

총기대비용 최소화원칙에 의한 최적신뢰성지수 Optimum Safety Indices Based On Expected Total Cost Minimization

이 증빈* 신 형우** 장 석모***
Lee, Cheung-Bin Shin, Hyung-Woo Jang, Seok-Mo

ABSTRACT

The safety factors of current standard code are considered to be not appropriate compared to design and construction practices, even this safety factors are not determined from probabilistic study but merely from experiences and practices.

This study propose the optimum safety indices based on expected total cost minimization using only three parameters, which are the level of the failure cost to the initial cost by improvement in safety, and the order of the initial cost function.

1. 서 론

최근 토목구조물의 신뢰성설계를 할때 재료강도 및 하중강도의 변동, 구조안전해석상의 단순화에 따른 오차등, 다양한 불확실성을 고려하고 구조물의 안전성에 관한 불확정요인을 확률통계적으로 나타내 이 안전성을 정량적으로 평가하는 총기대비용 최소화원칙에 의한 이론이 연구되어지고 있다.^{1)~5)}

이 총비용 최소화원칙에 의한 신뢰성해석은 불확실한 상황하에서의 시공·파괴시의 복구 유지관리등의 기대공비 및 이익에 관한 경제성분석, 또는 사회경제성원리에 의한 최적화기법에 의해 기대공비를 최소화하는 방법이다. 이 방법은 경제성이 중요한 척도가 되는 구조물인 교량, 송전탑, 원전구조물의 설계에 적합하지만 아직도 이론적인 단계에 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 통계적사결정이론을 이용한 최적신뢰성해석에서 파괴확률이 필요한데 이 파괴확률대신에 신뢰성지수를 사용하고, 전비용을 무차원화시켜 안전여유(Safety margin)가 없는 경우의 초기비용을 기본으로한 안전도의 증가에 따른 초기비용의 증가비율 및 증가곡선형을 사용하여 최적신뢰성해석 알고리즘을 개발하고 2차모멘트법에 의한 신뢰성이론인 MFOSM⁶⁾법과 AFOSM⁷⁾법의 신뢰성해석과 비교, 분석하는데 그 목적이 있다.

- * 순천공업전문대학 토목과 교수(공학박사)
- ** 순천공업전문대학 토목과 전임강사
- *** 순천공업전문대학 토목과 조교

2. 최적신뢰성이론 및 해석

2.1. 최적신뢰성이론

신뢰성설계법을 불확실요인을 확률 및 통계론적으로 취급하고 대상구조물에 관한 각 설계대안중에서 안정성과 경제성을 동시에 고려하는 최적설계안을 결정하는 방법이다. 이 안전성과 경제성을 동시에 고려한 평가법은 여러가지가 있지만 일반적으로 통계적의사결정이론의 가장 간단한 형태인 파괴확률을 사용한 신뢰성최적화이론은 다음과 같다.¹⁾

$$C_T = C_I + P_F \cdot C_F = \text{Min} \quad \text{---(1a)}$$

$$P_F = \Phi(-\beta) \quad \text{---(1b)}$$

여기서, C_T =총기대비용, C_I =초기비용(보수비포함), C_F =파괴손실비용, P_F =파괴확률. 식(1)의 초기비용 C_I 를 신뢰성지수 β 의 n 차 함수로 사용하면 다음과 같이 된다.³⁾

$$C_T = C_{I,0}(1 + k\beta^n) \{1 + \Phi(\beta) \tau\} = \text{Min} \quad \text{---(2)}$$

여기서 $C_{I,0}$ =안전여유가 없을 때의 비용($\beta=0$ 일때의 비용).

k =상수.

2.2. 최적신뢰성 해석

확률적인 안전도의 정의로 전술한 파괴확률대신에 상대적인 안전여유(Safety margin)를 나타내는 안전도지수 즉, 신뢰성지수는 저항 R 과 하중효과와 S 를 결과변수로 이용한 한계상태방정식 $g(R,S)=R-S$ 로 구한 MFOSM, AFOSM에 의해 구할 수 있다.

본 연구에서는 파괴손실비용의 정도(τ), 안전도의 증가에 따른 초기비용의 증가율(ν) 및 증가곡선형(n)의 3가지 함수로 식(2)의 C_T 를 무차원의 총기대비용 α 로 반복시행에 의해 최소화하면 최적신뢰성지수 β_{opt} 를 구할 수 있다.

$$\alpha = C_T / C_{I,0} = (1 + k\beta^n) \{1 + \Phi(\beta) \tau\} = \text{Min} \quad \text{---(3)}$$

식(3)에서 $C_{I,0}$ 는 $\beta=0$ 일때의 비용 즉, 안전여유(Safety margin)가 없을 때의 비용 k 는 상수로 $\beta=\beta_0$ 일때의 비용인 $C_{I,n0}$ 와 $C_{I,0}$ 와의 비 ν 와 β 의 차수 n 로 결정되어지는데 ν 와 k 는 다음과 같이 된다.

$$\nu = C_{I,n0} / C_{I,0} \quad \text{---(4)}$$

$$k = (\nu - 1) / \beta_0^n \quad \text{---(5)}$$

여기서, τ =파괴손실비용의 정도(C_F/C_I).

ν =안전도의 증가에 따른 초기비용의 증가율.

n =안전도의 증가에 따른 초기비용의 증가곡선형.

β_0 =설계목표신뢰성지수.

따라서 최적신뢰성지수 β_{opt} 가 구해지면 그림-1과 같이 무차원의 초기비용(λ)과 무차원의 파괴기대비용(μ)을 구할 수 있다.

$$\lambda = C_I / C_{I,0} = 1 + k\beta^n \quad \text{---(6)}$$

$$\mu = \Phi(-\beta)C_F / C_{I,0} = \Phi(-\beta)(1 + k\beta^n) \tau \quad \text{---(7)}$$

한편 구조안전도에 대한 재래적인 확정론적 척도인 안전율이나, 저항계수 및 하중계수는 한계상태가 초과될 확률 즉, 파괴확률과 관계되어진다. 이러한 관계는 특히 저항 R 과 하중효과 S 의 평균저항 및 평균하중효과의 비로 정의되는 중앙안전율 n_0 를 안전율의 척도로 사용한다.⁶⁾⁻⁷⁾

이러한 중앙안전율은 확률변수의 분포함수를 고려한 MFOSM법 및 AFOSM법의 저항 및 평균-공칭비, 공칭안전율(n)과의 관계로부터 구할 수 있다.

$$\lambda = 1 + q(n_0 - 1) \quad \text{---(8)}$$

$$\nu = \lambda(\beta_0) \quad \text{---(9)}$$

$$q = 1 / [1 + a n_s \{(1/b) - 1\}] \quad \text{---(10)}$$

여기서, $a = n_0 / n$ = 중앙안전율 / 공칭안전율.

n_s =현행설계의 공칭안전율.

b =상수(초기비용의 증가율).

3. 계산 및 고찰

3.1. 최적신뢰성해석의 수치계산

본 연구에서는 총기대비용 최소화원칙에 의한 신뢰성해석에 필요한 불확실량의 저항변동계수 $\Omega_R=0.15\sim 0.20$, 하중효과의 변동계수 $\Omega_S=0.25\sim 1.0$ 을 사용하였고 문헌·3)에 의해 확률분포에 따라 식(6), (8), (9)를 사용하여 계산한 결과 안전도의 증가에 따른 초기비용의 증가율 ν 와 증가곡선형 n 값은 표-1과 같이 $\nu=C_{1.5}/C_{1.0}=1.5\sim 15$ 정도이고 $n=1\sim 3$ 정도이다. 여기서 하한치 $\nu=1.5$ 는 안전여유(Safety margin)가 없는 경우에 비해 극한안전여유를 취한 $\beta_0=5$ 로 설계되는 초기비용이 50%정도 증가함을 의미한다.

표-1. 확률분포에 따른 ν, n 값

Ω_R, Ω_S	확률분포에 따른 ν, n 값											
	0.15, 0.25			0.20, 0.50			0.20, 0.70			0.20, 1.00		
	q		n	q		n	q		n	q		n
D_1, D_2	n^q	0.20		0.60	0.20		0.60	0.20		0.60	0.20	
L, N	1.45	2.34	1.40	1.94	3.82	1.50	2.23	4.68	1.50	2.67	6.00	1.50
L, L	1.63	2.88	1.80	3.16	7.49	2.20	5.37	14.1	3.00	11.2	31.6	3.00
L, E	1.74	3.21	2.00	2.60	5.81	2.00	3.18	7.54	2.00	4.06	10.2	2.00
W, E	1.71	3.13	1.90	2.53	5.59	1.90	3.10	7.29	1.90	3.96	9.88	2.00
B, L	1.62	2.87	1.80	3.21	7.63	2.20	5.40	14.2	2.80	11.1	31.3	3.00
W, N	1.37	2.11	1.00	1.79	3.37	1.10	2.06	4.18	1.10	2.47	5.41	1.20
B, N	1.38	2.13	1.00	1.80	3.41	1.10	2.08	4.23	1.10	2.49	5.47	1.10

N: 정규분포, L: 대수정규분포, W: Weibull 분포, B: Beta 분포, E: 극치분포

한편 파괴손실비용 C_F 와 초기비용 C_I 와의 비 $\tau=C_F/C_I$ 는 문헌·3)에서 사용한 $\tau=5\sim 1000$ 값을 사용한다

그림-2는 $n=2.0$ 일때, τ 에 따른 최적신뢰성지수 β_{opt} 를 산정하여 도시한 것이다. 그림-2에서 τ 값이 증가함에 따라 $\nu=2.0$ 의 β_{opt} 는 $5 < \tau < 50$ 사이에서 급격히 증가하는 반면에 $\nu=5, 10, 15$ 의 β_{opt} 는 확산적으로 증가하고, $50 < \tau < 1000$ 사이의 β_{opt} 는 거의 완만하게 증가함을 보여준다.

그리고 그림-3에서도 ν 가 증가함에 따라 $\tau=5, 10$ 의 $\beta_{opt}=2.59\sim 1.45$ 까지 급격히 감소하고 $\tau=50, 100, 1000$ 의 $\beta_{opt}=3.18\sim 2.43, 3.40\sim 2.70, 3.98\sim 3.50$ 정도로 완만하게 변화함을 보여주고 있다

이는 파괴손실비용의 초기비용에 대한 비 τ 가 적어지고 안전도의 증가에 따른 초기비용의 증가율 ν 가 커지면 최적신뢰성지수 β_{opt} 가 적어짐과 동시에 파괴확률이 비교적 커지기 때문이다.

그림-2.3에서와 같이 $n=2.0, \tau=50$ 일때의 $\nu=2, 5, 10, 15$ 의 각각의 $\beta_{opt}=3.0545$ ($\nu=2$ 일때), 2.7484 ($\nu=5$ 일때), 2.6076 ($\nu=10$ 일때), 2.5467 ($\nu=15$ 일때)로 ν 가 증가함에 따라 β_{opt} 가 완만하게 감소함을 보여준다.

따라서 총기대비용 최소화원칙에 의한 신뢰성해석에 있어서 최적신뢰성지수 β_{opt} 는 τ (파괴손실비용의 정도), ν (안전도의 증가에 따른 초기비용의 증가율), n (안전도의 증가에 따른 초기비용의 증가곡선형)의 함수로 결정되며 특히, ν, n 함수는 설계목표신뢰성지수 β_0 에 따른 중앙안전율 n_0 와 밀접한 관계를 갖는다.

3.2 확률분포에 따른 최적신뢰성지수의 비교분석

최적신뢰성해석은 한계상태함수인 저항과 하중효과의 확률분포의 표준화형식등에 따라 달라지기 때문에 종기대비비용 최소화원칙에 의한 최적신뢰성해석의 개발에 앞서 합리적이고 효율적인 알고리즘과 근사해법의 일관성있는 선택이 중요하다.

그림-4와 표-2는 저항과 하중효과의 불확실량을 각각 $\Omega_R=0.15, \Omega_R=0.25$ 로 하여 최적신뢰성지수 β_{opt} 를 산정한것이다. 그림-4에서와 같이 τ 와 q 의 변화에따른 β_{opt} 는 τ 가 증가하면 $W, N \gt L, N \gt L, L \gt W, E$ 순으로 감소하고 $q=0.2$ 의 β_{opt} 는 $q=0.6$ 이 β_{opt} 보다 $0.38 \sim 0.17$ 정도 상한치해 를보여준다. 이는 전절3.1.에서와 같이 ν 가 증가함에 따라 β_{opt} 가 감소함을 입증하고있다.

표-2. 확률분포 및 τ 에 따른 β_{opt}

q $D_1, D_2,$ τ	$\Omega_R=0.15, \Omega_S=0.5$							
	0.2				0.6			
	L,L	L,N	W,E	W,N	L,L	L,N	W,E	W,N
5	2.3989	2.5166	2.3620	2.6271	2.0076	2.1331	1.9685	2.2558
10	2.6530	2.7726	2.6162	2.8850	2.3149	2.4417	2.2751	2.5652
50	3.1776	3.2958	3.1425	3.4074	2.9222	3.0422	2.8867	3.1594
100	3.3820	3.4980	3.3476	3.6087	3.1578	3.2669	3.1182	3.3811
1000	3.9928	4.1014	3.9617	4.2073	3.8209	3.9219	3.7928	4.0260

그림-5는 Ω_s 를 Ω_R 보다 크게 취하여 τ 에 따른 확률분포로 β_{opt} 를산정비교한것이다. 그림-5에서 $\Omega_R=0.15, \Omega_s=0.25$ 의 β_{opt} 는 확률분포에 관계없이 0.1정도의 차이로 급격히 변화하고, $\Omega_R=0.2, \Omega_s=1.0$ 의 β_{opt} 는 τ 가 증가하면 확률분포에 따라 $L, N \gt W, E \gt L, L$ 순서로 증가한다. 이는 표-1에서 본바와 같이 하중효과의 변동계수 Ω_s 가 ν 와 n 값을 좌우하며 ν, n 값이 커짐에 따라 β_{opt} 는 급격히 감소한다. 특히 L,L 확률분포형은 τ 값이 증가하면 β_{opt} 가 가장 적게된다. 이는 다른 확률분포형의 ν 값보다 $\nu=11.2(q=0.2, \Omega_s=1.0$ 일때) $\nu=31.6(q=0.2, \Omega_s=1.0$ 일때)으로 특별히 크기 때문이다. 이는 대수형확률분포의 Ω_s 가 커짐에 따라 민감함을 나타낸것이다.

그림-6은 Ω_s 의 변화에 따라 $\tau=5.0$ 및 $\tau=1000$ 인 경우의 β_{opt} 를 산정하여 도시한것이다. 그림-6에서 $\tau=5.0$ 의 β_{opt} 는 $W, N \gt L, N \gt W, E \gt L, L$ 순으로 Ω_s 가 증가하면 거의 단계적으로 완만하게 증가함을 보여준다. 특히 L,L 확률분포형의 β_{opt} 는 확률분포중에서 제일 적은값으로 감소한다. 이는 표-1에서와 같이 다른 확률분포의 ν 값보다 $\nu=3 \sim 5$ 배, $n=2$ 배정도 높게 나타난 특수한 경우라 할 수 있다.

따라서 ν 와 n 값은 하중효과의 확률분포형과 변동계수에 영향을 받는데, 저항의 확률분포형에 거의 영향을 받지않음을 알 수 있다. 특히 대수정규분포형의 ν, n 값이 Ω_s 의 증가에 따라 대단히 크게 되는데, 현재 토목구조물 설계시 Ω_s 의 범위는 $\Omega_s=0.25 \sim 0.7$ 이하로서 총비용최소화원칙에 의한 최적신뢰성해석시에 $\nu=1.5 \sim 15, n=1 \sim 3$ 정도 취함이 합리적이고 일관성 있는 선택이라 본다.

3.3. 최적신뢰성 이론의 비교분석

본 연구에서는 대상구조물의 파괴로 인한 인명, 재산피해와 사회·경제적 중요도를 고려하여 정책적으로 결정하는 최소기대비비용 최소화에 의한 신뢰성해석 이론으로 개발한 알고리즘과 기존 신뢰성해석인 MFOSM으로 비교분석하는것이 주요점이므로 문헌.6)에서와 같이 R.C도로교의 상부구조에 대한 저항 및 하중효과의 불확실량인 $R/R=1.12, \Omega_R=0.16, S_D/S_D=1.0, \Omega_{SD}=0.08, S_L/S_L=1.34, \Omega_{SL}=0.287$ 로 해석한다.

그림-7은 $\tau=C_F/C_I$ 에 따른 하중비 $\rho=L/D$ 의 변화의 최적신뢰성지수 β_{opt} 를 $n=2.0, b=0.4, 0.6$ (초기비용의 증가율)으로 산정하여 도시한것이다. 그림-7에서 보면 MFOSM의 근사해법으로 산정한 $\beta_0=3.5$ 에 대응하는 본연구의 β_{opt} 는 $\rho=0.5 > 1.0 > 1.5$ 순으로 증가하고 $b=0.6$ 의 β_{opt} 가 0.1정도 적게 됨을 알수있다. 이는 $b=0.4$ 의 안전도의 증가에 따른 초기비용의 증가율 $\nu=1.25$ ($\rho=0.5$ 일때)~ 1.35 ($\rho=1.5$ 일때)인데 반하여 $b=0.6$ 의 $\nu=1.43$ ($\rho=0.5$ 일때)~ 1.60 ($\rho=1.5$ 일때)정도로 하중비 ρ 가 증가하면 ν 가 크게 되기때문에 ν 값이 증가하면 β_{opt} 가 작아지고 τ 값이 커짐에 따라 β_{opt} 가 증가함을 보여준다.

또한 표-3은 τ, ν, n 의 함수로 산정한 β_{opt} 와 MFOSM, AFOSM으로 산정한 β 를 비교분석한것이다. 표-3에서 본 연구의 β_{opt} 와 기존의 방법인 문헌.6)의 β 는 0.1~0.4정도의 차이로 본 연구의 β_{opt} 가 하한치해임을 보여주고, 하중비 ρ 에 따른 β 는 τ 에 따른 β_{opt} 로 대신할 수 있다. 즉, $\rho=0.5, 1.0, 1.5$ 의 β 는 $\tau=100, 50, 10$ 의 β_{opt} 에 거의 대응함을 보여준다.

표-3 ρ, τ 및 n 의 변화에 따른 β_{opt} ($\beta_0=3.5$)

ρ	n b τ	본 연구						문헌.6)
		1		2		3		MFOSM
		0.2	0.6	0.4	0.6	0.4	0.6	(AFOSM)
0.5	100	3.6164 (3.6175)	3.4962 (3.4981)	3.4159 (3.4181)	3.2925 (3.2946)	3.3106 (3.3127)	3.1871 (3.1892)	3.6994 (3.8092)
1.0	50	3.3594 (3.3760)	3.2365 (3.25190)	3.1613 (3.1784)	3.0313 (3.0479)	3.0671 (3.0840)	2.9369 (2.9537)	3.0626 (3.2419)
1.5	10	2.7728 (2.8091)	2.6190 (2.6542)	2.5921 (2.6295)	2.4291 (2.4672)	2.5428 (2.5781)	2.3894 (2.4246)	2.6965 (2.9082)

(): 정해치(AFOSM), 근사치(MFOSM)

그림-8은 문헌.6)의 불확실량을 사용하여 D+L하중조합인 경우 $\tau=C_F/C_I$ 에 따른 하중비 ρ 의 변화의 β_{opt} 를 산정도시한것이다. 그림-8에서 보면 $\tau=5, 10, 50, 100, 1000$ 의 경우 ρ 가 커짐에 따라 β_{opt} 가 단계적으로 완만하게 변화하는데 반하여 MFOSM 및 AFOSM의 β (문헌.6참조)는 τ 에 무관하게 하중비 ρ 가 커짐에 따라 급격히 감소함을 나타내고있다. 이는 τ, ν, n 의 함수로 β_{opt} 를 식(3)의 파괴확률까지 고려하여 계산했기 때문에 단계적으로 완만하게 변화한다.

표-4 β_0, τ 및 n 의 변화에 따른 β_{opt} ($\rho=1.0$)

β_0	n b τ	본 연구						문헌.6)	
		1		2		3		ρ	β
		0.4	0.6	0.4	0.6	0.4	0.4		
3.5	5	2.5601 (2.5834)	2.3793 (2.3993)	2.3993 (2.4224)	2.2167 (2.2409)	2.3762 (2.3972)	2.2109 (2.2327)	0.5	3.6994 (3.8092)
	10	2.8254 (2.8462)	2.6684 (2.6886)	2.6462 (2.6672)	2.4825 (2.5040)	2.5938 (2.6136)	2.4392 (2.4595)	1.0	3.0626 (3.2419)
	50	3.3594 (3.3760)	3.2365 (3.2519)	3.1613 (3.1784)	3.0313 (3.0479)	3.0671 (3.0840)	2.9361 (2.9537)	1.5	2.6965 (2.9082)
	100	3.5641 (3.5795)	3.4509 (3.4649)	3.3632 (3.3791)	3.2440 (3.2589)	3.2579 (3.2740)	3.1378 (3.1532)	2.0	2.4691 (2.6950)
	1000	3.2782 (2.9303)	3.8326 (3.8329)	3.9299 (3.9377)	3.8777 (3.8889)	3.8464 (3.8452)	3.7541 (3.7656)		

(): 정해치(AFOSM), 근사치 : MFOSM

표-4는 목표신뢰성지수 β_0 와 τ, n 의 변화에 따른 β_{opt} 값과 $\rho=1.0$ 인 경우, 문헌.6)의 β 를 비교산정한것이다. 이 표에서도 문헌.6)의 β 는 $\tau=50$ 의 β_{opt} 와 거의 일치함을 보여준다. 한

편구조물설계시 강도설계(USD)의 신뢰성지수는 $\beta=3.09\sim 3.719$ ($P_F=10^{-3}\sim 10^{-4}$) 정도이고 허용응력 설계(WSD)의 $\beta=4.265\sim 5.197$ ($P_F=10^{-5}\sim 10^{-7}$) 정도로 구조물의 안정성 수준을 검사하고 있으므로 $\rho=1.0$, $\beta_0=3.5$ 일때 $\tau=1000$ 의 β_{opt} 는 WSD의 β 정도이며 $\tau=50\sim 100$ 의 β_{opt} 는 USD의 β 정도와 같음을 보여준다.

따라서 τ, ν, n 의 함수중에서 n 값은 β_{opt} 에 영향을 주지 않고 $n=2.0$ 으로 β_{opt} 를 계산하여도 오차가 아주 작으며, ν 값이 어느정도 커짐에 따라 β_{opt} 에 별로 영향을 주지 않으므로, 최적신뢰성지수 β_{opt} 값은 τ 에 기본적으로 좌우됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 통계적의사결정이론을 사용한 총기대비용 최소화원칙에 의한 최적신뢰성해석 알고리즘을 개발하였고, 이 알고리즘으로 기존의 신뢰성해석이론인 MFOSM법 및 AFOSM법과 비교, 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

1). 총기대비용 최소화원칙에 의해 설계되는 최적신뢰성해석은 파괴손실비용과 초기 비용과의 비(τ), 초기비용의 증가율(ν) 및 초기비용의 증가곡선형(n)의 함수로 결정되며, 특히 파괴손실비용과 초기비용과의 비가 최적신뢰성지수를 산정하는데 기본적으로 좌우됨을 알 수 있었다.

2). 최적신뢰성지수 β_{opt} 는 확률분포형 및 하중효과의 불확실량의 크기에 따라 ν 와 n 값이 달라지는데 통상 토목구조물 설계시 하중효과의 불확실량 $\Omega_S=0.25\sim 0.50$ 정도이므로 $10 < \tau < 100$ 범위의 $\nu=1.5\sim 5.0, n=1\sim 2$ 정도의 함수로 최적신뢰성해석 및 검정함수가 바람직하다고 본다.

3). 신뢰성이론인 MFOSM 및 AFOSM법으로 하중비 $\rho=0.5\sim 1.5$ 의 신뢰성지수 β 는 본 연구에서 제시한 $\tau=10\sim 100$ 의 최적신뢰성지수 β_{opt} 보다 상한치해를 주며 거의 일치함을 알 수 있었다.

4) 본 연구에서 제시된 최적신뢰성해석모델은 확률론적 신뢰성모형을 토대로 각종 통계적 불확실량을 합리적으로 반영하고, 적절한 최적신뢰성지수와 보정기법을 사용하여 대상구조물의 하중 및 저항계수를 산정하는데 확장적용할 수 있다고 사료된다.

*****참 고 문 헌*****

1. Sugiyama, T. Saksi, T. Fujino, Y. and Ito. M. "Decision on Reliability Level and Safety Factor for Structural Design" Proc. of JSCE, NO.327, NOV.1982, pp.1-28.
2. Koyama, K. "A Fundamental Study using Entropy Theory to the Structural Design" Proc. of JACE, NO 337, 1983, pp.1-7.
3. Chou, T. "Optimum Safety Indices Based on Expected total cost Minimization" Jour. of Structural Engineering (in Japanese). Vol.37A, 1991, pp. 543-555
4. Eillingwood, B. and Kanda, J. "Formulation of Load Factors Based on Optimum Reliability" Structural Safety, 9. Elsevier, 1991, pp.197-210.
5. 이증빈, 신형우 "하중계수에 기초한 최적신뢰성의 해석모델 개발" 한국전산구조공학회 논문집 제5권 제4호, 1992년 12월, pp.113-123.
6. 조효남, "철근콘크리트 도로교 상부구조의 신뢰성 설계기준에 관한 연구" 대한토목학회 논문집 제2권 제3호, 1982년 9월, pp.87-99.
7. 조효남, 김우석, 이증빈, "강도로교의 신뢰성 설계기준에 관한 연구" 대한토목학회 논문집 제5권 제1호, 1985년 3월, pp.43-53.

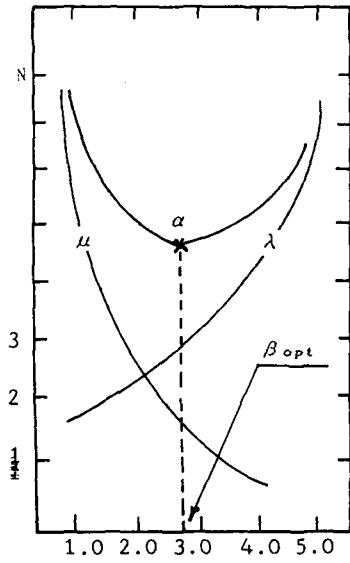


그림-1. 무차원화시킨 비용의 개념도

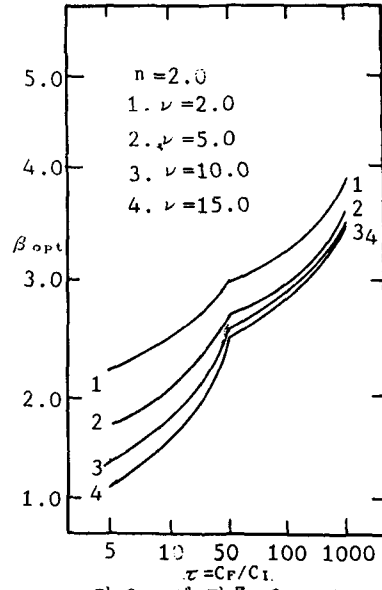


그림-2. τ 에 따른 β_{opt} 비교

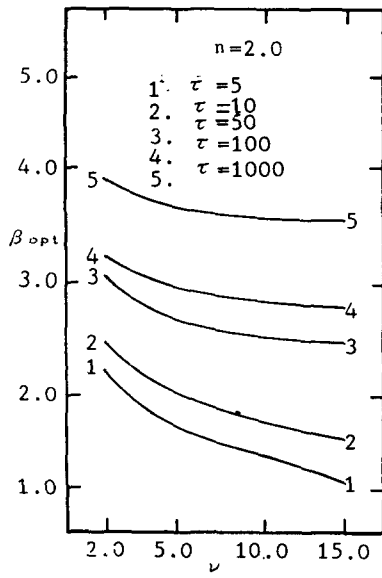


그림-3. ν 에 따른 β_{opt} 비교

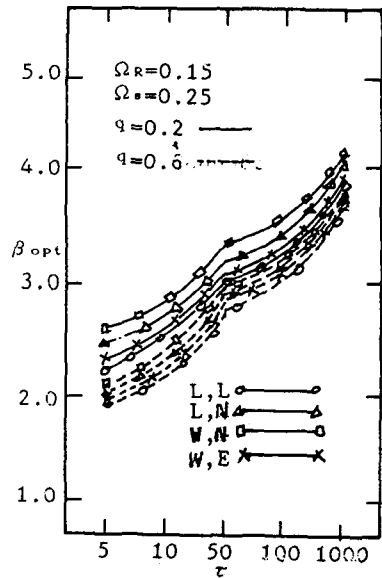


그림-4. τ 에 따른 β_{opt} 비교

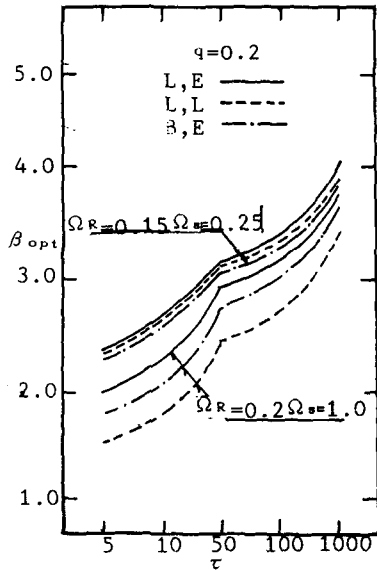


그림-5. τ 에 따른 β_{opt} 비교

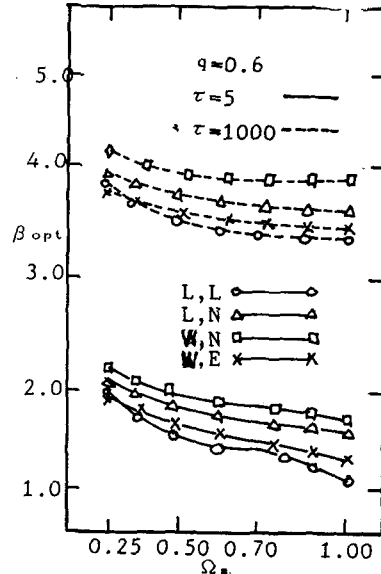


그림-6. Ω_s 에 따른 β_{opt} 비교

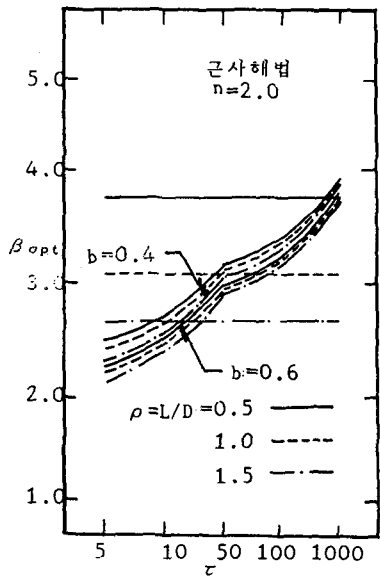


그림-7. τ 에 따른 β_{opt} 비교

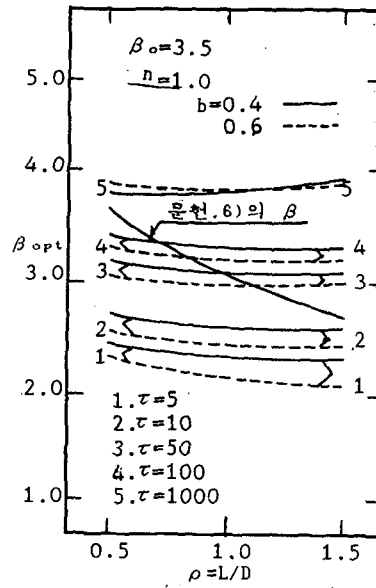


그림-8. ρ 에 따른 β_{opt} 비교