# 구조물의 성능기준 평가 현황에 관한 연구
# Study on Evaluation Status of Performance Guideline in the Structures

양태선[1], Tae-Seon Yang, 구재동[2], Jai-Dong Koo, 김제경[3], Je-Kyung Kim, 이 송, Song Lee

[1]김포대학 건설정보과 부교수, Associate Professor, Dept. of Construction Information, Kimpo College
[2]한국건설기술연구원 책임연구원, Chief Researcher, CM Research Group, KICT
[3]경동기술공사 지반공학부 상무, Director, Geotechnical Division, Kyongdong Engineering Co., Ltd.
[4]서울시립대학교 교수

**SYNOPSIS :** On the Performance-based Design guideline techniques, many studies were not execued. Especially, some structures were studied on the evaluation of performance-based design. Geotechnical foundation on the structures are investigated in domestic and other countries.

**Key words :** Performance, Guidelines, Evaluation

## 1. 서 론

우리나라에서도 설계나 시공의 신뢰성을 높이기 위하여 그 설계 내용의 기술적인 문제를 해결하기 위해서는 설계, 엔지니어링, 감리, 측면-성능설계의 도입 및 설계의 품질 확보, 성능 설계를 위한 법령 및 시방서 개편, 신자재, 신기술의 적용을 확대하기 위해서는 '토목 구조물 설계기준 등에 관한 규정, 각종 시방서 등을 성능규정 방식으로 전환해 시방설계(prescriptive design)보다 성능설계(performance-oriented design)의 촉진이 필요하다. 건설교통부가 제정한 표준시방서 및 설계, 시공기준을 개편해 ISO 표준체계, 구조물 유로코드 체계 등 국제 표준과의 적합성 확보가 필요하다. 성능설계의 목적에서는 구조물의 안전, 사용성 및 보수성과 관련된 고려사항에 포함되나 그에 국한되지는 않는다. 방화, 방음, 산사태 및 환경 등 성능과 관련된 기타의 다른 보존사항은 여기서 제외된다.

성능요구조건은 목표를 성취하기 위하여 구조물에 의해 제공되는데 필요한 기능이다. 다시말해, 성능요구조건은 목표에 부여된 각 항목에 대하여 구조물에 요구되는 기능을 말한다. 첫째, 설계 공용수명동안 작용하는 하중의 다양한 규모와 빈도에 대하여, 구조물은 적절한 신뢰수준을 가지고 안전성, 보수성과 사용성 등 모든 성능요구조건을 만족하게 되며, 설계 공용수명 내내 모든 가능한 설계환경에서 거주자와 주민에 미치는 심각한 피해를 막을 수 있도록 충분히 안전하게 설계된다. 둘째, 구조물은 사업자 또는 발주자의 판단에 의해 설계되는 한편, 정상적 기능이 적절한 신뢰도를 유지하고, 설계 공용수명동안 부여된 하중환경에서의 손상이 확실히 견딜만한 수준으로 제한되는 등 구조물의 중요성에 기초하여 설계된다. 본 논문에서는 성능요구조건을 만족하는 성능설계에서 성능기준을 정립하기 위한 성능설계 평가에 대하여 국내 및 여러나라의 현황을 살펴보고자 한다.

## 2. 국내 성능기준 평가 동향

기초구조물 LRFD 저항계수 개발에 관한 연구(건설교통부 2004-2006)가 진행되었으며 한국해양연구

원에서는 차세대 항만설계 기술개발(해양수산부 2001-2005)의 일환으로 항만시설물 설계관련 기반연구를 수행한바 있다. 그러나 아직까지 깊은 기초(말뚝)의 성능설계 개념에 대해서는 약간의 연구가 진행되었으나, 성능설계 기준의 지침이나 기준정립에 대한 연구는 미흡하다. 기초구조물과 관련이 있는 얕은 기초, 철도구조물, 지반조사, 터널, 사면, 연약지반 등에 대한 연구는 전무한 실정이므로 이러한 구조물에 대한 성능설계 기준의 정립이 되어야 구조물 설계에 필요한 자료를 확립할 수 있다. 이를 위해 2006년도 건설교통기술연구개발사업의 일환으로 구조물 기초 분야 성능중심의 건설기준 정비 및 표준화에 대한 연구가 현재 진행중에 있다. 이 연구의 목적은 각종 표준시방서 및 설계기준을 성능중심으로 정비하고 국제 표준에 맞게 표준화하기 위해서 시설물별로 표준시방서 및 설계기준 제, 개정을 지원하기 위한 기초연구 수행, 설계 및 시공지침 등 작성을 통해 국내 표준시방서 및 설계기준을 선진국 수준으로 향상시키는데 있다.

구조물기초의 설계 및 시공과 관련되어 국내에는 다양한 기준이나 시방서가 존재하고 있는데 이러한 기준들이 기관별 다소의 차이를 보이고 있다. 예를 들어 허용응력 설계법에서 사용되는 안전율이 각 기준별로 많은 차이를 보이고 있다. 최근 들어 말뚝의 지지력을 말뚝재료의 허용하중 대비 높은 비율로 증가시키기 위한 노력이 진행되어 오고 있다. 이는 기존의 설계방식이 매우 보수적이었음을 의미하며 말뚝의 허용지지력을 증가시키는 효과를 도모하게 되어 경제적인 말뚝설계를 할 수 있게 한다. 그러나 각 기준별로 콘크리트의 허용응력 규정 같은 항목에서는 다소의 차이를 보이고 있다.

국내의 인천대교 사례에서 아직까지는 국내에서 본격적으로 한계상태설계법이 구조물기초의 설계에 적용되지는 않고 있다. 인천대교의 현장타설말뚝 설계의 경우 대부분 미국의 기준을 중심으로 기준이 수립되었으며, 국내기준 및 자료는 주로 참고자료 정도로만 사용이 되었다. 그러나 재하시험을 통해 국내의 여건을 감안한 저항계수의 산정방식은 나름대로 의의가 있다고 할 수 있다. 일부 경우 저항계수를 현장상황을 고려하여 보수적으로 감소시켜 적용시켰는데 그 정당성에 대해서는 보다 심도있는 검토가 필요하리라 판단된다. 또한, 거가대교 사례의 경우 현장의 특성을 반영하지 않고 일률적으로 LRFD 및 외국설계사의 모국기준을 혼용하여 말뚝을 설계하였다. LRFD 및 Eurocode 7 모두 매우 훌륭한 설계개념이고 구조물의 기초설계에 성공적으로 이용되어 오고 있다. 그러나 국내에서 이를 설계에 이용하기에 앞서 국내의 특성을 (시공성, 지반조건, 설계특성 등) 반영할 수 있는 저항계수의 산정이 선행적으로 필요할 것으로 판단된다

## 3. 외국 성능기준 동향

미국, 캐나다 등에서는 지반공학과 관련된 기초분야에 한계상태설계법 (limit states design, LSD)을 사용해오고 있다. 미국, 캐나다, 호주는 LRFD 개념에 근거한 신뢰성 설계 기준을 개발하여 왔다 (Allen 2005). 미국의 대표적인 기준은 미국 연방도로국의 교량설계기준 (AASHTO, 1994, 2004, 2007)이며, 최근 TRB에서는 깊은기초 관련 다양한 조건에 대한 저항계수를 산정하여 이를 제안하기도 하였다 (NCHRP REPORT 507, 2004). 캐나다의 경우 부분안전계수법을 이용하여 Canadian Foundation Manual (1992) 에 기초구조물에 대한 신뢰성 이론에 근거한 설계방법을 제시하고 있다. 유럽, 홍콩의 경우는 Eurocode 7를 근간으로 기초설계를 실시하고 있다. 남아프리카 공화국의 경우는 LRFD와 Eurocode 7이 복합적으로 사용되고 있다. 일본의 경우는 신뢰성 이론에 근거한 종합기초 설계기준인 Geo-code 21을 개발하여 왔다. 그 외 아시아 국가에서는 널리 활용되지 못하고 있다. 그러나 아직도 지반분야에서는 많은 경우는 실무에서 전통적인 허용응력 설계법을 사용하고 있다. 하지만 구조분야의 설계에서는 LSD를 대부분 이용하고 있다. 따라서 서로 다른 기준을 사용하는 구조기술자 및 지반기술자 사이에는 구조-지반의 경계에서 서로의 의견이 불일치되는 경우가 있을 수 있다. 즉 LSD의 장점가운데 하나는 구조기술자와 지반기술자사이의 의사소통을 명확하게 해준다는 점이 있으나 평가항목에 대해서는 명확한 기준이 부족하다.

### 3.1 유럽

영국과 프랑스는 다른 유럽 국가들에 비해 중앙행정시스템이 강하다. 프랑스에서는 정부의 역할이 감소하고 있는 추세이며 설계자들은 일반적으로 발주자 또는 계약자에 속한다. 그리고 개별 설계자들은 보험 계약이 되지 않는 대신에 회사들이 보험에 가입한다. 각각의 기술적인 업무에 대한 책임소재가 명확하게 규정된다. 그러나 모든 사람들이 책임을 피하려고 하는 문제점을 가지고 있다. 건설시스템이 무엇이든지, 발주자, 설계자, 그리고 계약자 사이에 정보를 공유하는 것을 매우 중요하게 생각하고 있다. 발주자는 기본설계를 담당하고 시공자들은 상세설계를 담당한다. 설계의 검증진행 과정에서 독립적인 존재인 설계검토자들이 중요한 역할을 한다. DIN에서는 어떠한 임의적 해석들도 허락하지 않는다. 그리고 ~해야한다(Should be)와 같은 용어를 사용하지 않는다. 그렇다고 DIN이 보수적 성향만 고집하지는 않으며 유연성 있고 경쟁적 있는 설계를 사용할 수 있도록 해준다. DIN에 의한 설계는 설계보험의 관점에서 볼 때 중요하다. 설계자들이 DIN 표준을 벗어나서 설계를 하는 경우에는 보다 많은 위험을 감수해야 한다. 보험회사는 설계자들보다는 조직을 보호하려는 성향이 있으며 발주자나 계약자들 사이에서 법적소송이 발생하는 경우, 컨설턴트에게 자잘못에 대한 판단을 의뢰한다. 만약 소송에서 지는 경우 보험에서 지불해 주지 않기 때문에 막대한 재정적 손실이 발생한다.

### 3.2 기타

유럽에서 Euro 코드가 제정되었기는 하지만 태국에서는 아직 실무에서 널리 이용되고 있지는 않다고 하였다. 이는 기존 기술자들 사이에서 이에 대한 이해가 부족하여 거부감이 비교적 크기 때문이라고 한다. 태국의 경우 아직 LRFD가 실무에서는 전혀 사용되지 않았고 가까운 장래에도 이용될 가능성이 거의 없다고 판단된다. 또한 동남아 국가에서 신뢰성이론이 지반공학 분야에서 활발하게 사용되는 국가는 싱가포르가 유일하다. 말레이시아의 경우 일부 사용된 실적이 있는 것 같다고 하였으나 관련자료는 확인할 수 없었다.

특히 중국의 경우 10여년이상 한계상태이론에 근거한 시방서가 존재해왔음에도 불구하고, LRFD나 성능설계에 대한 개념자체가 없는 사람이 많다. 중국, 태국 전문가들은 LRFD의 설계개념에 익숙하지도 않고 매우 부정적인 의견을 가지고 있었다. 한편 신뢰성 설계가 일부 실시되고 있는 일본 및 싱가포르 전문가들의 의견에 의하면 전통적인 설계에서 LRFD로 전환하는 과정에서 기술자들의 거부감을 적절한 교육을 통해서 점진적으로 제거하는 것이 매우 중요하다는 의견이 있었다. 결론적으로 신뢰성 설계개념을 지반공학 분야에 적용할 때 실무기술자 사이에서 많은 저항을 받게 될 것으로 예상된다. 따라서 신뢰성 설계를 도입하는 과정에서 이에 대하여 충분한 사전홍보, 교육 등을 실시하여 기술자들의 동의를 얻는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 성능 설계 평가 고찰

### 4.1 평가 항목

지난 10여년간 교량구조물의 붕괴를 발생시킨 대표적 요인을 들면 아래와 같다. 자연적인 요인(수리학적 요인, 지진, 얼음, 폭풍 등), 외부적 요인(충돌, 피로, 과재하중 등), 인위적 요인(화재, 설계 오류, 토질 등)이 있다. 구조물기초에 미치는 영향도 같은 경향을 나타낸다. 그러므로, 성능설계의 평가를 위하여 그 순서는 개요, 한계상태, 하중, 지반자료의 적용과 설계상황, 설계 및 시공시 조건과 시방요구 사항, 토압등 외력의 결정, 극한 한계 상태 분석 및 기준정립, 구조물의 사용성 한계 상태분석 및 기준(성능설계 개념 적용)의 정립으로 진행될 수 있다.

그러므로, 구조물 기초에 요구되는 기본적인 요구 성능에 대한 평가는 다음과 같다. 먼저 설계 대상으로 삼는 구조물의 설계 공용 기간을 정한다. 설계 공용 기간은, 설계와 동시에, 설정 기간 동안에 목표하는 안전수준을 확보하는 기간을 만족하느냐이다. 그리고, 구조물 요구조건에 대하여 사용성을 확보할 수 있도록 구조물을 설계하였느냐 이다. 요구조건에 대하여 구조물내외의 안전성등을 확보할 수 있도록 구조물건을 설계하느냐이다. 요구조건에 대하여 기술적, 경제적으로 가능한 범위에서 복구를 하여 지속적인 사용이 가능한 구조물을 설계하였느냐 이다.

흙이나 암반으로 이루어진 지반구조물의 경우 내재된 불확실성으로 인하여 단순한 성능 설계의 기준을 정립하기 위한 항목으로 해석방법만으로 한정되는 것은 아니고 사업자가 요구하는 성능을 가진 구조물이 만족하게 건설될 수 있도록 구조물의 설계 목적, 적용범위(하중조건 포함), 한계상태의 요구성능이 포함된 평가항목이 되어야 한다. 규정된 신뢰도를 만족하는 토질조사나 토질시험에 기초하여 토질정수를 결정하는 방법, 규정된 신뢰성을 가지는 해석방법의 결정, 고도의 설계방식에 기초한 성능설계의 타당성을 검증하는 방법이 있어야 한다. 이를 위하여 전문지식을 가진 기술자의 확보, 기술자나 성능설계의 평가시스템의 확립이 필요하다.

### 4.2 국내 성능설계 기준의 평가시 고려사항

국내 지반기술자들에게 “성능설계”란 단어가 익숙하지 않은 것이 사실이다. 그러나 허용응력설계, 강도설계법등 토목구조물 설계에 일반적으로 사용되어 왔던 전통적인 설계법에서 성능설계(Performance Based Design)란 새로운 기법이 토목구조물 설계 분야에 도입되었다. 성능설계란 시방기준에 정해진 설계기법과는 달리 설계자나 계약자가 보다 유연성을 가지고 설계와 시공을 할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다. 또한, 구조물의 중요도에 따라 요구되는 성능기준을 조절함으로서 보다 경제적인 설계나 시공이 되도록 하는데 있다. 국내 한계상태설계법의 국내적용을 위해서는 구조물의 한계상태에 대한 정량적인 명확한 정의가 필요하다. 예를 들어 사용한계상태는 그 상태로 구조물 또는 부재가 만족하지 않으면 안되는 변형량, 균열폭 등의 조건에 의한 정량적인 정의가 필요한 것이다. 또한, 설계시점에서의 불확정 요인의 합리적인 고려가 필요하다. 즉, 사용기간중에 작용하는 외력의 변동 및 실제로 작용하는 외력과 설계하중과의 차이나 재료강도, 단면치수, 재료시험결과를 구조물에 적용할 때 포함되는 불확실성에 의한 부재 및 구조물 강도의 변화 등을 충분히 합리적으로 고려하여야 한다. 결국, 한계상태설계법을 구조물 설계에 도입하기 위해서는 구조물 거동의 복잡성, 지반의 강도특성이나 여러 설계공법과 그 품질 등에 관한 통계 및 확률량, 상부구조의 기능에 대한 간접적 평가 등과 같은 문제를 극복하여야 한다. 그러므로, 한계상태의 정의에 관계되는 설계의 평가사항과 해외 선진국의 연구 및 개발동향을 우선적으로 분석하고 그 대처방안을 준비하여야 한다.

또한, 국제적인 기술 표준화에 대한 건설 관련자의 인식부족으로 새로운 설계법에 대한 기술적인 적용문제가 해결되어도 실제 적용과정에서 실무자 사이에 상당 기간동안의 혼란이 예상되며, 관련되는 각종 건설기준이 새로운 설계법에 부합될 수 있도록 하기 위해서는 많은 노력이 투입되어야 할 것으로 보인다. 따라서, 새로운 설계법이 우리의 건설환경에서 제기능을 발휘하기 위해서는 어느 정도의 시일이 필요하며 많은 노력과 관심이 있어야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 성능설계 기준의 현황에 대하여 살펴보고 성능기준의 평가방법도 살펴보기 위하여 국내외 현황을 조사하였다. 구조물 기초의 성능중심 설계지침 개발을 통하여 성능에 기초한 설계를 가능하게 할 수 있으며 적정한 안전 수준을 확보할 수 있는 최적화된 설계를 유도할 수 있을 것으로 판단된다. 성능평

가 기술개발로 기존 공법보다 신속하고 정밀한 시공이 가능하며 강구조물의 정밀도가 향상되고 시공품질관리가 용이할 것으로 기대된다. 시스템 또는 부재 단계에서의 거동을 고려한 성능중심 설계기법 제시로 합리적인 설계를 구현할 수 있다. 신뢰성 개념을 통한 다양한 불확실성의 정량화로 합리적 설계입력변수 결정이 가능하고 다양한 조건 및 환경 변화에 적용될 수 있는 설계 기준의 개발을 촉진시킬 수 있다. 유지보수를 포함한 장기공용성을 고려한 구조물 설계 개념 도입으로 생애주기비용의 최적화 설계가 가능하다.

국내 각종 구조물의 설계방법에 대한 기술의 연구항목의 확보로 향후 건설기술의 발전에 기여할 것이며 외국 설계기술에 대한 동일한 조건의 연구속도를 진행할 수 있다. 또한, 성능설계에 대한 이론과 연구가 풍부한 국내 연구진을 확보하여 성능설계 평가기술의 연구가 진행되어야 한다.

그러므로, 규정된 신뢰도를 만족하는 토질조사나 토질시험에 기초하여 토질정수를 결정하는 방법, 규정된 신뢰성을 가지는 해석방법의 결정, 고도의 설계방식에 기초한 성능설계의 타당성을 검증하는 방법이 있어야 한다. 이를 위하여 전문지식을 가진 기술자의 확보, 기술자나 성능설계의 평가시스템의 확립이 국가적으로 필요하다.

## 참고문헌


1. 양태선, 구재동, 김제경(2006), “국내 성능설계의 지반분야 적용성 검토 연구”, 한국구조물진단학회 가을 학술발표회 논문집
2. 양태선, 이규환, 구재동, 김제경(2007),“구조물 기초의 기준에 있어서 성능설계의 경향과 적용”, 한국지반공학회지 가을 학술발표회 논문집, p233~236
3. 윤길림, 이규환, 채광석(2004), "확률 및 신뢰성 개념을 도입한 지반설계 사례연구", 한국지반공학회 지반조사위원회 특별세미나,pp.73-110.
4. 조성민(2008), “AASHTO LRFD를 적용한 인천대교 기초 설계”, 한국지반공학회 기초기술위원회 워크숍.
5. JGS (2002), The JGS foundation design guideline (Geo-code 21 ver.2), Foundation Design Codes and Soil Investigation in view of International Harmonization and Performance based Design (eds. Honjo et al.), Proc. IWS Kamakura, pp.399-449, A.A.Balkema Publishers
6. Honjo, Y., Y. Kikuchi, M. Suzuki, K. Tani and M. Shirato (2005), JGS Comprehensive Foundation Design Code: Geo-code 21, Proc. 16th ICSMGE, pp.2813-2816, Osaka.
7. 谷茂(2008), “土構造物 性能設計에 대해서”, 일본지반공학회지 5월호, pp.1-5