

5

어항해안 내진성능설계에 대해서

성능설계법은 ISO(국제 표준화 기구)를 중심으로 세계에서 공통화가 추진되어 국제규격으로서 인지되기 시작하고 있다.
내진성능을 고려한 설계에서 레벨 1·레벨 2의 2단계를 고려해 상정 지진동을 설정함과 동시에 각각의 지진동 레벨에 따라 적절히 허용재해정도를 설정하여, 구조물의 내진성을 종합적으로 규정한다.

1. 서론

어항해안에 있는 각종 시설의 내진설계법을 성능설계화하는 검토가 시작되고 있다. 항만, 철도 등의 시설이나 강재와 콘크리트의 재료 분야에서는 구조설계법이 종래의 사양설계에서 성능설계로 표기 변경을 했다. 사양설계에서는 발주자측이 사용재료, 계산법, 안전율, 허용 응력도 등을 나타내 수주자측이 설계하는 방법이다. 성능설계에서는 발주자측이 목적, 소정 성능 등을 나타내, 사용재료, 계산법 등은 설계 측에 선택의 여지를 주어 민간기술의 활용, 새로운 기술개발의 촉진을 도모할 수 있다. 어항 해안에서도 시대의 흐름에 따라서 성능설계법의 검토가 진행되어 기본적인 개념을 나타낼 단계에 이르렀지만 실무에 즉시 적용할 수 있을 단계는 아니다. 본문에서는 내진설계법으로 한정, 성능설계법으로 변경되고 있는 현재의 흐름과 상황을 설명한다.

2. 성능설계의 세계적 동향

성능설계법은 ISO(국제 표준화 기구)를 중심으로 세계에서 공통화가 추진되어 국제규격으로서 인지되기 시작하고 있다. 일본에서 종래의 구조설계법은 허용응력도에 기초를 둔 안전율로 조사하여 왔다. IS02394(구조물의 신뢰성에 관한 일반 원칙)에서는 한계 상태설계법을 기초로 성능조사형을 기본으로 하고 있다. 외력이나

재료 격차의 고려를 설계의 원칙으로 하여 신뢰성 설계법의 개념도 도입하고 있다. 구조물의 요구성능으로서 최종 한계 상태, 사용시의 한계 상태를 정의하여 요구성능을 정리, 적절한 신뢰성을 확보하고 있다. 이것을 기본으로 유럽 제국에서 유로 코드 Eurocode를 작성하였으며 Eurocode0로 구조설계의 기본을 나타내고 있다. 일본에서는 이 ISO와 협조하면서 토목학회가 중심이 되어 강 구조물, 콘크리트 구조물, 합성 구조물의 성능 규정 표시 설계법을 정비하여 항만, 철도 등의 각 분야에서도 성능설계 표시화가 되고 있다. 특히 내진설계법에 관해서는 일본이 중심적 역할을 완수하여 내진 성능설계법이 제시되고 있다.

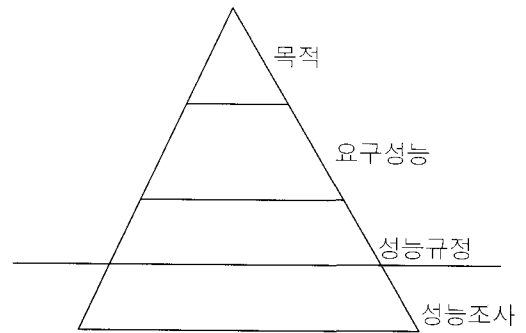
3. 항만시설에 있어서 성능설계의 도입

1979년에 제정된 항만시설의 기술상 기준은 항만구역내에 있는 시설, 즉 방파제, 호안, 계류시설, 교량, 터널, 파이프라인 등을 대상으로 한 설계법이다. 거의 10년마다 개정이 이루어져 그때마다 새로운 구조형식의 도입, 설계 방법의 고도화 등이 이루어져 왔다. 전회 1999년의 개정 후 검토되면서 차세대 구조설계법 도입이 결정되어 2008년도부터 시행되었다.

일본의 구조설계법과 국제기준 ISO와의 조정을 도모하는 동시에 주로 내진설계법에 관한 새로운 지진·성과를 반영하기 위해 항만시설의 기술상 기준의 대개정이 이루어졌다. 주요한 개정 항목은 아래와 같다.

- ① 사양설계에서 성능설계로의 표기방법 변경
 - ② 허용응력도에 근거하는 전체 안전율에서 신뢰성 설계법에 따르는 파괴 확률과 부분 안전계수에 의한 조사
 - ③ 힘의 균형조사를 중심으로 한 내진설계법에서 변위량 조사를 중심으로 한 내진설계법으로 변경
- 성능설계법은 <그림-1>에서 나타내듯이 목적, 요구

성능, 성능규정, 성능조사의 계층으로 나누어진다. 기준으로서 구속력이 있는 것은 목적, 요구성능, 성능 규정이다. 이 부분이 국토교통성의 성령으로 제시되어 강제력을 가진다. 여기서 목적은 시설, 구조물을 건설하는 취지이다. 그러나 구체적인 설계식, 안전율 등은 법률적으로 규제하지 않는다. 구체적인 설계방법, 설계조사식, 안전계수를 취하는 방법, 파괴 확률 등은 해설, 부속서에 나타난다. 이것들은 강제력이 없어 설계자의 재량에 의할 수 있다. 그러나 추천방법으로서 신뢰성 설계법을 베이스로 한 설계법을 제시하고 있다. 항만시설 구조설계에 일반적으로 사용되는 설계식을 이번 기준에서 제시하여 설계 기술자에 의해 방법이나 조사레벨이 크게 다르지 않게 하고 있다. 이외의 구조설계법을 채용하더라도 상관없지만, 근거설명이 별도로 필요하게 된다.



<그림-1> 설계법의 계층

4. 어항해안에 있어서 내진성능설계에 대해

4.1 요구성능이란

성능설계의 기본적인 개념은 시설, 구조물에 사용자가 요구하는 성능을 보관 유지할 수 있도록 구조설계를 실시하는 것이다. 구조물에 요구되는 구조적인 성능은 <표-1>에 나타내는 ① 큰 외력에 대한 안전성 ② 피해

를 받았을 때의 복구성 ③ 통상 받기 쉬운 외력이나 공용시 문제가 없는 성능 등 3종류의 요구성능으로 크게 나눌 수 있다. 안전성에 대한 요구성능으로는 매우 큰 외력으로 공용기간 중에 일어날 수 있는 확률이 매우 작은 현상, 예를 들어 대규모 지진(레벨 2 지진동)이나 지진에 의한 해일에 의해 구조물이 파손되어 수리가 필요해도 붕괴하여 사람이 다치거나 시설이 그 후 회복할 수 없는 상태가 되지 않을 요구성능을 가리킨다. 예를 들면 강판식 안벽에서는 강판말뚝이 항복 응력도를 넘거나 휘어지지 않을 것, 호안은 조금이라도 변형하지 않을 것 등을 들고 있다. 사용성에 관한 요구성능은 상시 받는 토압, 수압, 파랑 등의 하중이나 소규모 지진(레벨 1 지진동) 등 공용중에 받을 확률이 높은 외력에 대해서 시설의 사용에 간단한 수리만으로 지장이 없는 것이다. 복구성에 관한 성능은 사용시나 이상 외력에 생긴 손상을 발견하기 쉽고 또한 복구도 용이하게 실시할 수 있는 요구성능이다. 특수한 재료나 구조 형식을 이용하지 않는 방법이나 지반내에 있는 구조 부재보다 먼저 지상 구조 부재의 파괴를 우선시 하는 것들이 복구성을 높인다고 사료된다.

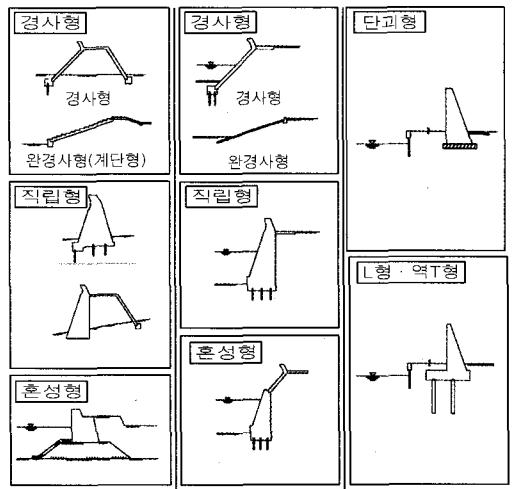
〈표-1〉 요구성능의 내용

분 류	정 의
기본적 요구성능	작용에 대한 시설의 구조적인 응답(변형, 단면력 등)에 관한 성능
사 용 성	간단한 복구에 의해서 신속하게 기능을 발휘 가능한 것
복 구 성	어느 정도의 복구가 필요하지만 비교적 단기간 동안에 기능을 다시 발휘하는 것이 가능한 것
안 전 성	매우 큰 손상이 발생하였지만 재해의 범위가 인명이나 배후권의 재산에 심각한 영향을 미치지 않을 것
공 용 성	시설의 공용 및 편리성의 관점에서부터 필요시 되는 구조적인 제한 등에 관한 성능

4.2 구조물의 중요도에 의한 요구성능 레벨

〈표-2〉 어항해안의 시설

제 방	호 안	홍 벽
경사형 석장식, 콘크리트 블록식, 콘크리트 피복식 등	경사형 석장식, 콘크리트 블록식, 콘크리트 피복식, 사석식, 사블록식 등	단괴형 중력식, 말뚝식, 강판식
직립형 석축식, 중력식, 부벽식 등	직립형 석장식, 중력식, 부벽식, 돌제식(L형을 포함), 케이스식, 콘크리트블록쌓기식, 셀식, 판형식 등	L형·역T형 중력식, 말뚝식, 강판식
혼성형 사석마운드 등+케이스, 블록 등	혼성형 중력식 등+콘크리트 블록식 등	



〈그림-2〉 시설의 상황

어항해안에는 제방, 호안, 홍벽, 돌제, 이안제, 잠제, 인공리프, 소파제, 수문, 통문, 배수기장, 갑문 등 다수의 시설이 있다. 각각 시설의 상당수는 내진설계가 이루어지고 있어 기본적으로는 허용 응력도법에 따르는

설계조사이다. 2004년 6월 간행된 「해안보전시설의 기술상 기준(規準)·해설」은 국토교통성과 농림수산성에 의한 성령 해설서이다. 여기에서 어항해안도 대상이 되고 있다. 이 해설서에서는 성능조사형 설계법의 「내진성능」, 「레벨 1, 2 지진동」, 「내진성능의 조사 기준」등의 개념이 나타나 있다. 다만 실무에 사용하는 구체적인 자료의 제시는 되어 있지 않다. 각 성령에서 구체적인 설계법을 제시하고 있으나, 현재 설계방법의 검토가 이루어지고 있다. 현재는 <표-2>와 <그림-2>에 나타내는 시설과 구조형식을 대상으로 검토가 되고 있다.

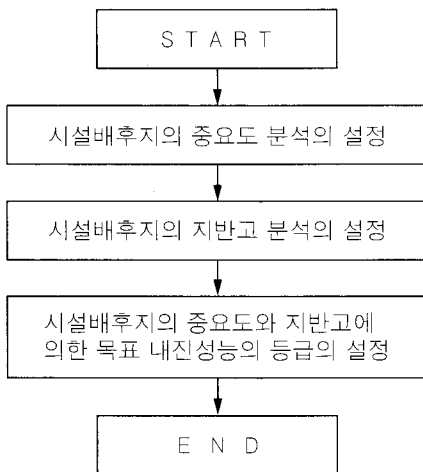
어항해안은 배후에 거주하는 사람들의 생활 터전이며 많은 사람들의 해양 레크레이션의 장소로 제공되고 있다. 또 지역의 진흥에 빠뜨릴 수 없는 공간이기도 하다. 이 때문에 지진시 어항공간의 안전성 확보가 중요하다. 다만 어항해안의 중요성을 일률적으로 설정할 필요성은 없고, 시설 배후지 가옥의 밀집도, 자산의 집적도, 방재거점의 가부 등에 의해 지진시 재해 레벨을 구분하는 것이 합리적이다. <그림-3>에서 중요도, 내진성능의 등급 설정의 흐름을 나타낸다. 재해 정도가 지

역사회 활동에 미치는 영향도를 고려하여 <표-3>에 나타내듯이 중요도를 구분하고 있다. 또 시설배후지의 지반높이도 고려하고 있다. 지반고가 높은 장소가 호안과 시설이 재해를 입어도 해일, 고조 등의 위험이 적기 때문이다.

<표-3> 시설 배후지의 중요도 구분

시설배후지의 중요도 A	이하의 어느 한 항목이라도 해당되는 지역 · 배후에 주택이 밀집하여 지진 후 침수에 의해 막대한 인명·재산·생활의 손실을 입는 지역 · 공공시설이나 공공용지 등, 지진재해의 부흥에 중요한 역할을 하는 지역 · 시설배후에 타지역으로 통하는 유일한 도로가 있어, 지진 후 붕괴 또는 침수에 의해 도로가 차단되어 고립되는 지역 · 배후에 가공장, 수산창고 등 지역의 어업 활동에 중요한 역할을 받고 있는 시설이 있는 지역 · 시설배후지의 지형 경사가 갑자기 급하여 지진에 의한 시설피해의 결과, 고조, 파랑 등에 의해 지형의 안정성이 손상되어 인명·재산 생활 등의 손실을 입을 가능성이 높은 지역
시설배후지의 중요도 B	· 중요도 A 이외의 지역

「참고 : 해안시설설계편람(2000년판), 토목학회」



<그림-3> 내진레벨의 설정의 흐름

제방, 호안, 흥벽에서의 피해정도를 <표-4>에 나타내듯이 3단계로 분류하고 있다. 피해단계 a는 거의 무피해로 복구가 필요없는 정도의 상태이다. 피해단계 b는 약간의 시설 이동, 침하 등의 피해로 즉시 위험한 상황은 아니며 단기 보수로 기능을 회복할 수 있는 상황이다. 피해단계 c는 이동, 침하가 심하게 일어나 구조물도 크게 파손된 상황으로 시설이 본래의 기능을 발휘할 수 없는 상황이다. 호안을 예로 들면, 재해항목은 침하, 경사, 변위, 이음새 파손, 본체의 손상(크랙) 등을 들 수 있다. 호안의 주요기능인 배후지 침수 방지에 주목하면 천단고의 유지 즉 침하를 중요한 조사 기준으로 할 수 있다.

〈표-4〉 시설의 피해단계의 상황

피해정도	제 방	호 안	구 벽
a			
b			
c			

4.3 상정하는 지진동

효고현(兵庫縣) 남부지진에 의해서 한신(阪神)·아와지(淡路)지방의 사회자본이 큰 피해를 입은 것에 의해 지진동 레벨을 2단계로 한 내진설계에 관한 토목학회의 제언이 나왔다. 여기서 레벨 1 지진동은 「시설의 공용기간 중에 발생하는 확률이 높은 지진동」이다. 시설의 사용기간중 발생할 확률이 50%의 지진동을 설정하는 방법 등이 생각된다. 예를 들어 사용기간이 50년 시설의 경우, 재현기간 75년의 지진동이 설정된다. 레벨 2 지진동은 「시설의 공용기간중에 발생하는 확률은 낮지만 큰 강도를 가지는 지진동」이다. 레벨 2 지진동의 설정에 대해서는 우선 대상지점에 최대한의 지진동을 가져올 수 있는 지진을 선정한다. 여기에서는

- ① 과거에 큰 피해를 가져온 지진의 재발
- ② 활단층의 활동에 의한 지진
- ③ 지진학적 혹은 지질학적 관점에서 발생이 염려되는 그 외의 지진
- ④ 중앙방재회의나 지진조사 연구추진본부 등 국가기관의 상정 지진
- ⑤ 지역방재계획의 상정 지진

⑥ M6.5의 직하 지진

등의 대규모 지진동으로부터 적당 선정한다.

4.4 내진설계법에 대해

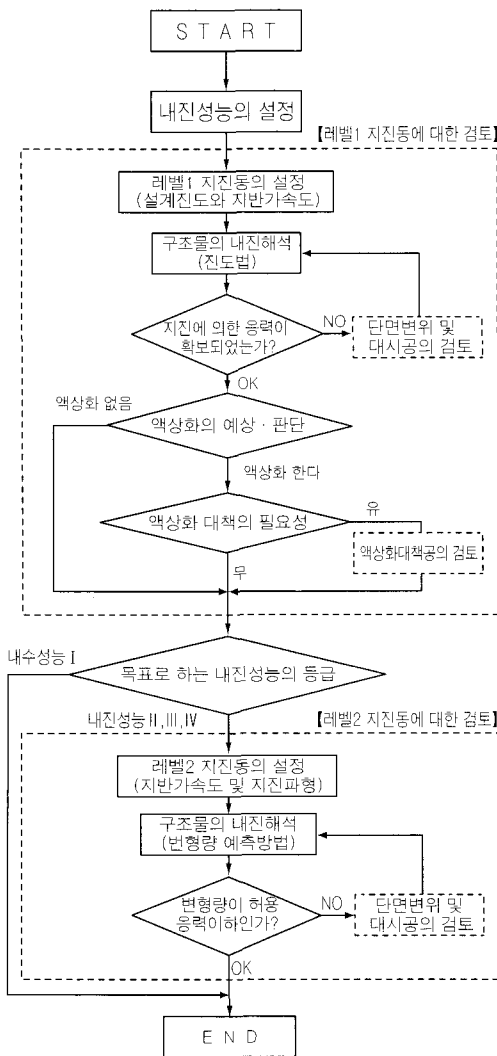
내진성능을 고려한 설계에서 레벨 1·레벨 2의 2단계를 고려해 상정 지진동을 설정함과 동시에 각각의 지진동 레벨에 따라 적절히 허용재해정도를 설정하여, 구조물의 내진성을 종합적으로 규정한다. 어항해안시설의 경우, 다양한 구조양식·기능을 가짐으로 대상시설의 특성·기능 등을 감안해 허용재해 정도를 설정한다. 레벨 1 지진동에 대해서는 「시설 건전성의 보호유지」, 레벨 2 지진동에 대해서는

「소기의 기능 보호유지」를 목표로 대상시설의 특성을 감안하여 성능을 설정한다. 이 때 내진성능으로 안전성, 사용성, 복구성의 3종류를 고려한다. 어항해안시설에서는 목표로 하는 내진성능을 〈표-5〉에 나타내듯이 I로부터 IV의 4단계로 분류하고, 허용피해 정도(a, b, c)를 지진동 레벨(1, 2)에 따라 설정하고 있다.

〈표-5〉 내진성능의 등급

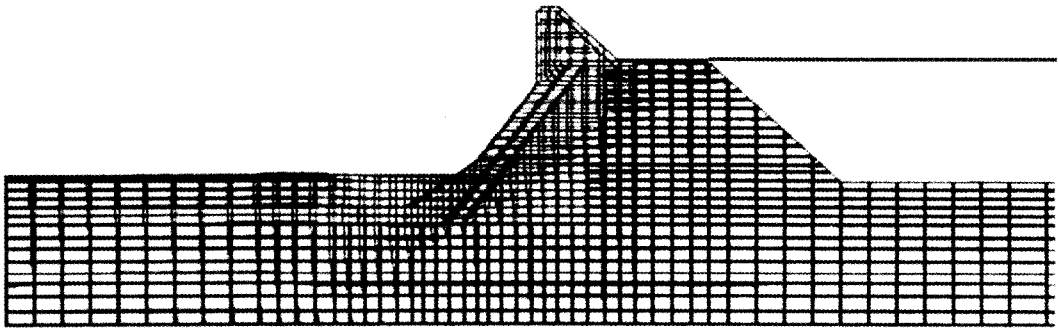
목표하는 내진성능의 등급	검토대상 지진동 레벨과 허용피해정도	내진성능 레벨
내진성능 I	레벨1 - 지진동에 대한 피해정도a 레벨2 - 지진동은 고려하지 않음	낮음 ↑ 내진성능 ↓ 높음
내진성능 II	레벨1 - 지진동에 대한 피해정도a 레벨2 - 지진동에 대한 피해정도c	
내진성능 III	레벨1 - 지진동에 대한 피해정도a 레벨2 - 지진동에 대한 피해정도b	
내진성능 IV	레벨1 - 지진동에 대한 피해정도 레벨2 - 지진동에 대한 피해정도a	

성능설계법으로 내진설계의 순서를 <그림-4>에 나타낸다. 해석방법은 난이도, 해석능력에 의해서 간이 해석·간이동적해석·동적해석으로 크게 구별된다. 예를 들면 호안의 내진성능조사에 대해서 간이해석으로 진도법, 간이동적해석으로서 강제활동해석, 동적해석으로서 비선형유한요소법(시각력해석) 등이 있다.



<그림-4> 내진설계의 순서

레벨 1 지진동에 대해서는 내진성능을 설정하여 종래의 진도법에 의해 구조물의 안정 등을 조사하는 것이 일반적이다. 구조물이 활동, 침하, 전도의 가부 등, 힘의 균형으로부터 조사한다. 또 구조부재는 계산되는 응력도가 허용응력도 이내인지를 조사한다. 주변지반이 사질토의 경우에는 액상화 발생의 유무를 간단하고 쉬운 방법으로 조사하여 필요에 따라 지반 개량 등의 대책을 고려한다. 액상화의 예측·판정법에는 입도와 N치에 의한 방법과 반복3축시험 결과를 이용하는 방법 등 2종류가 있다. 입도와 N치에 의한 방법은 간단하고 쉬운 방법이다. 반복3축시험결과를 이용하는 방법은 보다 상세한 방법으로 입도와 N치에 의한 방법에 의해 예측·판정이 곤란한 경우에 이용된다. 이 단계에서는 지반의 액상화 유무의 판단으로 변형량 조사는 간단하고 쉬운 추정식으로 실시한다. 레벨 2 지진동에 대해서는 동적응답계산 등의 방법을 이용하여 지반의 변형, 구조물의 피해정도 등을 조사한다. 또한 액상화가 예측되는 경우에는 사질토의 과잉간극수압을 고려, 지반의 변형(수평이동이나 침하)을 계산할 수 있는 방법으로 변형량을 조사한다. 호안에서는 종래의 지진피해 상황으로부터 육지측에 100~200m에도 액상화에 의한 지반변형의 영향이 미친다. 변형량을 조사하는 방법에는 몇 개의 방법이 제안되고 있다. 유동화한 지반의 강성을 작게 해 정적인 유한요소법으로 계산하는 방법, 모형진동실험에 의해 추정하는 방법 등이 있다. 항만구조물로는 FLIP로 불리는 유한요소법에 따라 동적비선형해석방법이 넓게 사용되고 있다. 지반을 유효응력으로 취급하여 지반이나 구조물의 변형을 정밀하게 계산할 수 있어 변위량에 근거한 내진성능의 조사에는 매우 유효한 수단이다. 다만 계산 실시에는 꽤 고도의 노후가 필요하다. 변위량의 제한은 각 시설의 사용기능에 의존한다. 항만구조물에서 중요한 시설로는 선박의 접안가능, 크레인의 가동 등의 관점으로부터 대강 1m 정도를 목표 성능으로 하고 있다. 어항해안시설에서 목표



〈그림-5〉 유한요소법의 보안 분할예

변위량은 이 값에 구애받지 않고 목표 성능을 고려하여 향후 설정해 나갈 필요가 있다.

5. 성능설계 도입에 관한 현상과 과제

항만분야에서 새로운 성능설계법에 따르는 기준은 벌써 국회에서 비준되어 시행되고 있다. 새로운 기준으로 계산 사례집도 출판되어 일반 기술자도 구조 설계할 수 있는 체제가 되었다. 국가가 실시하고 있는 시설의 구조설계법으로 차례차례 채용되고 있다. 단지 아직 국가의 중요시설(내진강화시설 등)을 대상으로 시행되고 있는 단계로서 수산청, 지방 자치체나 민간시설로의 적용은 보급되지 않았다. 성능설계법의 개념은 이해할 수 있지만 실무에 폭넓게 적용하려면 몇개의 문제가 존재한다. 이 요인으로서 이하의 사항을 들 수 있다.

- ① 요구성능의 평가가 어렵다 : 일반론으로 성립하지만 개개의 시설에 대한 요구성능을 발주자와 수주자로 상호이해·합의하기 위해서 아직 검토가 필요하다. 개개의 시설에서 구체적으로 어느 정도의 피해를 생각할까 통일적인 이념의 합의가 충분히 형성되어 있지 않다.
- ② 성능설계법과 고도의 수치해석 방법을 이해할 수 있는 설계자가 아직 적다 : 동적응답 계산법, 유한

요소법 등 계산방법이 고도화됨으로 계산이 일부 기술자에 한정되고 있다. 기술력이 있는 컨설턴트 밖에 업무를 할 수 없을 정도로 내용이 고도화·복잡화하고 있으므로 지방이나 중소 컨설팅 기술자의 육성이 향후 필요하다.

- ③ 관, 민과 같이 설계결과의 확인이 곤란 : 계산결과의 타당성을 심사하는 체제가 되어있지 않다. 고도의 수치계산으로 계산순서의 확인이나 실수의 발견 등이 곤란하다. 새로운 심사기관의 설립이나 설계 체크 업무가 새롭게 필요하다. 어항시설을 대상으로 연안기술연구센터에서 체크 업무가 최근 실시되고 있다.
- ④ 평가방법이 다양화 : 성능설계법에서는 설계자에게 판단을 맡길 수 있는 곳이 많지만 어느 설계법이 좋은지 개개의 설계자에서 판단이 곤란하다.

현재상태로서 예로 나타나는 설계방법 이외에는 없다. 결과적으로 한없이 사양설계에 가깝다. 소규모의 시설, 중요도의 낮은 시설에서 내진성능설계의 적용은 작업량이 많고 시간도 걸린다.

이상 상술한 현상에 문제점이 많지만 성능설계법으로의 이행이 구조설계법분야에서 흐름이 되고 있어 어항해안도 각종 상기의 문제점을 극복하면서 적절한 방법, 체제를 구축해 나갈 필요가 있다고 생각한다. ▲