구조물－지반 상호작용이 구조물의 동적거동에 미치는 영향

SSI Effects on the Dynamic Response of Structures

김 용 석*
Kim, Yong-Seok

요 약

최근 구조물의 동적해석에서 구조물－지반 상호작용이 구조물의 동적거동에 미치는 영향이 매우 중요하다는 것이 인식되어지고 있다. 이 논문에서는 관성력에 의한 구조물－지반 상호작용이 건물의 동적거동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 유한요소 기법을 이용하여 이론적인 연구와 시험적 조사(Experimental Investigation)연구를 수행하였다. 이론적 연구는 균질한 지반위에 기초가 약간 묻혀있는 낮고 강성이 강한 건물과 높고 가느다란 건물 두개에 대하여 수행하였으며, 시험적 조사연구는 1985년 멕시코 대지진을 겪은 말뚝 기초위에 세워진 두개의 건물에 대해 수행하였다. 이 연구결과를 살펴보면 구조물－지반 상호작용이 구조물에 미치는 주된 영향은 고유주파수 감소와 유효감쇄비 증가인데, 그 영향이 구조물 동적거동에 심각한 영향을 미치는 경우가 있기때문에 구조물－지반 상호작용 영향을 구조물 동적해석시 필히 고려해야 한다는 것이다.

ABSTRACT

Recently it is recognized that the effects of structure-soil interaction(SSI) on the response of structures are important in the dynamic analysis of structures. In this study, theoretical and experimental investigations were performed to study the SSI effects(mainly inertial interaction) on the dynamic response of buildings utilizing the finite element foumulation. Theoretical studies were performed with two idealized buildings(stubby one and slender one) built on the homogeneous soil layer and having the small embedment ratio. Experimental investigations were also carried out for two buildings built on the pile foundation in Mexico City, experienced the 1985 Earthquake. The results of this study show that the SSI effects are significant on the response of structures due to the change of fundamental frequency and effective damping ratio, and that it is necessary to include the SSI effects on the dynamic analysis of structures.

* 정회원, 목포대학교 건축공학과, 전임강사

이 논문에 대한 토론을 1993년 12월 30일까지 본학회에 보내주시면 1994년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 구조물－지반 상호작용이 구조물의 동적거동에 중대한 영향을 미친다는 것이 널리 인식되었으며 어떤 경우에는 그 영향이 심각하다는 것도 잘 알려져 있다. 구조물－지반상호작용이 구조물 동적해석에 미치는 3가지 주된 영향으로는 지반에 의한 입력파의 증폭효과, 구조물과 지반사이 운동학적 상호작용(Kinematic Interaction) 및 관성 상호작용(Inertial Interaction)이다.

지반에 의한 입력파의 증폭효과란 자유지면에서의 흙입자의 거동을 지하암반거동과 비교해보면 지반흙때문에 자유지면에서의 흙입자거동이 커지고 고주파 성분이 줄어드는 것을 말한다. 구조물－지반사이 운동학적 상호작용이란 지반위에 있는 질량이 없고 강성이 무한한 기초의 거동이 같은 위치 자유면(Free Field)에서 지반 거동과 달라지는 것을 말하는데, 기초거동은 강성때문에 고주파 성분이 제거되고 기초 회전운동이 추가된다.[1] 운동학적 상호작용 영향은 기초의 기하학적 형상과 지반에 전달되는 입력파의 특성에 따라 달라지는데, 수직방향으로 전달되는 입력파의 경우 기초가 지하에 묻힌 경우에 운동학적 구조물－지반 상호작용 영향이 더 심각하다.[5] 그래서 대개 기초가 지표면상에 있을때는 이 운동학적 구조물－지반 상호작용 영향을 무시하고 구조물 동적해석을 수행한다. 관성 상호작용이란 구조물이 동적하중을 받을 때 구조물 자체에 생기는 관성력(축력, 전단력 및 모멘트)때문에 구조물의 기초거동이 바뀌게 되고, 이로인해 기초에 전달되는 입력지진파가 영향을 받게 되는 것을 말한다.

이 논문에서는 지표면상의 온통기초와 말뚝기초 위에 설치된 구조물 내진거동에 대한 구조물－지반 상호작용 영향을 구조물과 지반사이 관성작용(Inertial Interaction)만을 고려하여 수직방향으로 전달되는 수평방향 지진파에 대하여 이론적 연구와 시험적 조사연구를 수행하였다. 이론적 연구는 균질한 지반 위에 세워진 지하실이 약간 묻힌 두 개의 이상화된 건물에 대하여 수행하였으며, 시험적 조사연구는 1985년 Mexico City지진을 겪는 말뚝기초 위에 세워진 두 개의 건물에 대해 실시하였다.

2. 시스템 모델링

좌우회전이 가능한 유연한 기초 위에 세워진 건물에 대한 내진거동해석을 위하여 시스템을 여러개의 부구조물로 나누어서 해석하는 Substructure방법을 이용하였으며 동적해석은 주파수영역(Frequency Domain)에서 실시하였다. 하지만 이 Substructure방법을 이용하기 위해서는 기초의 동적강성과 기초저면에서의 입력지진파를 알아야 하기 때문에 무질량 기초와 지반에 대한 유사(Pseudo)3차원 해석을 통해서 기초의 동적강성과 입력지진파를 구하였다.[1] 기초－지반에 대한 동적강성과 입력지진파를 구하기 위해서 기초는 무한한 강성을 지녔고, 지반층은 상대적으로 단단한 지반이나 암반 위에 놓여 있는 것으로 가정하였으며, 토질이 균질한 지반은 역학적으로 선형 및 등방성의 점성을 띤 탄성체로 가정하였다.

기초－지반에 대한 유한요소법 해석을 위해서 Fig. 1에서처럼 반무한지반을 암반, 등가원형기초(Equivalent Circular Foundation)아래 원통형 중앙부지반, 외부지반(Far Field)으로 구분하고, 중심부지반은 환상(Toroidal)의 유한요소로 나누어서 수직, 수평 및 방사상 방향 변위를 모델화하

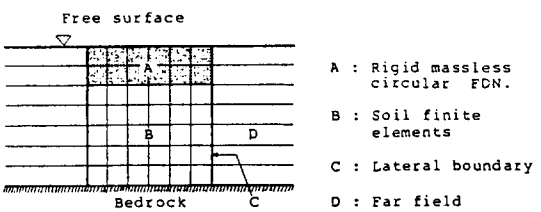

Fig. 1 기초－지반 모델

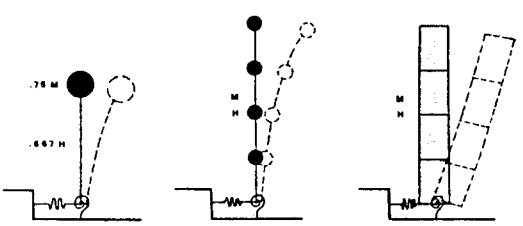

Fig. 2 건물－지반 모델

였으며, 외부지반은 Consistent Lateral Boundary 요소로 대체하여 중앙부분 가장자리에 결합시켰다. 기초-지반 강성 행렬은 기초 중심부에서 가장자리 방향으로 결합하면서 행렬을 줄여 나갔으며, 마지막 단계에서 Lateral Bounary 행렬을 추가 결합하였다. 기초-지반의 동적강성은 각 주파수마다 기초저면 가장자리에 수직 및 수평방향 단위하중을 가하여 구하였다.[3][4]

말뚝기초에 대한 동적해석시 격자형 말뚝 배치는 약축에 대한 회전단면2차모멘트가 같은 원형 배치로 치환하였으며, 지반 유한요소 크기는 말뚝 위치를 고려하여 결정함으로서 지반강성 행렬에 말뚝강성 행렬을 추가하여 전체강성 행렬을 구성할수 있게 하였다.[2] 이때 말뚝강성은 탄성한계 내에 있는 것으로 가정하였다.

건물-지반에 대한 모델링을 위하여 이론적 연구에서는 건물을 전단보(Shear Beam)로, 시험적 조사연구에서는 단자유도 구조물, 다자유도 구조물 및 전단보로 가정하였으며, 지반은 등가탄성체로 가정하여 이 탄성체가 건물을 지지하는 것으로 하였다.(Fig.2) 또한 건물에 대한 동적해석시 건물은 탄성거동을 보이는 것으로 가정하였다.

본 연구에서 입력지반거동으로 기초가 지반에 적게 묻힌 점을 고려하여 운동학적 상호작용(Kinematic Interaction)을 무시하고 지표면상에서 기록한 지진기록을 사용하였으며, 입력지진파는 지지점에 가하였다.

3. 구조물-지반 상호작용에 대한 이론적 연구

건물의 내진거동에 미치는 관성 상호작용 영향에 대한 동적해석을 약한 지반위에 세워진 낮고 강성이 강한 건물과 높고 강성이 약한 건물 두개에 대해서 수행하였다. 두건물의 특성을 살펴보면 건물의 높이는 각각 18m, 90m이고 바닥면적은 모두 1050m^{2}로 등가원형기초 반경(R)이 18m이다. 연약지반의 깊이는 대략 36m이고 건물 기초는 대부분의 다른 건물들처럼 2.25m 정도 지반에 묻힌(E)것으로 고려하였다.

지반의 특성을 살펴보면, 균질한 연약지반의 전단파전달속도(C_s)는 대략 150m/sec이고, 단위중량은 1.9t/m^3, Poisson비는 0.33, 감쇄비(D)는 5%로 지반층의 고유주파수(f_o)가 대략 1.0Hz이다. 이 모델에서 지반에 대한 유한요소 크기는 4.5m×4.5m로 하였다. 한편, 건물의 단위중량은 대략 0.29t/m^{3}이고, 감쇄비는 5% 정도로 낮은 건물의 고유주파수는 3.33Hz이고 높은 건물의 고유주파수는 0.33Hz이다.(Table 1)

건물에 대한 동적해석은 먼저 관성 상호작용 영향을 무시하고 기초가 고정된 것으로 가정하고 수행하였으며(Case A), 다음에는 관성 상호작용 영향을 반영하기 위해 기초의 유연성을 고려하여 수행하였다(Case B). Fig. 3과 4는 앞에서 수행한 낮은 건물과 높은 건물의 동적거동에 대한 변환함수(Transfer Function : T.F.)를 나타낸 것으로 각 주파수에서 기초의 변위에 대한 건물 최상부의 변위비를 나타내고 있다. 낮은 건물의 경우 지반의 관성 상호작용 영향으로 건물의 고유주파수가 약간 작아졌으며 변환함수 값은 낮은 주파수영역에서는 약간 증가하였으나 최대치는 크게 감소한 것을 알 수 있다. 한편 높은 건물의 경우 관성 상호작용 영향으로 고유주파수가 낮은 건물과 마찬가지로 약간 작아졌으며 T.F.값도 낮은 주파수영역에서는 약간 증가하였으나 최대치는 낮은 건물과 반대로 오히려 약간 증가하였다. 결론적으로 관성 상호작용 영향이 연약지반 위에 세워진 낮고 강한(Stiff) 건물일 때는 크고 심각하지만 높고 유연한(Flexible) 건물일 때는 작다는 것을 알 수 있

Table. 1 지반 및 건물의 특성

(단위 : Ton-M-sec)

Bldg ID	Building				Foundation			Soil				
	높이	면적	단위중량	D	f_o	R	E/R	C_s	깊이	단위중량	D	f_o
1	18	1050	0.29	0.05	3.33	18	0.125	150	36	1.9	0.05	1.0
2	90	1050	0.29	0.05	0.33	18	0.125	150	36	1.9	0.05	1.0

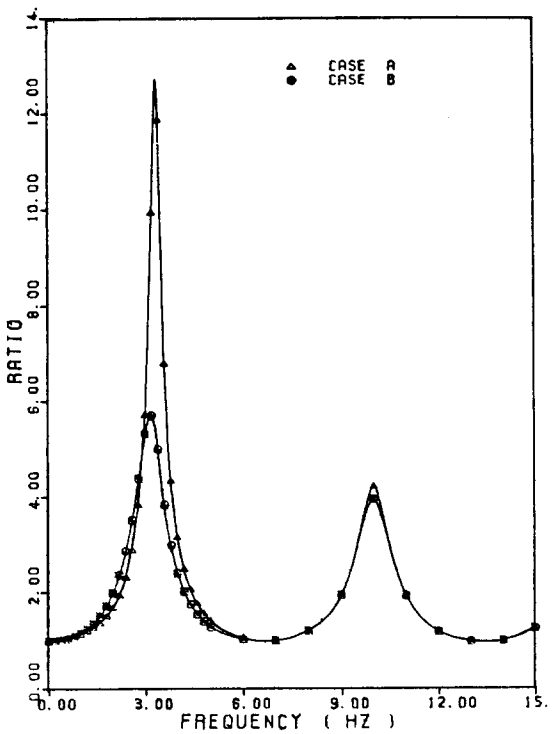

Fig. 3 낮은 건물의 T.F.

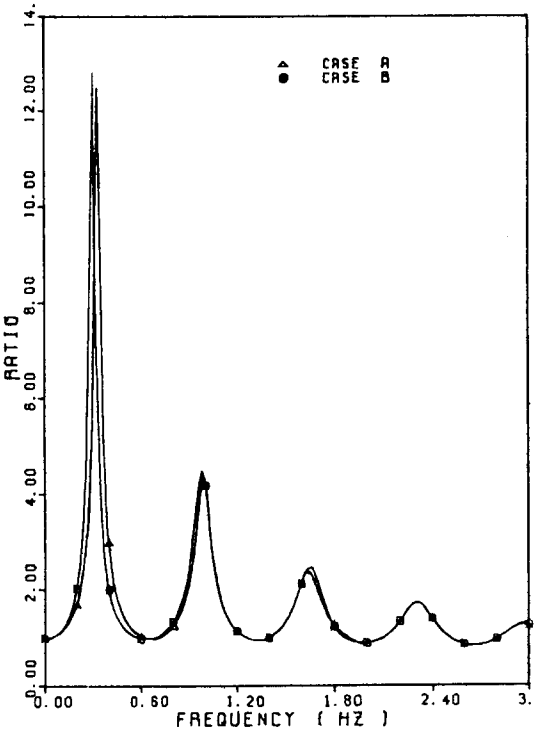

Fig. 4 높은 건물의 T.F.

다.[4]

4. 구조물－지반 상호작용에 대한 시험적 조사 결과분석

관성 상호작용 영향에 대한 시험적 조사연구는 Mexico City에 있는 말뚝기초 위에 세워진 두개의 철근콘크리트 건물의 내진 거동에 대해 살펴보았다. 두 건물의 물리적 특성은 Table 2에 나타나 있으며 기초가 고정된 높이가 11층, 19층인 건물의 고유주파수는 대략 0.9Hz와 0.52Hz로 예측되었으며, 건물의 단위중량은 대략 0.36t /m^3, 감쇄비는 5%로 가정하였다. 동적해석을 위하여 건물은 Table 3에서 보는 것처럼 전체 질량의 75%가 건물 높이의 2/3지점에 집중된 단자유도 모델로 이상화하였으며 건물기초도 등가원형기초로 이상화하였다. 또한 단자유도 모델에 대한 해석결과를 비교 평가하기 위하여 건물을 다자유도 모델과 전단보 모델로 이상화하여 동적해석을 실시하였다.

건물 1과 2는 모두 마찰말뚝 위에 세워졌는데 말뚝의 단위중량, 탄성계수 및 내부 감쇄비는 각각 2.4t /m^3, 210t /cm^2 및 0.5%이었다. 건물에 세워진 곳의 지반은 대략 35m 깊이의 연약한 지반층으로 흙의 특성은 단위중량이 1.5t /m^3이고

Table. 2 건물의 특성

(단위 : Ton-M-Sec)

Bldg ID	층수	Building 크기		Pile			Damping Ratio	주기 (T)
				본수	직경	길이		
1	11	13.6×27.9	30.0	47	0.40	19.8	0.05	1.1
2	19	30.0×42.8	78.8	272	0.60	21.3	0.05	1.9

Table. 3 SDOF모델의 특성

(단위 : Ton-M-sec)

Bldg ID	Equivalent FDN Radius	Equivalent Height	Equivlent Mass	Equivalent Stiffness	Damping Ratio	T (주기)
1	10.98	20.00	0.31	10.23	0.05	1.1
2	20.21	52.52	2.79	30.49	0.05	1.9

Poisson비 0.4, 내부감쇄비 10%이며, 전단파 전달속도는 대략 70m/sec이었다. 이때 지반에 대한 유한요소크기는 최대가 대략 1.5m×1.5m로 말뚝 위치에 따라 약간씩 그 크기를 다르게 하였다.

지반과 말뚝기초 시스템의 수평 및 회전 동적강성은 0−10Hz사이 10개의 주파수에서 계산하였으며 중간주파수에 대한 강성은 동적해석시 직선보간하여 사용하였다. 건물의 동적해석을 위한 입력지진파로는 1985년 Mexico City 지진때 기록된 E-W방향 기록(Fig. 5)중 하나를 사용했으며 말뚝기초에서 생길 수 있는 운동학적 상호작용에 의한 지진파의 변형은 기초가 얕게 묻혔기 때문에 무시하였다.

두 건물에 대한 내진해석은 기초가 고정된 경우와 기초가 이동 가능한 두 경우에 대해 수행하였으며 그 결과가 Table 4에 나타나 있는데, 기초가 유연한 경우에 건물의 고유주파수(f_o)가 줄어들고, 건물의 유효감쇄비(D_{eff})가 증가하였다. 이 고

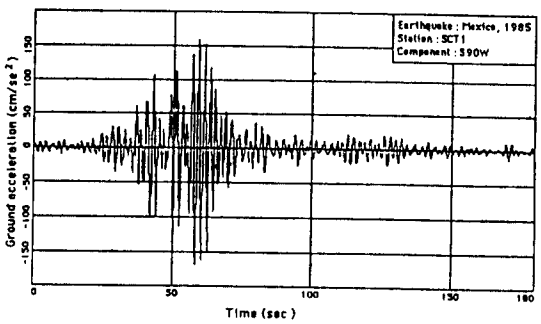

Fig. 5 1985년 Mexico City지진기록(E-W방향)

유주파수와 유효감쇄비의 변화로 건물 1의 경우는 가속도($\ddot{A}_{max}$)가 증가하였지만 건물 2는 반대로 감소하였다. 이 결과에 대한 설명은 Fig.6과 7에 잘 나타나 있는데, 특히 지진의 고유주파수인 0.5Hz주위에서 살펴보면 건물 1의 경우 유연한 기초일 때 동적거동이 상당히 증가하는 것을 볼 수 있지만 건물 2의 경우 건물의 거동이 매우 크게 줄

Table. 4 건물의 동적거동

(단위 : Ton-M-sec-Hz)

Bldg ID		SDOF Model		MDOF Model		Shear Beam Model	
		Rigid Base	Pile FDN	Rigid Base	Pile FDN	Rigid Base	Pile FDN
1	f_0	0.91	0.66	0.91	0.66	0.91	0.66
	D_{eff}	0.05	0.10	0.05	0.09	0.05	0.09
	$\ddot{A}_{max}$	2.72	3.52	3.04	4.45	3.04	4.26
	A_{max}	0.08	0.20	0.10	0.29	0.10	0.27
	V_{max}	0.85	1.10	1.01	1.44	1.04	1.36
	M_{max}	17.2	22.3	17.4	25.0	17.4	23.1
2	f_0	0.52	0.30	0.52	0.30	0.53	0.30
	D_{eff}	0.05	0.09	0.05	0.08	0.05	0.08
	$\ddot{A}_{max}$	8.13	1.65	9.96	3.32	9.95	3.15
	A_{max}	0.74	0.49	0.94	0.73	0.93	0.70
	V_{max}	22.7	4.60	25.6	4.51	25.8	4.28
	M_{max}	1202	244	1234	237	1233	264

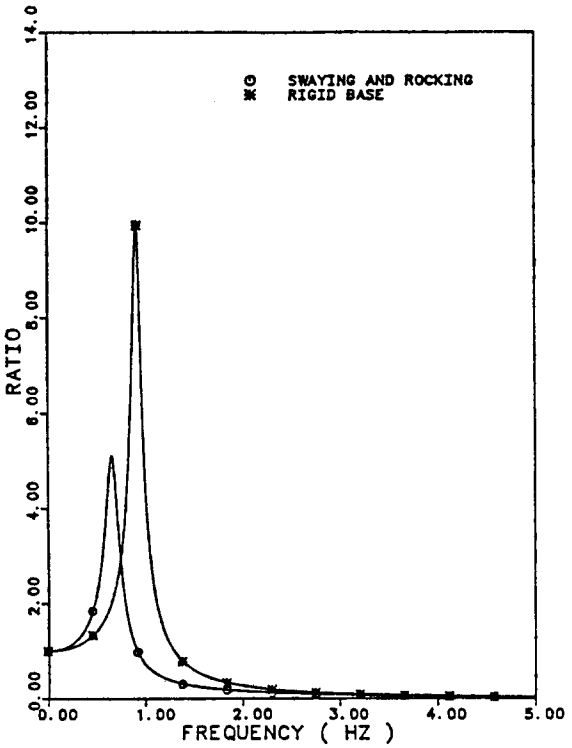

Fig. 6 건물 1의 T.F.

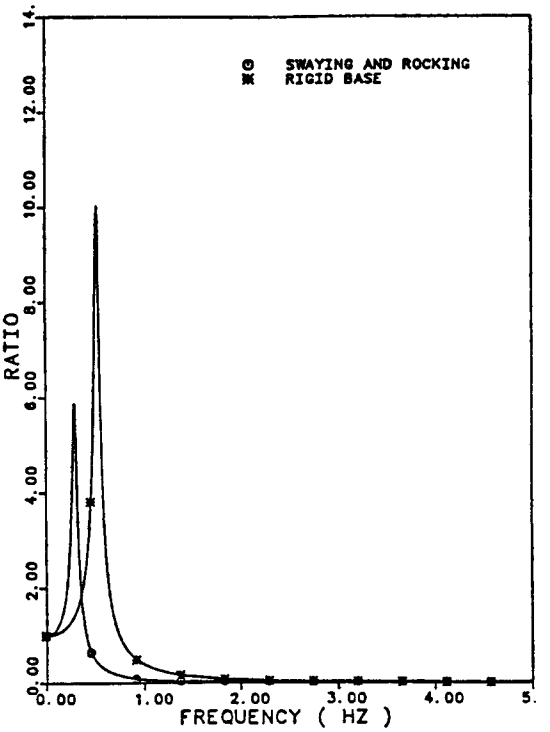

Fig. 7 건물 2의 T.F.

어든 것을 알 수 있다.

시험적 조사연구 결과를 종합해보면, 건물 1에서처럼 고정된 기초일 때 고유주파수가 0.91Hz정도인 건물은 기초지반의 유연성(Flexibility)영향으로 고유주파수가 0.86Hz로 작아졌기 때문에 고유주파수가 0.5Hz인 지진이 건물 동적거동에 부정적 영향을 미쳤지만, 건물 2처럼 고정기초일 때 고유주파수가 0.5Hz인 경우는 고유주파수가 0.3Hz로 작아짐으로서 지진에 의한 건물거동에 영향이 감소하여 건물의 동적거동이 상당히 작아졌다는 것을 알 수 있으며 Mexico지진때 10-15층 정도의 중층건물들이 왜 많은 피해를 입었는지를 잘 설명해 주고 있다.

5. 결　　론

구조물－지반 상호작용(SSI)이 건물의 동적거동에 미치는 영향을 이론적 연구와 시험적 조사연구를 통하여 살펴보았는데 건물의 동적거동에 미치는 관성 상호작용 영향은 크게 고유주파수 감소와 유효감쇄비 증가이었다. 이 두가지 변화가 구조물에 미치는 영향은 구조물의 특성과 입력지진파의 주파수 내용에 따라 구조물에 도움이 될 수도 있고 심각할 정도로 해로울수도 있기 때문에 구조물의 내진설계에서 구조물－지반 상호작용 영향을 일률적으로 평가하는 것은 어렵고 지반의 영향을 고려한 건물의 동적해석을 통해서 구조물－지반 상호작용 영향을 평가하는 것이 필수적이다.

참 고 문 헌

1. 김용석, "반지하구조물 내진설계를 위한 지반거동" 전산구조공학회지 제1권 제2호(12월호), 1988.
2. D.C. Angelides and J. M. Roésset, "Nonlinear Dynamic Stiffness of Piles," M.I.T. Research Report R80-13, 1980.

3. E. Kausel, "Forced Vibrations of Circular Foundations on Layered Media," Ph.D. Dissertation, M.I.T., 1974.
4. Yong-Seok Kim, "Dynamic Response of Structures on Pile Foundations," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 1987.
5. Yong-Seok Kim, "Effect of Embedment on Seismic Motions of Buildings," M.S. Thesis, The University of Texas at Austin, 1984.

(접수일자 : 1992. 10. 27)