

댐의 지진관측 및 내진대책 수립을 위한 지진계측시스템 구축 방안에 관한 연구 The Establishment Plan of Strong-Motion Instrumentation of Dams for Monitoring of Seismic Behavior and Taking An Urgent Countermeasure

오병현¹⁾, Byung-Hyun Oh, 이종욱²⁾, Jong Wook Lee

¹⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원, Head Researcher, Korea Water Resources Corporation

²⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Water Resources Corporation

SYNOPSIS : In this study, the installation location of accelerometer and accelerograph for dam are investigated in the field to establish of emergency action against dam failure when earthquake occur and to guarantee the results of seismic stability of dams which are analysed with dynamic analysis method during 1999 to 2003 by KOWACO. By a comparative study concerning of domestic and foreign guidelines of seismic strong motion instrumentation for dams, "Guidelines of Seismic Strong-Motion Instrumentation Installation, Operation and Maintenance for Dams" is established to set up the standard of seismic strong-motion instrumentation for dam, are supervised by KOWACO

There is some problems in taking a measure of stability of dams when earthquake event occur because the existing seismic strong motion instruments are operated independently. This make difficult to confirm the occurrence of seismic event. For that reason, in this study the plan of unified operation and maintenance system for strong-motion instrument for dams is designed. It will make possible real-time seismic monitoring, data transmission and receiving, giving warning for earthquake, and exchanging data with national seismic network.

Key words : Dam, Earthquake, Seismic behavior, accelerometer, accelerograph, seismic monitoring

1. 서 론

영월지진('97년) 및 최근 울진지진의 발생으로 국가주요 시설물에 대한 내진안정성에 대한 관심이 증대되었으며 최근 중규모 이상의 지진의 발생빈도가 증가하는 추세로 향후 대규모 지진의 발생에 대한 대비가 필요한 실정이다. 이상과 같은 배경으로 국가주요시설물에 대한 내진설계기준은 강화되고 있으나 기존댐의 경우에는 지진계가 설치되어 있지 않아 지진에 대한 응답거동 및 내진안정성 확인이 곤란한 실정이다. 현재 국내에서는 일본의 고베지진 이후 내진설계기준(건설교통부, 1997)이 개정되었으며 2001년 개정된 댐 설계기준(건설교통부)에는 내진특등급 댐의 경우에는 의무적으로 지진계를 설치하고 정상상태를 유지하여 한다고 규정하고 있다.

대규모 다목적댐과 용수전용댐의 건설 및 유지관리의 책임을 맡고 있는 한국수자원공사에서는 지진발생시 지진에 영향을 받는 댐에 대한 종합적인 관리의 필요성을 인식하여 기존댐 및 신규 건설댐에 대한 지진계측 시스템 구축을 추진하고 있으며 각 댐 지진계의 원격관리 및 지진발생시 신속히 댐의 피해상황을 판단하여 대응방안을 강구할 수 있도록 댐의 지진동을 실시간 감시, 자료수신 및 경보발령, 대외적으로는 국가지진관측망과의 연계운영이 가능한 통합운영관리시스템의 구축방안을 검토중에 있다.

본 연구에서는 댐의 지진응답거동 및 내진안정성확인을 통한 신속한 지진대응체계의 확립과 내진안정성을 확보하고자 지진계가 설치되지 않은 기존댐의 지진계 최적 설치위치 조사하였으며 댐 지진계의 설치 및 운영관리 표준화를 위해 국내·외 설치 및 운영기준안에 대하여 조사·분석을 통해 합리적인 “댐 지진계 설치 및 운영관리 지침안”과 “댐 지진계 통합운영관리 시스템 구축방안”을 마련하였다. 이를 통해 댐 지진계 설치 및 계측분석의 일관성 확립 및 효율적인 유지관리가 가능할 것으로 사료된다.

2. 지진계 설치 및 운영현황

국내의 주요 지진관측기관은 표 1과 같이 기상청, 한국자원연구소, 한국전력연구원, 원자력안전기술원이며, 몇 개의 대학에서 자체 또는 한국자원연구원과 공동으로 관측망을 운영하고 있다. 또한, 원자력발전소(전력연구원, 원자력안전기술원)와 다목적댐(수공)등에서 가속도 지진계가 운영 중에 있다. 또한 2001년도 인천국제공항이 건설되면서 인천국제공항 여객터미널과 자유장에 계측기를 설치하여 운영중이며, 2002년 수·화력발전소에 13개의 지진계측 관측소를 설치하여 운영하고 있다.

그러나, 국내의 지진응답계측은 아직까지 기상청등의 국가지진관측망과 연구기관의 고유목적에 의하여 운영되는 것이 전부이다. 실제로 지진으로 인한 피해 저감을 위한 강진동(Strong Ground Motion) 지진응답계측 시스템은 전무한 상태이다. 이러한 지진응답계측은 연구기관의 관측망과는 달리 인구 밀집지역이나 주요시설물을 중심으로 설치되어야 하기 때문에 많은 기관의 참여가 필요하다. 앞으로 우리나라에서 적절한 내진 대책을 세워 지진피해를 예방하기 위하여서는 강진동 관측을 위한 지진응답계측 시스템 구축이 절실한 상황이다.

한국수자원공사에서 건설 및 관리중인 다목적댐은 사회적, 경제적 중요도가 높은 내진특등급 시설물이며 댐설계기준(건교부, 2001)에서는 지진계의 설치 및 운영을 의무화하고 있다. 과거에 건설된 기존댐들에는 지진계측설비가 설치되어 있지 않으나 최근에 건설된 다목적댐에는 설계당시부터 지진계가 반영되어 그림 2와 같이 현재 남강댐, 용담댐, 횡성댐, 밀양댐에 지진계가 설치되어 운영중에 있다. 기록계는 Kinematics사의 SSA-1과 K2, 가속도 센서 역시 Kinematics사의 FBA-23과 Epi-sensor(ES-T)를 사용하고 있다.

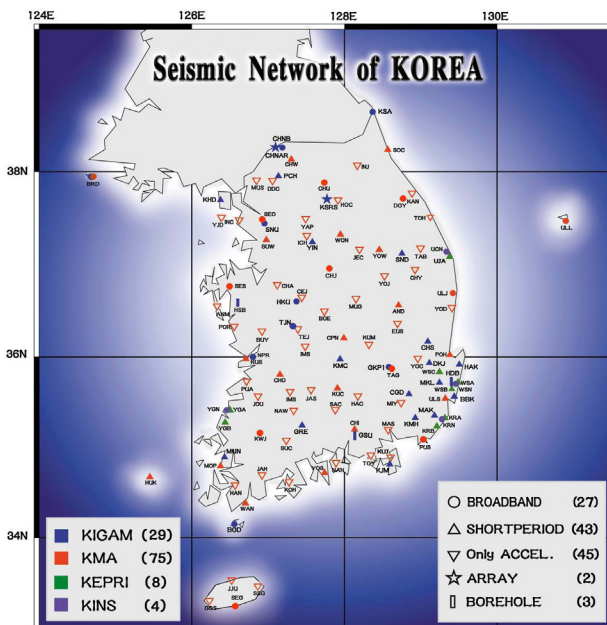


그림 1. 국가 지진관측망 현황(2003년 1월 기준)

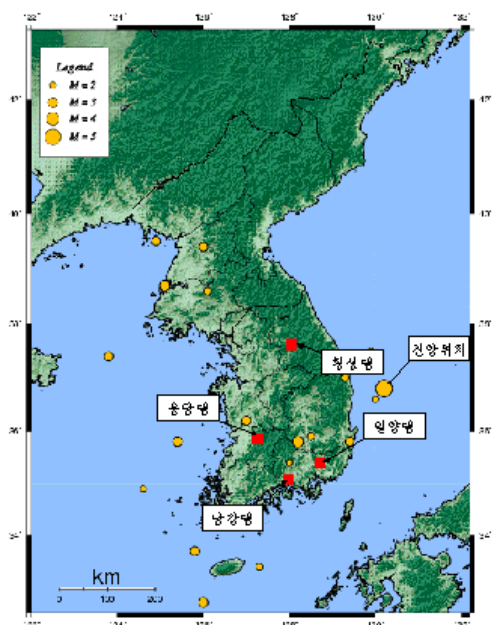


그림 2. 한국수자원공사 댐 지진계 운영 현황

표 1. 우리나라 지진계 운영 현황

기 관	지진계	모델	최대 계측범위	기능
기상청 (KMA)	속도계	STS-2, SS-1	13mm/sec	지진발생통보
	가속도계	ES-T	0.5g	
한국지질자원연구원 (KIGAM)	속도계	STS-2, JC-V100	13mm/sec	지각구조규명 및 지진발생특성연구
	가속도계	ES-T	0.5g	
한국전력연구원 (KEPRI)	속도계	JC-V100	13mm/sec	원전주변 지진활동 감시
	가속도계	ES-T	0.5g	
원자력안전기술원 (KINS)	속도계	STS-2	13mm/sec	원전부지 지진 안전성 평가
	가속도계	ES-T	0.5g	
한국수자원공사 (KOWACO)	속도계	-	-	내진안정성확인 지진응답특성연구
	가속도계	FBA-23, ES-T	2g	

3. 댐 지진계 설치 및 운영관리 기준

3.1 설치 및 운영 기준

건설교통부에서 제정한 국가 기간시설물의 내진설계를 위한 상위 성능기준인 “내진설계기준(1999)”의 지진응답계측에 관한 요구사항에는 내진특등급의 경우에는 의무적으로 지진계측기를 설치, 운영하여야 하며, 내진 I 등급으로 분류된 댐의 경우에는 관할기관이 필요에 따라 지진응답계측기의 설치, 운영을 요구할 수 있는 것으로 기술하고 있다. 또한, 댐설계기준(건교부, 2001)에서는 내진특등급 댐의 경우 지진응답계측기를 설치하고 정상상태가 유지될 수 있도록 관리 해야 하며 내진 I 등급댐에 대해서는 유지관리, 내진설계기술개발 및 개선에 필요한 자료확보를 위하여 관할기관은 지진계를 설치하도록 요구할 수 있는 것으로 규정되어 있다. 댐의 내진등급은 표 2와 같이 댐의 중요도에 따라 내진 I 등급 및 내진특등급의 두 가지 등급으로 분류한다.

표 2. 댐의 내진등급과 설계지진

내진등급	댐	설계지진의 평균재현주기
내진특등급	· 사회, 안보, 경제적인 측면에서 특별한 댐으로 발주처가 지정하는 댐 · 법에 의하여 다목적댐으로 분류한댐 · 높이가 45m 이상이고 총저수용량이 50백만m ³ 이상인 댐	1000년
내진 I 등급	· 내진특등급 댐 이외의 모든 댐	500년

3.2 계측항목

댐의 지진 후, 안정성확인 및 내진설계 및 평가기술 개발을 위한 지진응답을 계측하기 위한 가속도 지진계를 이용하여 일반적으로 관측하고자 하는 항목은 다음과 같다.

1) 자유장(Free-field motions)

미래의 지진에 대해 댐과 같은 큰 구조물의 거동을 예측하고, 지진의 특성 즉, 동작규모, 강진동 지속시간, 국부적인 지질학상의 영향과 토양상태, 감쇠법칙(attenuation laws)과 파 전달계수와 같은 특성을 밝히

기 위해 필요하고 현장에서의 지진 위험을 결정할 때 사용되는 Data base를 획득할 수 있다.

2) 아버트먼트(Buttment motions)

댐 기저부위 접촉면의 형상과 치수로부터 토양구조 상호작용의 각각의 다양한 양상을 파악하여 지진 응답에 기여하고, 기존 분석 모델의 Calibration과 새로운 모델을 개발하는데 도움을 준다.

3) 댐의 동적 응답과 특성

지진이 발생했을 때 댐의 각 부위에 설치된 계측기로부터 거동하는 개별적인 형태의 응답을 종합하여 댐의 전체적인 응답의 선형 및 비선형의 범위를 결정한다.

3.3 설치위치

댐의 전체적인 거동을 대표할 수 있는 위치에 계측기를 설치한다. 그러므로 가속도계들은 중간 및 가장 높은 부분 즉, 댐마루(crest)에 집중되어 배치된다. 댐의 각 부분에 해당하는 거동을 알기 위해 계측기가 설치되어야 하는 위치는 다음과 같다.

1) 자유장 계측기

이 계측기는 댐과 부속 구조물 및 진동으로부터 영향을 받지 않도록 댐과 부속구조물로부터 충분히 떨어진 곳에 위치를 정해야 된다. 이격거리는 콘크리트댐과 중력댐은 댐 높이의 2배인 곳이 적당하고, 필댐은 댐 높이의 3-4배 정도이다.

다만, 가까운 곳에서 다른 기관이 지진계측을 할 경우에는 그 자료를 이용할 수 있다.

2) 측벽 계측기

측벽에서 총 유효입력운동은 댐 기초 접촉면을 따라 위치된 계측기들에 의해 측정된다. 계측기들이 충분한 개수로 설치되었을 때, 접촉면의 변형은 견고한 강제운동과 함께 계측될 수 있다.

3) 댐기초부 계측기

댐 기초부분에서 과 전달은 이 부분에 설치된 계측기들에 의해 계측될 수 있다. 기초부분의 계측기는 흙댐의 기초부분 천공계측과 콘크리트댐의 선택된 지하도(galleries)에서의 설치로 구성된다. 기존댐에 계측기를 기초부분에 설치할 수 없는 경우에는 하류측 선단부분에 설치하는 것으로 한다.

4) 댐 중앙 및 상부(댐마루) 계측기

댐 응답의 형태상 분석(선형범위)을 이용함으로써 포괄적으로 평가할 수 있다. 일차적인 위치는 강진 운동 중에 최대변위가 예상되는 곳이며, 일반적으로 최대단면이다. 댐의 비대칭성 때문에 최대단면은 댐 꼭대기의 실제 중심부와는 멀어질 수도 있다. 이차적인 위치는 댐 꼭대기에서 댐 높이의 0.6배에 해당하는 높이의 지점이다. 만약 구조물의 동적해석이 강진계측기 도입 이전에 행해진다면, 그 응답계측 위치는 해석에 근거하여 특징지어질 수 있다. 해석결과 설치지역은 낮은 안전계수와 높은 하중수준이 예상되는 곳으로 한다.

4. 기존댐 지진계 설치 및 통합운영관리방안

4.1 기존댐 지진계 설치위치 조사

한국수자원 공사에서 관리중인 다목적댐과 용수댐의 내진설계기준(건설교통부, 1999) 및 댐설계기준(건설교통부, 2001)에 의한 내진등급은 다음의 표 3과 같이 모든 다목적댐과 1개의 용수댐은 내진특등

급이며 이외의 모든댐들은 내진 I 등급에 해당되어 대부분의 댐에 지진계의 설치가 필요하여 지진계 설치위치 조사와 향후 통합운영관리방안 검토를 목적으로 현장조사를 실시하였으며 댐 형식별 지진계 설치표준안은 그림 3과 4와 같다. 다목적댐인 남강댐, 밀양댐, 용담댐, 황성댐에는 지진계가 설치되어 운영중에 있다.

표 3. 한국수자원공사 댐 내진등급

No.	댐 명	구 분	타 입	높이/길이 (m)	총저수용량 (백만m ³)	내진등급	비 고
1	소양강댐	다목적댐	RF	123/530	2,900	내진특등급	
2	충주댐		CG	97.5/447	2,750		
3	안동댐		RF	83/612	1,248		
4	임하댐		RF	73/515	595		
5	합천댐		CG	96/472	790		
6	남강댐		CFRD	34/1,126	309		지진계 운영중
7	대청댐		CG+ RF	72/495	1,490		
8	섬진강댐		CG	64/344.2	466		
9	주암댐		RF	58/330	457		
10	주암조절지댐		RF	99.9/562.6	250		
11	부안댐		CFRD	50/282	42		
12	용담댐		CFRD	70/498	825		지진계 운영중
13	황성댐		RF	49/205	87.0		지진계 운영중
14	밀양댐		CFRD	89/535	73.6		지진계 운영중
15	보령댐		RF	50/291	116.9		
16	탐진댐		CFRD	53/403	183.0		설치예정('04년)
17	광동댐	용수댐	RF	39.5/282	11	내진 I 등급	
18	달방댐		RF	53.5/326	7.7		
19	선암댐		ED	22/331	2.0		
20	사연댐		RF	46/300	25		
21	대암댐		RF	27/318	9.5		
22	안계댐		ED	32.5/223.5	17.7		
23	영천댐		RF	42/300	96.4		
24	운문댐		RF	55/407	135.3	내진특등급	
25	연초댐		RF	24.5/120	5.0	내진 I 등급	
26	구천댐		RF	50/234	9.7		
27	수어댐		RF	67/437	28		
28	대곡댐		CFRD	52/190	28.5		설치예정('04년)

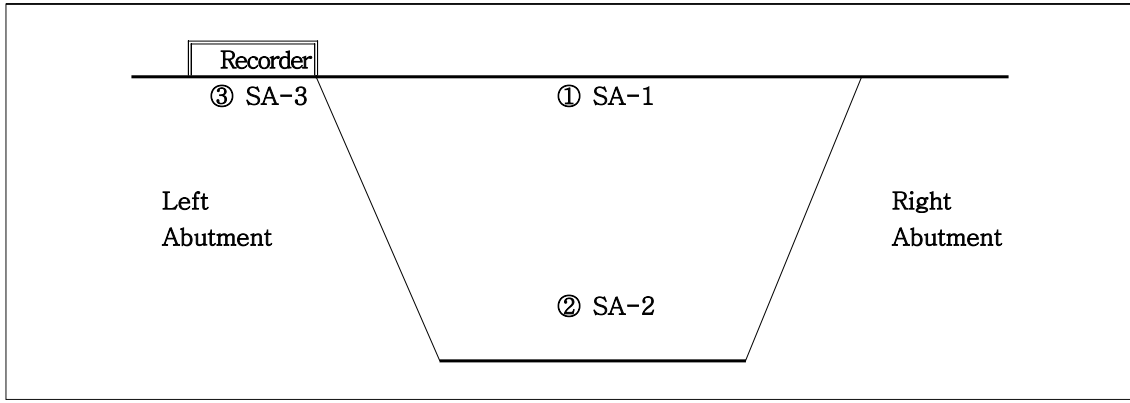


그림 3. 땔댐 및 콘크리트댐 지진계 설치표준(안)

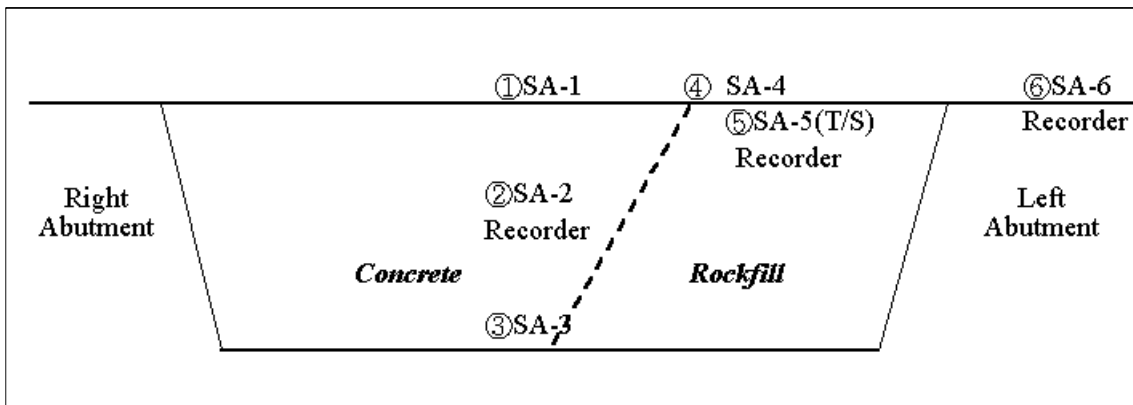


그림 4. 복합댐(콘크리트+ 땔댐) 지진계 설치표준(안)

4.2 댐 지진계 통합운영관리 방안

지진발생 시에 댐의 피해 여부를 신속히 파악하여 대처하고, 실제로 관측된 자료로부터 댐의 거동 특성을 분석하여 이로부터 댐의 안정성 평가와 보강여부 판단 그리고 향후 댐 설계 시의 기초자료 활용을 위해서는 댐 지진계의 통합운영관리가 필요하다. 지진으로 인한 피해 여부를 신속한 파악을 위해서는 댐에서 계측된 자료뿐 아니라 주변의 다른 기관이 운영하고 있는 모든 관측소 자료를 실시간으로 파악할 수 있는 시스템이 필요하다.

댐 지진계를 통합운영관리를 위해서는 지질자원연구원이나 기상청에 전용회선을 설치하여 국가 지진 통합네트워크에 연결된 모든 관측소의 관련된 자료를 받아 볼 수 있도록 국가지진관측망과 연계운영하는 것이 유리한 것으로 판단된다. 그리고 취합된 자료를 실시간으로 가공하여 댐 주변지역 및 댐의 피해여부를 쉽게 가시적으로 파악할 수 있도록 하기 위해서는 계측된 자료를 쉽게 저장하고 분석할 수 있는 데이터베이스와 분석 프로그램이 필요하다. 이를 위한 하드웨어 장비는 워크스테이션과 네트워크장비, 무정전전원장치(UPS) 등의 부대장비가 필요하며 소프트웨어로는 데이터베이스용 오라클(Oracle), 통합네트워크에 필요한 프로그램, 지반진동의 실시간 영상화 프로그램, 그리고 댐 내부에 설치된 자료를 취합하여 이를 분석하여 영상화할 수 있는 프로그램을 개발하도록 하여야 한다. 그러나 예산확보 등 상황에 따라 중앙시스템실의 시스템을 축소 또는 단계별로 구축할 수도 있으며 또한 연차적으로 설치된 댐의 숫자가 증가하고, 댐 내부의 추가 설치 등 관측 환경이 바뀔 수도 있으므로 향후 이런 상황을 고려하여 전체 시스템의 호환성과 확장성을 확보하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다.

4.3 국가지진관측망과의 연계운영 방안

댐을 포함한 모든 구조물에 설치된 계측기로부터 관측된 자료는 개략적으로 두 가지의 주된 요소인 1) 지진으로 인한 구조물 하부의 지반진동과 2) 구조물의 고유 거동 특성의 상호작용에 의한 구조물의 실제적인 거동을 관측한 것으로, 구조물의 거동 특성을 유추하기 위해서는 자유장에서의 지반진동 관측이 필요하므로 건설교통부 내진설계하위기준<지진응답계측기 설치·운영>에서는 댐뿐 아니라 교량, 고속철도, 터널 등 주요 구조물의 경우 반드시 자유장 관측소를 설치하도록 명시하고 있다.

구조물에 설치된 가속도센서의 자료와 비교하기 위해 자유장관측소에 반드시 가속도센서를 설치하여야 하나 속도센서의 경우 의무사항은 아니지만 정확한 도착시각, 각종 위상의 판독 등 지진연구를 위해서는 자유장에 설치된 속도자료가 필수적이다. 따라서 국가지진관측망 협의회에 소속된 기상청, 지질자원연구원, 전력연구원, 원자력안전기술원 등은 자유장 관측소에 속도센서의 설치를 의무화하고 있어 우리공사가 국가지진관측망 협의회에 회원기관으로 참여하기 위해서는 속도계의 설치가 필요한 실정이며 현재 국가지진관측망 협의회와 협의중에 있다.

5. 결론

본 연구에서는 댐의 지진응답거동 및 내진안정성확인을 통한 신속한 지진대응체계의 확립과 내진안정성을 확보하고자 지진계가 설치되지 않은 기존댐의 지진계 최적 설치위치 조사하였으며 댐 지진계의 설치 및 운영관리 표준화를 위해 국내·외 설치 및 운영기준안에 대하여 조사·분석을 통해 합리적인 “댐 지진계 설치 및 운영관리 지침안”과 “댐 지진계 통합운영관리 시스템 구축방안”을 마련하고자 하였다.

또한, 기존에 운영중인 지진계에 대해서도 운영현황점검을 실시하여 고장계기 복구방안 및 통합운영관리방안에 대하여 검토하여 지진계측 업무의 일관성 및 효율적인 유지관리 가능토록 하고자 하였다.

기존 운영지진계의 경우 각 댐에서 독립적으로 운영되어 지진발생시 기상청 및 기타 국가지진관측망의 지진기록과 비교, 검토하여 지진발생 여부를 확인하여야 하는등 초기대응 문제점을 나타내었다.

이러한 배경으로 본 연구에서는 지진계의 원격관리 및 지진발생시 신속히 댐의 피해상황을 판단하여 대응방안을 강구할 수 있도록 댐의 지진동을 실시간 감시, 자료수신 및 경보발령, 대외적으로는 국가지진관측망과의 연계운영이 가능한 댐 지진계 통합운영관리 시스템의 구축방안을 마련하였다.

댐 지진계 통합운영관리 시스템의 구축으로 댐 지진계의 통합운영관리를 통한 계측분석의 일관성 확립 및 효율적인 유지관리, 댐 지진계 설치·운영으로 지진 발생시 즉각적인 댐체의 응답거동 및 내진안정성 분석, 지진발생에 대비한 댐의 종합적인 안전관리, 댐 내진설계기술 개발 및 개선에 유용한 자료확보가 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 기상청(2003), 지진연보
2. 건설교통부(1997), 내진설계기준연구(Ⅱ)
3. 건설교통부(1999), 내진설계기준
4. 건설교통부(2000), 내진설계하위기술기준, 지진응답계측기 설치·운영
5. 건설교통부(2001), 댐설계기준
6. 이대수등(2002), 화력발전설비 내진성능 평가 및 지진감시체계 구축, 한국전력공사 전력연구원
7. 오병현, 임정열, 이종욱(2000), 수자원시설물 내진성능평가에 관한 연구, 한국수자원공사
8. 오병현, 임정열, 이종욱(2002), 댐시설물의 내진성능 및 안전도 평가 연구, 한국수자원공사
9. 오병현, 이종욱(2004), 탐진댐 지진계 설치계획 검토 기술지원 보고서, 한국수자원공사
10. 오병현, 이종욱등(2004), 평화의댐 지진계 설치계획 검토 기술지원 보고서, 한국수자원공사

11. 한국자원연구소(2000), 지진관측망 연계 및 실시간 지진감시 시스템 구축, 한국원자력안전기술원
12. 한국수자원공사(2001), 용담댐 지진계 운영 지침서
13. 한국수자원공사(2001), 밀양댐 지진계 운영 지침서
14. 한국지질자원연구원(2001), 인천국제공항 지진감시시스템 구축사업 최종보고서, 인천국제공항공사
15. 한국수자원공사(2004), 댐 계측기기 설치·운영관리지침
16. Don E. Yule, Tina H. Grau(2003), Earthquake Event Report for the North Alabama 29 April 2003 $M_w=4.6$ Earthquake, U.S. Army Corps of Engineers, ERDC, USA
17. Dept. of The Army(1995), Instrumentation of Embankment Dams and Levees, U.S. Army Corps of Engineers, USA
18. Dept. of The Army(1980), Instrumentation for Concrete Structures, U.S. Army Corps of Engineers, USA
19. Robert F. Ballard, Jr., Tina H. Grau(1998), US Army Corps of Engineers Seismic Strong Motion Instrumentation Program, Dept. of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, USA
20. KOWACO(2004), Korea & Dams, Korea
21. U.S. Bureau of Reclamation(1987), Embankment Dam Instrumentation Manual, USA