



댐 안전성 평가를 위한 여수로 피어부의 정적 거동 분석

장봉석^{1)*} · 임정열¹⁾ · 이명규²⁾ · 이형준³⁾

¹⁾한국수자원공사 수자원연구원 ²⁾전주대학교 토목환경공학과 ³⁾한밭대학교 토목공학과

Static Behavior Analysis of Spillway Pier for Dam Safety Evaluation

Bong-Seok Jang^{1)*}, Jeong-Yeul Lim¹⁾, Myung-Kue Lee²⁾, and Hyung-Jun Lee³⁾

¹⁾Dam Engineering Research Center, Korea Institute of Water and Environment, Daejeon 305-730, Korea

²⁾Dept. of Civil & Environmental Engineering, Jeonju University, Jeonju 560-759, Korea

³⁾Dept. of Civil Engineering, Hanbat University, Daejeon 305-719, Korea

ABSTRACT Seismic performance evaluation for dam safety evaluation has been continually conducted. However the behavior analysis for the spillway pier which is known as the weak point of dam is seldom reported. Therefore, this study performed the static loading tests for a prototype structures as elementary tests for the final seismic performance evaluation of dam safety. The prototype of pier structure has 1/20 scale and it adopts to strength model. And cracking loads and ultimate loads of real structures are calculated through numerical analysis using commercial FEM program (ABAQUS). The results of this study show some difference between the results of prototype tests and the results of numerical analysis. Also, the ultimate and cracking loads can be estimated through the prototype loading test and numerical analysis.

Keywords scale reduction model, dam, pier, static analysis

1. 서 론

최근 들어 구조물의 안전성에 대한 국민적 관심이 증대되고 있고 있으며, 댐의 경우 붕괴시 대형 참사를 일으킬 수 있는 중요 구조물로 안전성 평가에 대한 연구는 지속적으로 실시되어 왔다. 그러나, 댐 안전성 평가는 댐체에 대한 연구를 주로 실시하였으며, 여수로 피어부에 대한 연구는 미흡한 실정으로, 근래에 기존 댐에 대한 여수로 피어부의 안전성 평가의 필요성이 대두되었다.

따라서, 본 연구에서는 댐 여수로 피어부에 대한 안전성 평가를 위한 구조물 축소모형 시험체를 제작하고, 제작을 위한 원형(prototype)구조물은 국내 댐 중 대표모형을 선정하였다.

이에 따라, 모형 제작을 위하여 여러 가지 모델 제작 기법을 검토하고, 실제 구조물의 거동을 모사하기 위하여 합리적으로 상사 방법을 제시하고, 모형 제작의 설계를 하기 위한 예비 실험 및 모형체 제작 절차를 설명하였으며, 제작된 모형 시험체의 실험 방법을 제시하였다.

모형시험체는 구조물의 거동 상사성을 검토하기 위하여 정적모형을 제작하였다. 제작 모형은 국내 댐의 여수로 시공 상태를 고려하여 기하학적 상사비에 의해 축소

된 철근콘크리트 모형으로 제작하였다. 모형 시험체는 구조물의 사용하중 상태에서의 거동과 균열하중, 균열 발생 이후의 비선형 거동, 극한하중 등에 대한 결과를 얻기 위하여 실제 구조물의 강도 모델을 구성하여 재하시험을 실시하고, 시험 결과에 대한 분석과 구조해석(수치해석)을 통하여 실제 구조물의 거동 및 균열하중, 극한하중에 대한 응답을 분석할 수 있었다.

2. 모형 제작

2.1 개요

일반적인 모형 시험은 예측하기 힘든 복잡한 구조물의 거동을 분석하기 위하여 이용되며, 또한 사용하중에 따른 거동 분석과 극한하중의 도출이 가능하다. 이러한 모형 실험은 모형의 기하학적인 형상 및 재료 특성을 고려한 모형의 상사비에 따라 시험이 수행된다.

본 모형 시험체 제작을 위하여 먼저 기존 댐의 시공 상태를 조사 분석하였고, 문헌분석, 재료, 작업성을 고려하여 구조물의 거동을 나타낼 수 있는 상사비를 결정하였다. 상사비 결정 후 원형(prototype)구조물의 시공도면을 기준으로 결정된 상사비를 바탕으로 여수로 피어부의 모형 제작이 이루어지게 되었다. 모형 구조물의 제작을 위해서는 모형 콘크리트 타설을 위한 시멘트의 선정, 골

*Corresponding author E-mail : svic@hanafos.com

Received September 5, 2005, Accepted September 20, 2006

©2007 by Korea Concrete Institute

재선정, 시험배합비 산출, 압축과 할렬인장강도를 포함한 기본 물리 특성 시험 등의 분석 과정이 필요하다. 이러한 선행 작업을 실시한 후 실제 모형 제작을 한다.

모형 제작은 거푸집제작-기초 형성(일반 콘크리트 이용)-월류부(weir) 철근 배근-콘크리트 타설 및 양생-피어부(pier) 철근배근-콘크리트 타설 및 양생의 순서로 시험체를 완성하였다. 또한, 각 철근 조립 단계에서 재하시 구조물의 거동을 측정할 게이지(gauge)를 철근용 변형게이지를 이용하여 특수하게 제작하였고, 콘크리트 표면의 균열을 관찰하기 위하여 표면 게이지를 설치하였으며, 계측을 위한 센서는 40여개 설치하였다.

2.2 모형 제작 이론

2.2.1 개요

철근콘크리트 구조물의 모형 시험은 구조물의 거동이 어느 정도 범위까지 파악하는가에 따라 모델의 특성이 결정되고, 결정된 모델의 특성에 따라 기하학적 상사비와 재료상사비가 결정된다. 상사비 결정 후 제작된 모형 시험체에 대하여 구조해석을 실시하고, 그 결과로부터 거동 특성 및 내하 능력에 대한 검토를 실시한다.

2.2.2 축소 모형의 제작

모형시험을 통한 구조물 거동 분석은 상사비에 대한 신뢰성이 확보되어야 결과에 대한 신뢰도를 확보하는 것으로 축소모형시험을 위해서는 계획 단계에서 다음과 같은 사항이 일반적으로 고려되어야 한다.

1) 모델의 종류

모형 시험시 제작되는 모델은 모형 시험(model test)으로부터 구하려는 구조 응답의 특성에 따라 탄성모델, 간접모델, 직접모델, 강도모델 등으로 분류되며 각 모델별 특성을 갖는다.

가) 탄성모델 : 기하학적으로 원형과 유사하며, 균질하고 탄성적인 재료를 쓰나, 반드시 원형의 재료와 같을 필요는 없다.

나) 간접모델 : 전단력, 휨모멘트, 축력과 같은 단면력과 반력에 대한 영향선도를 얻기 위해서 사용되는 특별한 형태의 탄성모델이다.

다) 직접모델 : 기하학적으로 모든 면에 있어서 원형과 유사하며, 하중도 원형과 같은 방식으로 재하된다.

라) 강도모델 : 원형의 파괴시까지 거동을 예측하기 위한 것이며, 원형과 유사한 재료로 만들어진 직접모델의 일종이다.

이러한 모델 종류 중에서 본 연구에서는 구조물의 균열 발생 하중, 균열 발생 이후의 거동, 극한하중을 모형 시험으로부터 구하기 위하여 직접모델의 일종인 강도모델을 제작하였다.

2) 기하학적 상사

모형 시험을 위하여 제작되는 모형은 적절한 축소를

(scale factor)을 가져야 하며, 그 크기에 따라 장단점을 가지고 있다. 일반적으로 적용되는 구조물과 모형의 종류에 따른 기하학적 상사비는 Table 1과 같다.

3) 재료적 상사

철근콘크리트 구조물의 파괴모드와 극한 거동을 포함한 비선형 거동을 완전하게 모델링하는 것은 어려운 일이다. 인장과 압축강도내의 응력범위에서 콘크리트의 비탄성은 그 자체로 문제이나, 철근에 의한 보강효과를 모델링 하는 것도 문제이다.

모델과 원형에 있어서의 콘크리트와 철근의 응력-변형도 곡선의 모양 차이에 따라 진모델(true model), 실용적(practical)진모델, 왜곡(distorted)모델로 나눌 수 있다.

진모델에서 응력상사비(S_f)가 1이 아닌 경우는 차원해석을 적용하여 강도의 차를 설명할 수 있고, 모델 콘크리트에서 $S_f \neq 1$ 인 경우에는 철근에 대해서도 같은 응력상사비를 적용하여야 한다.

원형과 모델의 재료적 성질을 진모델에 맞출 경우 왜곡모델에 비해 계산상의 편리함이 있으나, 콘크리트에 있어 탄성계수상사비(S_E)가 응력상사비(S_f)와 같아야 하고, 무엇보다 철근의 S_{E^*} 을 콘크리트의 S_E 에 맞추는 어려움이 있으므로 일반적으로 $S_E=1$ 로 놓은 실용적 진모델을

Table 1 Typical geometric ratio of structure model

Structure	Elastic model	Strength model
Roof(shell)	1/200~1/50	1/30~1/10
Bridge(highway)	1/25	1/20~1/4
Atomic reactor	1/100~1/50	1/20~1/4
Slab structure	1/25	1/10~1/4
Dam	1/400	1/75
Wind test	1/300~1/50	-

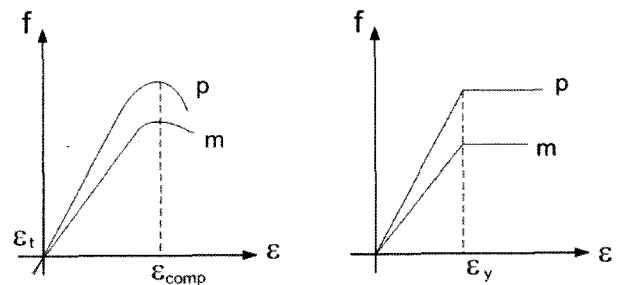


Fig. 1 Similarity condition of true Model

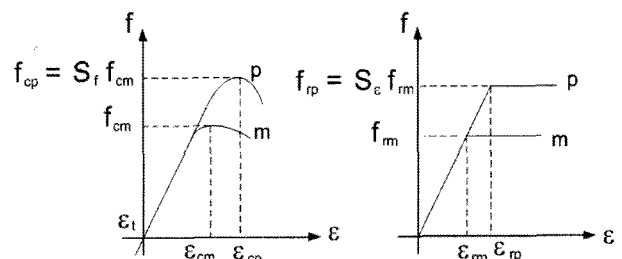


Fig. 2 Distorted similarity condition

사용한다. 만일, 모델 콘크리트가 $S_f = S_E = 1$ 을 만족하지 못할 경우 왜곡모델을 사용할 수 있다.

2.2.3 차원해석과 상사법칙

물리현상에 있어 모든 지배방정식들은 차원적으로 균일해야하므로, $F(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$ 형태의 지배방정식은 다음과 같은 형태로 나타내어 질 수 있다.

$$G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0 \quad (1)$$

여기서, $\pi = n$ 개의 물리적 변수들의 조합인 무차원 독립항, $m = n - r$ (r : 물리적 변수들에 포함된 기본적인 차원의 수)

일반적으로 상사비는 구조물의 거동에 관련된 주요한 변수들을 무차원의 독립적인 항으로 조합하는 차원해석의 일종인 Buckingham's pi theorem으로 구하게 된다. 철근콘크리트 구조물의 경우 진모델, 실용적 진모델, 왜곡 모델 중 해당되는 것을 선택하고, 상사법칙을 적용하면 모든 물리량에 대한 상사비가 결정되어 진다^{3,4)}.

3. 수치해석

3.1 개요

대상 구조물의 수치해석 모델은 현장조사 및 설계도면 분석을 통하여 사용 재료 물성값과 파괴 및 비파괴 강도 시험을 고려하여 결정하였다.

해석 모델은 여수로 피어부 교각을 월류부, 피어부 및 기초암반을 포함하였고, 재료적으로는 탄성모델로 구성하여 범용유한 요소해석프로그램인 ABAQUS를 이용하여 해석하였다⁵⁾.

3.2 해석 모델

대상 구조물은 암반기초, 월류부 콘크리트, 피어부 콘크리트로 구성되어 있으며, 각 부위의 재료 특성을 현장조사 자료(월류부, 피어부)와 일반적인 추정값(기초암반-경암)을 사용하여 정하였다.

해석 모델은 암반부, 피어부, 월류부로 나누어져 있으며, 각 부위는 앵커, 철근으로 구속되어 있어 절점이 일체로 거동하는 것으로 모델링을 실시하였다. 해석 모델은 Fig. 3과 같으며, 해석에 사용한 하중은 10,000 kN으로 결정하였으며, 하중재하는 상단, 중간, 하단으로 3단계로 실시하였다. 해석 모델에 대한 정보는 Table 2에 나타내었으며, 모델 요소는 3차원 4절점을 이용하였다.

3.3 정적해석 결과

구조물에 적용한 하중(10,000 kN)은 상단, 중간, 하단으로 실시하여 해석을 수행하였으며, 각 하중 경우에 대한 최대인장응력 분포는 Table 4와 같다.

해석 결과로부터 균열하중을 추정하면, 해석에서 10,000 kN

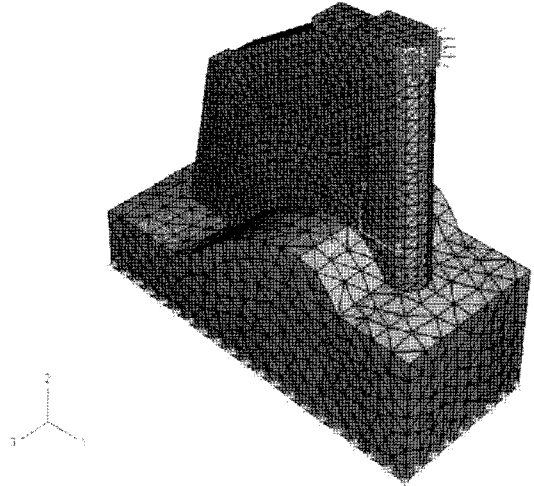


Fig. 3 Analysis model

Table 2 Finite element model of spillway structures

Model joint	Element(pier)	Element(weir)	Element(rock)
4,824	13,161	2,523	5,333

Table 3 Input data

	Pier	Weir	Foundation rock
Compressive strength(MPa)	26.9	24.4	70.0
Elastic modulus(MPa)	24.6	23.4	30.0
Specific weight(kg/cm ³)	2,500	2,500	2,600
Poisson ratio	0.18	0.18	0.25

Table 4 Maximum tensile stresses of static analysis (MPa)

Maximum tensile stress	Loading point		
	Top of pier	Middle of pier	Lower of pier
Longitudinal direction(Sxx)	0.33	0.24	0.28
Perpendicular direction(Syy)	1.07	0.73	0.11
Transverse direction(Szz)	0.25	0.17	0.18
Principal stress	1.24	0.86	1.00

의 하중이 작용하는 상태의 발생 응력을 기준으로 하여 작용 하중과 발생 응력이 선형으로 증가한다고 가정하면, 최대 주응력이 콘크리트 압축강도의 1/10에 도달할 때 균열이 발생하는 것으로 판단되어(26.9 MPa/10)/(1.24 MPa) × 10,000 kN = 21,700 kN로 균열하중을 예측 할 수 있다.

4. 피어부 모형 시험

4.1 개요

모형 제작을 위해 적용할 상사비는 재하 시험 장치의 용량과 제작의 용이성 등을 고려하고, 거동을 검토할 부

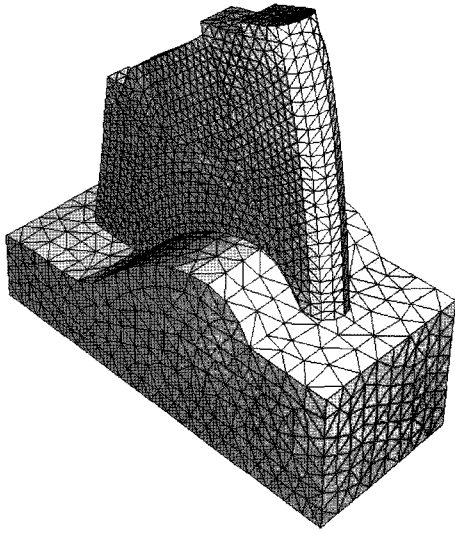


Fig. 4 Deformed shape of spillway structure subjected to the top loading

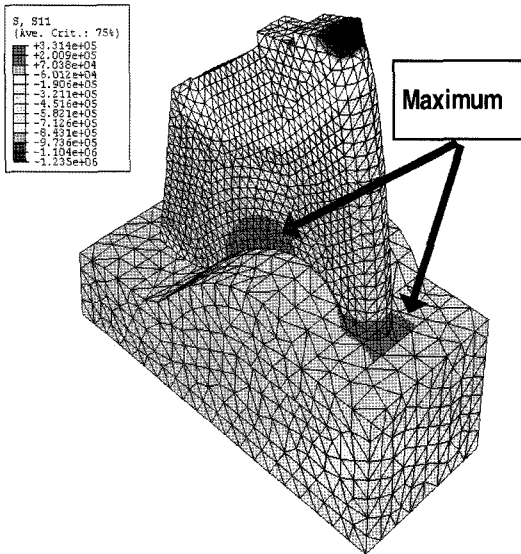


Fig. 5 Longitudinal stress distribution in spilway structure subjected to the top loading

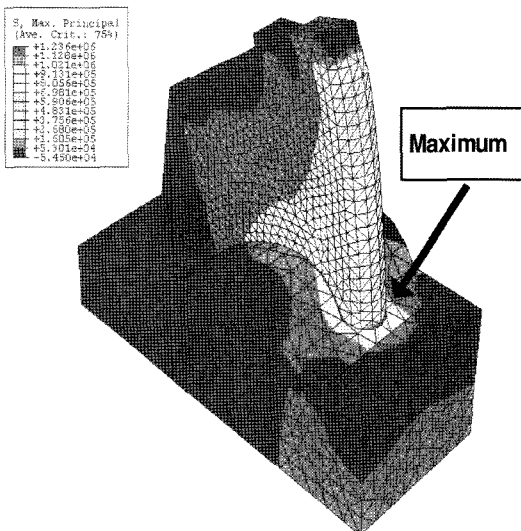


Fig. 6. Distribution of principal stress(upper loading)

분의 역학적 특성을 고려하여 일반적인 댐 구조물의 상사비가 아닌 일반 구조물에 적용되는 기하학적 상사비인 1/20을 적용하였다. 즉, 실제 구조물의 1/20의 크기로 극한강도 시험용으로 모델을 제작하였고, 주 구조물에 대하여 마이크로 콘크리트를, 피어부 철근은 철망을 이용하여 제작하였다.

4.2 마이크로 콘크리트

일반적으로 잔골재만으로 콘크리트 모델을 하는 경우에는 압축파괴시 극한변형이 크게 발생하고, 압축강도에 대한 인장강도의 비율이 크게 된다. 따라서, 마이크로 콘크리트에서는 연속입도의 일반 잔골재를 사용하지 않고, 불연속 입도의 잔골재를 이용하여 입도별 혼합비율을 변화시켜가면서 구조물에 사용된 보통 콘크리트와 유사하게 압축파괴시의 극한 변형률이 0.0025에서 0.004범위로 발생하고, 압축강도에서의 변형이 0.002 근처로 발생하는 혼합비율을 선정해야 한다¹⁾. 모형 제작에 사용될 재료의 배합비를 선정하기 위하여 Table 5와 같은 여러 배합에 대하여 압축강도 시험을 수행하였고 그 분석 결과는 Fig. 8과 같다. 모형 제작에는 원형 콘크리트와 유사한 거동을 보인 No.4 배합을 적용한 콘크리트를 이용하였다.

시험에 사용한 골재는 원형 구조물에서 굵은골재는 40 mm 를 사용한 것을 고려하여, 마이크로 콘크리트에서는 2 mm (1.7 mm~2.4 mm) 골재를 굵은골재(coarse aggregate)로 하고, 0.5 mm 골재를 잔골재(fine aggregate)로 하여 시험체

Table 5 Mixing proportion (micro-concrete, unit: g)

No.	Cement	Water	Fine	Glass ball	Coarse	Flow(cm)
1	400	240	1,200	0	1,200	18.5
2	400	240	720	0	1,680	16.6
3	400	200	1,200	0	1,200	16.1
4	400	200	720	0	1,680	12.7
5	400	240	1,200	0	1,200	15.9
6	400	240	720	0	1,680	13.6
7	400	200	720	336	1,344	17.5
8	400	200	720	0	1,680	16.5

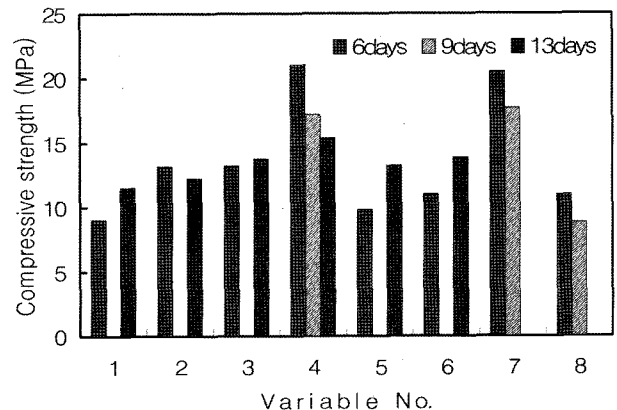


Fig. 7 Compressive strength

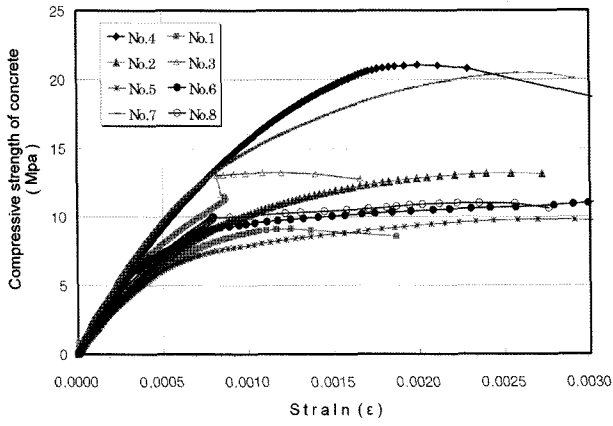


Fig. 8 Stress-strain curve

를 제작하여 강도와 압축 응력-변형 곡선을 분석하여 혼합비율을 선정하였다.

4.3 마이크로 철근

실제 구조물에 사용된 철근은 D22, D19를 사용하여 본 시험체에서는 1/20의 형상비를 고려하면 1 mm 철근이 필요하지만, 1 mm 철근은 제작이 어렵고, 모형내에서 부착 특성이 원형 구조물에서 비하여 적어지는 영향을 고려하여 눈크기 10 mm의 철망을 사용하여 1 mm 철근을 모델링하였다. 철선은 특성상 철선간 구속이 발생하게 되는데, 이것의 정량적인 판단이 어렵지만, 실제 구조물에서 철근과 콘크리트의 부착 거동을 어느 정도 유사하게 모델링하는 것으로 가정하여 모형 제작에 사용하였다.

4.4 모형 시험체 제작

모형 시험체는 기초암반부, 월류부, 피어부로 나누어서 타설하였고, 기초 암반부는 40 mm 골재의 24 MPa 강도의 레미콘으로 타설하고, 월류부와 피어부는 마이크로 콘크리트를 이용하여 제작하였으며, 모형 시험체 형상은 Fig. 9와 같다. 모형 시험체 제작 과정은 Figs. 10~13에 나타내었다.

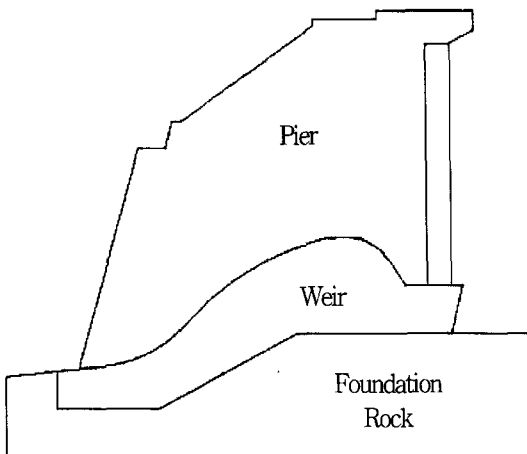


Fig. 9 Layout of structure model

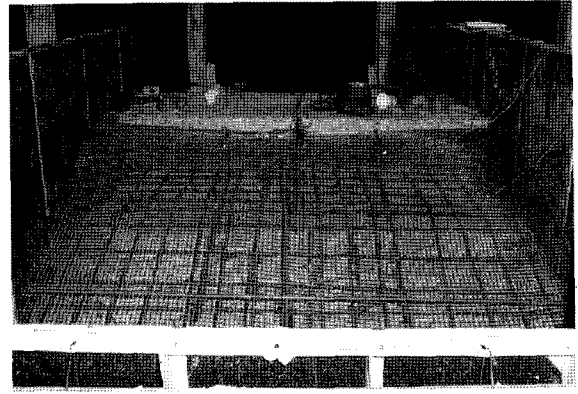


Fig. 10 Reinforcing details of weir

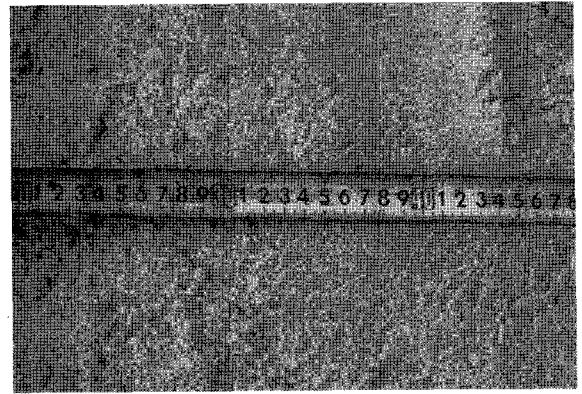


Fig. 11 Fine aggregate for micro-concrete

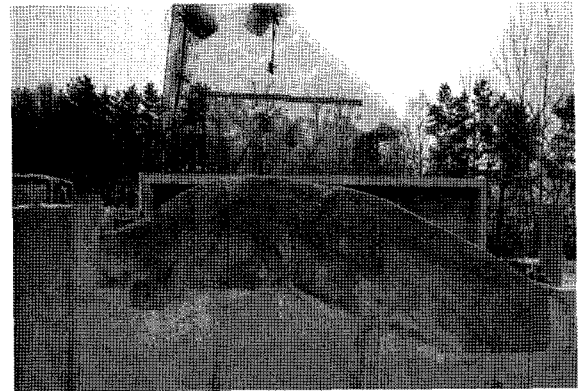


Fig. 12 Structure model of spillway (after removing the form of weir: refer to Fig. 10)

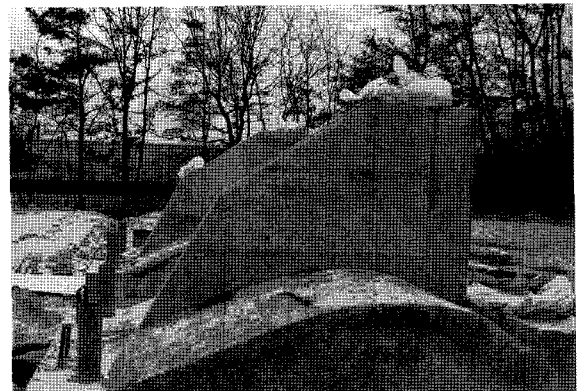


Fig. 13 Completed structure model

5. 피어부 모형 시험 결과

실제 구조물의 거동을 분석하기 위하여 정적 재하 시험을 통한 균열하중과 균열 이후 거동을 살펴보았다.

5.1 계측 위치

콘크리트 내부의 거동을 살펴보기 위하여 철근게이지를 내부에 매설하였으며, 콘크리트 표면의 변형을 측정하기 위하여 콘크리트 게이지를 표면에 부착하였고, 피어부를 통해 전달되는 하중의 방향을 검토하기 위하여 strain rosette를 형성하도록 3개의 게이지를 교차하여 부착하였다 (Figs. 14~16).

5.2 시험 결과

계측 위치 결정 후 하중재하를 실시하여 시험을 진행하였으며, Fig. 17은 시험 장면을 나타낸 것이다.

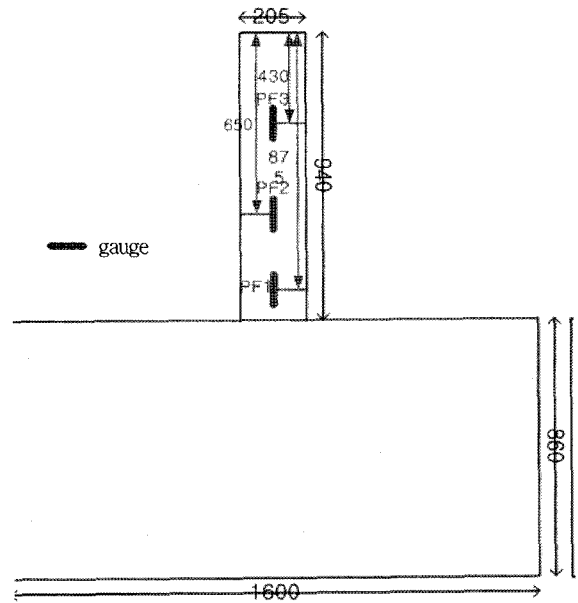


Fig. 16 Strain gauge(front surface)

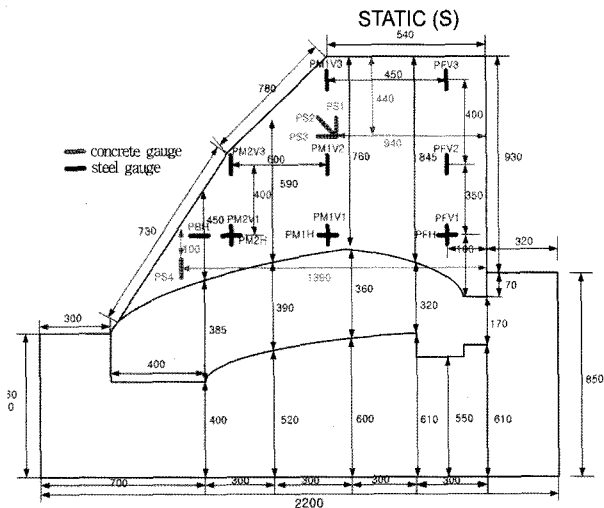


Fig. 14 Strain gauge(southern surface)

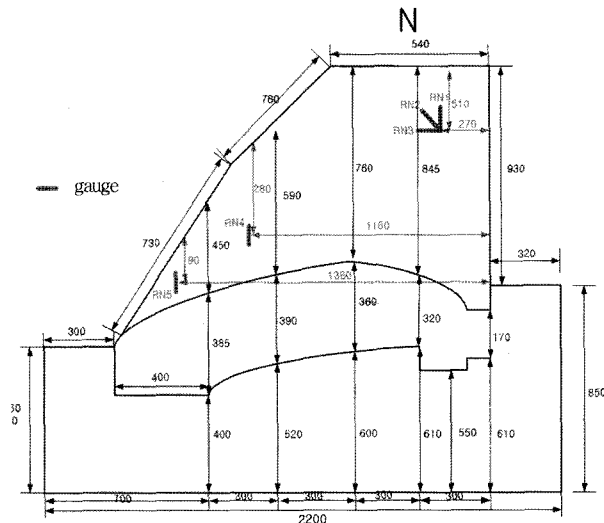


Fig. 15 Strain gauge(northern surface)

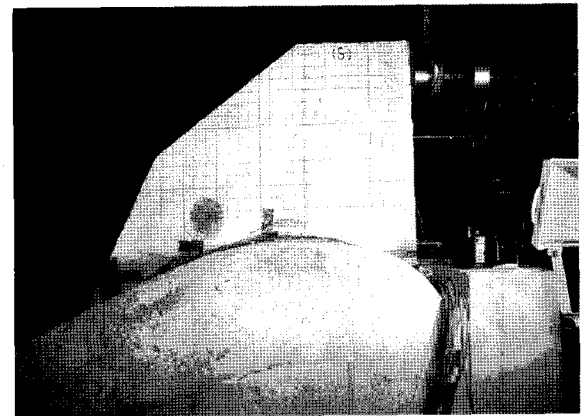


Fig. 17 Configuration of testing apparatus

시험 결과 피어부 전면부(상단에서 430 mm 아래)의 하중변위 곡선은 Fig. 18과 같으며, 균열은 100 kN 근처에서 관찰되었고, 모형 시험체의 파괴하중은 190 kN으로 측정되었으며, 이 근처에서 변형량이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

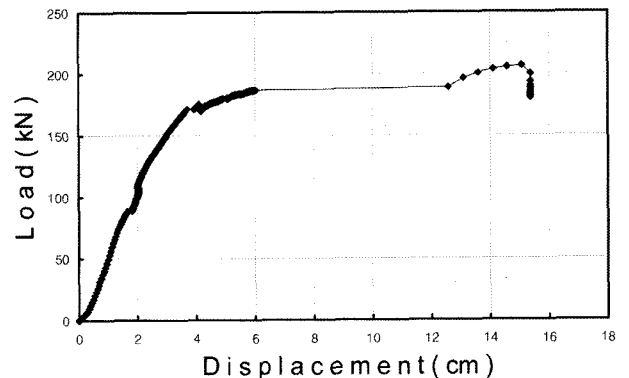


Fig. 18 Load-displacement curve(top of pier)

일류부 정상과 기초부 전면에 설치한 게이지에서 측정된 변형은 Fig. 19와 같고, 이 측정 결과에 의하면 균열이 발생한 100 kN 근처에서 변형이 증가량이 크게 늘어나는 것을 볼 수 있었다. Figs. 20과 21은 시험 완료 후 남측과 북측에 발생한 균열 형상을 나타낸 것이다.

6. 결 론

본 논문에서는 여수로 피어부의 안전성 검토를 위한 강도모델을 제작하여 재하 시험을 수행하였다. 균열하중과 극한 강도를 결정하기 위한 모형 시험체를 기하학적 상사비 1/20, 응력상사비 및 탄성계수 상사비가 1인 강도 모델로 제작하였다. 모형에 대한 정적 재하 실험 결과 모형 시험체의 균열하중이 100 kN, 추정 극한하중이 190 kN으로 추정되었다.

이러한 모형 시험 결과에 모형의 상사비를 적용하면 원형 구조물에서의 추정 균열하중은 40,000 kN으로, 극한 하중은 76,000 kN으로 추정할 수 있다. 모형 시험체 거동 예측을 위한 원형 구조물의 전체에 대한 해석 결과 추정 균열하중은 약 21,700 kN으로 계산된 것에 비하

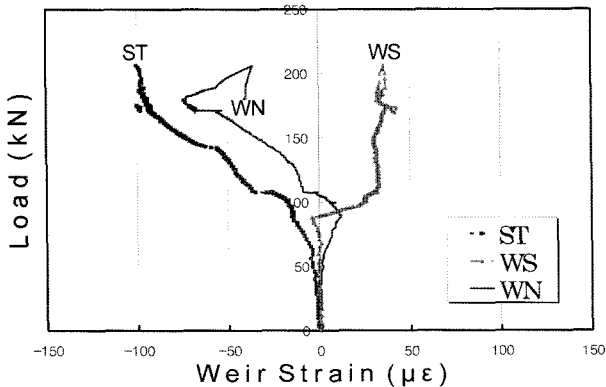


Fig. 19 Load-strain curve(weir and front of foundation)

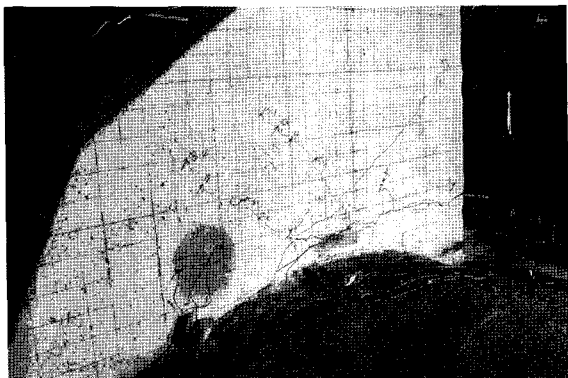


Fig. 20 Crack distribution(southern surface)

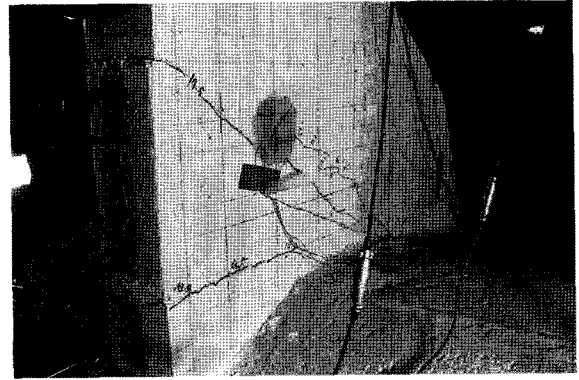


Fig. 21 Crack distribution(northern surface)

여 크게 추정되었다. 이는 축소 모델 시험체의 균열 파괴 양상이 전체 구조물의 거동 예측 시뮬레이션의 결과와는 다른 응력 상태가 되어 발생하는 결과로 볼 수 있다. 즉, 전체 구조물 거동 해석에서는 구조적으로 불연속인 피어 하단과 기초 콘크리트 연결 부위에서 수치적으로 응력이 집중되고 있으나(Fig. 6참조), 모형 시험체에 대한 재하 실험에서는 이 부분에 하중 집중 현상이 발생하지 않고, 재하 하중을 기초로 전달하면서 벽체에 형성되는 압축 스트럿 부분 주변에서 초기 균열이 발생하였다(Figs. 20, 21 참조). 전체 거동 해석 모델에서는 구조물의 전반적인 거동을 파악하기 위하여 피어의 전면부와 기초 콘크리트가 평면으로 연결된 것으로 모델링하였으나, 모형 제작시에는 실제 구조물의 시공 상태를 반영하여 피어 전면부에 기초 콘크리트 턱이 형성(Fig.17 참조)되어 하중 집중을 현저하게 줄여 주고 있다. 이와 같이 모형 제작 상태를 고려하여 해석한 균열하중이 116.8 kN 으로 산정되었으나 실험에서는 100 kN에 초기 균열이 발생하였다⁶⁾. 이러한 점을 고려하면 실험을 통하여 산정된 추정 균열하중을 실제 구조물에 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, “최신 콘크리트 공학,” 기문당, 1992.
2. Malhotra, V.M. and Carino, N.J., *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, CRC Press, 1991.
3. Noor, F.A. and Boswell, L.F., *Small Scale Modeling of Concrete Structures*, Elsevier Applied Science, 1992.
4. Sabnis, G.M., et al, *Structural Modeling and Experimental Techniques*, Prentice Hall.
5. *ABAQUS User's Manual Ver.6.4*, Hibbit, Karson & Sorensen, Inc, 2003.
6. 이명규, 장봉석, 이형준, 하익수, 김형수, 고성기, “여수로 수문교각의 정적 거동 예측을 위한 구조 모형시험”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 17권 1호, 2005, pp.115~118.

요 약 댐 안전성 평가를 위한 내진성능평가는 지속적으로 실시하였으나, 댐에서 취약부로 알려진 여수로 피어부에 대한 거동 분석에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 실제 지진발생시 여수로 피어가 국부 손상을 받기에 취약한 부분으로 추정되어 본 연구에서 댐의 내진성능 평가를 위한 기초 실험으로서 정적 시험을 수행하였다. 본 연구에서는 댐의 여수로 피어부에 대한 축소된 철근콘크리트 모형을 통한 강도모형을 구성하여 정적 모형 시험을 실시하고, 시험 결과의 분석, 구조해석을 통한 실제 구조물의 거동 및 균열하중, 극한하중에 대한 분석을 실시하였다. 대상 시험체에 대한 모형 시험 결과와 수치해석 결과는 서로 다른 파괴 거동을 나타내어 파괴하중이 서로 다르게 추정되었으나, 모형 시험체의 파괴 거동을 고려하는 경우에는 정적 시험과 해석을 통하여 실제 구조물의 균열 발생 하중과 극한하중을 추정할 수 있는 것으로 사료된다.

핵심용어 : 축소 모델, 댐, 피어, 정적해석