

응답변위법에서 지반강성 보정계수의 보수성 평가

2019. 8. 29

김재민 (전남대학교 토목공학과 교수)

임재성 (전남대학교 대학원 건설·환경공학과 박사과정)

Contents

1. 서론
2. 지반강성 보정계수의 보수성 평가
3. 설계감쇠비의 20% 사용의 합리성 평가
4. 전력구의 부재력 비교
5. 결론 및 요약

1

서론

1.1 연구의 배경

1.2 연구목표 및 내용



1.1 연구배경

▪ 정부의 내진설계기준 개정 요구

- 9.12 경주지진 이후 행정안전부의 내진설계기준 공통적용사항(2017) 고시
- 산업통상자원부의 전력설비 최소 내진성능 요구수준(2018) 제안

▪ 송배전설비의 내진설계 실무지침 개정

- 최신 국내·외 내진기술을 반영한 송배전설비의 내진설계방법 및 절차 개정
- 국내 송배전설비의 동특성을 고려한 내진설계변수 규정
- 현장 실무자의 편의를 위한 해설 반영 및 개정

▪ 내진설계 실무예제 개정

- 개정기준을 반영한 내진설계 예제 재해석
- 송배전설비 내진설계 실무예제 개정



1.2 연구목표 및 내용

연구목표

- **지반강성 보정계수의 보수성 평가**
- **설계감쇠비 20% 사용의 합리성 평가**
- **지진응답해석법에 따른 전력구의 부재력 비교**

연구내용

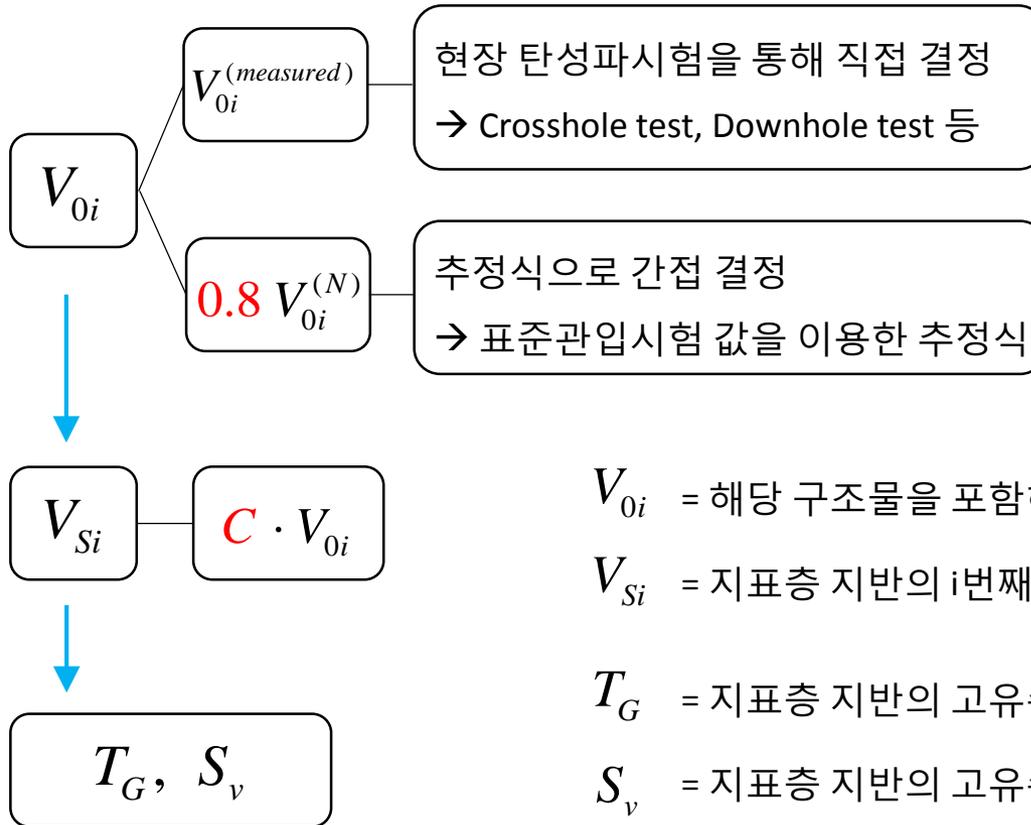
- **지반강성 보정계수의 보수성 평가**
 - 현행 내진설계기준과 일본 내진설계기준을 참조하여 지반강성 보정계수 추정
 - 일차원 파동전달해석(SHAKE)과 간략해석법을 이용하여 보수성 평가
- **설계감쇠비 20% 사용의 합리성 평가**
 - 다양한 재료감쇠비(5~20%)에 대한 자유장응답 및 SSI응답의 감쇠비 추정
- **지진응답해석법에 따른 전력구의 부재력 비교**
 - 응답변위법(단일코사인, 이중코사인)과 정밀 SSI 해석에 의한 부재력 비교

2

지반강성 보정계수의 보수성 평가



▪ 지반의 전단파속도 특성



V_{0i} = 해당 구조물을 포함하는 i번째 지층의 설계 초기전단파속도

V_{Si} = 지표층 지반의 i번째 토층의 설계전단파속도

T_G = 지표층 지반의 고유주기

S_v = 지표층 지반의 고유주기에 해당되는 내진설계기준면 설계속도응답스펙트럼 값



지반강성 보정계수 (C)

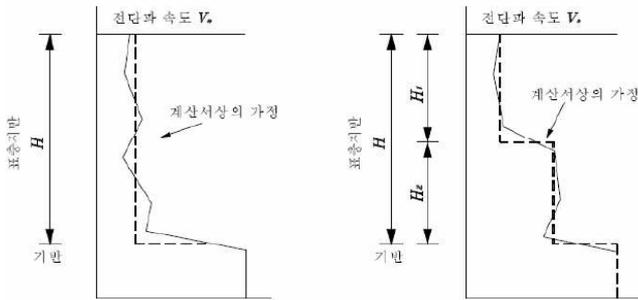
$$V_{Si} = C \cdot V_{0i}$$

V_{0i} ; G/G_{max} and Damping Curves

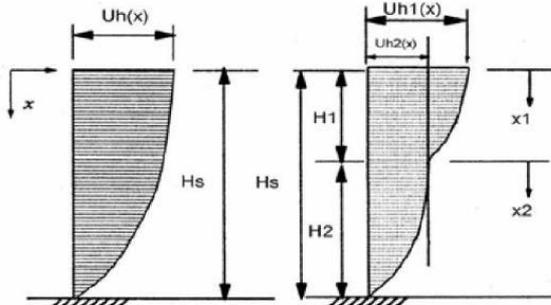
Single cosine method,
Double cosine method

VS

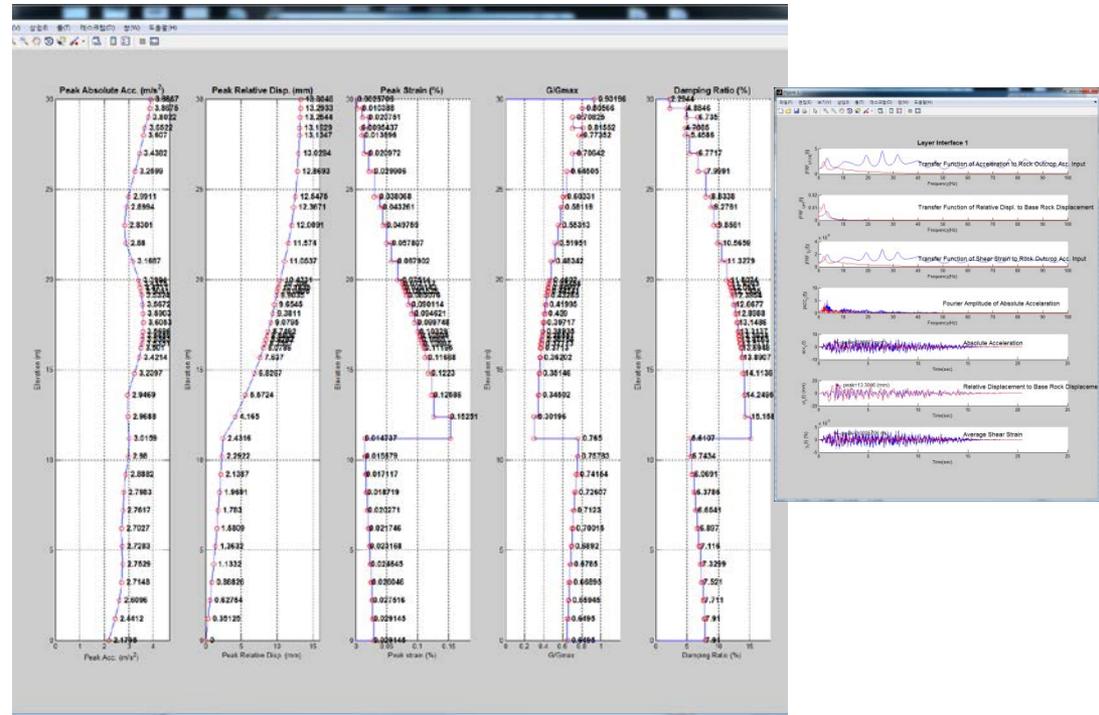
SHAKE 해석



(a) 전단파속도에 따른 지층의 분할 및 평균전단파 속도와 산정



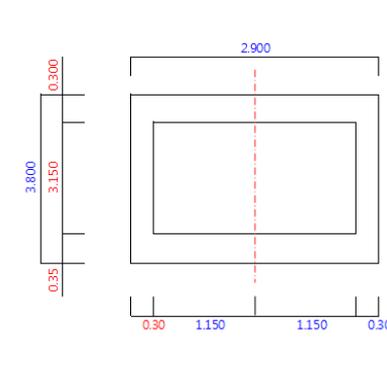
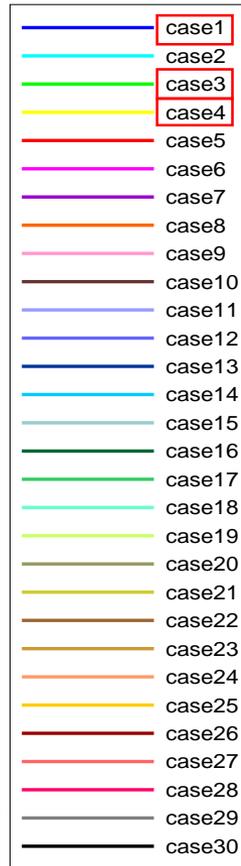
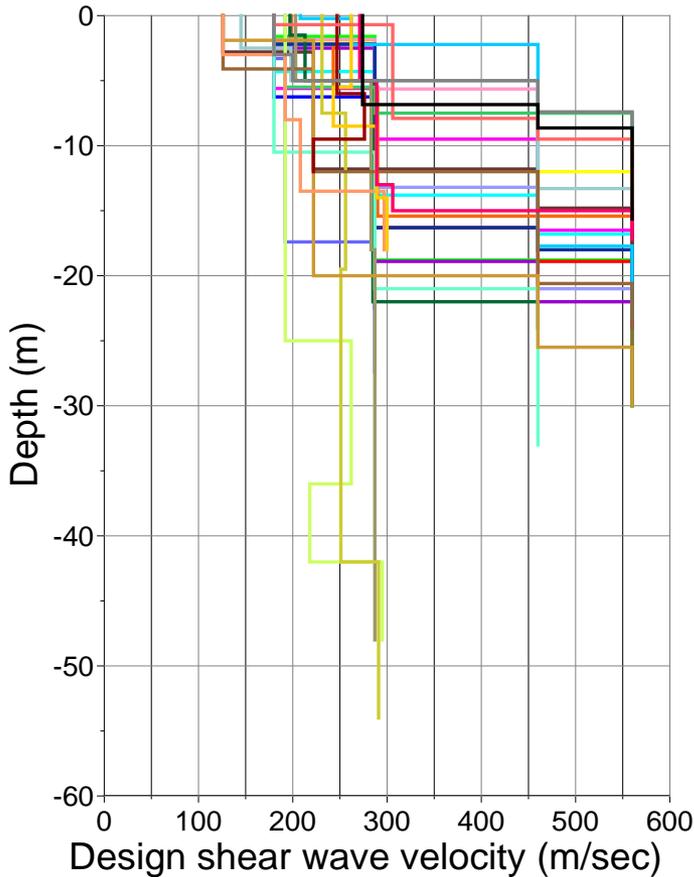
(b) 단일코사인, 이중코사인 변형형상(모드)



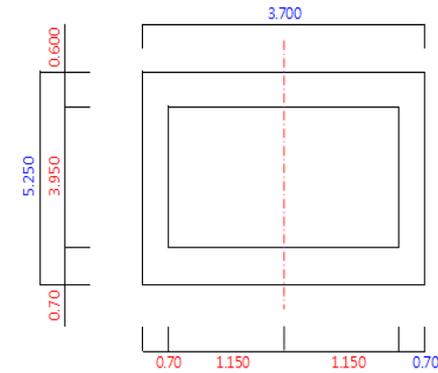


전력구 예제 선정

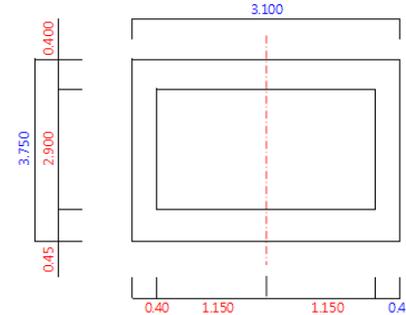
→ 총 30개 예제 선정



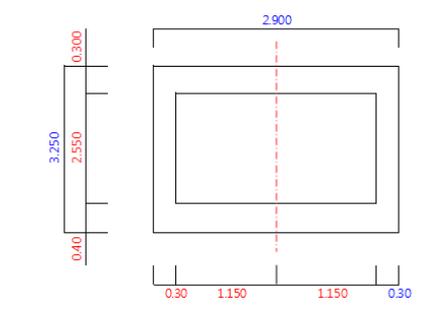
(a) case1



(b) case2



(c) case3



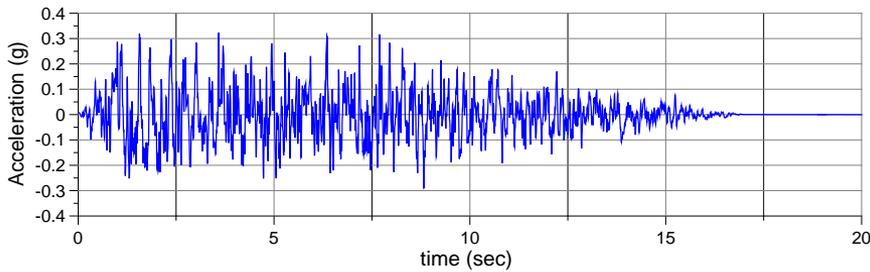
(d) case4



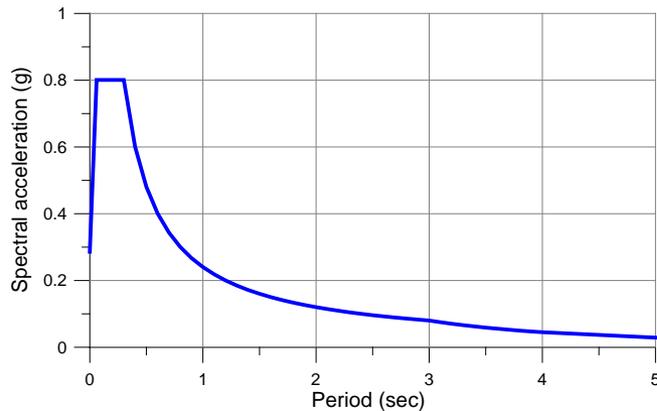
지진입력

→ 기반암 노두에 S1 지반에 대한 설계가속도스펙트럼에 부합하는 가속도 시간이력 입력

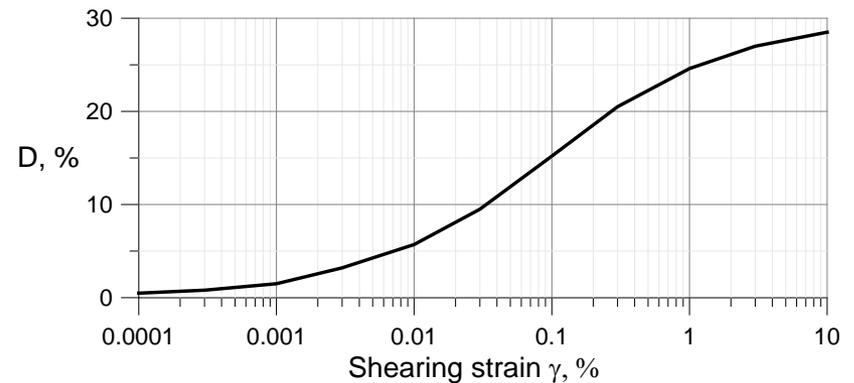
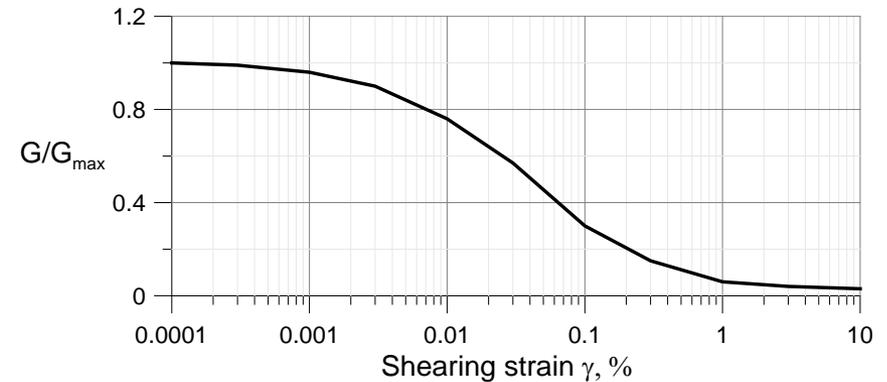
기반암 노두 입력지진파 (PGA=0.286g)



내진특등급 : $S=Z \times I=0.286$ (S1 지반)
($Z=0.11$, $I=2.6$, 재현주기=4800년)

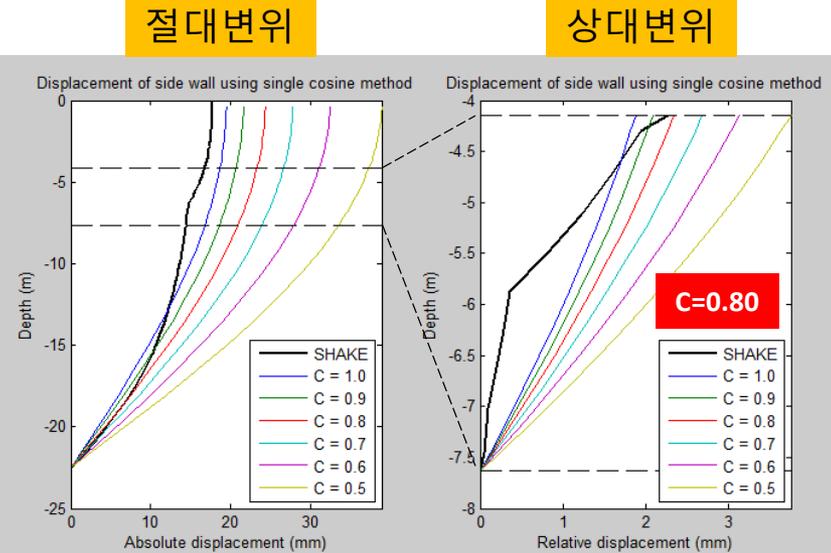
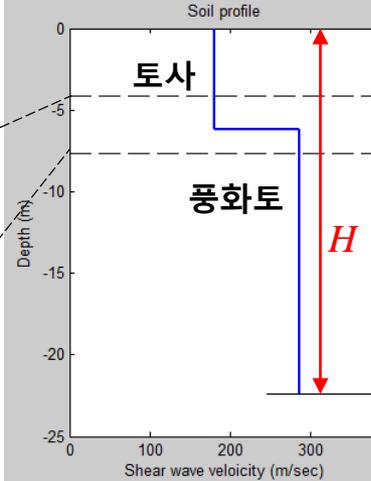
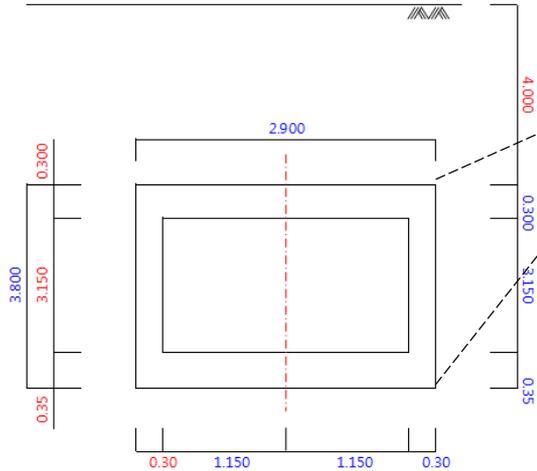


지반의 비선형 특성 (Sand : Seed et al., 1986)



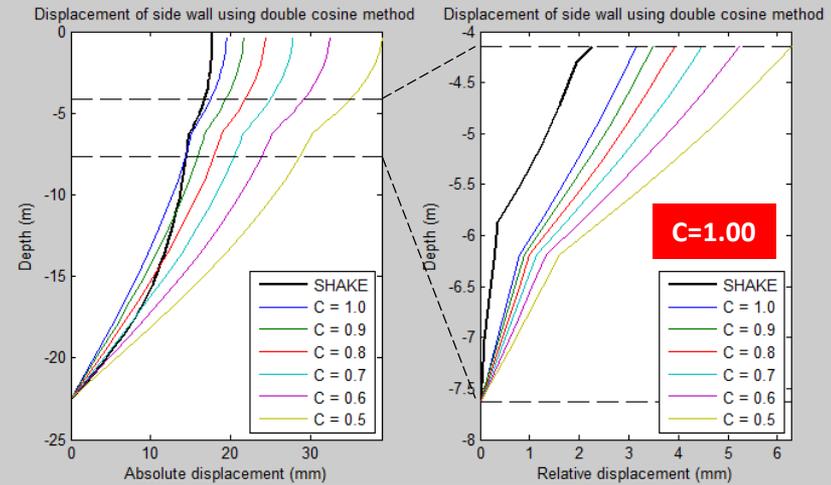


Case 1 : 345KV 북부산-구포삼거리 전력구



Single cosine, $\xi=20\%$

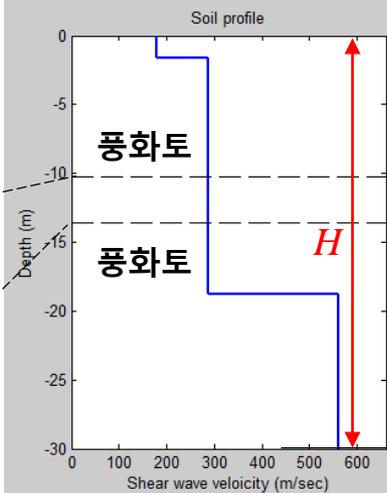
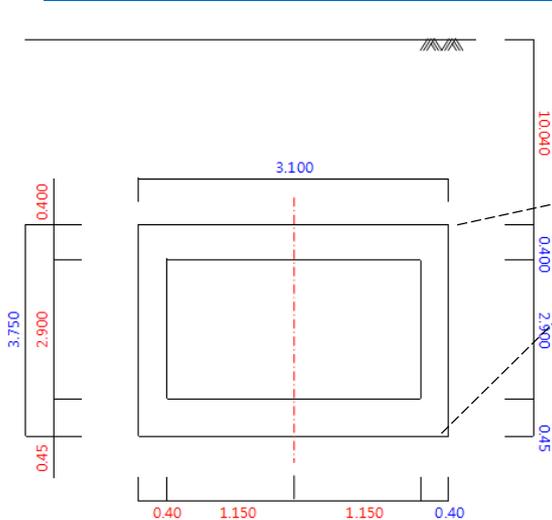
구분	심도(m)	지반종류	단위중량 (kN/m ²)	전단파속도 V _{oi} (m/s)	설계 전단파속도 V _{Si} (m/s)	동적프아송비	비고
1	0~6.2	토사	18	180.5	90.2	0.45	
2	6.2~22.5	풍화토	19	286.7	143.3	0.45	
3	22.5~	연암	24	760.0	760.0	0.35	



Double cosine, $\xi=20\%$

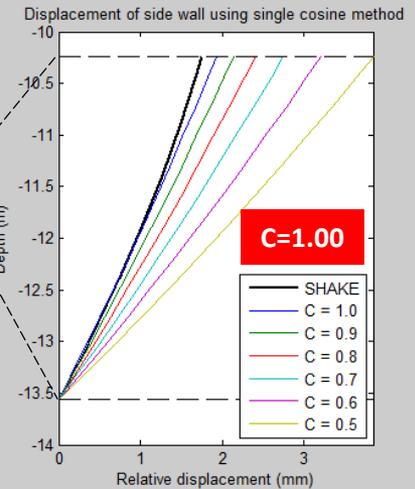
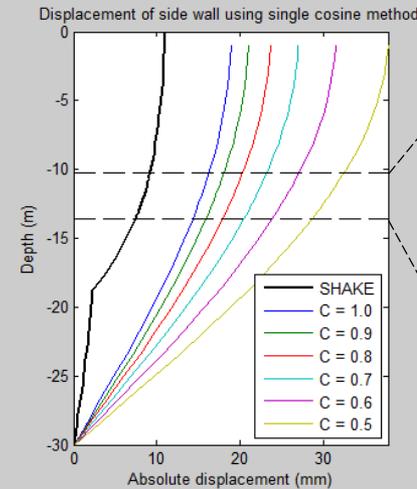
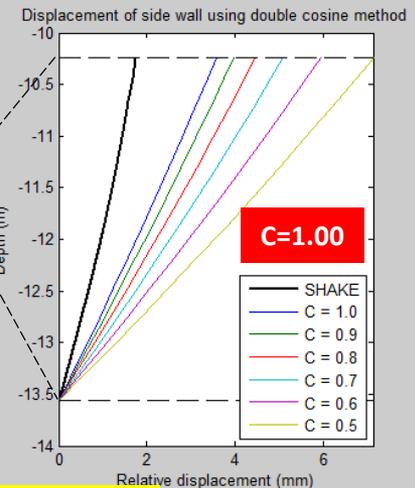
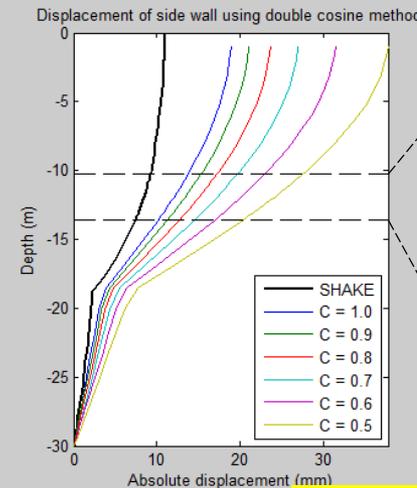


Case 3 : 345KV 부산 지하철 1호선 전력구



절대변위

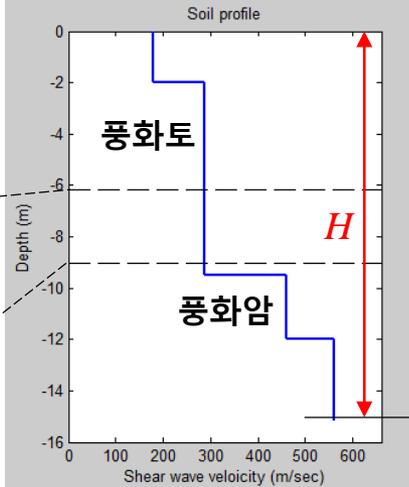
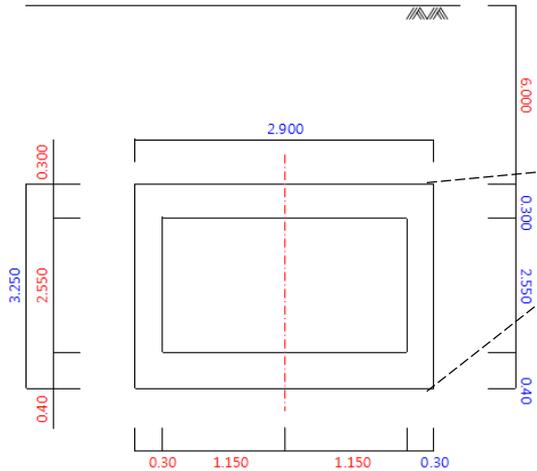
상대변위

Single cosine, $\xi=20\%$ Double cosine, $\xi=20\%$

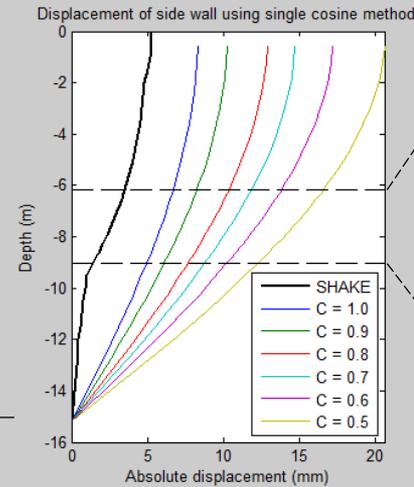
구분	심도(m)	지반종류	단위중량 (kN/m ²)	전단파속도 V _{oi} (m/s)	설계 전단파속도 V _{si} (m/s)	동적프아승비	비고
1	0~1.6	토사	18	180.5	90.2	0.45	
2	1.6~18.8	풍화토	19	286.7	143.3	0.45	
3	18.8~30.0	연암	21	560.0	280.0	0.45	
4	30.0~	보통암	24	760.0	760.0	0.35	



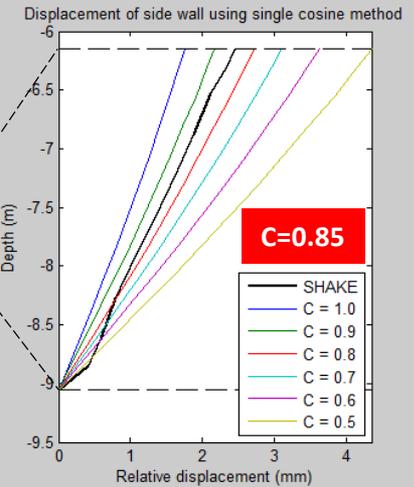
Case 4 : 345KV 좌동-해운대 전력구



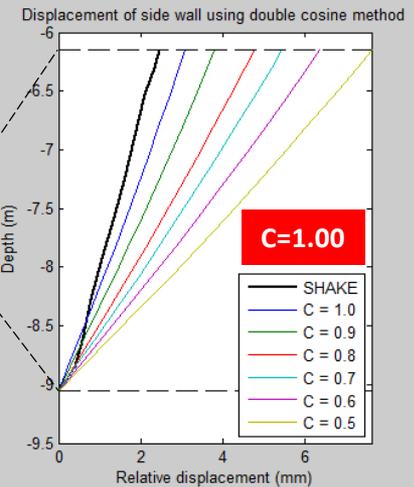
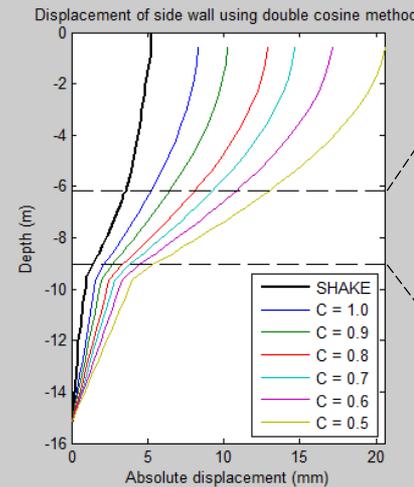
절대변위



상대변위

Single cosine, $\xi=20\%$

구분	심도(m)	지반종류	단위중량(kN/m ²)	전단파속도 V _{0i} (m/s)	설계 전단파속도 V _{Si} (m/s)	동적프아승비	비고
1	0~2.0	토사	18	180.5	90.2	0.45	
2	2.0~9.5	풍화토	19	286.7	143.3	0.45	
3	9.5~12.0	풍화암	19	460.0	230.0	0.45	
4	12.0~15.2	연암	21	560.0	280.0	0.45	
5	15.2~	경암	24	760.0	760.0	0.35	

Double cosine, $\xi=20\%$



- 30개 예제의 C값 추정

→ 20% 감쇠비에 대해 검토

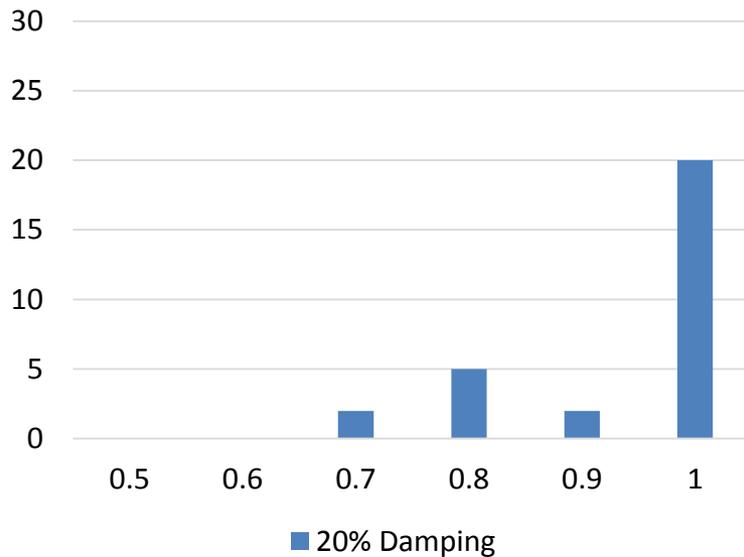
Case	$\left(\frac{\rho_1 V_{s1}}{\rho_2 V_{s2}}\right)_{str}$	단일코사인 방법	이중코사인 방법
1	0.59	0.8	1.0
2	0.42	1.0	1.0
3	1	1.0	1.0
4	1	0.8	1.0
5	1	1.0	1.0
6	0.42	1.0	1.0
7	1	1.0	1.0
8	1	1.0	1.0
9	1	1.0	1.0
10	1	1.0	1.0
11	1	0.82	1.0
12	0.71	0.9	1.0
13	1	1.0	1.0
14	1	1.0	1.0
15	1	1.0	1.0

Case	$\left(\frac{\rho_1 V_{s1}}{\rho_2 V_{s2}}\right)_{str}$	단일코사인 방법	이중코사인 방법
16	1	1.0	1.0
17	0.43	0.78	1.0
18	1	1.0	1.0
19	1	0.9	1.0
20	1	1.0	1.0
21	1	1.0	1.0
22	0.53	0.5	0.65
23	1	1.0	1.0
24	1	0.78	1.0
25	0.86	1.0	1.0
26	1.11	0.84	0.86
27	0.50	1.0	1.0
28	0.64	1.0	1.0
29	0.34	1.0	1.0
30	1	0.83	1.0

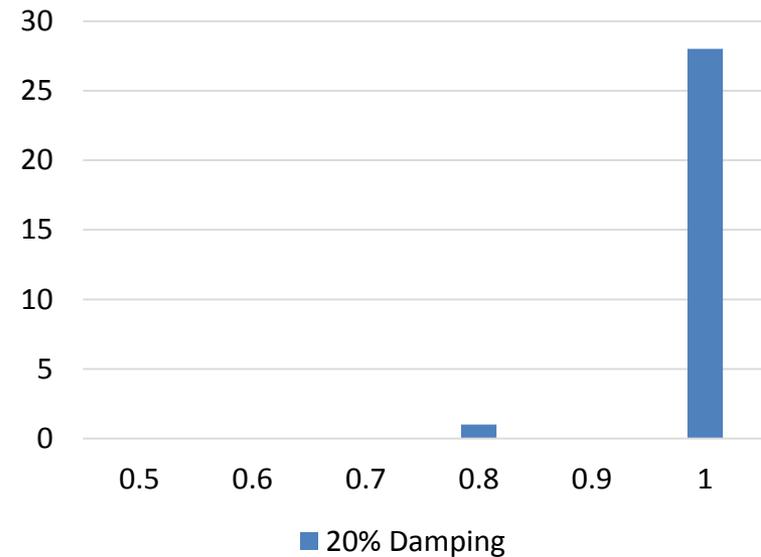


30개 예제에 대한 C값 분석

- 단일코사인 방법의 C값은 최소 0.65이고 대부분 1.0으로 나타남
- 이중코사인 방법의 C값은 최소 0.83이고 대부분 1.0으로 나타남
- 따라서 현행 C값인 0.5는 보수적인 결과임
- 단일코사인 방법과 이중코사인 방법의 C값은 서로 큰 차이를 보임



단일코사인 방법의 C값



이중코사인 방법의 C값

3

설계감쇠비 20% 사용의 합리성 평가

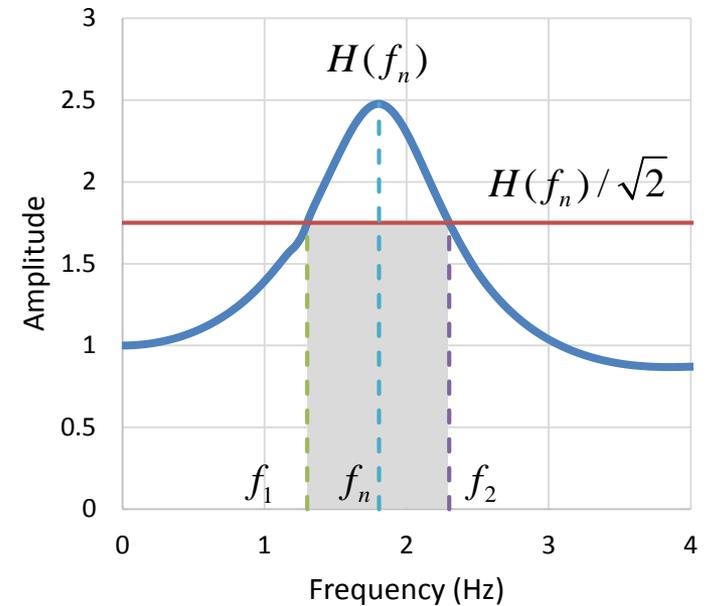
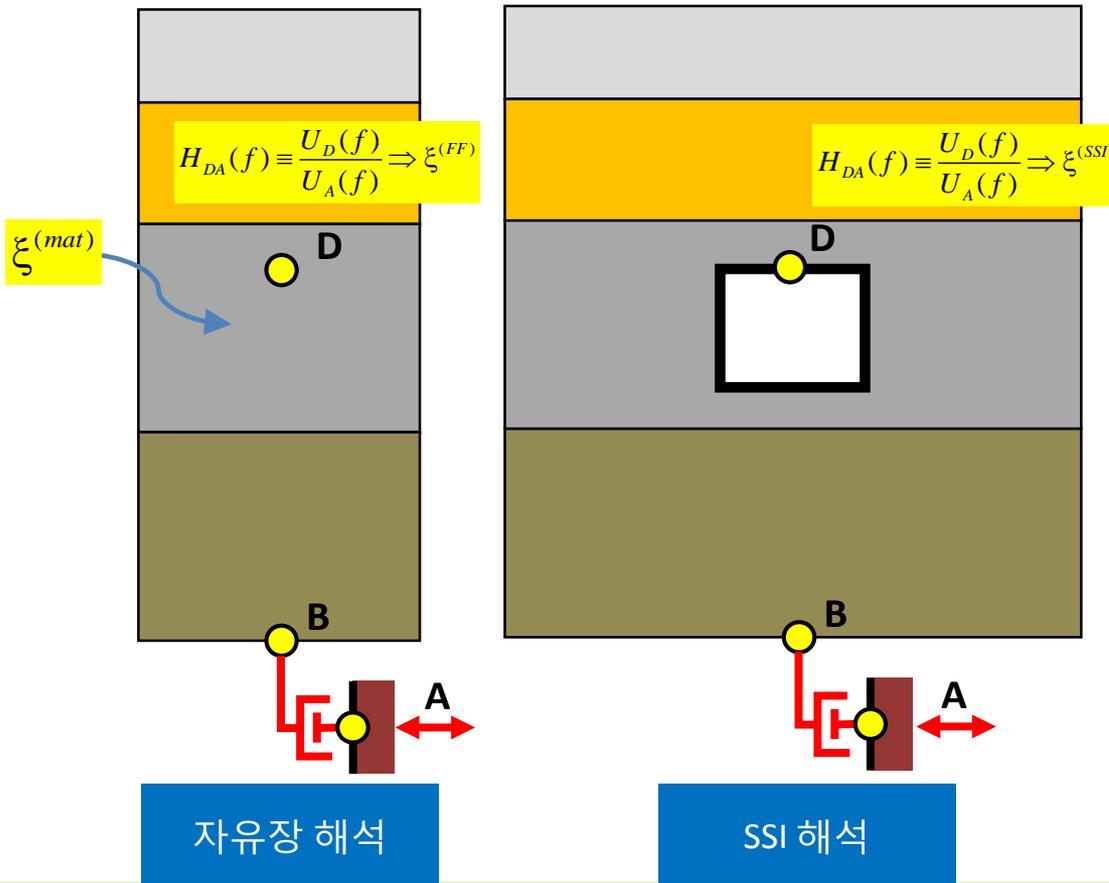


- 재료감쇠비 $\xi^{(mat)}$
- 자유장(FF) 시스템 감쇠비 : A → D
- 지반-구조물 (SSI) 시스템 감쇠비 : A → D

$$\xi^{(mat)} < \xi^{(FF)} < \xi^{(SSI)}$$

$$\tilde{\xi}^{(FF)} \equiv \xi^{(FF)} - \xi^{(mat)} \quad : \text{radiation damping for FF system}$$

$$\tilde{\xi}^{(SSI)} \equiv \xi^{(SSI)} - \xi^{(mat)} \quad : \text{radiation damping for SSI system}$$



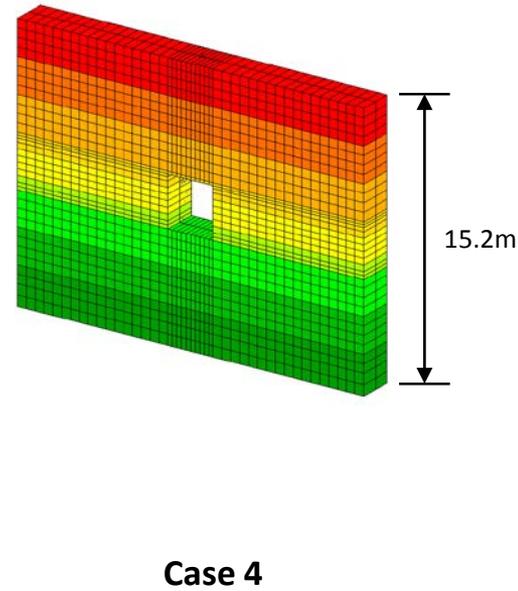
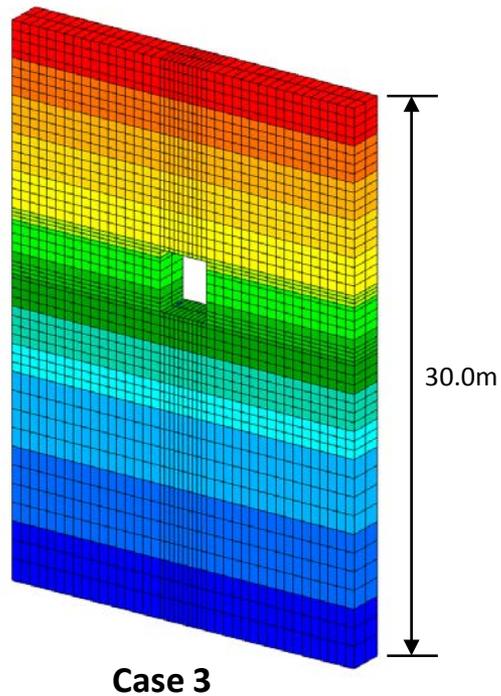
$$\xi \approx \frac{f_2 - f_1}{2f_n}$$



- 설계감쇠비(ξ_d) 20% 사용의 합리성 평가

→ 자유장해석과 정밀 SSI 해석을 수행하여 설계감쇠비가 보수적인지 검토

정밀 SSI 해석



KIESSI-3D Models



- 설계감쇠비 평가

→ 다양한 재료감쇠비(5%, 10%, 15%, 20%)에 대한 FF 및 SSI 시스템의 감쇠비 추정

→ 자유장응답의 감쇠비와 SSI 응답의 감쇠비의 차이는 0.5% 이내로 매우 작음

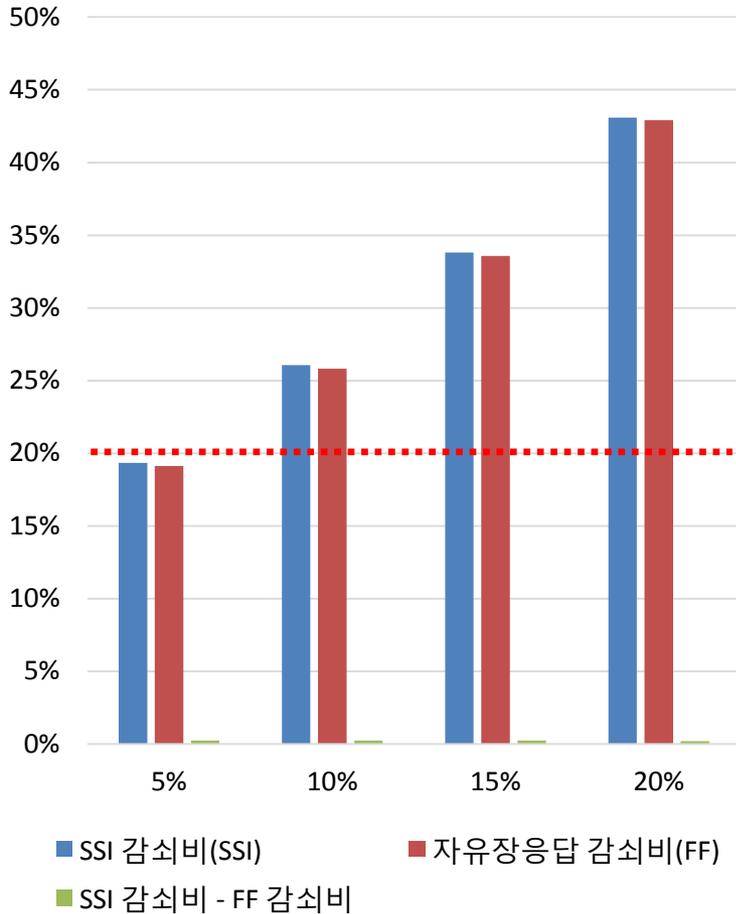
→ **붕괴방지수준**(등가 재료감쇠비 10% 내외로 추정) : **FF 및 SSI 시스템의 감쇠비는 20% 이상**

→ **기능수행수준**(등가 재료감쇠비 5% 내외로 추정) : **FF 및 SSI 시스템의 감쇠비는 10% 이상**

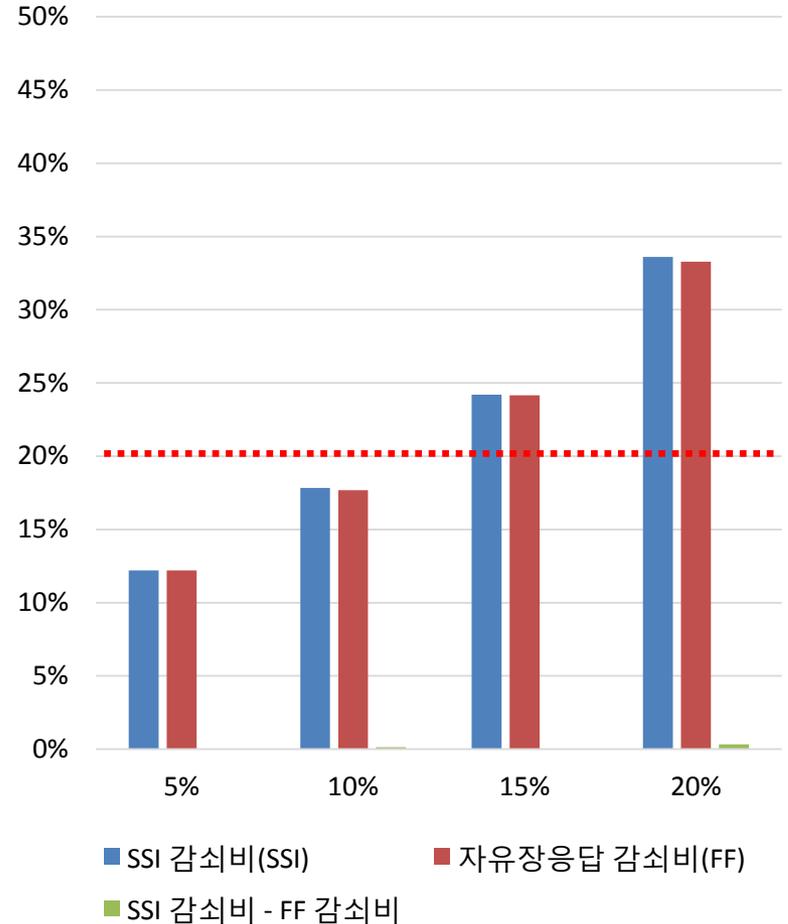
재료 감쇠비(%) $\xi^{(mat)}$	Case 3		Case 4	
	자유장응답 감쇠비(%) $\xi^{(FF)}$	SSI 응답 감쇠비(%) $\xi^{(SSI)}$	자유장응답 감쇠비(%) $\xi^{(FF)}$	SSI 응답 감쇠비(%) $\xi^{(SSI)}$
5	19.11	19.34	12.20	12.20
10	25.83	26.07	17.69	17.83
15	33.58	33.82	24.17	24.20
20	42.91	43.10	33.28	33.60



Case 3



Case 4



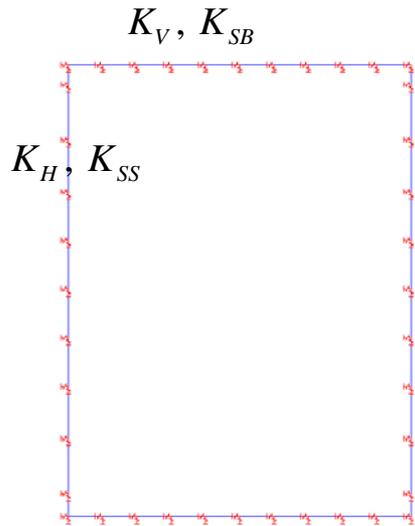
4

전력구의 부재력 비교



전력구의 해석모델

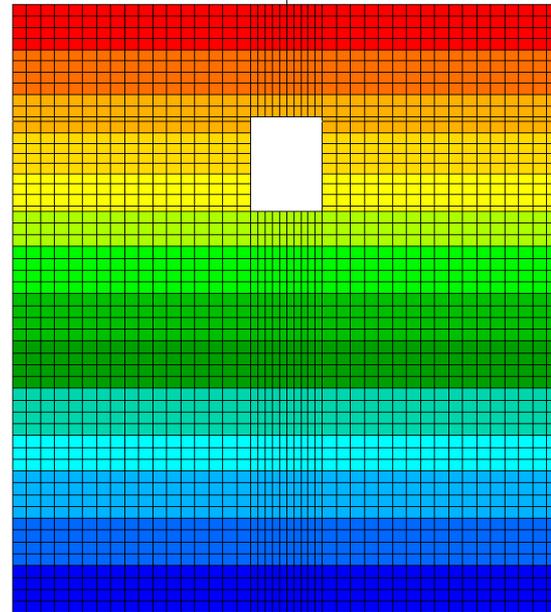
→ 지진응답해석 방법에 따른 부재력 비교



$$\{f_{eqk}(t)\} = \{f_{\Delta, \max}(t)\} + \{f_{\sigma, \max}(t)\} + \{f_{L, \max}(t)\}$$

$$V_{Si} = C \cdot V_{0i}$$

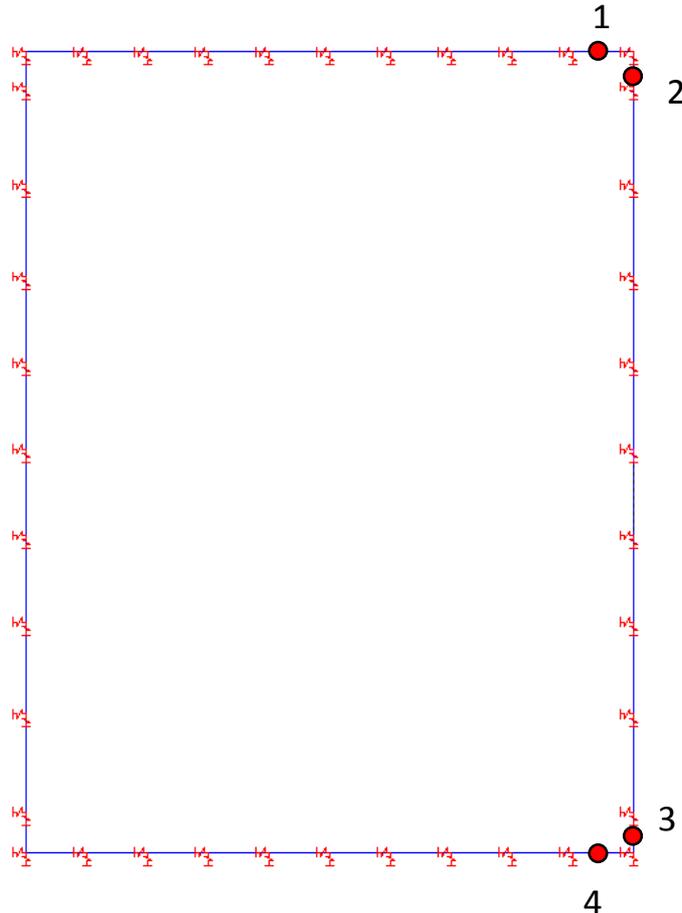
(a) 응답변위법 (SAP2000)



(b) SSI 해석법 (KIESSI-3D)



부재력 검토 단면



응답변위법

$$\{f_{eqk}(t)\} = \{f_{\Delta, \max}(t)\} + \{f_{\sigma, \max}(t)\} + \{f_{I, \max}(t)\}$$

f_{Δ} = 지반변위 하중 f_{σ} = 주면전단력 하중

f_I = 구조물의 관성력 하중

- 지반반력계수 계산 방법
 - 유한요소법 지반반력계수

- 지진하중 정의 방법
 - 단일모드 응답스펙트럼 해석

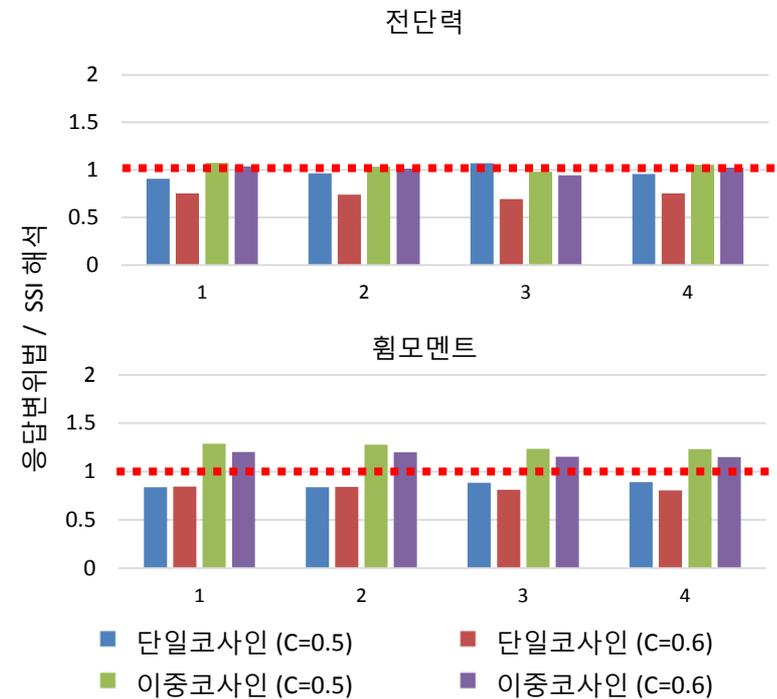


부재력 검토 (Case 3)

→ 간략식을 이용한 응답변위법의 부재력 대비 정밀 SSI 해석의 부재력 비교

- 단일코사인 방법을 이용한 응답변위법의 부재력: C값이 0.5일 때 0.84~1.07배, C값이 0.6일 때 0.69~0.84배
- 이중코사인 방법을 이용한 응답변위법의 부재력: C값이 0.5일 때 0.98~1.29배, C값이 0.6일 때 0.94~1.20배

단면 위치	응답변위법 / SSI 해석								SSI 해석	
	단일코사인				이중코사인					
	C = 0.5		C = 0.6		C = 0.5		C = 0.6			
	전단력	모멘트	전단력	모멘트	전단력	모멘트	전단력	모멘트		
1	0.91	0.84	0.75	0.84	1.07	1.29	1.04	1.20	102.08	110.77
2	0.96	0.84	0.74	0.84	1.04	1.28	1.01	1.20	82.61	116.29
3	1.07	0.88	0.69	0.81	0.98	1.23	0.94	1.15	105.99	134.19
4	0.96	0.89	0.75	0.81	1.05	1.23	1.03	1.15	114.12	130.71



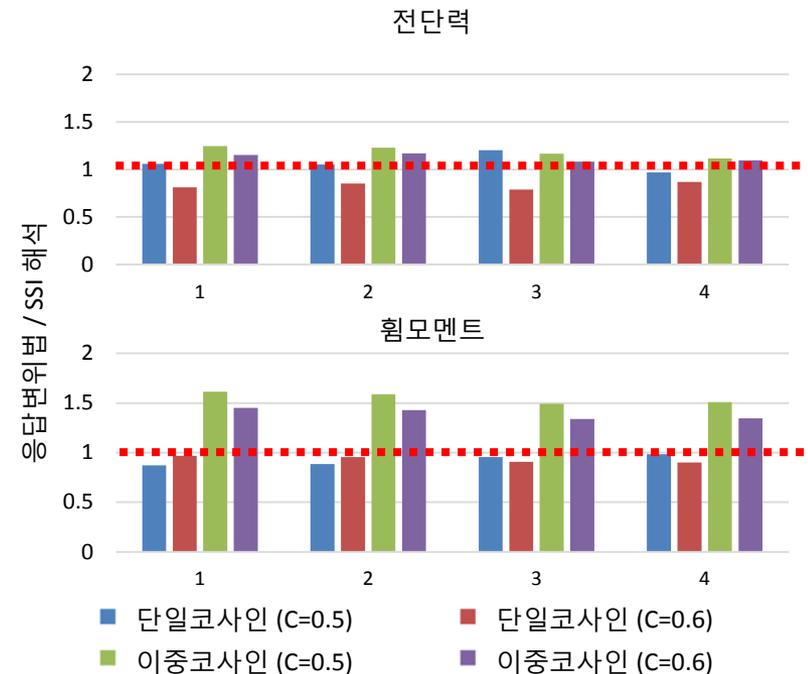


부재력 검토 (Case 4)

→ 간략식을 이용한 응답변위법의 부재력 대비 정밀 SSI 해석의 부재력 비교

- 단일코사인 방법을 이용한 응답변위법의 부재력: C값이 0.5일 때 0.87~1.20배, C값이 0.6일 때 0.79~0.97배
- 이중코사인 방법을 이용한 응답변위법의 부재력: C값이 0.5일 때 1.11~1.61배, C값이 0.6일 때 1.08~1.45배

단면 위치	응답변위법 / SSI 해석								SSI 해석	
	단일코사인				이중코사인					
	C = 0.5		C = 0.6		C = 0.5		C = 0.6			
	전단력	모멘트	전단력	모멘트	전단력	모멘트	전단력	모멘트		
								전단력 (kN)	모멘트 (kN·m)	
1	1.06	0.87	0.81	0.97	1.24	1.61	1.15	1.45	78.82	69.13
2	1.05	0.89	0.85	0.95	1.23	1.59	1.17	1.43	69.11	74.19
3	1.20	0.95	0.79	0.91	1.16	1.49	1.08	1.34	106.36	100.54
4	0.97	0.98	0.87	0.90	1.11	1.51	1.10	1.35	107.33	97.22

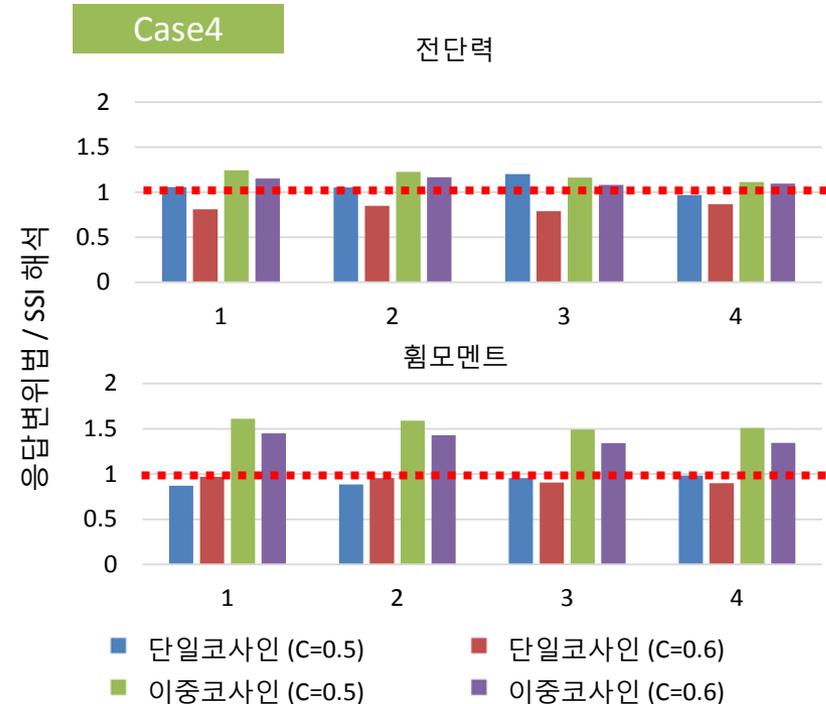
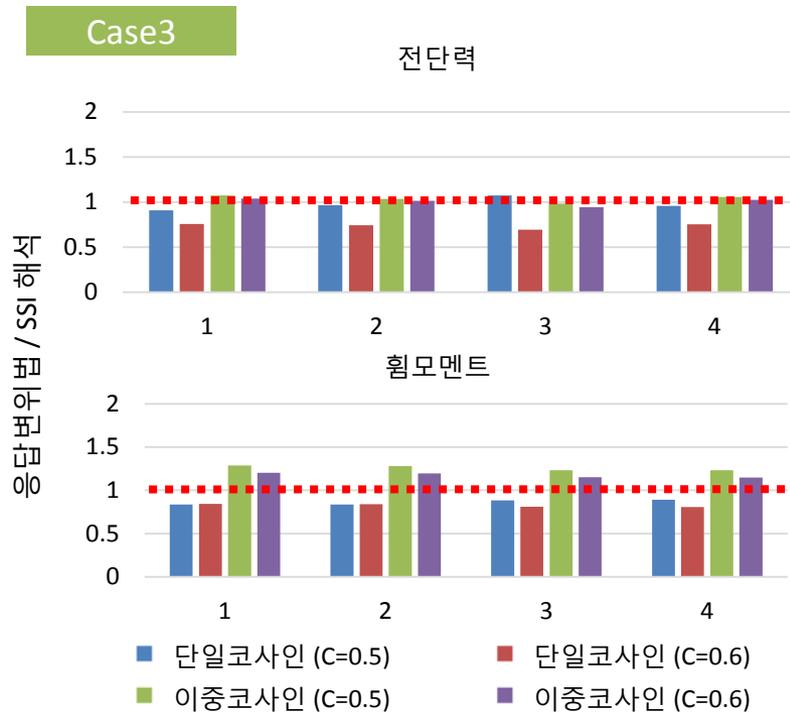




부재력 검토

→ 응답변위법의 부재력 대비 정밀 SSI 해석의 부재력 비교

- 단일코사인 방법의 부재력은 보수적이지 않은 경우가 많음
- 이중코사인 방법의 부재력은 대부분 보수적임
- **지반강성 보정계수 0.5를 적용한 이중코사인방법을 적용한 응답변위법에 의한 설계지진력은 보수적임**



4

결론 및 요약



➤ 지반강성 보정계수의 보수성 평가

- 총 30개 예제에 대한 지반강성 보정계수의 보수성을 자유장해석을 통해 평가한 결과,
 - 단일코사인 방법의 C값은 최소 0.65이고 대부분 1.0
 - 이중코사인 방법의 C값은 최소 0.83이고 대부분 1.0
 - **현행 C값인 0.5와 20% 감쇠비를 사용하는 자유장응답 계산법은 보수적임**
- **단일코사인 방법과 이중코사인 방법의 C값은 서로 큰 차이를 보였음**

➤ 설계 감쇠비의 합리성 평가

- 각 예제 별로 지반의 재료감쇠비 (5%, 10%, 15%, 20%) 를 달리하여 지진응답해석을 수행한 결과,
 - 현행 응답변위법 적용시 **20% 감쇠비는 붕괴방지수준에 대해서는 적절한 것으로 판단됨**
 - 현행 응답변위법 적용시 **20% 감쇠비는 기능방지수준에 대해서는 보수적이지 않은 것으로 판단됨**



➤ 지진응답해석 방법에 따른 전력구의 부재력 비교

- 응답변위법과 정밀 SSI 해석을 통하여 부재력을 비교하였음
 - 단일코사인 방법을 이용한 응답변위법을 적용할 경우, 부재력이 과소평가 될 수 있음
 - 이중코사인 방법을 이용한 응답변위법을 적용할 경우, 보수적인 부재력을 얻을 수 있음
 - 붕괴방지수준에 대한 현행 전단파속도 감소계수(C)인 0.5를 0.6으로 변경하는 방안이 합리적인 것으로 보임
- 하지만, 추가적인 분석을 통해 타당성을 입증할 필요가 있음



- 응답변위법 적용시 **지반강성 보정계수 (C) 개정(안)**

$$V_{Si} = C \cdot V_{0i}$$

내진목표성능	현행 기준 도시철도 내진설계기준 (한국, 2017)	개정 기준(안)	일본 내진설계기준 철도 구조물등 설계 표준·동해설(내진설계) (일본, 1999)
기능수행수준	0.8 (재현주기 100년)	0.9 (재현주기 200년)	L1 지진동 : 0.7 (EPGA=0.102g) L2-I 지진동 : 0.5 (EPGA=0.44g) L2-II 지진동 : 0.5 (EPGA=0.69g)
붕괴방지수준	0.5 (재현주기 1000년)	0.6 (재현주기 4800년)	

- 응답변위법 적용시 **자유장응답의 감쇠비 개정(안)**

내진목표성능	현행 기준 도시철도 내진설계기준 (한국, 2017)	개정 기준(안)	
기능수행수준	0.2 (재현주기 100년)	0.1 (재현주기 200년)	
붕괴방지수준	0.2 (재현주기 1000년)	0.2 (재현주기 4800년)	