

안전율 확률분포에 근거한 케이블지지교량 주요부재의 내진성능 취약도 평가

박진우^{1*}, 김창성², 김두기³

Seismic Fragility Evaluation of Cable Supported Bridges Based on Probability Distribution Using Safety Factors of Structural Members

Jin-Woo Park^{1*}, Chang-Sung Kim², Doo-Kie Kim³

Abstract: The purpose of this study is to rationally determine the priority of seismic reinforcement of main(key) members of bridges. Cable Supported bridge was selected as the evaluation target and the reliability based on the probability distribution was used to evaluate the seismic fragility of the key members as a quantitative indicator. The safety factor, which is a random variable, is considered an artificial (fixed load and live load) load and a natural (earthquake, wind, temperature, etc.) load. The seismic load is applied as a possible earthquake during the lifetime of the bridge. From analyzing the fragility of each key member based on the seismic reliability, it can be concluded that the shoe (23.8%) was the most fragile, where the other members are ranked as place concrete (20.5%), pier (18.9%), foundation (17.3%) and cable (5.0%) respectively.

Keywords: Cable-supported bridges, fragility, reliability, safety factor

1. 서론

우리나라는 과거 개발도상국에서 벗어나 경제 강국으로 변모한 지금 경제적 측면보다 사회적 안전에 더욱 관심이 많다. 최근 포항지진으로 이러한 관심은 고조되고 있으나 대부분의 교량은 내진설계개념이 도입되기 이전에 건설된 교량으로 적절한 내진보강대책이 마련되지 않은 상태로 공용 중에 있다(KISTEC, 1999).

내진설계가 고려되지 않은 기존 교량들을 현행 내진설계수준으로 모두 보강할 경우 과도한 국가재정이 수반될 수 있다. 그러나 제한적인 재정자원 내에서 효과적으로 내진안전성을 확보하기 위해서 우선순위를 결정하는 것이 매우 중요하다. 따라서 교량별 우선순위에 따라 적용 가능한 내진보강기법에 따른 내진성능 향상효과를 정확하게 평가하고 효율적인 보강기법을 결정하는 방법론의 제시가 필요하다(Lee et al., 2004).

현재 국토교통부(KISTEC, 2015)에서는 내진성능평가를 수행하여 우선순위를 결정하고 대상 시설물에 대하여 상세평가를 통해 내진보강 여부를 결정하고 있다.

그러나 시설물 단위의 내진보강 우선순위의 결정에 대한 기준은 마련되어 있으나 시설물(교량)의 주요부재(하부구조, 받침, 상부구조 등)에 대한 우선순위 결정은 아직 마련되어 있지 않다. 따라서 이 연구는 교량의 주요부재에 대한 지진취약도를 평가 하는데 그 목적이 있다. 평가 대상으로는 케이블 교량을 선정하였으며 평가방법으로 확률분포의 신뢰도를 활용하였고 각 주요부재의 안전계수(안전율)를 확률변수로 사용하였다. 각 주요 부재에 대한 안전계수는 하중에 의해 발생하는 공급역량(Capacity)과 내진에 필요한 소요역량(Demand)

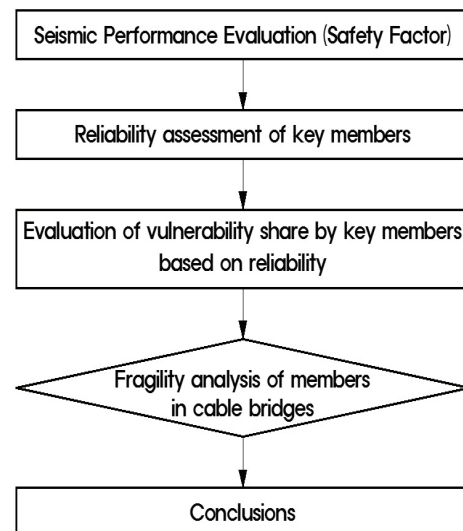


Fig. 1 Evaluation flow of members vulnerability in cable bridge

¹정회원, 한국시설안전공단 특수교관리센터 대리

²정회원, ㈜이노웍 대표이사

³정회원, 군산대학교 토목공학과 교수

*Corresponding author: pjw9842@gmail.com

National Center for Seismic Safety, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, Jinju, Gyeongsangnamdo, 52856, Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2019년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

을 비교한 것으로 주하중(고정하중, 활하중)과 부하중(지진, 내풍, 온도 등)이 고려된 것이다. Fig. 1은 케이블 교량의 주요 부재(main members)에 대한 지진취약도 연구 절차이다.

2. 연구이론

2.1 구조물 신뢰성 공학

2.1.1 구조물의 신뢰도 개념

토목구조물의 신뢰성 공학의 도입은 구조물의 안정성 평가에 적용되어 왔다. 구조물의 안정성 측면에서 바라 볼 때 신뢰성 공학을 살펴보면 구조물에 가해지는 하중(하중 요소, load factor) L 과 그에 저항하는 구조물의 저항 요소(resistance) R 로 표시되어 있으며 구조물의 안전(safety 또는 success)과 파괴(failure)를 판단할 수 있는 설계 기준(design criterion) Z 는 식 (1)과 같다(Yang et al., 1999).

$$Z = R - L \quad (1)$$

식 (1)과 같은 설계기준식은 대부분 해석 대상이 되는 구조물의 파괴 유형(failure mode)에 따라 유도된 식이므로 파괴 방정식(failure equation), 한계 상태 방정식(limit state equation) 또는 안전 여유(safety margin) 등으로 불려진다.

기존의 결정론적인 방법에서는 R 과 L 의 분산 특성을 무시하고 대푯값 \bar{R} 과 \bar{L} 만을 고려하여 적당한 안전 계수 값 즉, 항상 \bar{R} 이 \bar{L} 보다 큰 상태가 유지되는 수준을 택하여 파괴에 대한 안전 여유를 두어 왔다. 이와 같은 방법은 R 과 L 의 분산 특성을 고려하는 확률론적인 입장에서도 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 대푯값 \bar{R} 을 증가시키면 파괴 확률과 관계가 있는 R 과 L 의 밀도 함수가 겹쳐지는 부분의 면적이 감소하게 되는 사실로도 그 유효성을 설명할 수 있다.

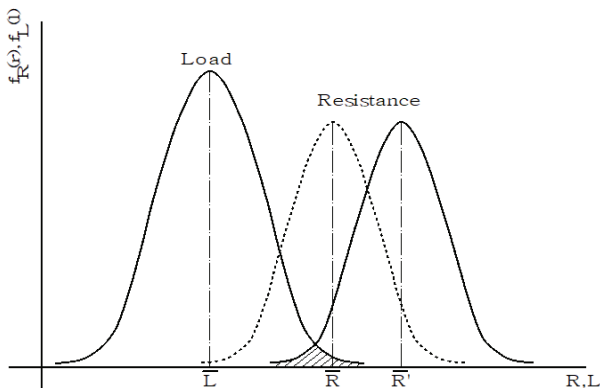


Fig. 2 Change of probability of failure due to change of mean

또한, Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 R 과 L 의 대푯값 \bar{R} 과 \bar{L} 이 일정하게 유지되어 동일한 안전 계수를 갖는 경우라 하더라도, R 이나 L 의 분산 특성이 변함에 따라 파괴 확률도 달라질 수 있다.

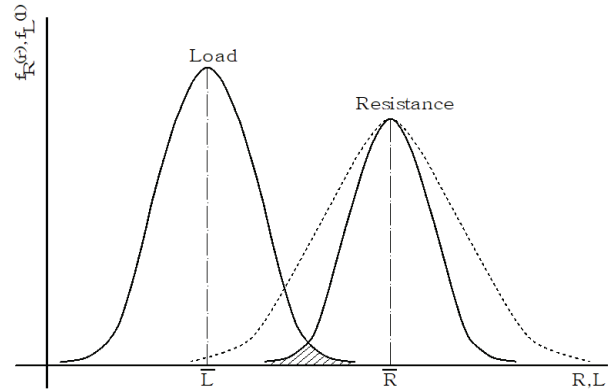


Fig. 3 Change of probability of failure due to change of variance

따라서, 구조물의 신뢰도를 합리적으로 평가하기 위해서는 단순히 설계 변수들의 대푯값만을 고려하는 것보다는 설계 변수들의 통계적인 분산 특성까지도 고려한 파괴 확률의 개념을 이용하는 것이 더욱 설득력을 갖는다고 할 수 있다.

즉, 평균뿐만 아니라 분산의 영향도 구조물의 신뢰도를 결정하는데 중요한 인자인 것이다. 따라서 구조물의 안정성 평가를 위한 신뢰도 평가 식은 식 (2)와 같다.

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} \quad (2)$$

여기서, β 는 신뢰도, μ_Z, μ_R, μ_L 는 각각 설계기준, 저항요소, 하중요소의 확률분포 평균, $\sigma_Z, \sigma_R, \sigma_L$ 는 각각 설계기준, 저항요소, 하중요소의 표준편차이다(Yang et al., 1999).

2.1.2 안전계수에 의한 구조물 신뢰도

위에서 언급한 토목 구조물의 신뢰성 이론을 응용하여 안전계수로 정립하면 식 (3)과 같다.

$$S.F = \frac{R}{L} \quad (3)$$

여기서, $S.F$ 는 안전계수(안전율), R 은 저항값(소요역량), L 은 하중(공급역량)이다.

안전계수에 대한 확률분포함수는 단일곡선 함수로 정규분포함수이며 식 (4)와 같다.

$$F_{S.F} = \frac{1}{\sigma_{S.F}\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{s.f - \mu_{S.F}}{\sigma_{S.F}}\right)^2\right\} ds.f \quad (4)$$

따라서, Fig. 4에서 보듯이 $F_{S.F}(s.f)$ 인 $S.F$ (안전계수) 성분의 확률변수라고 하면, Z 가 1보다 작게 될 확률인 파괴확률은 식 (5)로 계산할 수 있다.

$$P_f = P[S.F < 1] = F_{S.F}(1) \\ = \int_{-\infty}^1 \frac{1}{\sigma_{S.F}\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{s.f - \mu_{S.F}}{\sigma_{S.F}}\right)^2\right\} ds.f \quad (5)$$

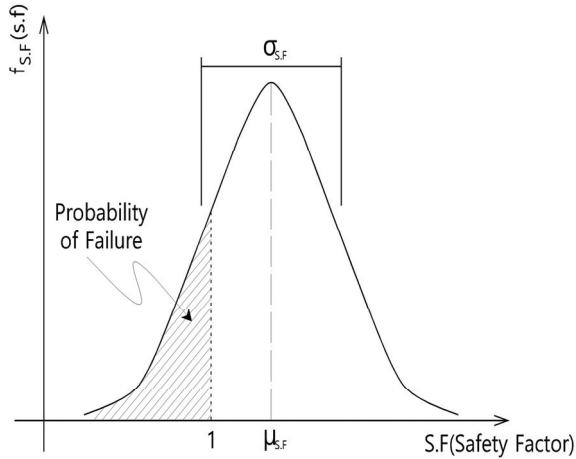


Fig. 4 Probability of Failure considering Safety Factor

또한, 단일곡선의 확률밀도함수의 신뢰도는 식 (6)이 된다.

$$\beta = \frac{\mu_{S.F}}{\sigma_{S.F}} \quad (6)$$

2.2 취약도 점유율 산출

케이블 교량의 부재별 신뢰도와 식 (7)을 이용하여 취약영향계수(Fragility Influence Coefficient)를 산출할 수 있다.

$$FIC_{member} = \frac{\sum \beta}{\beta_{member}} \quad (7)$$

여기서, FIC_{member} 는 각 부재별 취약영향계수, $\sum \beta$ 는 교량 부재별 신뢰도의 합, β_{member} 는 각 부재별 신뢰도이다.

또한, 취약영향계수를 활용하여 각 부재별 취약도 점유율(Fragility Share)을 산출할 수 있으며 식 (8)과 같다.

$$FS_{member} = \frac{IC_{member}}{\sum IC} \quad (8)$$

여기서, FS_{member} 는 각 부재별 취약도 점유율, $\sum IC$ 는 교량 부재별 영향계수의 합이다.

3. 케이블 교량의 내진성능평가

3.1 수치해석(안전율 산정)

본 연구에서 적용한 교량은 ○○대교로 자정식 현수교이다. 크게 세 부분으로 나누면 접속교(시점부, 종점부)와 현수교로 구분된다.

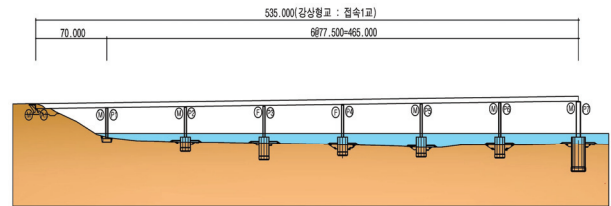


Fig. 5 Connecting bridge(START)

시점부 접속교는 7경간으로 우물통기초의 교각과 강상형교의 상부구조를 취하고 있다(Fig. 5).

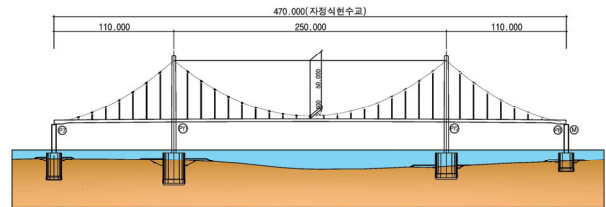


Fig. 6 Main bridge

현수교는 자정식으로 우물통기초의 주탑과 강재로 이루어진 보강거더의 상부구조이다(Fig. 6).

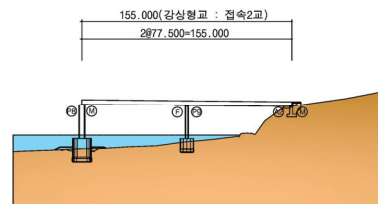


Fig. 7 Connecting bridge(END)

종점부 접속교는 2경간 우물통기초(교각)와 강상형교(거

더)로 구성된 상부구조이다(Fig. 7).

적용지진하중(Fig. 8)은 도로교 설계기준(2016)의 직교 지진력 조합에 따라 다음과 같이 조합하였다(MOLIT, 2016).

- CASE 1 : 1.0 X방향 지진 + 0.3 Y방향 지진
- CASE 2 : 0.3 X방향 지진 + 1.0 Y방향 지진

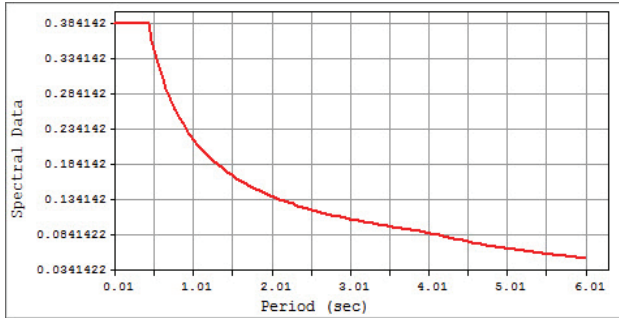


Fig. 8 Input Spectral Data

Fig. 9는 ○○대교에 대한 3D 모델링 형상을 나타내며 경계 조건으로 교대부는 고정, 우물통 기초는 스프링계수를 적용하였다. 스프링계수는 공내재하시험을 통해 얻어진 지반반력 계수를 근거로 산출하였으며 구조재료는 콘크리트와 강재로서 각각 28,221Mpa(교각), 27,537Mpa(우물통), 210,000Mpa(강상형)의 탄성계수를 적용하였다.

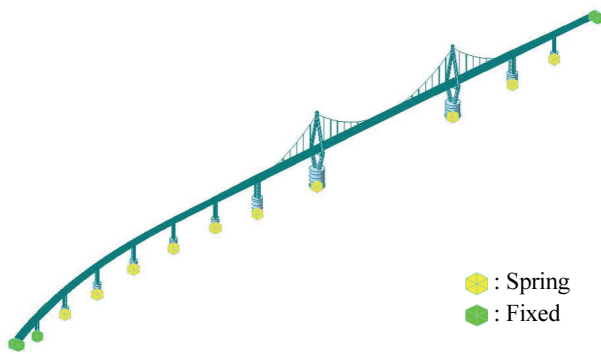


Fig. 9 3D Modeling and Boundary condition

이러한 조건의 수치해석 절차는 Fig. 10과 같으며 자료수집, 모델링, 계산을 통해 최종적으로 안전율(Safety Factor)를 산출하였다.



Fig. 10 Evaluation flow of Safety Factor

수치해석을 통해 공급역량과 변위를 확인하였고 지진에 대한 주요모드의 변위형상은 Fig. 11과 같다.

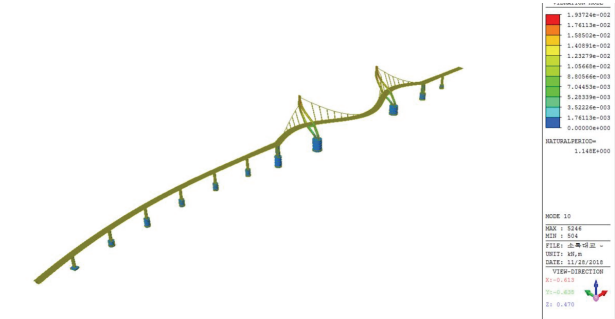


Fig. 11 Main mode shape of Cable Bridge e.g.

주요부재에 대한 공급역량과 소요역량을 비교하여 안전율을 산출한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Safety factor by major members

No.	Foundation	Pier	Shoe	Place Concrete	Stiffening girder	Cable
1	3.94	13.26	2.117	1.23	2.51	1.94
2	2.05	12.21	1.078	2.27	1.87	1.89
3	2.37	7.13	0.793	1.91	2.60	1.84
4	1.43	7.99	1.095	1.01	1.92	1.79
5	1.26	4.02	0.778	1.86	1.59	1.73
6	0.85	3.45	1.076	1.09	1.51	1.67
7	1.26	13.18	1.191	1.08	1.23	1.60
8	1.6	10.44	1.33	1.22	1.10	1.54
9	1.61	7.63	1.244	1.14	1.59	1.72
10	1.64	6.05	1.85	1.94	1.52	1.78
11	1.47	6.80	1.929	2.78	1.27	1.85
12	8.22	9.29	3.423	1.53	1.23	1.91
13	1.76	8.83	1.222	1.06	-	1.98
14	1.84	5.89	3.583	1.87	-	2.03
15	1.86	-	1.781	2.08	-	2.08
16	1.93	-	2.265	1.17	-	2.12
17	2.07	-	1.274	2.27	-	2.14
18	1.96	-	1.218	1.23	-	2.16
19	1.64	-	1.152	-	-	-
20	1.44	-	1.871	-	-	-
21	1.92	-	1.051	-	-	-
22	1.61	-	1.778	-	-	-

3.2 신뢰도 평가

Fig. 12 ~ 17은 케이블 교량의 주요부재인 기초, 교각, 받침,

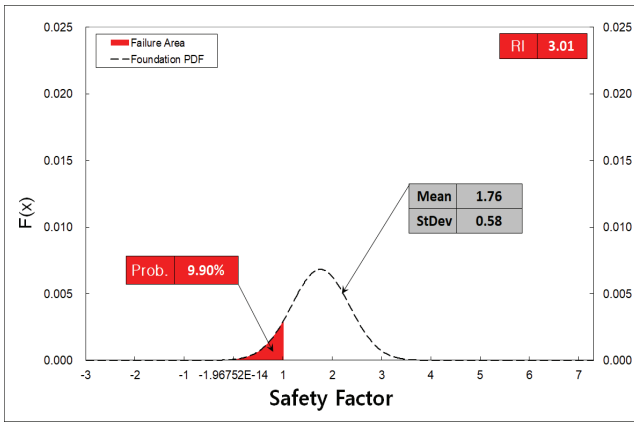


Fig. 12 Foundation PDF

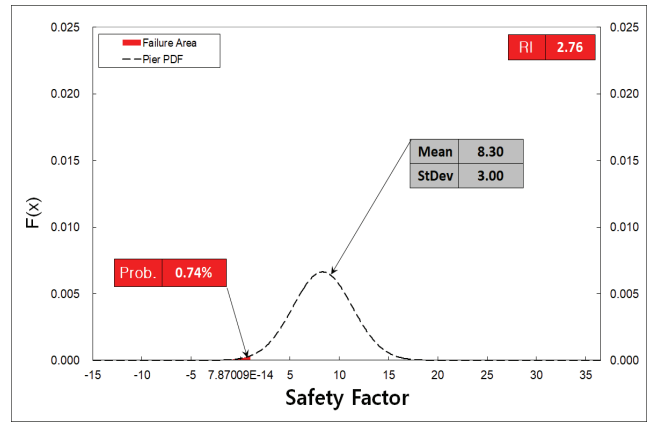


Fig. 13 Pier PDF

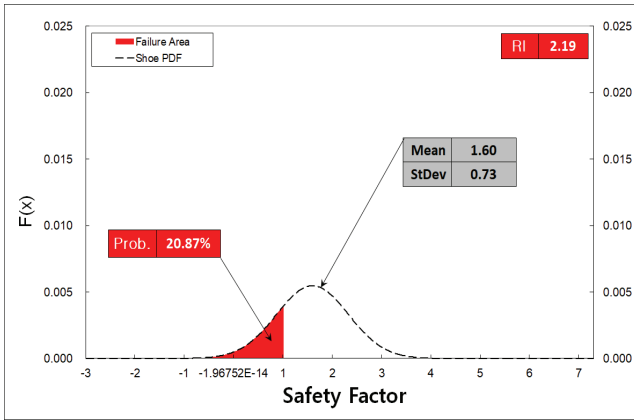


Fig. 14 Shoe PDF

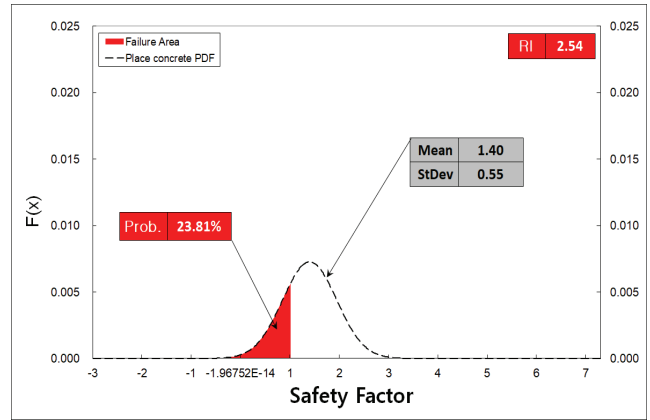


Fig. 15 Place concrete PDF

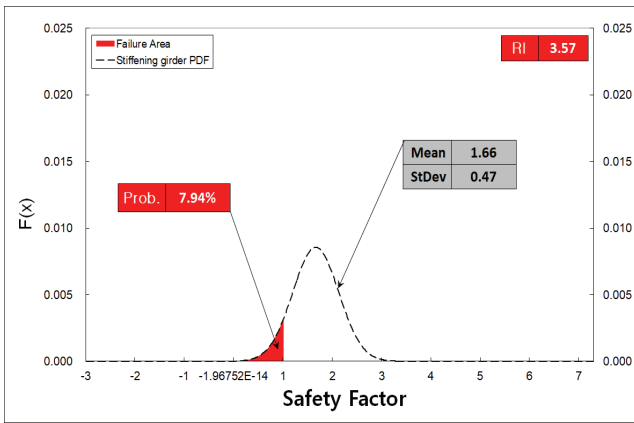


Fig. 16 Stiffening girder PDF

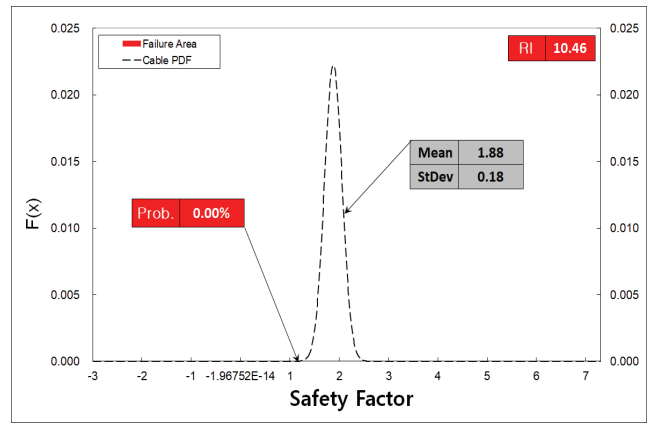


Fig. 17 Cable PDF

받침콘크리트, 보강형, 케이블에 대하여 안전율에 대한 확률 밀도함수(PDF)를 나타낸 것이며 이를 활용하여 각 부재에 대

Table 2 Mean and Standard deviation

Sign	Foundation	Pier	Shoe	Place Concrete	Stiffening girder	Cable
μ_z	1.76	8.30	1.60	1.40	1.66	1.88
σ_z	0.58	3.00	0.73	0.55	0.47	0.18

한 신뢰도 및 파괴확률을 확인하였다.

Table 2는 주요부재의 안전율에 대한 평균과 표준편차를 정리한 것이다.

Fig. 18에서 볼 수 있듯이 평균과 표준편차 모두 교각(8.30, 3.00)에서 가장 높았다. 안전율의 평균은 받침콘크리트(1.40)가 가장 낮았으며, 표준편차는 케이블(0.18)이 가장 낮게 나타났다.

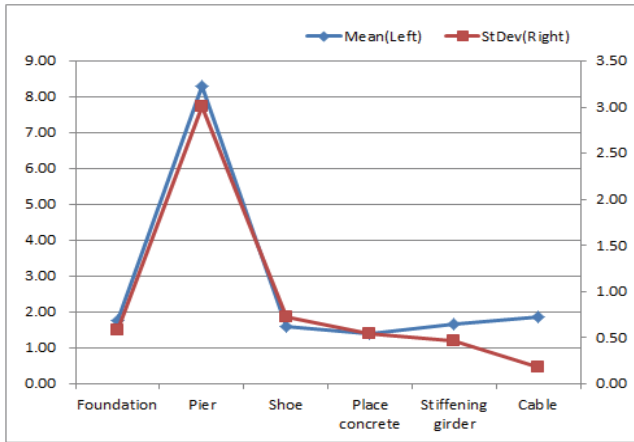


Fig. 18 Mean and Standard deviation

Table 3은 주요 부재별 신뢰도와 파괴 확률을 정리한 것이다. 신뢰도는 케이블이 10.46으로 가장 높았으며 받침이 2.19로 가장 낮았다.

Table 3 Members of Failure and Reliability

Sign	Founda-tion	Pier	Shoe	Place Concrete	Stiffening girder	Cable
P_f	9.90%	0.74%	20.87%	23.81%	7.94%	0.00%
β	3.01	2.76	2.19	3.07	3.57	10.46

Fig. 19는 신뢰도와 파괴확률을 선형그래프로 나타낸 것으로 서로 역의 관계를 보여주고 있다.

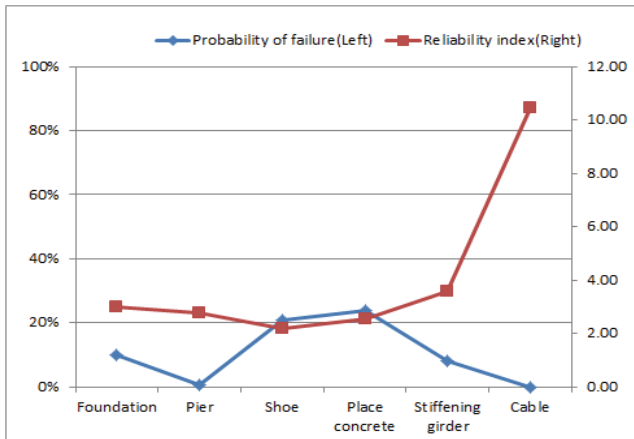


Fig. 19 Probability of failure VS Reliability index

3.3 취약도 및 민감도 평가

Table 4 Fragility Influence Coefficient and Fragility Share

Sign	Foundation	Pier	Shoe	Place Concrete	Stiffening girder	Cable
FIC	8.16	8.88	11.20	9.65	6.88	2.34
FS	17.3%	18.9%	23.8%	20.5%	14.6%	5.0%

Table 4는 주요 부재에 대한 신뢰도를 근거로 하여 산출된 취약 영향계수(FIC) 및 취약도 점유율(FS)을 정리한 것으로 높을수록 지진에 취약하다는 것을 의미한다. Fig. 20은 취약 영향계수(FIC)의 그래프로 받침이 가장 높게 나타났다.

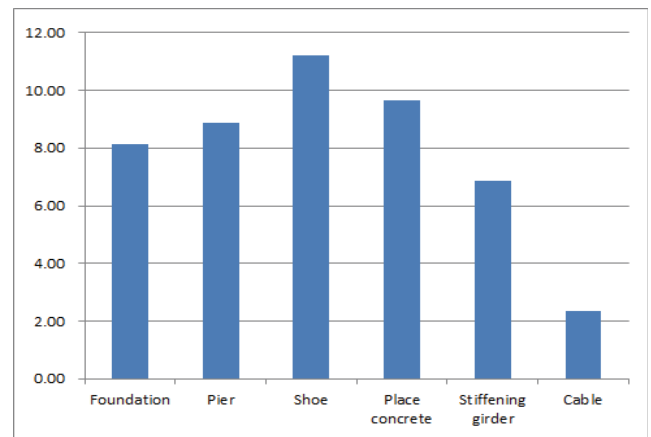


Fig. 20 Fragility influence coefficient

산출된 취약도의 검증을 위해 주요부재에 대한 민감도를 확인 하였으며 매개변수로는 지진하중과 안전율을 대상으로 검토하였다. Fig. 21은 이를 나타낸 토네이도 다이어그램으로 취약도 지수(FIC)와 민감도의 경향이 서로 유사한 것으로 나타났다.

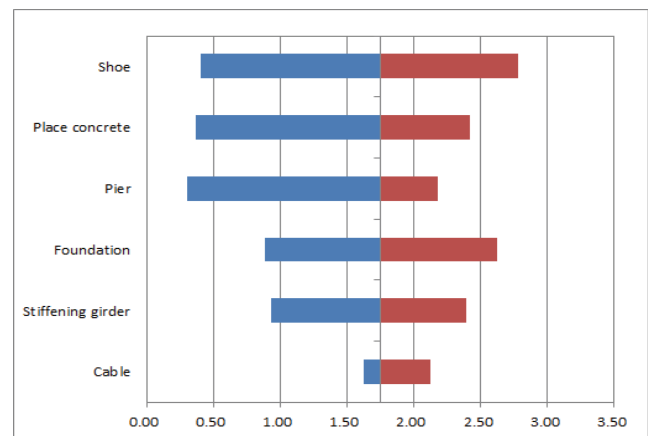


Fig. 21 Tornado Plot - Sensitivity of members

4. 결 론

각 주요부재에 대한 신뢰도는 케이블 부재의 신뢰도(10.46)가 가장 높았으며 받침(2.19)이 가장 낮은 것으로 확인되었다. 이에 따른 원인을 파악하기 위해 안전율의 구성변수인 공급역량과 소요역량을 확인 하였다. 그 결과 케이블에 발생하는 공급역량과 소요역량의 변화(분산)가 상대적으로 작은 반면, 받침은 공급역량과 소요역량의 변화(분산)가 크기 때문인 것으로 나타났다. Fig. 22는 케이블 교량 주요부재의 취약도 점유율 분포를 나타낸 것으로 받침(23.8%)이 지진에 가장 취약하였으며 받침콘크리트(20.5%), 교각(18.9%), 기초(17.3%), 보강형(14.6%), 케이블(5.0%) 순으로 나타났다.

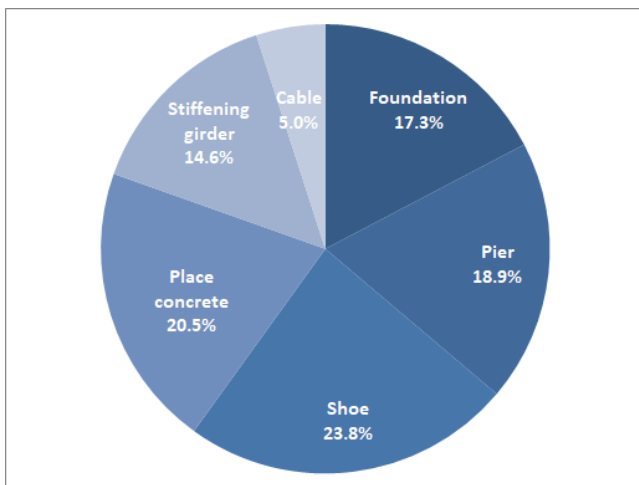


Fig. 22 Fragility share pie chart

받침이 가장 취약한 것은 공급역량과 소요역량의 다양성에 기인한다. 공급역량의 다양성은 받침 역할 상 하부구조와 상부구조의 연결 부재로서 중력, 지진, 온도 등 다양한 하중에 저항해야 하는 구조적 특성에 기인한 것으로 수치해석 과정을 통해 확인되었다. 소요역량의 다양성은 소요역량 산출(구조계산서)에서 하중 방향에 따라 형상이 다양하기 때문인 것으로 나타났다.

이 연구에서는 선정된 케이블 교량의 주요부재에 대한 지진취약도 평가절차 및 분석결과를 기술하였다. 기술된 분석방법과 결과는 내진보강 우선순위를 합리적으로 결정할 수 있는 방법론을 제시하고 있으나 대상 구조물이 변경될 경우 추가적인 분석 과정이 필요하다. 이러한 과정을 줄이기 위해 분석 대상의 확대와 빅데이터 기반의 통계적 분석을 통한 기준설정 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2017-MOIS31-002)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Ang, A. H-S., and Tang, W. H. (2011), Probability Concepts In Engineering, Goomibook, Seoul, 105-194.
2. Cho, H. N., Kang, K. K., and Cha, C. J. (2005), Reliability-Based Managing Criteria for Cable Tension Force in Cable-stayed Bridges, *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 9(3), 129-138(in Korean, with English abstract).
3. Haldar, A. (2006), Recent Developments in Reliability-Based Civil Engineering, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore By Mainlar, 77-98.
4. Haldar, A., and Mahadevan, S. (2000), Probability Reliability and Statistical Methods in Engineering Design, John Wiley & Sons, New York, 63-68.
5. Iksan regional office for construction and management (IROCM) (2016), Seismic performance evaluation and reinforcement design of bridges including National highway No. 27, Ministry of land, infrastructure and transport (MOLIT), written in Korean.
6. Jeong, Y. S., Kim, W. S., Lee, I. K., and Lee, J. H. (2016), Development of Bridge Inspection Reliability and Improvement Strategy, *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 20(5), 50-57(in Korean, with English abstract).
7. Kim, D. K. (2017), Dynamics of Structures, Goomibook, Seoul, 333-348.
8. Kim, S. Y. (2016), Correlation Effect of Maintenances on Probabilistic Service Life Management, *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 20(1), 48-55(in Korean, with English abstract).
9. Korea infrastructure safety and technology corporation (KISTEC) (1999), Seismic Performance Evaluation and Reinforcement of Existing Bridges, Korea infrastructure safety and technology corporation (KISTEC), written in Korea.
10. Kwak, J. M. (2013), Research and Statistical Analysis, Informa, Seoul, 49-64.
11. Lee, H. S., and Kwon, S. J. (2018), Probabilistic Analysis of Repairing Cost Considering Random Variables of Durability Design Parameters for Chloride Attack, *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 22(1), 32-39(in Korean, with English abstract).
12. Lee, S. W., and Kim, S. H. (2004), Retrofit Measures Based on Seismic Retrofit Priority of Existing Bridges, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, 8(3), 77-86.
13. Ministry of land, infrastructure and transport (MOLIT) (2016), Korean highway bridge design code (limit state design), written in Korean.
14. Ministry of land, infrastructure and transport(MOLIT) (2015), Evaluation of seismic performance of existing structures (bridges) Commentary and Examples, Korea infrastructure safety and

technology corporation (KISTEC), written in Korea.

15. Park, J. W., Choo, J. H., Park, G. R., Hwang, I. B., and Shin, Y. S. (2015), The Evaluation of Non-Destructive Formulas on Compressive Strength Using the Reliability Based on Probability, *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 19(4), 25-34(in Korean, with English abstract).
16. Park, K. S., Ju, H. S., Choi, H. C., and Kim, I. H. (2009), Advanced Seismic Retrofit Priority Decision For Seismic Performance Estimation of Existing Bridges, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, 13(6), 47-57.
17. Williams, R. (2005), *Electrical Engineering Probability*, Inter Vision, Seoul, 259-281.
18. Yang, Y. S., Seo, Y. S., and Lee, J. O. (1999), *Structural Reliability Engineering*, Seoul National University Press, Seoul, 47-68.

Received : 12/05/2018

Revised : 03/06/2019

Accepted : 06/12/2019

요 지 : 이 연구에서는 교량 주요부재의 내진보강 우선순위를 합리적으로 결정하는데 그 목적이 있다. 평가대상으로 케이블 교량을 선정하였으며 정량적 지표인 주요부재의 취약도를 평가하기 위해 확률분포에 근거한 신뢰도를 활용하였다. 확률변수인 안전계수는 주하중(고정하중, 활하중)과 부하중(지진, 내풍, 온도 등)을 고려하였고 지진하중은 교량의 사용수명 동안 발생 가능한 진진을 적용하였다. 이러한 신뢰도를 근간으로 각 주요부재의 취약도 점유율을 확인한 결과 받침(23.8%)이 가장 취약하였으며 받침콘크리트(20.5%), 교각(18.9%), 기초(17.3%), 보강형(14.6%), 케이블(5.0%) 순으로 나타났다.

핵심용어 : 케이블교량, 취약도, 신뢰도, 안전율
