

## 지진특성을 고려한 장경간 현수교량의 시공방안별 내진성능 평가에 관한 연구

### A Study on Seismic Capacity Assessment of Long-Span Suspension Bridges by Construction Methods Considering Earthquake Characteristics

한성호\* · 장선재\*\* · 임남형\*\*\*

Han, Sung Ho · Jang, Sun Jae · Lim, Nam Hyung

#### Abstract

The numerical analysis and safety assessment by construction stages were considered the essential examination particular in order to solving the unstability of long-span bridges in the middle a construction. When estimating structural response characteristics by the construction stage analysis of long-span bridges, the influence of the near-field ground motion (NFGM) would be evaluated as a critical factor for the seismic design because it indicates clearly different aspects from the existing input earthquake motion data. Therefore, this study re-examined the response aspect of long-span bridges considering NFGM characteristics based on the response spectrum result, and advanced the presented numerical analysis program by the related research for conducting the construction stage analysis and reliability assessment of long-span bridges efficiently. The excellency of various construction schemes was assessed using the time history analysis result of critical member considering NFGM characteristics. For evaluating quantitative safety level, the reliability analysis was conducted considering the influence of external uncertainties included in random variables, and presented the safety index and failure probability of the critical construction stage by NFGM characteristics. In addition, the reliability result was examined the influence of internal uncertainties using monte carlo simulation (MCS), and assessed the distribution aspect of the essential analysis result. It is expected that this study will provide the basic information for the construction safety improvement when performing seismic design of long-span bridges considering NFGM characteristics.

**Keywords** : long-span bridges, response spectrum, construction safety assessment, internal and external uncertainty, Near-Field Ground Motion characteristic, safety level, seismic design

#### 요 지

시공단계별 수치해석 및 안전성 평가는 장경간 교량의 시공 중 불안전성을 해결하기 위한 주요 검토사항으로 고려되어야 한다. 장경간 교량의 시공단계해석에 따른 구조응답특성 평가 시, 근거리지진(NFGM)의 영향은 기존 입력지진동 데이터와는 확연히 다른 특성을 가지고 있기 때문에 내진설계를 위한 주요 변수로 평가되어야 한다. 따라서 이 연구에서는 응답스펙트럼 해석결과를 바탕으로 NFGM 특성에 따른 장경간 교량의 응답양상을 재검토하였으며, 장경간 교량의 시공단계해석 및 신뢰성평가를 효율적으로 수행하기 위해 관련연구에서 제시된 수치해석 프로그램을 개선하였다. NFGM 특성을 고려한 다양한 시공방안의 우수성은 주요 부재의 시간이력해석 결과를 이용하여 평가하였다. 정량적인 안전수준 평가를 위해 확률변수에 포함된 External Uncertainty의 영향을 고려하여 신뢰성해석을 수행하였으며, NFGM 특성에 따른 주요 시공단계의 안전지수 및 파괴확률을 제시하였다. 아울러, 몬테카르로 시뮬레이션(MCS)을 이용하여 신뢰성해석 결과에 대해 Internal Uncertainty의 영향을 검토하였으며, 주요 해석결과와 분포양상을 평가하였다. 이 연구는 NFGM 특성을 고려한 장경간 교량의 내진설계 시, 시공안전성 향상을 위한 기초자료를 제공할 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 장경간 교량, 응답스펙트럼, 시공안전성 평가, 근거리지진 특성, 내·외적 불확실성, 안전수준, 내진설계

#### 1. 서 론

장경간 교량의 붕괴사고는 사회·경제적으로 막대한 손실을 수반하므로, 시공과정에 대한 정밀한 재평가는 매우 중요

한 사항이며, 지속적인 연구가 필요한 분야이다(Bang 등 (1996)). 최근, 기존 지진특성곡은 확연히 다른 근거리지진(NFGM)의 발생으로 인해 막대한 인적·경제적 피해가 속출하고 있다(Rao 등(2001)). NFGM의 영향 평가는 원지력 격

\*정회원 · 충남대학교 토목공학과 공학박사 (E-mail : han2001@cnu.ac.kr)

\*\*충남대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : sjjang@cnu.ac.kr)

\*\*\*정회원 · 교신저자 · 충남대학교 토목공학과 부교수 (E-mail : nhrim@cnu.ac.kr)

납구조물을 비롯하여 주요 사회기반시설에 대해 국내·외적으로 활발하게 수행되고 있다(Alavi (2001), Korea Atomic Energy Research Institute(2003), Han 등(2010)). 구조물에 포함된 확률변수의 불확실성은 Internal and External Uncertainties로 구분하여 적용하는 것이 안전성을 평가하기 위해 타당한 것으로 검토되었다(Ang(2004), Ang 등(2007), Han 등(2008)). 이 연구에서는 응답스펙트럼 해석결과를 바탕으로 NFGM 특성을 검토하였다(Bang 등(2007), Kim 등(2002)). 또한 NFGM 특성을 고려한 장경간 교량의 합리적 시공방안결정 및 지진응답특성을 상세히 검토하기 위해, 시공단계별 시간이력해석 및 신뢰성평가를 수행하였다. 이를 위해, 관련연구에서 제시된 수치해석 프로그램을 개선하여 시공 중 구조계의 변화에 따른 시공단계해석, 신뢰성평가 및 MCS(Monte Carlo Simulation)를 보다 일괄적이며, 효율적으로 처리할 수 있도록 작성하였다(Han 등(2009a)). 시공방안의 우수성은 NFGM 특성을 고려한 주요 시공단계의 수치해석 결과를 바탕으로 검토하였다. 또한 장경간 교량의 시공안전성은 External Uncertainty의 영향에 따른 신뢰성해석을 수행하여 평가하였다. 아울러 검토된 안전지수(Safety Index:  $\beta$ ) 및 파괴확률(Failure Probability:  $pf$ )을 Internal Uncertainty의 영향에 따른 확률변수로 가정한 후, 최적 구조설계의 평가기준이 되는 주요 분포양상을 검토하였다. 따라서 이 연구결과는 NFGM 특성을 고려한 장경간 교량의 시공안전성 확보 및 최적 시공방안을 결정하기 위한 기초자료로 활용될 것이다. Fig. 1은 이 연구에서 수행한 장경간 교량의 최적 시공방안

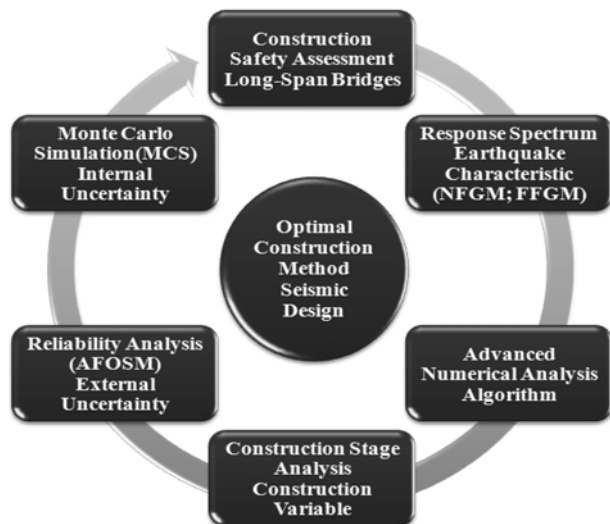


Fig. 1 Safety Assessment Concent for Optimal Construction Method of Long-Span Suspension Bridges

을 위한 시공안전성 평가과정의 개요를 도시한 것이다.

## 2. 응답스펙트럼 및 신뢰성평가 방안

응답스펙트럼을 이용한 NFGM 특성 평가는 Table 1 (TCU052; TCU068; ILA002; ILA035) 및 Table 2에 제시된 입력지진동을 적용하여 수행하였다. Table 1의 입력지진동에 의한 응답스펙트럼 평가결과를 정리하면 다음과 같다

Table 1. Characteristics of Selected Earthquake Records

| Site | $D_{rup}$ (km) | PGA (gal) |     |     | PGV (cm/s) |      |     | PGV/PGA |      |      |
|------|----------------|-----------|-----|-----|------------|------|-----|---------|------|------|
|      |                | EW        | NS  | UD  | EW         | NS   | UD  | EW      | NS   | UD   |
| NFGM | 1.84           | 348       | 419 | 241 | 159        | 118  | 111 | 0.46    | 0.28 | 0.46 |
|      | 3.01           | 566       | 462 | 486 | 177        | 263  | 187 | 0.31    | 0.57 | 0.39 |
| FFGM | 109.11         | 48        | 73  | 22  | 10.2       | 10.7 | 6.7 | 0.21    | 0.15 | 0.30 |
|      | 104.77         | 70        | 52  | 11  | 10.5       | 9.9  | 2.1 | 0.15    | 0.19 | 0.19 |

\*Distance from Rupture; \*\*FFGM: Far-Field Ground Motion

Table 2. Characteristics of Selected Near-Field Ground Motion by Rock and Soil Site Conditions

| Site Condition | NFGM                  | Station Name                  | Magnitude (Mw) | Station No.          | Max. Acceleration(g) | Max. Velocity (cm/sec) | Max. Displacement (cm) |
|----------------|-----------------------|-------------------------------|----------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| Rock Site      | Landers, 1992         | Lucerne                       | 7.20           | Luce 270<br>Luce 360 | 0.7302<br>0.8050     | 148.64<br>32.79        | 271.12<br>71.78        |
|                | Cape Mendocino, 1992  | Cape Mendocino                | 7.00           | Cape 00<br>Cape 90   | 1.4960<br>1.0380     | 131.00<br>43.90        | 59.88<br>34.43         |
|                | Kobe, 1995            | JMA                           | 6.90           | Kobe EW<br>Kobe NS   | 0.6287<br>0.8332     | 75.67<br>92.09         | 1536.87<br>234.72      |
|                | Loma Prieta, 1989     | Los Gatos Presentation Center | 6.90           | Lgpc 00<br>Lgpc 90   | 0.5700<br>0.6075     | 96.31<br>52.14         | 36.93<br>16.86         |
| Soil Site      | Tabas, 1978           | Tabas                         | 7.40           | Taba 74<br>Taba 344  | 0.8790<br>0.9363     | 98.26<br>114.23        | 35.73<br>87.78         |
|                | Cape Mendocino, 1992  | Petrolia                      | 7.00           | Petr 00<br>Petr 90   | 0.5890<br>0.6616     | 46.39<br>90.86         | 26.66<br>26.74         |
|                | Northridge, 1994      | Rinaldi Receiving Station     | 6.70           | Rina 228<br>Rina 318 | 0.8410<br>0.4798     | 174.81<br>80.63        | 49.16<br>48.47         |
|                | Northridge, 1994      | Sylmar Converter Station      | 6.70           | Sylm 90<br>Sylm 360  | 0.6037<br>0.8423     | 77.43<br>128.88        | 20.25<br>30.67         |
|                | Imperial Valley, 1979 | Meloland                      | 6.50           | Melo 00<br>Melo 270  | 0.3170<br>0.2966     | 70.21<br>94.63         | 122.90<br>313.30       |

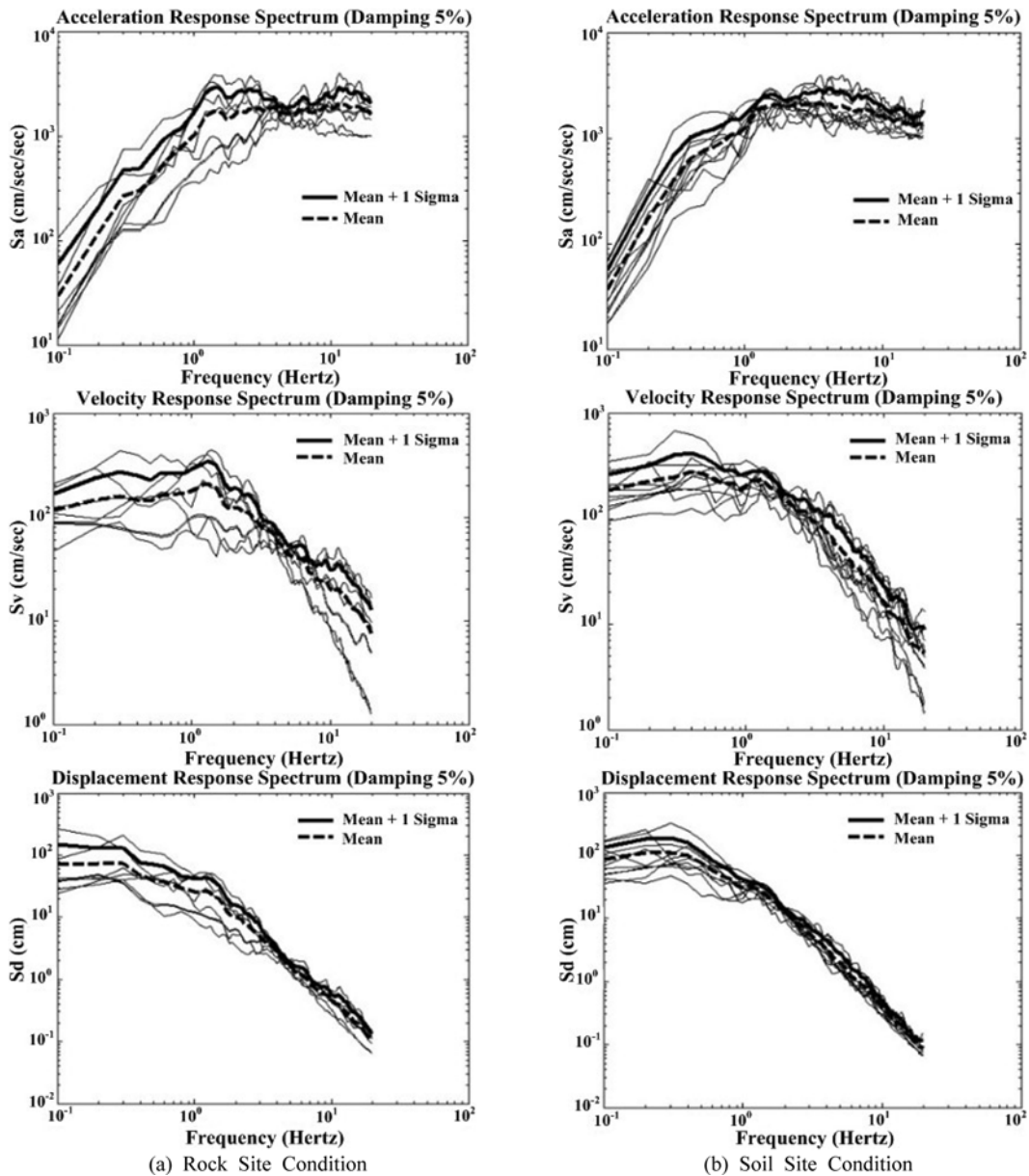


Fig. 2 Response Spectrums of Near-Field Ground Motion by Rock and Soil Site Conditions

(Bang 등(2005), Han 등(2010)). 가속도응답스펙트럼은 약 0.4~1.5초 이상에서 NFGM에 의한 영향을 큰 것으로 평가되었다. NFGM의 속도응답스펙트럼은 최대속도응답 값이 장주기 쪽으로 이동하는 것으로 검토되었다. 변위응답스펙트럼은 장주기에서 NFGM에 영향이 매우 크게 산정되었다. 응답스펙트럼을 이용하여 NFGM 특성을 평가한 결과, 동일한 단면을 갖는 장주기 구조물은 NFGM에 의한 영향이 큰 것으로 검토되었다. 또한 NFGM의 영향을 받을 경우, 연성거동을 하도록 설계된 구조물은 구조물의 강성거동 특성과 더불어 제한된 변위 이상의 응답양상을 나타내어 예상외의 피해를 발생시킬 수 있는 것으로 평가되었다. 따라서 장경간 교량의 시공방안결정 시, Completed System에 비해 매우 유연한 시공단계의 경우, NFGM 특성을 고려한 응답양상 검토과정이 필요한 것으로 사료된다.

한편, Table 2의 Rock Site 및 Soil Site에서 측정된 입력지진동을 이용하여 지반조건에 따른 응답스펙트럼 평가결과를 요약하면 다음과 같다(Kim 등(2002), Korea Atomic Energy Research Institute(2003)). Fig. 1은 각각의 응답스

펙트럼을 통계처리 하여 평균 및 표준편차를 산정한 후, 비초과확률(Non-exceedance Probability)이 84%인 평균+1Sigma 및 평균응답스펙트럼 작성한 것이다. Fig. 2에서 굵은 실선은 비초과확률이 84%인 평균+1Sigma, 굵은 점선은 평균응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 전반적인 응답스펙트럼 양상은 NFGM에 대한 지반조건을 명확히 나타내고 있다. 특히, Soil Site에 가설된 저진동수 특성을 갖는 구조물의 경우, NFGM에 매우 취약한 것으로 평가되었다. 따라서 장경간 교량의 시공단계별 내진설계 시, 지반조건에 영향을 충분한 검토가 선행되어야 할 것으로 판단된다. 신뢰성이론은 요소신뢰성(Component Reliability)과 시스템신뢰성(System Reliability)으로 대별할 수 있다. 일반적으로 신뢰성평가 방법은 다음과 같은 세 그룹으로 분류된다. 1) Level I: 반(Semi) 확률적 방법이며, 부분적 하중계수나 안전계수를 이용하는 것이다. LSD(Limit State Design) 또는 LRFD(Load Resistance Factor Design)에 의한 구조설계 과정에서 많이 적용되고 있는 방안이다. 2) Level II: 2차 모멘트 방법을 이용하여 근사적으로 안전지수를 산정하는 방안이다. 3) Level

III: 수치해석이나 MCS를 이용한 엄밀 해석에 의해 구조물의 파괴확률을 직접 산정하는 방안이다. External Uncertainty의 영향에 따른 장경간 교량의 신뢰성평가는 NFGM 특성을 고려한 시공단계해석결과와 Rackwitz-Fiessler 등이 제안한 등가정규변환 방안을 이용하여 수행하였다. 등가정규변환 방법은 연성 비정규분포를 갖는 기본변수들의 한계상태방정식이 비선형함수(Nonlinear State Function)인 경우에도 비교적 정확한 해석결과를 산정할 수 있는 신뢰성평가 방안이다. 구조물의 안전지수를 산정하기 위한 반복시행(단계 1~8) 알고리즘은 다음과 같이 정리할 수 있다(Joe 등(2008), Rackwitz 등(1978)).

- Stage 1: 고려하고자 하는 한계상태방정식을 정한다.
- Stage 2: 신뢰성지수  $\beta$ 를 가정한다.
- Stage 3: 모든  $i$ 에 대하여 초기치  $X_i^* = X_i$ 를 설정한다.
- Stage 4: 비정규 변수들에 대하여 등가의 정규분포 평균 ( $\mu_{X_i}^N$ )과 표준편차 ( $\sigma_{X_i}^N$ )를 계산한다.
- Stage 5: 추정점  $X_i^*$ 에서 편미분  $\frac{\partial g}{\partial X_i}$ 를 계산한다.
- Stage 6: 단위 구배벡터  $\alpha_i$ 를 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$\alpha_i = \frac{(\partial g / \partial X_i) \sigma_{X_i}^N}{\left[ \sum [(\partial g / \partial X_i) \sigma_{X_i}^N]^2 \right]^{1/2}}$$

- Stage 7:  $X_i^*$ 의 새로운 값을 다음 식으로부터 계산한다.  
 $X_i^* = \mu^N - \alpha_i \beta \sigma_{X_i}^N$  그리고  $\alpha_i$ 가 수렴될 때까지 Stage 4~7을 반복한다.
- Stage 8: 고려하는  $g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) = 0$ 에 대하여  $\beta$ 를 계산한다. 연속적인 반복시행에 의해  $\beta$ 의 오차가 허용 한계 내에 들어 올 때까지 Stage 4~8을 반복한다.

### 3. NFGM 특성을 고려한 시공단계해석 및 신뢰성평가

장경간 교량의 수치해석 결과는 비선형 거동특성 때문에 주형, 행거, 주케이블 및 주탑의 수치모델링 방법에 따라서 상당히 큰 영향을 받는다. 이 연구에서 개선한 수치해석 알고리즘은 Figs. 3~5와 같은 해석모델을 이용하여 작성하였다(Bang 등(1996), Irvine(1981), Jang 등(1994)).

Fig. 6은 개선된 수치해석 알고리즘의 개요에 대한 내용을 정리한 것이며, Fig. 7은 장경간 교량의 수치해석 모델링 및 주요 평가부재의 위치를 도시한 것이다(Ministry of Construction & Transportation of Korea(1993), Kim 등(1994)). 시공단계해석을 위한 장경간 교량의 수치해석 모델은 인용문헌에서와 같이

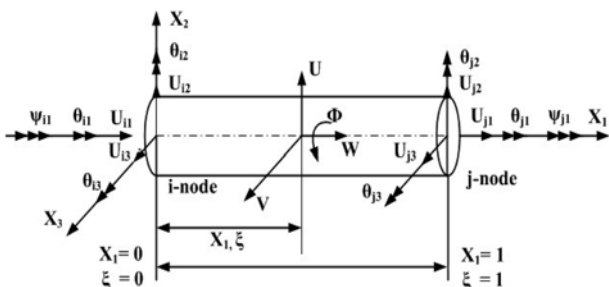


Fig. 3 Displacement Vector of Three Dimensional Frame Element

총절점(379개), 탄성현수선요소(202개), 뼈대요소(174개) 및 절점연결요소(204개)를 이용하였다(Lee(2006)). 시공방안은

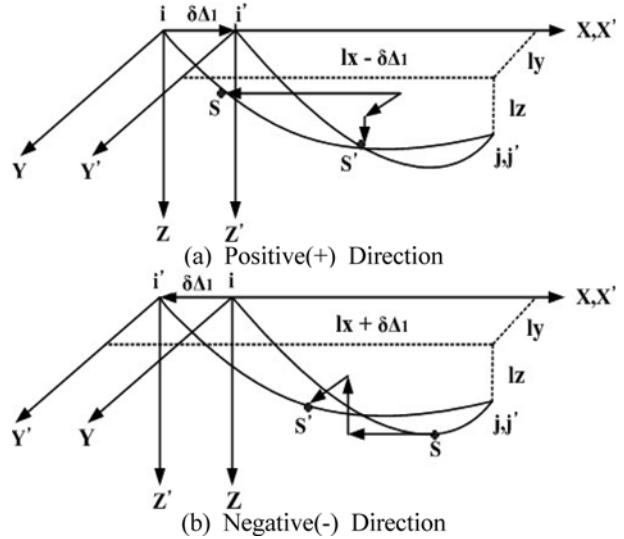


Fig. 4  $\delta_{L1}$  of Virtual Displacement for Shape Function Three Dimensional Elastic Catenary Cable Element

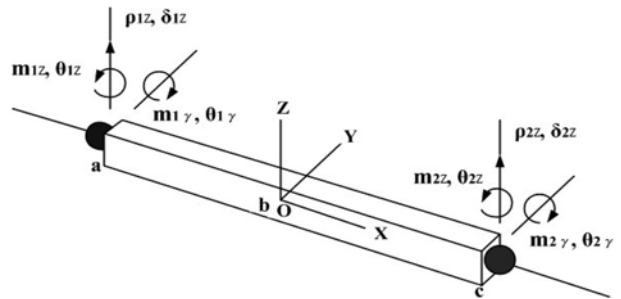


Fig. 5 Three Dimensional Nodal Connection Element

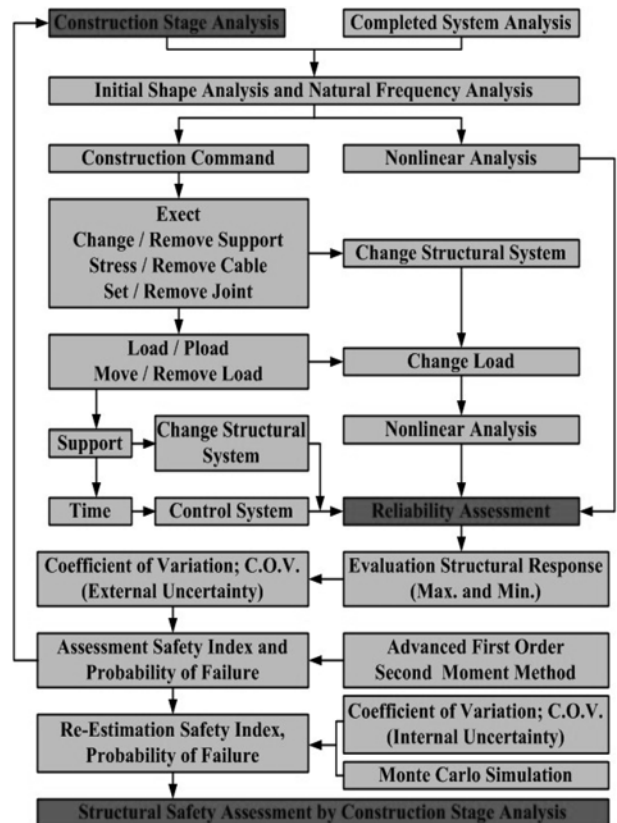


Fig. 6 Advanced Numerical Algorithm for Construction Stage Analysis and Structural Reliability Assessment

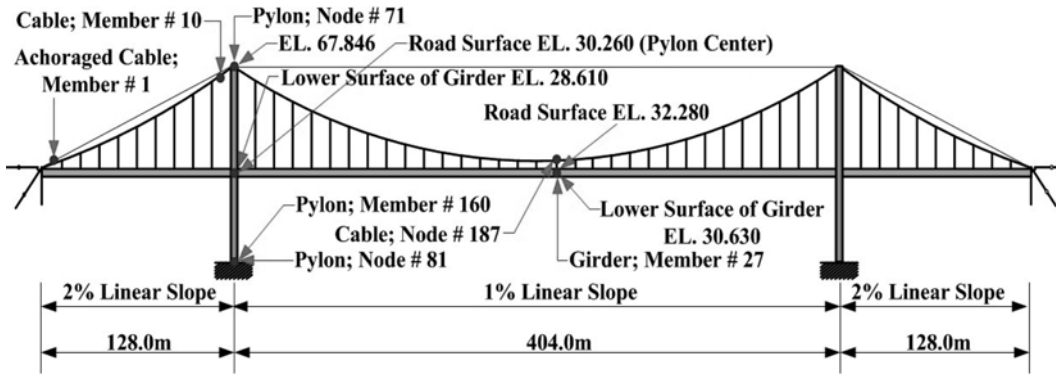


Fig 7. Profile and Numerical Analysis Modeling of the Objective Bridge  
(X: Horizontal Direction; Y: Lateral Direction; Z: Vertical Direction)

Table 3. Alternative Construction Methods by Construction Variables (Han 등(2009a))

| Construction Cases | Construction Direction of Main-Span Girder | Construction Direction of Side-Span Girder | Simultaneous Construction | Construction Sequences               |
|--------------------|--|--|---------------------------|--------------------------------------|
| Case 1             | Main-Span(Center) → Pylon                  | Anchorage → Pylon                          | Non-consideration         | I-type Method (the Objective Bridge) |
| Case 2             | Pylon → Main-Span(Center)                  | Anchorage → Pylon                          |                           | -                                    |
| Case 3             | Main-Span(Center) → Pylon                  | Pylon → Anchorage                          |                           | II-type Method                       |
| Case 4             | Pylon → Main-Span(Center)                  | Pylon → Anchorage                          |                           |                                      |
| Case 5             | Main-Span(Center) → Pylon                  | Anchorage → Pylon                          | Consideration             | -                                    |
| Case 6             | Pylon → Main-Span(Center)                  | Anchorage → Pylon                          |                           |                                      |
| Case 7             | Main Span(Center) → Pylon                  | Pylon → Anchorage                          |                           |                                      |
| Case 8             | Pylon → Main-Span(Center)                  | Pylon → Anchorage                          |                           |                                      |

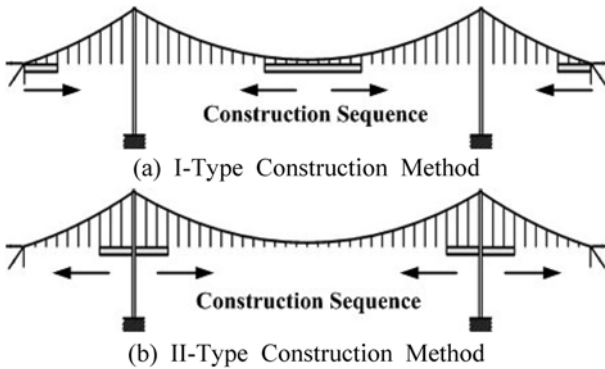


Fig. 8 Construction Methods of Long-Span Bridges

Fig. 8에 도시된 기존 시공방법 및 Fig. 9와 같은 실제 대상교량의 시공방법을 응용하여 Table 3과 같이 제시하였다. 이때, 시공단계는 주탑과 주케이블이 완성된 1단계로부터 주형의 가설단계에 따라 전체 27단계로 구분하였으며, 모든 시공방안의 시공 1단계 및 27단계는 동일하게 설정하였다. 입력지진동은 상대적으로 수직성분이 큰 NFGM 특성과 장경간 교량(내진 1 등급)인 점을 감안하여, NFGM 특성을 보다 명확하게 나타낸 가속도 시간이력(TCU052)을 방향성분 별로 정규화(0.154 g)한 후, 주탑과 Anchorage의 탄성 지지점에 세 방향으로 동시에 적용하였다. 모든 모드에서의 감쇠비는 2.0%, 수치해법은 Newmark-beta 방안을 이용하였다.

### 3.1 NFGM 특성을 고려한 장경간 교량의 시공단계해석

제안된 시공방안의 우수성은 NFGM 특성을 고려한 응답양상을 FFGM에 의한 평가결과와 비교하여 분석하였다(Han 등 (2009a)). Fig. 10은 NFGM 특성에 따른 71번 절점의

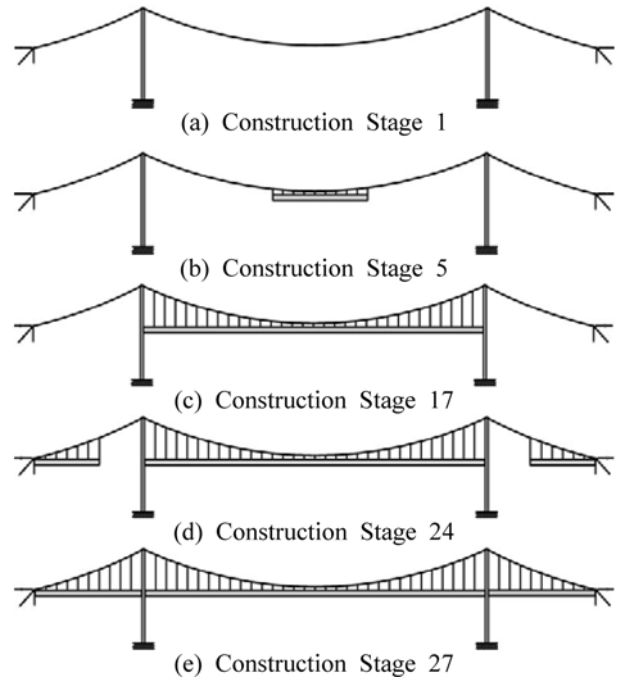


Fig. 9 Construction Method of the Objective Bridge

주요 시공단계별 최대응답을 도시한 것이다. 교축방향 변위 응답의 경우, 동시 시공성을 고려한 Case 5~8은 전반적으로 Case 1~4에 비해 안전한 응답양상을 나타냈다. 최대응답비는 약 2.61(Case 1, 3)로 NFGM에 의한 영향이 크게 검토되었다. 교축직각방향 변위응답의 경우, Case 2, 4와 Case 6, 8은 Case 1, 3과 Case 5, 7에 비해 안전한 시공방안으로 분석되었다. 최대응답비는 약 1.94(Case 1, 3)로 NFGM의 영향이 크게 산정되었다. 그러나 NFGM에 의한 수직방향

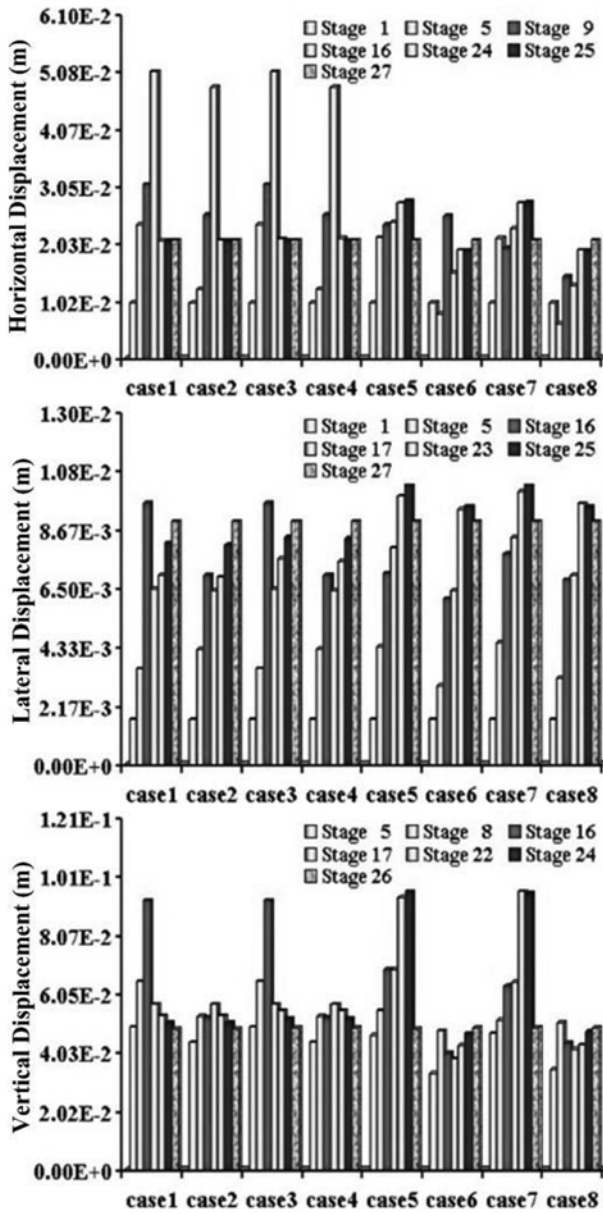


Fig. 10 Maximum Displacement at the Top of Pylon (NFGM)

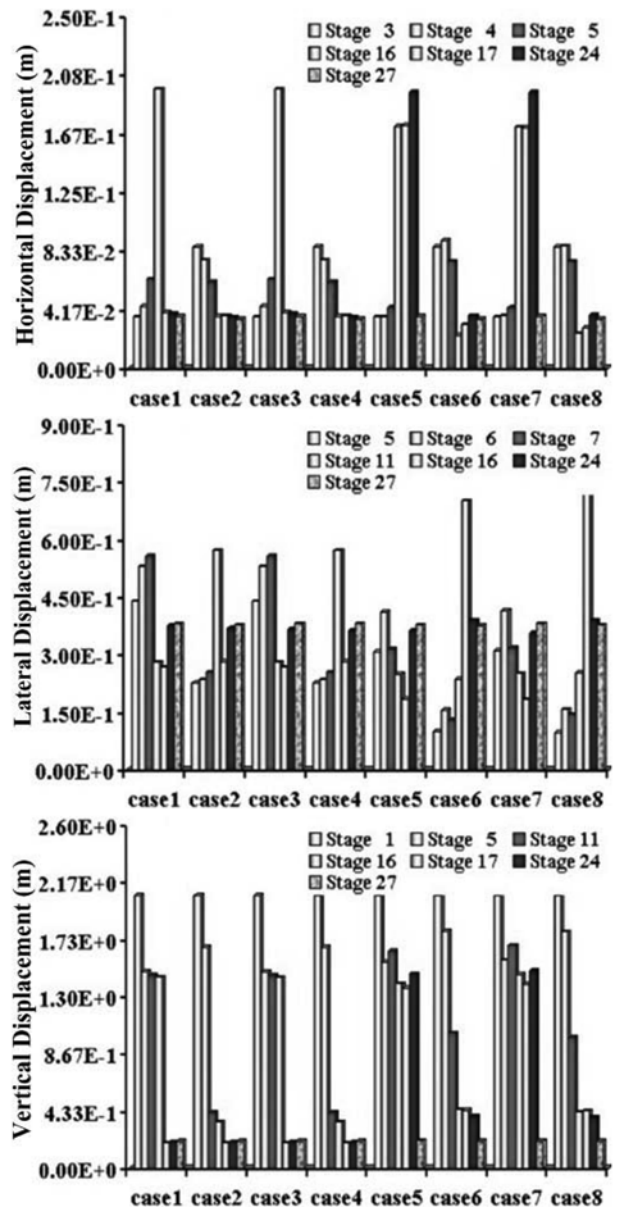


Fig. 11 Maximum Displacement at the Middle of Main-Span (NFGM)

변위응답의 경우, FFGM의 응답양상과는 다르게 Case 1, 2와 Case 5, 7은 주경간 Completed System까지 증가하였으며, 주경간이 완성된 이후, 급격히 감소하는 양상을 보인 반면, Case 2, 4와 Case 6, 8은 시공이 진행되면서 선형적으로 증가하였다.

Case 1~4는 Case 5~8에 비해 안전한 시공방안인 것을 확인할 수 있었으며, 특히 Case 2, 4는 다른 시공방안에 비해 보다 안전한 시공방안으로 분석되었다. 최대응답비는 약 1.38(Case 2, 4)로 NFGM의 영향이 크게 산정되었다.

Fig. 11은 NFGM을 고려한 187번 절점의 주요 시공단계별 최대응답을 도시한 것이다. 교축방향 및 교축직각방향 변위응답의 경우, Case 2, 4와 Case 6, 8은 안전한 시공방안으로 평가되었으며, 최대응답비는 각각 약 2.94~3.07(Case 6, 8) 및 약 1.95(Case 2, 4)로 NFGM의 영향이 크게 산정되었다. 그러나 수직방향의 최대응답비는 0.83(All Cases)로 NFGM의 영향이 작게 검토되었다. Case 6, 8은 다른 시공방안에 비해 불안정한 결과를 보였으나, Case 5, 7은 비교적 안전한 시공방안으로 평가되었다. Table 4는 NFGM

특성에 따른 시공단계별 최대변위응답을 정리한 것이다. 교축방향 및 수직방향의 전반적인 응답양상은 NFGM에 의한 응답이 크게 산정되었다. 교축직각방향의 응답양상은 시공초기에는 작게 평가되었으나, Completed System에서는 NFGM의 영향이 크게 나타났다. 이러한 수치해석 결과는 장경간 교량의 구조적 특성과 NFGM 특성을 잘 반영한 것으로 사료된다.

부재력응답은 최대축력 및 휨모멘트가 발생하는 81번 절점에 대하여 검토하였으며, NFGM 특성을 고려한 주요 시공단계별 최대응답을 Fig. 12에 도시하였다. 교축방향 휨모멘트( $M_{33}$ )의 경우, 최대응답비는 약 1.84~1.99(Case 6, 8)로 NFGM의 영향이 크게 검토되었다. Case 6, 8은 시공 1단계부터 최종단계까지 선형적인 증가 양상을 보였으며, 다른 시공방안에 비해 변동양상이 비교적 작은 것으로 평가되었다. 축력 및 교축직각방향 휨모멘트( $M_{22}$ )는 시공방안별로 최대응답을 나타낸 시공단계가 불규칙하게 검토되었다. 최대응답비는 축력의 경우, 약 1.34(Case 2, 4)로 NFGM의 영향이 큰 반면, 교축직각방향 휨모멘트는 약 0.65(Case 2, 4)

Table 4. Maximum Displacement by Acceleration Time History (NFGM)

[Unit: m]

| Construction Schemes | Displacement of No. # 71 (Construction Stage) |                   |                    | Displacement of No. # 187 (Construction Stage) |                   |                    |
|----------------------|---|-------------------|--------------------|--|-------------------|--------------------|
|                      | Horizontal Direction                          | Lateral Direction | Vertical Direction | Horizontal Direction                           | Lateral Direction | Vertical Direction |
| Case 1               | 5.17E-2(16)                                   | 9.83E-3(16)       | 9.42E-2(16)        | 2.02E-1(16)                                    | 5.67E-1(7)        | 2.11E+0(1)         |
| Case 2               | 4.90E-2(16)                                   | 9.06E-3(27)       | 5.79E-2(17)        | 8.78E-2(3)                                     | 5.82E-1(11)       | 2.11E+0(1)         |
| Case 3               | 5.17E-2(16)                                   | 9.83E-3(16)       | 9.42E-2(16)        | 2.02E-1(16)                                    | 5.67E-1(7)        | 2.11E+0(1)         |
| Case 4               | 4.90E-2(16)                                   | 9.06E-3(27)       | 5.79E-2(17)        | 8.78E-2(3)                                     | 5.82E-1(11)       | 2.11E+0(1)         |
| Case 5               | 2.85E-2(25)                                   | 1.07E-2(25)       | 9.76E-2(24)        | 2.00E-1(24)                                    | 4.19E-1(6)        | 2.11E+0(1)         |
| Case 6               | 2.57E-2(9)                                    | 9.70E-3(25)       | 4.96E-2(26)        | 9.24E-2(4)                                     | 7.15E-1(16)       | 2.11E+0(1)         |
| Case 7               | 2.82E-2(25)                                   | 1.06E-2(25)       | 9.73E-2(22)        | 2.00E-1(24)                                    | 4.22E-1(6)        | 2.11E+0(1)         |
| Case 8               | 2.16E-2(27)                                   | 9.79E-3(23)       | 5.14E-2(8)         | 8.84E-2(4)                                     | 7.48E-1(16)       | 2.11E+0(1)         |

Table 5. Maximum Member Force by Acceleration Time History  
[Unit: kN; kN-m]

| Construction Schemes | Member force of No. # 81 (Construction Stage) |                           |                           |
|----------------------|---|---------------------------|---------------------------|
|                      | Axial Force                                   | Moment (M <sub>22</sub> ) | Moment (M <sub>33</sub> ) |
| Case 1               | 3.45E+3(16)                                   | 2.93E+3(16)               | 9.79E+2(27)               |
| Case 2               | 2.85E+3(26)                                   | 2.00E+3(17)               | 9.86E+2(22)               |
| Case 3               | 3.45E+3(16)                                   | 2.93E+3(16)               | 9.79E+2(27)               |
| Case 4               | 2.85E+3(26)                                   | 2.00E+3(17)               | 9.86E+2(22)               |
| Case 5               | 3.36E+3(25)                                   | 3.06E+3(24)               | 9.79E+2(27)               |
| Case 6               | 2.85E+3(27)                                   | 1.72E+3(26)               | 9.79E+2(27)               |
| Case 7               | 3.36E+3(25)                                   | 3.02E+3(24)               | 9.79E+2(27)               |
| Case 8               | 3.08E+3(18)                                   | 1.73E+3(8)                | 9.79E+2(27)               |

로 작게 평가되었다. Case 2, 4와 Case 6, 8은 다른 시공 방안에 비해 안전한 것으로 분석되었다.

Table 5는 NFGM 특성에 따른 시공단계별 최대부재력 응답을 정리한 것이다. 교축방향 휨모멘트는 시공 전 과정에서 NFGM에 의한 응답이 작게 산정되었다. 축력 및 교축직각방향 휨모멘트 또한 시공초기에는 NFGM에 의한 응답이 작게 평가되었으나, 시공단계가 진행되면서 전반적으로 큰 양상을 나타냈다. 휨모멘트의 경우, 교축방향에 비해 교축직각방향 이 크게 평가되었다. 이와 같이 NFGM에 의한 부재력응답은 기존 해석결과와 다른 양상을 나타내고 있다. 따라서 내진성능 평가 시, NFGM 특성을 고려하여 상세검토가 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 13은 주경간 첫 번째 요소(10번 케이블 요소)에 대해 NFGM 특성에 의한 주요 시공단계의 최대응답을 도시한 것이다. 고정하중의 증가로 인해 최대응답은 Completed System에서 산정되었으며, 최대응답비는 NFGM(19,920.0 kN)에 의한 응답이 FFGM(17,600.0 kN)에 비해 약 11.65% 크게 평가되었다. 동시 시공성을 고려한 시공방안은 Case 1~4에 비해 비교적 안전한 시공방안으로 검토되었다. 따라서 장경간 교량은 케이블 자체가 역학적으로 중요한 역할을 하기 때문에 NFGM 특성을 고려한 케이블의 시공단계별 응답은 중요한 평가사항인 것으로 사료된다.

### 3.2 NFGM 특성을 고려한 장경간 교량의 신뢰성평가

신뢰성평가를 위한 확률분포는 극한응력 및 부재강성의 경우(Normal Distribution: ND), 케이블긴장력 및 주탑의 부재력의 경우(Log-normal Distribution: LND)이며, 각각 Non-correlation 관계를 갖는 것으로 가정하였다. 장경간 교량의 극한응력(Ultimate Strength)은 케이블의 경우 16,00 Mpa, 주형 및 주탑의 경우 각각 3,20 Mpa로 건설지에 제시된 결과를 이용하였다. 인용문헌 조사와 가정 사항을 바탕으로 극

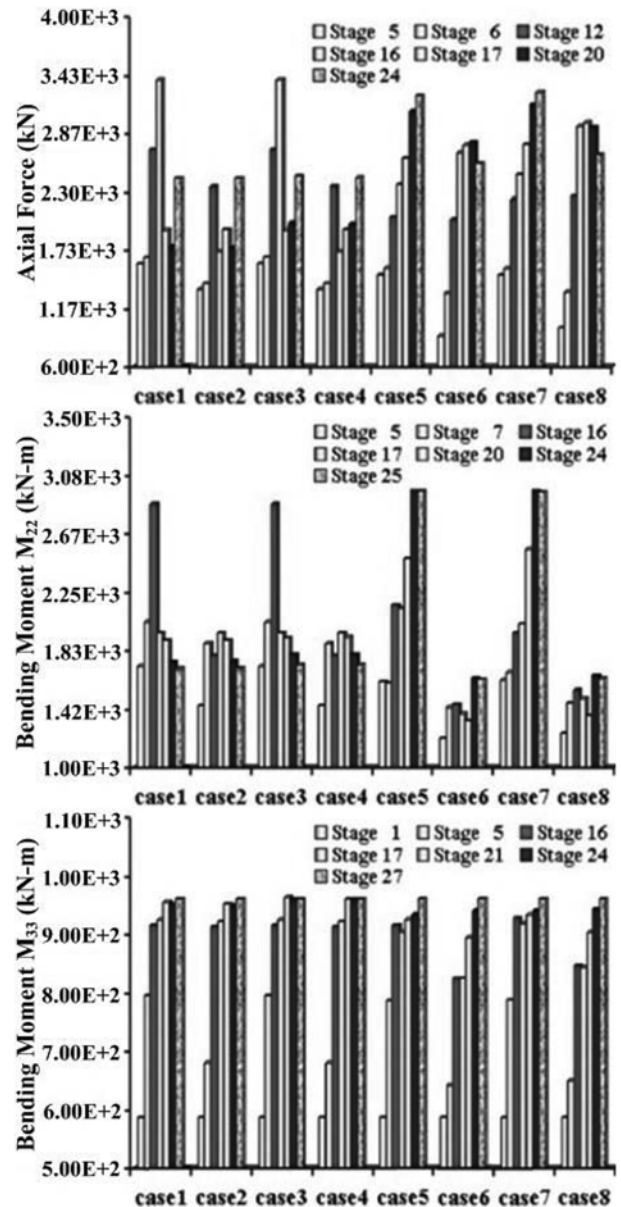


Fig. 12 Maximum Member Force at the Bottom of Pylon (NFGM)

한응력에 대한 변동계수 및 Bias Factor(Ratio of Actual Values to Nominal Values)는 각각 0.12 및 1.12, 부재강성의 경우, 각각 0.02 및 1.00, 케이블긴장력 및 주탑의 부재력의 경우, 각각 0.25 및 1.05를 적용하였다(Nowak(1993), Nowak(2000), Tabsh 등(1991)). NFGM에 의한 시공단계별 최대응답을 이용하여 주탑 기초부 및 주케이블의 주요 시공단계별 파괴확률을 Fig. 14에 도시하였다. 시공 5단계의 파괴확률은 좌측, 나머지 시공단계는 우측을 기준으로 정리하였다. 신뢰성평가를 위한 한계상태방정식은 관련문헌과 같이 확률변수

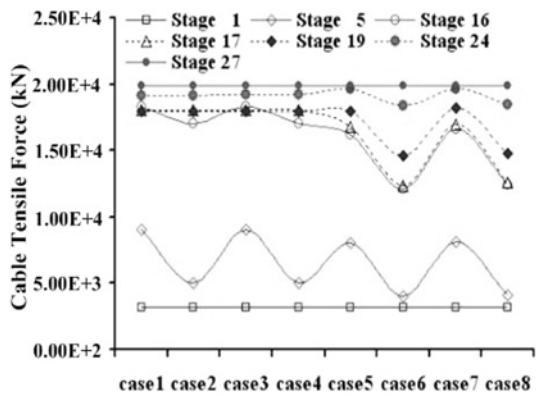


Fig. 13 Maximum Main Cable Tensile Force (NFGM)

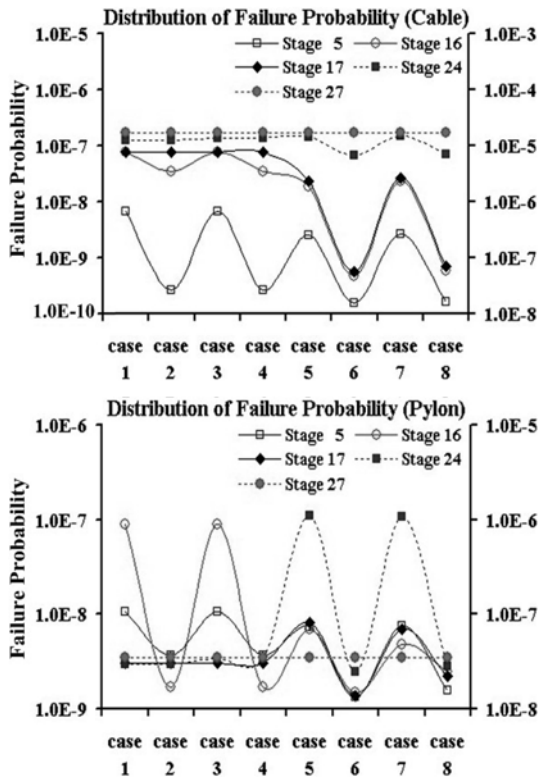


Fig. 14 Failure Probabilities of Critical Construction Stages by External Uncertainty (NFGM)

Table 6. Maximum Failure Probability Values of Pylon

| Construction Schemes | NFGM (Construction Stage) | Ratio* |
|----------------------|---------------------------|--------|
| Case 1               | 8.890E-7(16)              | 1.581  |
| Case 2               | 3.484E-8(21)              | 3.871  |
| Case 3               | 8.890E-7(16)              | 1.581  |
| Case 4               | 4.384E-8(21)              | 4.752  |
| Case 5               | 1.117E-6(24)              | 3.829  |
| Case 6               | 3.494E-8(26)              | 4.464  |
| Case 7               | 1.085E-6(24)              | 3.019  |
| Case 8               | 3.580E-8(26)              | 4.333  |

\*Ratio of Failure Probability (NFGM to FFGM)

의 함수로 정의하였다(Han 등(2009a)). 주케이블의 최대과파 확률은 완성계에서 산정되었으며, NFGM에 의한 영향이 약 1.65배 크게 검토되었다. Table 6은 NFGM 특성을 고려한 주탑의 최대과파확률을 시공방안별로 정리한 것이다. Case 2, 4와 Case 6, 8의 경우, 최대과파확률은 수치적으로는 작게 산정되었으나, NFGM의 영향을 비교적 크게 받는 것으로 평가되었다. 따라서 장경간 교량의 구조안전성 검토를 위해 NFGM 특성을 고려한 신뢰성평가가 필요한 것으로 사료된다.

External Uncertainty에 의한 상기의 안전지수 및 과파확률은 각각 Internal Uncertainty을 포함하는 확률변수로 고려하여 검토할 수 있다(Ang 등(2007)). 구조설계 및 평가 시, Internal Uncertainty에 대한 평가는 신뢰성평가 결과의 적용 범위를 결정하기 위해 상세한 검토가 요구된다. 변동계수 측면에서 장경간 교량의 Internal Uncertainty는 극한응력의 경우, 0.10(ND), 부재강성의 경우, 0.10(ND), NFGM에 따른 케이블긴장력 및 부재력응답의 경우, 0.20(LND)을 갖는 것으로 가정하였다(Han 등(2008), Han 등(2009b)). Table 7은 Case 1(I-type Sequence: Construction Method of the Objective Bridge) 및 Case 4(II-type Sequence)에 따른 주케이블의 주요 시공단계별 평가결과를 제시한 것이며, Table 8은 장경간 교량의 시공방안(Case 1) 및 최대과파확률이 검토된 시공방안(Case 5)에 의한 주탑의 주요 시공단계별 분포양상을 정리한 것이다(Han 등(2010)). Fig. 15는 주케이블(Case 1: Stage 27)과 주탑(Case 5: Stage 24)의 안전지수

Table 7. Safety Index and Failure Probability of Critical Construction Stage by Internal Uncertainties (NFGM)

| Percentiles | Stage 1                                    |        | Stage 5   |        | Stage 17  |        | Stage 24 |        | Stage 27 |        |          |
|-------------|--|--------|-----------|--------|-----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|
|             | $\beta$                                    | $pf$   | $\beta$   | $pf$   | $\beta$   | $pf$   | $\beta$  | $pf$   | $\beta$  | $pf$   |          |
| Case 1      | Mean                                       | 6.3738 | 8.850E-11 | 5.6735 | 6.742E-9  | 4.3172 | 7.587E-6 | 4.2114 | 1.222E-5 | 4.1426 | 1.691E-5 |
|             | Median (50-Percentile)                     | 6.3778 | 8.835E-11 | 5.6770 | 6.747E-9  | 4.3205 | 7.578E-6 | 4.2204 | 1.223E-5 | 4.1433 | 1.692E-5 |
|             | 75-Percentile $\beta$ ; 25-Percentile $pf$ | 7.4330 | 7.371E-11 | 6.6163 | 5.664E-9  | 5.0497 | 6.319E-6 | 4.8925 | 9.397E-6 | 4.8216 | 1.414E-5 |
|             | 90-Percentile $\beta$ ; 10-Percentile $pf$ | 8.3689 | 6.020E-11 | 7.4494 | 4.630E-9  | 5.6701 | 5.218E-6 | 5.5351 | 6.906E-6 | 5.4420 | 1.170E-5 |
| Case 4      | Mean                                       | 6.3738 | 8.850E-11 | 6.2272 | 2.681E-10 | 4.3172 | 7.587E-6 | 4.1905 | 1.358E-5 | 4.1426 | 1.691E-5 |
|             | Median (50-Percentile)                     | 6.3778 | 8.835E-11 | 6.2423 | 2.684E-10 | 4.3205 | 7.578E-6 | 4.1842 | 1.356E-5 | 4.1433 | 1.692E-5 |
|             | 75-Percentile $\beta$ ; 25-Percentile $pf$ | 7.4330 | 7.371E-11 | 7.2399 | 2.231E-10 | 5.0497 | 6.319E-6 | 4.8859 | 1.132E-5 | 4.8216 | 1.414E-5 |
|             | 90-Percentile $\beta$ ; 10-Percentile $pf$ | 8.3689 | 6.020E-11 | 8.1382 | 1.847E-10 | 5.6701 | 5.218E-6 | 5.5125 | 9.331E-6 | 5.4420 | 1.170E-5 |



Table 8. Safety Index and Failure Probability of Critical Construction Stage by Internal Uncertainties (NFGM)

| Percentiles |   | Stage 1 |           | Stage 5 |          | Stage 17 |          | Stage 24 |          | Stage 27 |          |
|-------------|---|---------|-----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|             |   | $\beta$ | $pf$      | $\beta$ | $pf$     | $\beta$  | $pf$     | $\beta$  | $pf$     | $\beta$  | $pf$     |
| Case 1      | Mean  | 6.1094  | 5.591E-10 | 5.5976  | 1.069E-8 | 5.3950   | 3.038E-8 | 5.4301   | 2.953E-8 | 5.3955   | 3.437E-8 |
|             | Median (50-Percentile)                        | 6.1173  | 5.583E-10 | 5.5998  | 1.068E-9 | 5.3990   | 3.036E-8 | 5.4309   | 2.955E-8 | 5.3872   | 3.434E-8 |
|             | 75-Percentile $\beta$ ;<br>25-Percentile $pf$ | 7.1937  | 4.586E-10 | 6.6065  | 8.825E-9 | 6.3438   | 2.495E-8 | 6.3957   | 2.426E-8 | 6.3382   | 2.837E-8 |
|             | 90-Percentile $\beta$ ;<br>10-Percentile $pf$ | 8.1612  | 3.709E-10 | 7.4751  | 7.074E-9 | 7.2176   | 2.003E-8 | 7.2401   | 1.958E-8 | 7.2161   | 2.275E-8 |
| Case 5      | Mean  | 6.1094  | 5.591E-10 | 5.6938  | 7.327E-9 | 5.2298   | 8.052E-8 | 4.7399   | 1.165E-6 | 5.3955   | 3.437E-8 |
|             | Median (50-Percentile)                        | 6.1173  | 5.583E-10 | 5.6872  | 7.251E-9 | 5.2249   | 8.051E-8 | 4.7380   | 1.166E-6 | 5.3872   | 3.434E-8 |
|             | 75-Percentile $\beta$ ;<br>25-Percentile $pf$ | 7.1937  | 4.586E-10 | 6.6812  | 5.954E-9 | 6.1882   | 6.596E-8 | 5.5793   | 9.621E-7 | 6.3382   | 2.837E-8 |
|             | 90-Percentile $\beta$ ;<br>10-Percentile $pf$ | 8.1612  | 3.709E-10 | 7.6389  | 4.770E-9 | 7.0450   | 5.315E-8 | 6.3209   | 7.833E-7 | 7.2161   | 2.275E-8 |

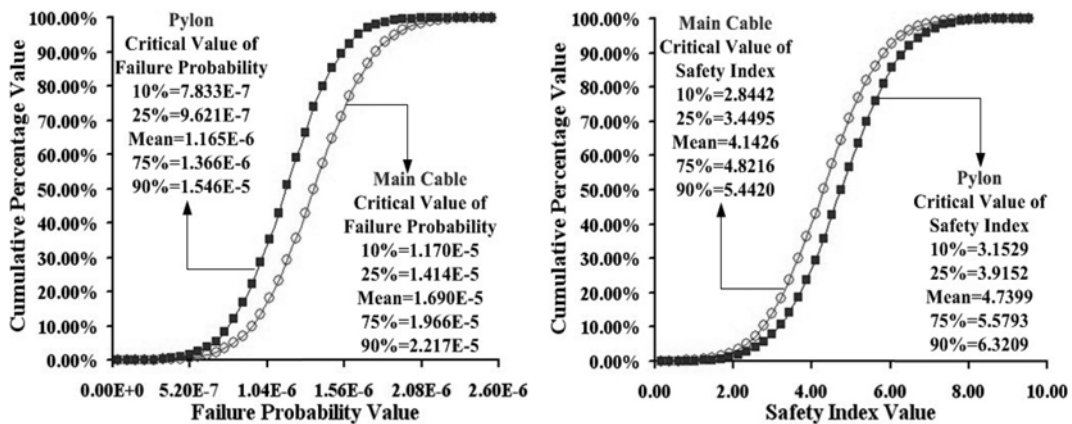


Fig. 15 Cumulative-Frequency Plot of Safety Index and Failure Probability (NFGM)

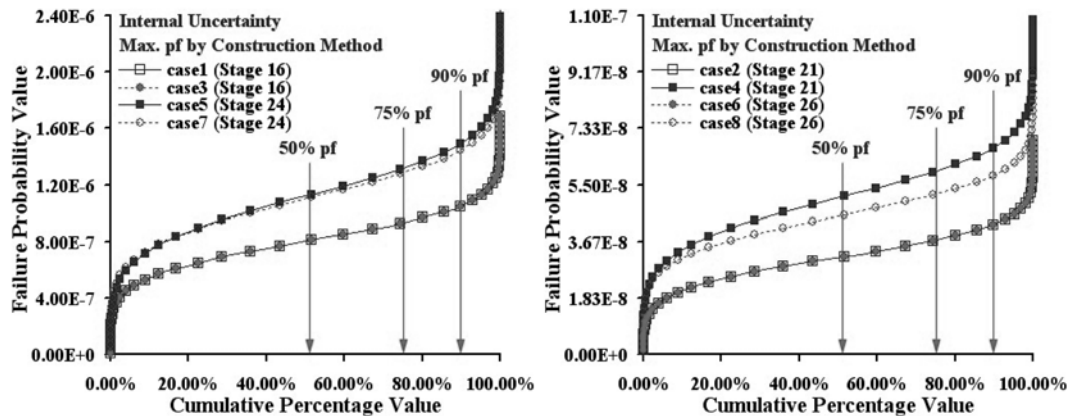


Fig. 16 Cumulative-Frequency Plot of Failure Probability by Construction Method (NFGM)

및 파괴확률에 대한 누적-퍼센트 그래프를 도시한 것이다. Fig. 16은 주탑에서 최대 파괴확률이 산정된 시공단계의 누적-퍼센트 그래프를 시공방안별로 도시하여 비교한 것이다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 응답스펙트럼 해석결과를 이용하여 NFGM 특성에 따른 장경간 교량의 거동양상을 재평가하였으며, 다양한 시공방안에 대해 NFGM 특성을 고려한 시공방안별 시

간이력해석을 수행하였다. 또한 수치해석 결과를 바탕으로 시공단계별 주요 응답특성 및 확률변수의 불확실성에 의한 신뢰성평가 결과를 검토하여, 다음과 같은 결론을 유추할 수 있었다. 저진동수 구간에서 응답스펙트럼 평가결과는 NFGM 특성에 따라 큰 차이를 나타내고 있는 결과를 감안할 때, Completed System 보다 시공단계에서 매우 유연한 장경간 교량의 경우, NFGM 특성을 고려한 시공단계별 응답평가는 필수사항인 것으로 판단되므로, NFGM 특성에 대한 명확한 내진설계 규정이 정립되어야 할 것으로 사료된다. 전반적인

주요 시공단계의 해석결과는 NFGM 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 검토되었다. 또한 주형의 시공순서 및 동시 시공성은 NFGM 특성에 관계없이 장경간 교량의 응답양상에 매우 큰 영향을 미치는 주요 설계변수이므로 내진설계 및 시공 시, NFGM 특성과 더불어 중요한 검토항목으로 간주되어야 할 것으로 판단된다. NFGM 특성 및 시공조건에 따른 시공단계별 주요 신뢰성평가 결과는 시공붕괴 및 위험에 대처하기 위한 기초자료를 제공할 것이다. 따라서 우수 시공방안 선정과 더불어 시공안전성을 명확히 검토하기 위해 장경간 교량에 포함된 확률변수의 불확실성의 영향 평가는 상당히 중요한 사항으로 고려되어야 할 것이다. 이 연구의 신뢰성평가 결과는 국·내외 인용문헌을 기초로 불확실성의 영향을 객관적으로 가정하여 산정된 것이다. 그러나 여러 가지 현장상황 및 조건에 의해 불확실성의 변동계수가 변함에 따라서 안전지수 및 중요한 다른 양상이 검토될 수 있음을 유의해야 한다. 그러므로 보다 신빙성 있는 평가결과를 위해서는 다양한 실험 및 연구를 바탕으로 하여 불확실성의 영향에 관한 자료축적이 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다. 추후, 시공장비, 가설재, 다양한 지진특성, 풍하중, 하중조합 및 지반조건의 영향을 고려한 시공안전성 검토가 수행되어야 하며, 기대생애주기비용에 기초한 장경간 교량의 최적 설계방안 결정에 관해 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- Alavi, B. and Krawinkler, H. (2001) *Effects of Near-Field Ground Motion on Building Structures*, CUREE-Kajima Joint Research Program Phase III.
- Ang, A.H-S. (2004) Treatment of uncertainties in risk- based optimal design of marine structures, *OMAE 2004, June, Vancouver, Canada*.
- Ang, A.H-S. and Tang, W.H. (2007) *Probability Concepts in Engineering Planning and Design, 2nd Edition*, John Wiley & Sons, Inc.
- Bang, M.S. et al. (1996) *A Study on Design and Construction Method for Long Span Bridges*, Report ID KICT/95-SE-111-64, Korea Institute of Construction Technology.
- Bang, M.S. and Han, S.H. (2005) A study on characteristics and dynamic response spectrum of near fault ground motions, *Journal of the KOSOS*, Vol. 20, No. 3, pp. 143-151.
- Han, S.H. and Ang, A.H-S. (2008) Optimal design of cable-stayed bridges based on minimum life-cycle cost, *IABMAS08 Conference, Seoul, Korea*.
- Han, S.H. and Shin, J.C. (2009a) Structural reliability evaluation considering construction stage and epistemic uncertainty of suspension bridges, *Journal of Korean Society Civil Engineering*, Vol. 29, No. 3A7, pp. 181-188.
- Han, S.H. and Park, J.K. (2009b) Practical valuations on the effect of two type uncertainties for optimal design of cable-stayed bridges, *International Journal of Steel Structures IJOSS*, Vol. 9, No. 2, pp. 143-152.
- Han, S.H., Cho, H.N., Cho, T.J. Shin, S.W., and Kim, T.S. (2010) Risk Assessments of Long-Span Bridges Considering Life-Cycle Cost Concept and Near-Fault Ground Motion Effect, *International Journal of Steel Structures IJOSS*, Vol. 10, No. 1, pp. 51-63.
- Irvine, H.M. (1981), *Cable Structures*, The MIT Press.
- Jang, S.P. et al. (1994) *Development of Intergrated Structural Analysis System for Suspension Bridge*, Final Report, Hyundai Institute of Construction Technology.
- Joe, Y.H., Kim, J.S., and Han, S.H. (2008) Seismic safety assessment of the turbine-generator foundation using probabilistic structural reliability analysis, *Journal of Earthquake Society of Korea*, Vol. 12, No. 2, pp. 33-44.
- Kim, H.K. and Choi, I.K. (2002) Characteristics of near-field earthquake ground motion, *Proc. Journal of the Korean Nuclear Society*.
- Kim, H.K. and Suh, J.I. (1994) Hanger tension variation of self-anchored suspension bridge in construction, *Journal of Korean Society Civil Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 1309-1317.
- Korea Atomic Energy Research Institute (2003) *Characteristics of Near-Fault Ground Motions*, Report ID KAERI/TR-2453.
- Lee, K.H. (2006) *Static and Dynamic Analysis of Suspension Bridges Considering Construction Stage and Procedure Direction*, Master Thesis, Department of Civil Engineering, Chungnam National University.
- Ministry of Construction & Transportation of Korea (1993) *Safety Diagnosis Report of Namhae Bridge*, Korea Institute of Construction Technology.
- Nowak, A.S. (1993) *Calibration of LRFD Bridge Design Code*, National Cooperative Highway Research: Final Report.
- Nowak, A.S. and Collins, K.R. (2000) *Reliability of Structures*, Vol. 268, McGraw-Hill, New York.
- Rackwitz, R. and Fiesseler B. (1978) Structural reliability under combined random load sequences, *Computers and Structures*, Vol. 9, No. 5, pp. 489-494.
- Rao, P.B. and Jangid, R.S. (2001) Performance of sliding systems under near-fault motions, *Nuclear Engineering and Design*, 203.
- Tabsh, S.W. and Nowak, A.S. (1991) Reliability of highway girder bridges, *Journal of Structural Engineering ASCE*, Vol. 117, No. 8, pp. 2373-2388.

(접수일: 2009.7.6/심사일: 2009.8.16/심사완료일: 2010.1.22)