

반복하중을 받는 철근 콘크리트 막요소의 전단거동 예측

Prediction of Shear Behavior of Reinforced Concrete Panels Subjected to Reversed Cyclic Loading

이 정 윤*

Jung-Yoon Lee

ABSTRACT

This paper proposes an analytical method to predict the behavior of reinforced concrete beams subjected to reversed cyclic loading. The proposed method is based on the compatibility aided truss model and adopts the stress vs. strain curve of concrete which considers the softening effects. This model is verified by comparing to the six reinforced concrete panel tests.

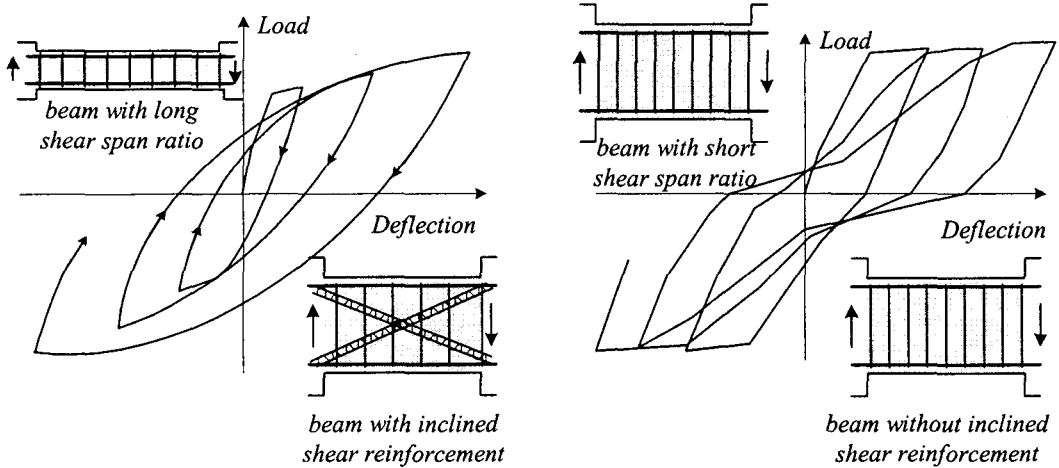
1. 서론

철근콘크리트 부재의 전단거동 예측에 관한 연구에 있어서 변형률 적합조건을 이용한 트러스 모델은 사인장 균열 각도 α 와 콘크리트의 주압축 응력의 각도 θ 가 동일하다고 가정한 후, 각도 θ 를 힘의 평형 조건뿐만 아니라, 변형률의 적합 조건을 이용하여 구하고 있다. 이와 같은 변형률의 적합조건을 이용한 대표적인 이론은, 토론토대학에서 개발된 수정 압축 응력장 이론(Modified Compression Field Theory, MCFT)¹⁾과 휴스턴대학에서 개발된 회전각 연화 트러스 이론(Rotating Angle Softened Truss Model, RA-STM)²⁾이 있다. 두 이론의 계산 절차는 힘의 평형조건만을 이용한 트러스 이론보다 복잡하지만, 전단 강도와 부재의 변형을 동시에 예측할 수 있는 장점이 있다.

지진하중을 받는 철근콘크리트 부재는 지배하중의 종류와 철근의 양 및 배근방향에 따라 상이한 하중이력곡선을 나타낸다. 그림 1은 전단스팬비 및 전단보강근의 배근방향이 다른 두 종류의 철근콘크리트 보의 하중-처짐곡선을 개념적으로 나타내고 있다. 그림 1(a)는 전단스팬비가 비교적 커서 부재가 휨모멘트에 의하여 지배받는 부재의 하중-처짐곡선을 나타낸다. 그림에서 지진하중에 의한 에너지 소산이 비교적 크다는 것을 알 수 있다. 그림 1(b)는 전단스팬비가 작아 전단하중에 의하여 지배받는 부재의 하중-처짐곡선을 나타낸다. 그림 1(b)의 하중-처짐곡선은 핀칭효과에 의하여 에너지 소산이 매우 작다. 철근의 배근방향에 따른 이력곡선의 차이를 살펴볼 때, 전단스팬비가 작은 부재에도 대각선 전단보강근이 배근될 경우, 에너지 소산이 휨에 의하여 지배받는 부재와 비슷하게 커짐을 알 수 있다(그림 1(a)). 전단 강도와 부재의 변형을 동시에 예측할 수 있는 MCFT와 RA-STM에서는 단조하중을 받는 콘크리트와 철근의 응력-변형률관계를 적용하였기 때문에 지진하중을 받는 철근콘크리트 막요소의 전단거동을 예측할 수 없었다. 그러나, 근년 Lee 등³⁾에 의하여 반복하중을 받는 철근과 콘크리트의

* 정회원, 성균관대학교 건축공학과 조교수

응력-변형률관계가 제안되었다. 제안된 철근의 응력-변형률관계에서는 콘크리트에 묻혀있는 철근의 평균응력-평균변형률의 개념이 적용되었고, 균열수직방향에서의 콘크리트변형률에 의한 강도연화효과가 고려되었다. 이 논문에서는 Lee 등³⁾에 의하여 제안된 재료의 구성법칙을 이용하여 지진하중을 받는 철근콘크리트 막요소의 비선형 거동을 예측하고자 한다.



(a) 전단스팬비가 긴 보, 대각선 전단보강근이 배근된보 (b) 전단스팬비가 짧은 보, 수직 전단보강근이 배근된보
그림 1. 전단스팬비 또는 전단보강근의 배근방향이 다른 RC보의 하중-처짐곡선

2. 재료 메카니즘

이 논문에서는 힘의 평형조건, 변형의 적합조건 및 재료의 구성법칙을 이용한 재료메카니즘만을 이용하여 면내응력을 받는 콘크리트 막요소의 거동을 예측하고자 한다. 따라서, 이 연구에서 사용되는 지배 방정식은 MCFT 및 RA-STM에서 사용된 지배 방정식과 동일하다. 그림 2는 면내 응력 σ_l , σ_t , τ_{ll} 을 받아 균열이 발생한 철근콘크리트 요소를 나타낸다. 철근은 l 방향과 t 방향에 배근 되어 있으며 콘크리트 요소의 주응력 방향은 1과 2방향이다. RA-STM에서는 외력에 의한 주압축 응력 각도가 균열 각도 α 와 일치한다고 가정한다. 그림 2에서 σ_2^c 와 σ_1^c 은 콘크리트의 주압축, 주인장 응력이며, 주응력각도는 균열 각도 α 와 일치한다. 따라서, 그림 2로부터 다음과 같은 평형 조건식을 구할 수 있다.

$$\sigma_l = \sigma_2^c \cos^2 \alpha + \sigma_1^c \sin^2 \alpha + \rho_l f_l \quad (1)$$

$$\sigma_t = \sigma_2^c \sin^2 \alpha + \sigma_1^c \cos^2 \alpha + \rho_t f_t \quad (2)$$

$$\tau_{ll} = (-\sigma_2^c + \sigma_1^c) \sin \alpha \cos \alpha \quad (3)$$

변형의 적합 조건은 다음과 같다.

$$\epsilon_l = \epsilon_2 \cos^2 \alpha + \epsilon_1 \sin^2 \alpha \quad (4)$$

$$\epsilon_t = \epsilon_2 \sin^2 \alpha + \epsilon_1 \cos^2 \alpha \quad (5)$$

$$\frac{\gamma_{ll}}{2} = (-\epsilon_2 + \epsilon_1) \sin \alpha \cos \alpha \quad (6)$$

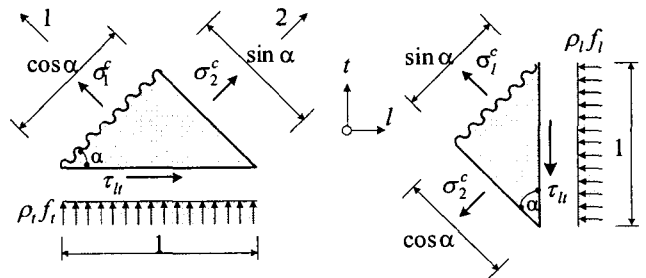


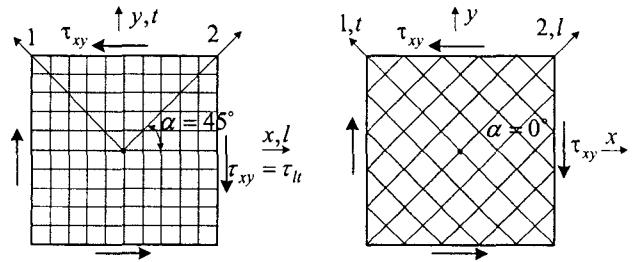
그림 2 철근콘크리트 막요소의 응력상태

여기서 σ_l, σ_t 는 l 과 t 방향의 축응력, τ_{ll} 는 l 과 t 방향의 전단 응력, σ_2^c, σ_1^c 는 2와 1방향의 콘크리트의 주응력, f_l, f_t 는 l 과 t 방향의 철근의 평균 인장 응력, ρ_l, ρ_t 는 l 과 t 방향의 철근비, ϵ_l, ϵ_t 는 l 과 t 방향의 변형률, γ_{ll} 는 l 과 t 방향의 전단 변형률, ϵ_2, ϵ_1 는 2와 1방향의 콘크리트 변형률이다.

식 (1)에서 식 (6)을 이용하여, τ_{ll}, γ_{ll} 관계를 구하기 위해서는 4개의 재료 구성 법칙이 요구된다. 즉, 콘크리트 압축 응력-변형률 $\sigma_2^c - \epsilon_2$ 관계, 콘크리트 인장 응력-변형률 $\sigma_1^c - \epsilon_1$ 관계, l 과 t 방향의 철근의 응력-변형률 $f_l - \epsilon_l$ 관계, $f_t - \epsilon_t$ 관계이다. Collins 등의 MCFT와 Hsu등의 RA-STM에서는 단조하중을 받는 콘크리트와 철근의 응력-변형률관계를 적용하였기 때문에 지진하중을 받는 철근콘크리트 막요소의 거동을 예측할 수 없었다. 근년 Lee 등³⁾은 철근콘크리트 패널실험에 근거하여 반복하중을 받는 철근과 콘크리트의 응력-변형률관계를 제안하였다. 제안된 철근의 응력-변형률관계에서는 Steven 등⁴⁾의 제안식에서 무시된 콘크리트에 묻혀있는 철근의 평균응력-평균변형률의 개념이 적용되었고, 균열수직방향에서의 콘크리트변형률에 의한 강도연화효과가 고려되었다.

3. 계산과정

이 논문에서는 철근 배근 방향이 다르며 반복하중을 받는 두 종류의 철근콘크리트 막요소의 거동을 예측할 것이다. 그림 3에서 철근은 l 방향과 t 방향에 배근되어 있으며, 외력에 의한 철근콘크리트 판요소의 주응력 방향은 1과 2방향이다. 따라서 그림 3(a)에서 철근은 주응력방향과 45° 경사지게 배근되어 있고, 그림 3(b)에서 철근은 주응력 방향에 평행하게 배근되어 있다.



(a) 주응력방향에 45도 경사지게 배근된 철근배근

(b) 주응력방향에 평행한 철근배근

그림 3 철근 배근 방향이 다른 막요소의 응력상태

3.1 주응력방향과 45° 경사지게 배근된 철근콘크리트 막요소

그림 3(a)에서 시험체의 주응력방향(2-, 1-방향)은 철근배근방향(l -, t -방향)과 45° 경사지게 된다. 따라서, 식 (1)-(6)에서의 주압축응력각도 α 는 45° 가 되어 평형조건 및 적합조건식은 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$\sigma_t = \sigma_2^c/2 + \sigma_1^c/2 + \rho_l f_l \quad (7)$$

$$\sigma_l = \sigma_2^c/2 + \sigma_1^c/2 + \rho_t f_t \quad (8)$$

$$\tau_{ll} = (-\sigma_2^c + \sigma_1^c)/2 \quad (9)$$

$$\epsilon_t = \epsilon_2/2 + \epsilon_1/2 \quad (10)$$

$$\epsilon_l = \epsilon_2/2 + \epsilon_1/2 \quad (11)$$

$$\gamma_{ll} = (-\epsilon_2 + \epsilon_1) \quad (12)$$

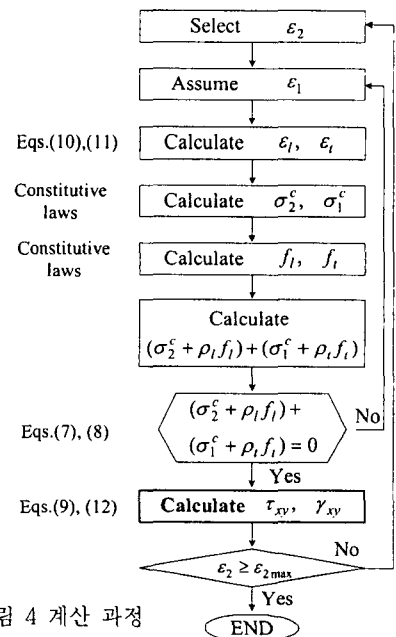


그림 4 계산 과정

그림 4는 해석법의 계산 과정을 나타낸다. 계산에서는 먼저 주압축 변형률 ϵ_2 의 값이 주어지고 지배 방정식 (7)에서 식 (14)를 이용하여 부재 최대전단응력 τ_{ll} , 및 전단변형률 γ_{ll} 를 구한다. 전단면이 순수 전단을 받을 경우 식(7)과 (8)의 σ_l 과 σ_t 는 0 이다. 그림 4에서 ϵ_{2max} 는 패널하중이력에 의하여 도달할 수 있는 최대 ϵ_2 값을 나타낸다.

3.2 주응력방향과 평행하게 배근된 철근콘크리트 막요소

그림 3(b)에서 패널시험체에 대한 하중가력방향과 철근배근방향이 일치하므로 시험체의 주응력방향 (2-, 1-방향)은 철근배근방향(l -, t -방향)과 일치하게 된다. 따라서, 식 (1)-(6)에서의 주압축응력각도 α 는 0°가 되어 평형조건 및 적합조건식은 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$\sigma_l = \sigma_2^c + \rho_l f_l \quad (13)$$

$$\sigma_t = \sigma_1^c + \rho_t f_t \quad (14)$$

$$\epsilon_l = \epsilon_2 \quad (15)$$

$$\epsilon_t = \epsilon_1 \quad (16)$$

여기서 철근배근방향(l -, t -방향)은 주응력방향이 되므로 l -, t -방향에서의 전단응력 τ_{ll} , 및 전단변형률 γ_{ll} ,는 없어진다. 따라서, 최대 전단응력 및 전단변형률은 주응력방향에서 45°기울어진 x -, y -방향에 존재하며 식 (17), 식 (18)에서 구할 수 있다.

$$\tau_{xy} = \frac{-\sigma_l + \sigma_t}{2} \quad (17)$$

$$\gamma_{xy} = -\epsilon_l + \epsilon_t \quad (18)$$

주응력방향과 평행하게 배근된 시험체의 경우 그림 4의 계산과정에 식(13)에서 (18)을 대입하여 부재 최대전단응력 τ_{ll} , 및 전단변형률 γ_{ll} ,를 구한다.

4. 실험 결과에 의한 검증

4.1 시험체

제안된 해석에 의하여 예측된 반복하중을 받는 RC패널의 거동에 대한 검증은 철근의 배근방향이 다른 6개의 RC 패널 시험체에 대한 실험결과와 비교되었다. 비교된 시험체의 크기는 1397 × 1397 × 178 mm이었고, 실험은 휴스턴대학의 만능 패널 실험기에 의해 이루어졌다. 3개의 시험체로 구성된 A 시리즈에서는 그림 5(a)와 같이 철근이 힘의 가력방향과 45° 되게 배근되었고, B시리즈의 3개의 시험체에서는 철근의 배근방향과 외력의 방향이 일치하였다. 따라서, A시리즈에서는 균열각도 α 가 45°가 되며, 이와 같은 배근은 그림1(b)의 수직 전단보강근이 배근된 보와 유사하다. 한편, B시리즈에서의 균열각도 α 는 0° 이며 이는 그림 1(a)의 대각선 전단보강근이 배근된 보와 유사한 배근방향이다. A

시리즈 시험체 CA2, CA3, CA4의 철근비는 각각 0.0077, 0.0170, 0.0266이며, B 시리즈 시험체 CE2, CE3, CE4의 철근비는 각각 0.0054, 0.0120, 0.0188이다. 철근은 l -방향과 t -방향에 2열씩 서로 직교하도록 배근되었다. A 시리즈 및 B 시리즈 시험체의 재료 특성은 각각 표1과 표2에 정리되어 있다.

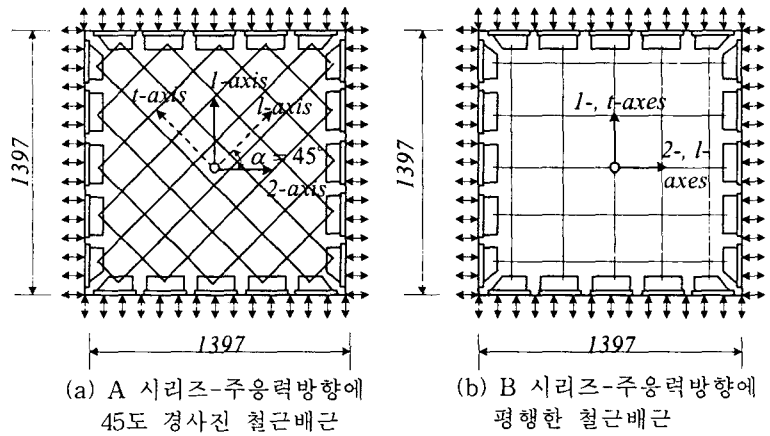


그림 5 시험체의 철근배근 및 크기

표1. 시험체의 재료특성 (A 시리즈, $\alpha = 45^\circ$)

Panel	Concrete		Steel			
	f_{ck} (kgf/cm ²)	ρ_l	l -direction		t -direction	
			f_{ly} (kgf/cm ²)	ρ_t	f_{ty} (kgf/cm ²)	ρ_b
CA2	457	0.0077	4335	0.0076	4335	
CA3	453	0.0170	4335	0.0170	4335	
CA4	467	0.0266	4621	0.0266	4621	

표1. 시험체의 재료특성 (A 시리즈, $\alpha = 0^\circ$)

Panel	Concrete		Steel			
	f_{ck} (kgf/cm ²)	ρ_l	l -direction		t -direction	
			f_{ly} (kgf/cm ²)	ρ_t	f_{ty} (kgf/cm ²)	ρ_b
CE2	500	0.0054	4335	0.0054	4335	
CE3	510	0.0120	4335	0.0120	4335	
CE4	479	0.0188	4621	0.0188	4621	

여기서, f_{ck} : 콘크리트의 압축강도, ρ_l : l 방향 철근비, f_{ly} : l 방향 철근 항복강도, ρ_t : t 방향 철근비, f_{ty} : t 방향 철근 항복강도

4.2 해석결과와 실험결과의 비교

시험체는 각 면에 설치된 8개의 변위측정기(LVDT)를 통해 수직, 수평 및 전단변형이 측정되었다. 실험에서는, 반복하중을 받는 철근콘크리트 패널의 거동을 측정하기 위하여 가로방향(l -방향)과 세로방향(t -방향)에 동일한 힘을 가력하여, 시험체가 순수전단응력을 받도록 하였다.

패널실험에서 얻어진 결과는 그림 6(a)-(c) 및 그림 7 (a)-(c)에서 A 시리즈와 B 시리즈의 해석결과와 비교되었다. 그림 6(a)-(c)에서 철근이 주응력 방향과 45° 로 배근 될 경우, 이력곡선은 핀칭효과에 의하여 에너지 소산이 매우 작은 것을 알 수 있다. 이와 같은 부재의 거동은 전단보강근이 수직으로 배근된 보의 거동과 매우 유사하며 핀칭효과는 전단변형률이 증가함에 따라 증가하였다. 한편, 철근이 주응력 방향과 평행하게 배근 될 경우, 이력곡선은 그림 7(a)-(c)에서 보여지는 것과 같이 핀칭효과가 나타나지 않고 에너지 소산이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 B 시리즈 부재의 거동은 대각선 전단보강근이 배근된 보의 거동⁵⁾과 매우 유사하다. 해석결과와 실험결과의 비교에 있어서, 변형률 적합조건을 이용한 해석결과는 A 시리즈의 핀칭효과를 매우 정확히 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한, 이 논문의 해석방법은 핀칭효과가 나타나지 않고 에너지 소산이 큰 B 시리즈 시험체의 이력거동에 대해서도 매우 정확히 예측하였다.

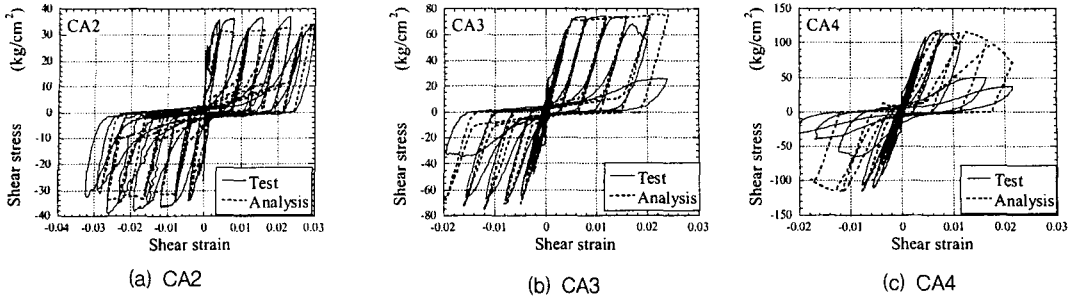


그림 6 A 시리즈 시험체의 실험결과와 해석결과와의 비교

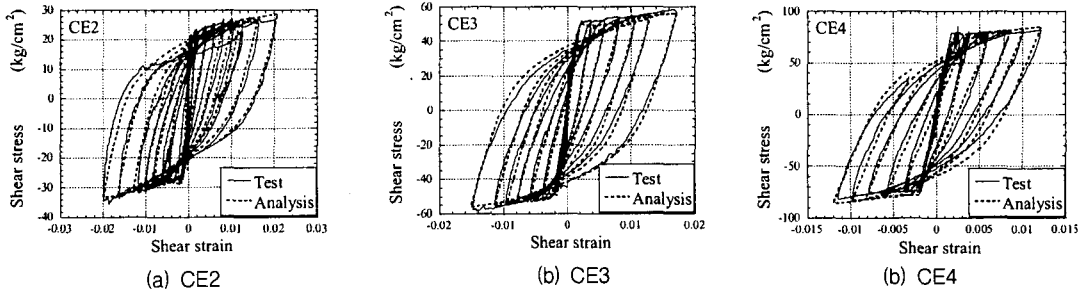


그림 7 B 시리즈 시험체의 실험결과와 해석결과와의 비교

5. 결론

이 연구에서는 변형률적합조건을 이용한 트러스모델에 반복하중을 받는 재료의 구성법칙을 적용하여 철근콘크리트 패널의 거동을 예측하였다. 철근콘크리트 패널의 거동은 철근의 배근방향에 따라 상이한 이력거동을 나타내었다. 철근이 주응력 방향과 45° 경사지게 배근된 A 시리즈의 시험체는 권칭 효과에 의하여 에너지 소산이 매우 작았지만, 주응력 방향과 평행하게 배근된 B 시리즈의 시험체에서는 에너지 소산이 컸다. 제안된 평가법은 철근의 배근방향이 다른 두 종류의 철근콘크리트 패널의 이력거동을 매우 정확히 예측하였다.

참고문헌

1. Vecchio F. and Collins M.P., "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear," ACI Structural Journal, V. 83, No. 2, Mar.-Apr. 1986, pp.219-231.
2. Belarbi, A. and Hsu, T.T.C., "Constitutive Laws of Softened Concrete in Biaxial Tension-compression," ACI Structural Journal, V. 92, No. 5, 1995, pp. 562-573.
3. Mansour, M., Lee, J. Y., and Hsu, T. T. C., "Cyclic Stress-Strain Curves of Concrete and Steel Bars in Membrane Elements," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 12, Dec. 2001, pp. 1402-1411.
4. Stevens, N. J., Uzumeri, S. M., and Collins, M. P., "Reinforced Concrete Subjected to Reversed Cyclic Shear - Experiments and Constitutive Model," ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 2, 1991, pp. 135-146.
5. Paulay, T. and Binney, J. R., "Diagonally Reinforced Concrete Beams of Shear Walls," ACI Special Publication 42, Vol. 2, 1974, pp. 579-598.