.26E+07
	a1					1.017E+05	9.881E+04	103216.633
	a2					3.061E+04	6.114E+04	122537.372
	a3					2.232E+04	4.375E+04	89733.3515
	a4					-1.202E-04	7.178E+00	-3.601332
	a5					-1.557E-01	-5.190E-01	-2.768169
	a6					1.389E-01	1.389E+00	-2.27E-05

Table 3. The reliability index and Probability of failure by three different evaluation methods for 3 ultimate resistance cases with varying the area of reinforcements

Reinforcement	Reliability/Probability of Failure	RSM	Rackwitz-Fiessler Method <sup>7)</sup>	MCS	Comparison RSM*2/(AFOSM+MCS)
$A_s = 87.972\text{mm}^2$	Reliability	1.798	1.816	1.862	0.99
	Probability of Failure	3.60890E-02	3.46587E-02	3.12828E-02	1.04
$A_s = 175.94\text{mm}^2$	Reliability	7.894	8.219	NA*	0.96
	Probability of Failure	1.44329E-15	1.11022E-16	NA*	13
$A_s = 351.9\text{mm}^2$	Reliability	11.776	12.582	NA*	0.94
	Probability of Failure	0.0	0.0	NA*	1.00

\* 파괴확률이 1.0E-08보다 작은 파괴확률은 Monte-Carlo Simulation 방법으로 계산이 불가능에 가까워진다.

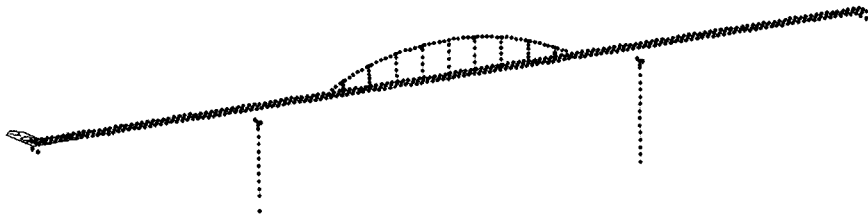


Fig. 2. Finite element model for the target bridge.

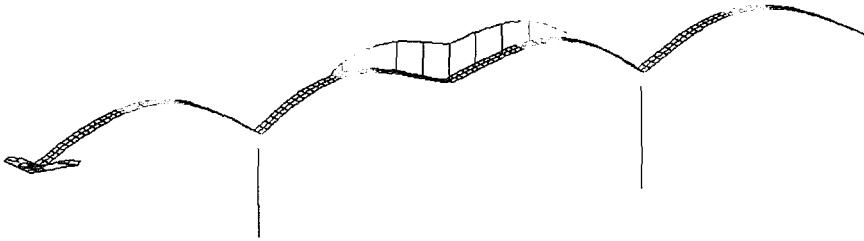


Fig. 3. Deformed shape of the target bridge in moving load case.

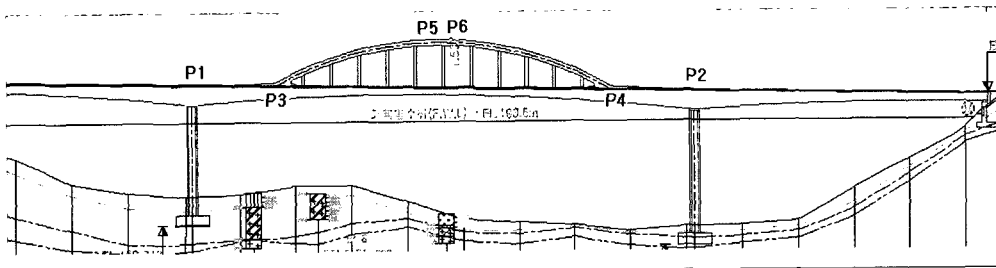


Fig. 4. Side view and Observation Points for the target bridge.

Table 4. Observed points with failure modes of the target bridge

Name of the failure of component	Failure Events by	Locations for the failure of component
P1, P2	Bending of the girder	
P3, P4	Shear force of the girder	
P5, P6	Buckling and Bending of Arch ribs	

같이 총 절점 1494 개, 총 요소 1570개의 프레임 요소로 구성되었다. Fig. 3은 이동활하중이 작용하는 하중 조합에 대한 변형형상이다. 강재 아치교의 위험도평가를 위하여 Fig. 4, Table 4와 같이 유한요소 응력해석결과로부터 요소파괴가 가능한 위험단면을 결정하였다.

### 3.2.2. 신뢰성 분석시 사용되는 무작위 변량과 확률분포

신뢰성에 기초하여 각 붕괴시나리오의 발생확률을 평가하기 위해서는 선행적으로 각 확률 변수의 표준편차나 C.O.V(Covariance of Variation)와 같은 불확실 값의 정보가 필요하다. 이러한 불확실 값의 결정은 공학적인 관점에서 붕괴 시나리오의 신뢰성을 평가하는데 없어서는 안되는 구성요소이다. 정확한

신뢰성 해석을 위해서 확률분포 불확실 값의 추정은 합리적으로 이루어져야 하며 그러기 위해서는 통상 실험이나 시뮬레이션에 의한 방법이 사용되고 있다. Table 5는 아치교의 위험도를 평가하는데 사용되는 무작위 변량의 확률분포 특성값을 나타낸다.

Table 5. Statistical values for the considered random variables for the target bridge

Random Variables	Bias Factor	C.O.V.	Distribution Type	References	
Arch-rib	Resistant Moment $M_R$	1.12	0.135	Log normal	Tabsh-Nowak[1994] <sup>8)</sup>
	External Moment $M_S$	1.05	0.100	Log normal	Nowak[1999] <sup>9)</sup>
Girder	Elasticity of Steel $E_S$	1.00	0.060	log normal	Tabsh-Nowak[1994] <sup>8)</sup>
	Resistant Moment $M_R$	1.08	0.12	Log normal	Tabsh-Nowak[1994] <sup>8)</sup>
	Shear Capacity $S_R$	1.08	0.12	Log normal	Nowak[1999] <sup>9)</sup>
	External Moment $M_S$	1.05	0.100	Normal	Nowak[1999] <sup>9)</sup>
	External Shear Force $S_S$	1.05	0.100	Normal	Nowak[1999] <sup>9)</sup>

### 3.3. 아치교량의 요소신뢰성 평가

#### 3.3.1. 거더의 휨 파괴에 대한 요소 신뢰성 평가

사하중과 활하중이 작용할 때의 유한요소해석결과로부터 최대 정모멘트 및 부모멘트가 발생하는 위치에서의 보강형의 위험단면에 대한 극한 휨강성과 최대발생 휨모멘트를 이용하여 한계상태 방정식을 구성하였다.

$$g(\cdot) = M_{G_n} \cdot N_{G_{MR}} - \left\{ a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i + \sum_{i=4}^6 a_i (x_i)^2 \right\} \quad (3)$$

Table 6은 휨 파괴에 대한 한계상태 방정식을 구성하는 입출력변수의 확률분포 특성값을 나타낸다. 휨파괴가 가능한 위치 P1과 P2에서의 두 가지 하중조합에 대한 입출력 값은 Table 7과 같다.

P1 위험단면에서의 하중조합 1, 2, 그리고 P2 위험단면에서의 하중조합 1, 2에 대하여 최소자승법을

Table 6. Statistical values for the considered random variables

Random Variables	Name	Mean	C.O.V.	Distribution Type
Izz 1	x1	2.47E+06	0.12	Normal
Area	x2	3.54E+03	0.015	Normal
Izz 2	x3	1.45E+07	0.12	Normal
$M_{G_n}$	x4	2.27E+10	0.10	Log normal

적용하여 결정된 응답면 계수를 이용하여 다음과 같이 각각의 네 가지 경우에 대한 한계상태함수를 구성하게 된다.

$$g(\cdot) = M_{G_n} \cdot N_{G_{MR}} - (57347.6 + 0.0294x_1 - 0.1405x_2 - 0.000101x_3 - 4.649 \cdot 10^{-9}x_1^2 + 2.26 \cdot 10^{-5}x_2^2 + 5.20 \cdot 10^{-12}x_3^2) \quad (4)$$

$$g(\cdot) = M_{G_n} \cdot N_{G_{MR}} - (59326.9 + 0.0305x_1 - 0.107x_2 - 0.000077x_3 - 4.82 \cdot 10^{-9}x_1^2 + 1.96 \cdot 10^{-5}x_2^2 + 4.66 \cdot 10^{-12}x_3^2) \quad (5)$$

$$g(\cdot) = M_{G_n} \cdot N_{G_{MR}} - (34348.9 + 0.00096x_1 + 7.39x_2 + 0.0011x_3 + 1.08 \cdot 10^{-10}x_1^2 - 6.36 \cdot 10^{-4}x_2^2 - 2.02 \cdot 10^{-11}x_3^2) \quad (6)$$

$$g(\cdot) = M_{G_n} \cdot N_{G_{MR}} - (41698.2 - 0.0011x_1 + 8.18x_2 + 0.0011x_3 + 1.18 \cdot 10^{-10}x_1^2 - 7.05 \cdot 10^{-4}x_2^2 - 2.13 \cdot 10^{-11}x_3^2) \quad (7)$$

목표신뢰도지수를 4.0으로 생각한 경우, 두 가지 하중조합에 대한 검토결과는 다음 Table 8과 같다.

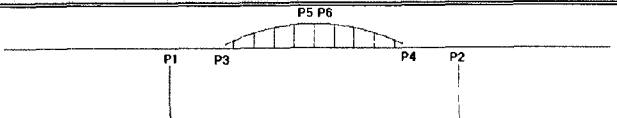
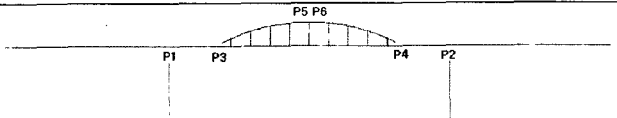
#### 3.3.2. 요소 신뢰성 평가 결과

반복적인 수식과 평가방법의 적용으로 거더의 전

Table 7. Coefficients of RSM for two load cases with resistant moments

Cases of Analyses	Random Variables (cm <sup>2</sup> , cm <sup>4</sup> )			P1		P2	
	x1	x2	x3	Load Combination1	Load Combination2	Load Combination1	Load Combination2
CASE1	2.47E+06	3.54E+03	1.45E+07	101080.48	104970.76	62184.37	71754.91
CASE2	2.77E+06	3.54E+03	1.45E+07	102600.37	106540.27	62066.54	71627.52
CASE3	2.17E+06	3.54E+03	1.45E+07	98723.84	102533.47	62321.67	71903.62
CASE4	2.47E+06	3.97E+03	1.45E+07	101093.19	104988	63309.96	72996.61
CASE5	2.47E+06	3.12E+03	1.45E+07	101076.15	104960.92	60857.94	70290.55
CASE6	2.47E+06	3.54E+03	1.60E+07	101166.68	105069.1	62872.11	72464.10
CASE7	2.47E+06	3.54E+03	1.31E+07	101021.13	104897.88	61460.33	71006.62

Table 8. The reliability indices for two load cases at two observed points in girders for flexure failure

Observed points of girders	Reliability Index	Locations for the failure of component	Comments
P1	Load Combination1		OK
	Load Combination2		
P2	Load Combination1		OK
	Load Combination2		

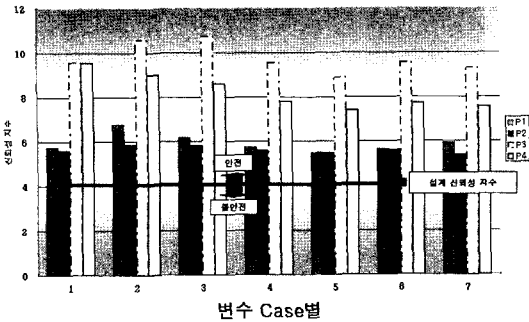


Fig. 5. Component reliability index for the observed points of girders.

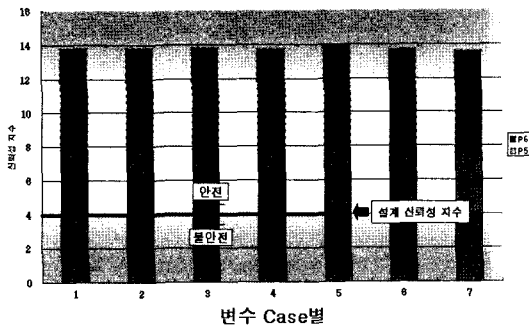


Fig. 6. Component reliability index for the observed points of arch ribs.

단파괴에 대한 위험성 검토와 아치리브의 축력과 휨모멘트에 대한 위험성 평가는 부록에 기술하였다. 아치교의 주요 검토 위치별 요소 및 가정된 붕괴모드에 대한 구조시스템의 위험도 평가결과를 요약하면 Fig. 5와 Fig. 6과 같다. 여기서 대상교량의 위험도 분석평가결과로 활하중상태에서 거더 및 아치리브 요소의 신뢰성지수( $\beta$ )가 4.0 이상으로 충분한 안전도를 확보하고 있다.

#### 4. 결론

1) 복잡한 구조물의 유한요소해석 응답값으로부터 계산된 요소신뢰성 지수와 파괴확률은 미분항 및 작은 파괴확률의 계산상 FOSM과 MCS의 적용이 어려워지므로, 선택된 무작위 변량만의 함수인 한계상태방정식을 음함수로 구성하는 응답면기법을 적용하여 해석하였다.

2) 음함수로 구성된 한계상태방정식의 결정시 응답면기법은 변수의 중요도에 따라서 사용자가 지정

한 선택된 입력 변수들로 구성되어 해당 변수의 민감도 분석과 복잡한 다자유도 구조물의 파괴확률 및 신뢰성지수의 결정에 유용하게 사용되었다.

3) 대상 아치교의 요소신뢰성 해석결과, 종횡측 단면2차모멘트와 단면적을 주요변수로 한 휨 파괴신뢰성지수는 5.7, 전단 파괴위험단면의 신뢰성지수는 9.5 이상, 좌굴파괴위험단면에 대해서는 6.4 이상의 안전성을 각각 나타내었다. 각 위험요소들의 파괴확률을 종합적으로 검토하는 교량시스템의 체계신뢰성 검토 및 파괴확률에 대한 평가가 필요하다.

#### 참고문헌

- 1) Sundararajan, Probabilistic Structural Mechanics handbook, Chapman & Hall, pp. 102~111, 1994.
- 2) Box, G. E. P., and Wilson, K. B., On the Experimental Attainment of Optimum Conditions, Journal of Royal Statistical Society, Series B13, pp. 1~45, 1951.
- 3) Nowak A. S., Collins K. R., "Reliability of Structures", McGraw-Hill, London, 2000.
- 4) 이성로, 배용귀, "2축 응력하의 콘크리트 구조물의 신뢰성해석 및 민감도해석", 대한토목학회논문집, 제24권, 제34호, pp. 631~637, 2004.
- 5) Al-Harthy, A. S. and Bucher, C. G., Bourgund, U., Efficient Use of Response Surface Methods, Report No.9-87, Institute of Engineering Mechanics, University of Innsbruck, Austria, 1987.
- 6) Bucher, C. G., Bourgund, U., Efficient Use of Response Surface Methods, Report No.9-87, Institute of Engineering Mechanics, University of Innsbruck, Austria, 1987.
- 7) Rackwitz R, Fiessler B., Structural reliability under combined random load sequences, Computers and Structures, Vol. 9, 489~494, 1978.
- 8) Nowak, A. S., Yamani, A. S., and Tabsh, S. W., "Probabilistic Models for Resistance of Concrete Bridge Girders", ACI Structural Journal, Vol. 91, No. 3, pp. 269~276. 1994.
- 9) Nowak, A. S., "Report 386 Calibration of LRFD Bridge Design Code", Transportation Research Board National Academy Press, pp. 150~161, 1999.

## Appendix

### A1. 거더의 전단파괴에 대한 위험성 검토

사하중과 활하중이 작용할 때의 유한요소해석결과로부터 최대 전단하중이 발생하는 위치에서의 보강형의 위험단면에 대한 극한 전단강성과 전단하중을 이용하여 한계상태 방정식을 구성하였다.

$$g(\cdot) = S_{G_n} \cdot N_{G_{SR}} - a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i + \sum_{i=4}^6 a_i (x_i)^2 \quad (8)$$

Table A1. Coefficients of RSM for two load cases with shear forces

Cases of Analyses	Random Variables(cm <sup>2</sup> , cm <sup>4</sup> )			P3		P4	
	x1	x2	x3	Load Combination1	Load Combination2	Load Combination1	Load Combination2
CASE1	2.47E+06	3.54E+03	1.45E+07	4484.83	4520.18	-4316.59	-4376.08
CASE2	2.77E+06	3.54E+03	1.45E+07	4562.5	4600.05	-4393.62	-4454.55
CASE3	2.17E+06	3.54E+03	1.45E+07	4408.59	4441.98	-4241.1	-4299.45
CASE4	2.47E+06	3.97E+03	1.45E+07	4485.1	4520.49	-4316.56	-4376.06
CASE5	2.47E+06	3.12E+03	1.45E+07	4484.63	4519.93	-4316.63	-4376.11
CASE6	2.47E+06	3.54E+03	1.60E+07	4486.05	4521.52	-4317.81	-4377.42
CASE7	2.47E+06	3.54E+03	1.31E+07	4483.85		-4315.62	-4374.96

P3 위험단면에서의 하중조합 1, 2, 그리고 P4 위험단면에서의 하중조합 1, 2에 대하여 최소자승법을 적용하여 결정된 응답면 계수를 이용하여 다음과 같이 각각의 네가지 경우에 대한 한계상태함수를 구성하게 된다.

$$g(\cdot) = S_{G_n} \cdot N_{G_{SR}} - (3897.3 + 0.00022x_1 - 0.00071x_2 - 3.79 \cdot 10^{-7}x_3 + 7.97 \cdot 10^{-12}x_1^2 + 1.78 \cdot 10^{-7}x_2^2 + 3.91 \cdot 10^{-14}x_3^2) \quad (9)$$

$$g(\cdot) = S_{G_n} \cdot N_{G_{SR}} - (3920.1 + 0.00022x_1 - 0.00039x_2 - 8.83 \cdot 10^{-8}x_3 + 9.28 \cdot 10^{-12}x_1^2 + 1.48 \cdot 10^{-7}x_2^2 + 3.22 \cdot 10^{-14}x_3^2) \quad (10)$$

$$g(\cdot) = S_{G_n} \cdot N_{G_{SR}} - (3739.4 + 0.00021x_1 - 0.00030x_2 - 4.54 \cdot 10^{-7}x_3 + 8.56 \cdot 10^{-12}x_1^2 + 3.00 \cdot 10^{-8}x_2^2 + 4.15 \cdot 10^{-14}x_3^2) \quad (11)$$

$$g(\cdot) = S_{G_n} \cdot N_{G_{SR}} - (3795.0 + 0.00021x_1 - 0.00027x_2 - 8.83 \cdot 10^{-8}x_3 + 1.02 \cdot 10^{-11}x_1^2 + 2.93 \cdot 10^{-8}x_2^2 + 3.22 \cdot 10^{-14}x_3^2) \quad (12)$$

### A2. 아치리브의 축력과 휨모멘트에 대한 위험성 평가

일본강구조설계지침에서 규정하고 있는 축력과 휨모멘트를 고려한 시방서 규준을 참조하여 다음과 같은 한계상태모형을 사용하였다.

$$g(\cdot) = P_{cr} - P \cdot N_{G_p} - [a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i + \sum_{i=4}^6 a_i (x_i)^2] \quad (13)$$

$$+ \frac{M_y}{M_{cr} \left(1 - \frac{1}{P_e} [P \cdot N_{G_p} - a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i + \sum_{i=4}^6 a_i (x_i)^2]\right)}$$

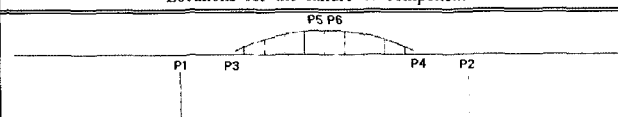
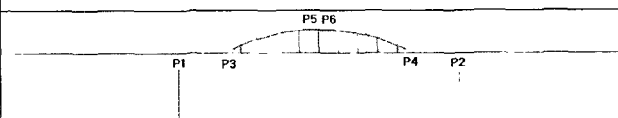
$$+ \frac{M_z}{M_{cr} \left(1 - \frac{1}{P_e} [P \cdot N_{G_p} - a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i + \sum_{i=4}^6 a_i (x_i)^2]\right)}$$

여기서,  $P_{cr}$ : 좌굴강도,  $M_{cr}$ : 휨모멘트저항강도,  $P_e = \frac{\pi^2 EI}{(kl)^2}$

Table A3. Coefficients of RSM for two load cases with axial forces in arch ribs

Cases of Analyses	Random Variables(cm <sup>2</sup> , cm <sup>4</sup> )			P5		P6	
	x1	x2	x3	Load Combination1	Load Combination2	Load Combination1	Load Combination2
CASE1	2.47E+06	3.54E+03	1.45E+07	23052.79	2.40E+04	-23034.76	-24577.54
CASE2	2.77E+06	3.54E+03	1.45E+07	23035.49	24578.15	-23072.21	-24618.06
CASE3	2.17E+06	3.54E+03	1.45E+07	23072.94	24618.67	-23064.52	-24609.05
CASE4	2.47E+06	3.97E+03	1.45E+07	23066.09	24610.52	-23038.46	-24582.2
CASE5	2.47E+06	3.12E+03	1.45E+07	23038.29	24581.9	-23284.8	-24839.22
CASE6	2.47E+06	3.54E+03	1.60E+07	23285.51	24839.82	-22811.36	-24344.58
CASE7	2.47E+06	3.54E+03	1.31E+07	22812.12	24345.21	-21049.50	-24124.88

Table A2. The reliability indices for two load cases at two observed points in girders for shear failure

Observed points of girders	Reliability Index	Locations for the failure of component	Comments
P3	Load Combination1		OK
	Load Combination2		
P4	Load Combination1		OK
	Load Combination2		

P5 위험단면에서의 하중조합 1, 2, 그리고 P6 위험단면에서의 하중조합 1, 2에 대하여 최소자승법을 적용하여 결정된 응답면 계수를 이용하여 다음과 같이 각각의 네 가지 경우에 대한 한계상태함수를 구성하게 된다.

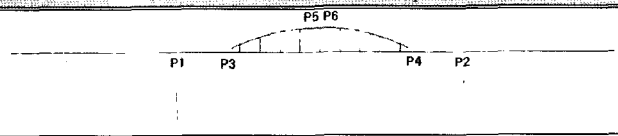
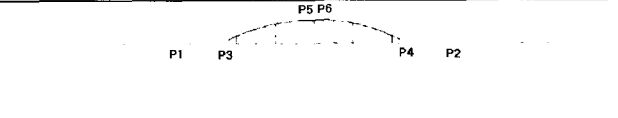
$$g(\cdot) = P_{cr} - P \cdot N_{Gr} - (19544.2 - 0.00014x_1 + 0.063x_2 + 3.31 \cdot 10^{-4}x_3 + 1.58 \cdot 10^{-11}x_1^2 - 4.23 \cdot 10^{-6}x_2^2 - 5.78 \cdot 10^{-12}x_3^2) \quad (14)$$

$$g(\cdot) = P_{cr} - P \cdot N_{Gr} - (162486.3 - 0.033x_1 - 23.37x_2 - 0.0079x_3 + 6.65 \cdot 10^{-9}x_1^2 + 3.30 \cdot 10^{-3}x_2^2 + 2.78 \cdot 10^{-10}x_3^2) \quad (15)$$

$$g(\cdot) = P_{cr} - P \cdot N_{Gr} - (19552.7 - 0.00014x_1 + 0.059x_2 + 3.32 \cdot 10^{-4}x_3 + 1.58 \cdot 10^{-11}x_1^2 - 4.00 \cdot 10^{-6}x_2^2 + 5.78 \cdot 10^{-12}x_3^2) \quad (16)$$

$$g(\cdot) = P_{cr} - P \cdot N_{Gr} - (20932.7 - 0.00015x_1 + 0.062x_2 + 0.00035x_3 + 1.73 \cdot 10^{-11}x_1^2 - 4.28 \cdot 10^{-6}x_2^2 - 6.13 \cdot 10^{-12}x_3^2) \quad (17)$$

Table A4. The reliability indices for two load cases at two observed points in arch ribs for axial failure

Observed points of arch ribs	Reliability Index	Locations for the failure of component	Comments
P5	Load Combination1		OK
	Load Combination2		
P6	Load Combination1		OK
	Load Combination2		