

파괴기구에 근거한 역 T형 합성지하벽의 강도평가

Strength Evaluation of Inverted T-shaped Composite Basement Wall Based on Failure Mechanisms

박지환*
Park, Ji Hwan

서수연**
Seo, Soo Yeon

이리형***
Lee, Li Hyung

ABSTRACT

This Study is performed to analyze the behavior of inverted T-shaped Composite Basement Wall(CBW). For this, it is purposed to analyze the failure mechanisms of inverted T-shaped composite basement wall and propose the method of evaluating strength for design. The failure mechanisms would be divided into 4 type mechanisms from previous experimental results, that is hanger failure, punching shear failure, flexural failure and the buckling of H-pile. A strength evaluation procedure for CBW is induced by analyzing respective failure mechanism. Then, the strength for actual structure consisted of inverted T-shaped composite basement wall was evaluated and the expected failure mechanism was determined.

1. 서론

본 연구는 역T형 합성지하벽(Composite Basement Wall)의 거동을 분석하기 위한 연구이다. 이를 위하여 작용하중에 대한 역T형 합성지하벽의 파괴기구를 분석하고 설계를 위한 내력평가방법을 제시하고자 한다. 파괴기구는 기존의 실험 결과 분석을 통하여 Flexural Failure, Hanger Failure, Punching Shear Failure, H-Pile의 좌굴 등 4개의 메카니즘으로 분류하였고 각 형태별 분석을 통하여 내력 산정식을 유도하였다. 이를 위해 다음의 사항을 고려하였다.

첫째, 합성 지하벽의 강도는 발생가능한 메카니즘 중 가장 약한 강도를 가지는 메카니즘에 의해 결정된다고 보고 파괴기구를 예상하였다. 둘째, hanger failure를 국부적인 파괴로 간주하였고, punching shear failure, flexural failure는 합성지하벽 전체의 내력을 좌우할 수 있는 파괴기구로 간주하고 연구를 진행하였다. 셋째, 본 연구에서는 H-pile의 좌굴은 위의 3가지 파괴기구에 따르는 부수적인 파괴기구로 보고, 강도분석에서 제외하였다.

* 정회원, 한양대학교 대학원 석사과정

** 정회원, 충주대학교 건축공학과 교수

*** 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수

2. 파괴기구 (Failure Mechanisms)

2.1 Flexural Failure

역 T형 합성벽의 휨파괴는 단면의 휨변형에 대한 저항력이 떨어지기 시작할 때 일어난다. 어느정도 큰 변형이 생기면 하부 콘크리트 면에 균열이 발생하고 인장철근이 항복한다. H-pile과 콘크리트 접합면 사이에 들뜸이 발생하여 합성율이 저하되고, 이후 콘크리트 벽체는 실제부재보다 짧은 스펬에 대해 독자거동을 하게 된다. (그림 1)

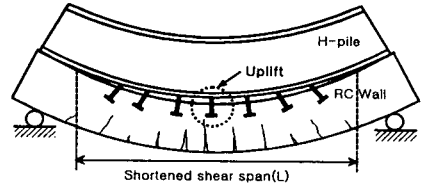


그림 1 Flexural Failure

2.2 Hanger Failure

역 T형 합성벽에서 스테드볼트는 전단력에 저항하는 역할 이외에 H-pile로부터 콘크리트가 분리되지 않도록 hanger로서의 역할을 한다. hanger failure란 hanger 역할을 하는 스테드볼트가 파괴되는 것을 말하며, 그림 2와 같이 스테드볼트의 인장파괴나 콘크리트 콘파괴의 형태로 나타난다. 이로 인해 H-pile과 콘크리트 벽체의 접합면 사이에 수직분리가 일어나게 된다. 수직분리는 하중이 집중되는 하중점 부근에서 먼저 발생하게 되는데, 하중이 증가하여 스테드볼트가 항복하거나 콘크리트 콘 파괴가 발생하게 되면 수직분리는 더 많은 스테드볼트로 확산되어간다.

2.3 Punching Shear Failure

역 T형 합성벽의 punching shear failure는 그림 3과 같이 하중점 하부의 콘크리트가 잘린 피라미드 형태로 뚫려나가는 형태로 일어난다. 파괴가 일어나게 되면 그림과 같이 하중판 모서리로부터 경사진 인장균열이 나타난다.

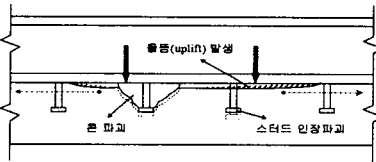


그림 2 Hanger Failure

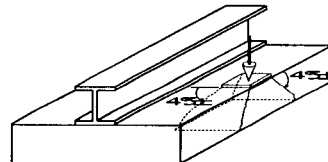


그림 3 Punching Shear Failure

3. 파괴기구별 강도

3.1. Hanger Strength

극한하중 P_u 를 받을때의 최대 hanger strength는 표 1과 같다. 표에 나타난 2개의 내력식을 비교하여 작은 내력을 가지는 경우의 파괴형태가 hanger failure를 지배하게 되고 이때의 내력을 hanger force라고 한다(그림 4). 따라서 극한하중 P_u 를 받을때의 hanger strength는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_u = \min(1.06 n \sqrt{f_c} A_p, n A_{sc} F_u) \quad (1)$$

표 1 hanger failure의 내력식

구 분	콘크리트 콘 파괴시	스텝드 볼트 인장파괴시
내력식	$P_u = n \times 1.06 \sqrt{f_c} \times A_p$	$P_u = n \times A_{sc} \times F_u$
기 호 (Notation)	<ul style="list-style-type: none"> n: 유효 스테드볼트 개수 $1.06 \sqrt{f_c}$: 콘크리트의 인장응력 A_p: 스테드볼트 머리에서 45° 로 방사한 면적이 콘크리트에 투영된 면적(원형기준) 	<ul style="list-style-type: none"> A_{sc}: 스테드 볼트의 단면적 F_u: 스테드볼트의 인장내력

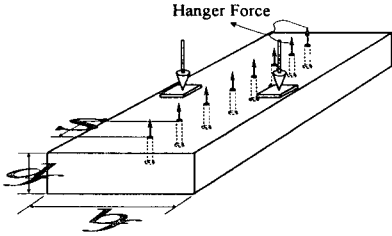


그림 4 작용하중과 Hanger Force

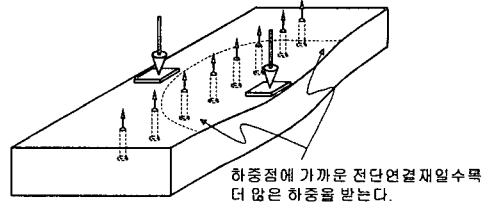


그림 5 하중점의 유효거리

한편, 하중이 작용할 때 하중점 근처에 있는 스테드는 더 멀리 떨어져 있는 스테드보다 더 많은 힘을 받게 되므로 하중점의 위치에 따라 하중의 영향을 받는 유효 스테드 개수가 달라지게 된다(그림 5). 따라서 작용하중에 대한 유효 스테드 거리를 구할 필요가 있다. Hanger Failure가 일어나려면 콘크리트의 전단파괴가 먼저 일어나지 않도록 우선 콘크리트 벽체의 전단성능이 스테드에 작용하는 hanger force를 견딜 수 있는 정도여야 한다. 이를 이용하여 식(2),(3)를 유도할 수 있고, 이를 조합하면 식(4)과 같이 유효거리를 구할 수 있다.

$$0.53\sqrt{f_c}b_d f_j \geq \frac{z}{s} \times \min(A_{sc}F_u, 1.06\sqrt{f_c}A_p) \quad (2)$$

$$x_h = B + 2d_f + 2z \quad (3)$$

$$x_h \leq B + 2d_f + 2 \frac{0.53\sqrt{f_c}b_d f_j \times s}{\min(A_{sc}F_u, 1.06\sqrt{f_c}A_p)} \quad (4)$$

여기서, b_f 는 콘크리트 벽체의 폭, d_f 는 콘크리트 벽체의 깊이, s 는 스테드의 간격이다. 유효 스테드 거리 x_h 는 s 만큼의 간격으로 배치되어 있는 스테드 중에서 하중을 길이방향으로 분배해 줄 수 있다고 생각되는 스테드까지의 거리를 말한다. x_h 를 구했으므로 식 (1)의 유효 스테드 개수 $n = \frac{x_h}{s}$ 로 표현할 수 있다. 그런데, 하중점이 2개소인 경우 하중점 사이의 거리에 따라 총 유효거리는 달라질 것이며, 표 2와 같이 l 에 따른 총 유효거리와 유효스테드개수를 산정할 수 있다.

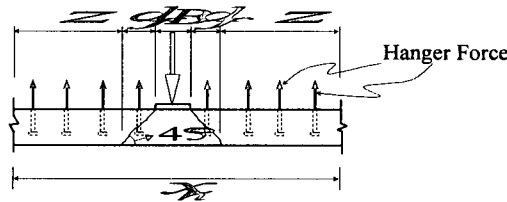


그림 6 하중의 영향을 받는 유효 스테드

표 2 하중점 사이 거리에 따른 총 유효거리와 유효스테드 개수

구 분	각하중점의 유효거리가 겹칠 경우 ($l \leq x_h$)	각 하중점의 유효거리가 겹치지 않을 경우 ($l > x_h$)
총 유효거리 (l_t)	$l_t = l + x_h$	$l_t = 2x_h$
유효스테드개수 (n)	$n = \frac{l + x_h}{s}$	$n = \frac{2x_h}{s}$
기 호	· l : 두 하중점 사이의 거리	· l_t : 두 하중점의 총 유효거리

3.2 Punching Shear Strength

punching shear strength는 그림 7과 같이 하중판에서 $d_f/2$ 떨어진 지점의 전단면에 작용하는 인장 응력 $1.06\sqrt{f_c}$ 으로 구할 수 있다. 극한하중 P_u 를 받을때의 최대 punching shear strength는 식 (5)와 같다. 여기서, B, D 는 하중판의 각변의 길이이다. 이와 같이 punching shear failure가 일어날때의 내력을 punching shear force라고 하면, hanger force와 punching shear force의 크기를 비교함에 따라 punching shear failure는 몇가지 다른 형태를 갖는다.

$$P_u = 1.06\sqrt{f_c}(B + 2D + 2d_f)d_f \quad (5)$$

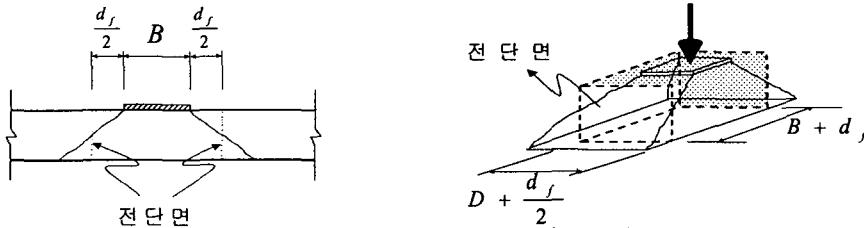


그림 7 punching shear failure의 전단면

3.2.1 hanger force > punching shear force일 때

hanger force가 punching shear force보다 큰 경우에는 punching shear failure가 먼저 일어나기 때문에 그림 8과 같이 2가지 형태의 파괴가 일어난다고 가정할 수 있다.

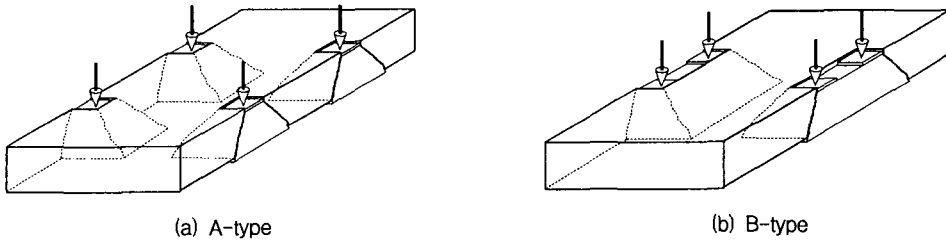


그림 8 A, B-type punching shear failure

위의 2가지 형태의 파괴는 하중점 사이의 거리 ℓ 에 따라 좌우되며 전단면의 면적과 내력식은 표 3과 같다. A-type의 파괴는 각각의 하중점마다 punching shear failure가 일어나는 경우로 하중판의 크기가 바뀌지 않는한 전단면의 크기가 바뀌지 않으므로 내력은 일정하게 된다. B-type의 파괴는 하중점 사이의 거리 ℓ 이 일정이하로 작다고 가정할 때 두 하중판과 그사이의 콘크리트가 동시에 punching sheare failure를 일으키는 경우로, 전단면의 크기가 ℓ 에 따라 바뀌게 된다.

한편, A-type 파괴시의 내력은 일정하고, B-type의 내력은 ℓ 에 따라 바뀌기 때문에 $\ell = B + 2D + 2d_f$ 을 기점으로 A-type의 내력과 B-type의 내력은 차이가 생기며, 둘 중 더 작은 내력을 가지는 형태로 파괴된다.

표 3 파괴형태별 전단면적과 내력식

구 분	A-type failure	B-type failure
전단면의 면적	$(B + 2D + 2d_f)d_f$	$(B + 2D + 2d_f + \ell)d_f$
내 력 식	$P_u = 4.24\sqrt{f_c}(B + 2D + 2d_f)d_f$	$P_u = 2.12\sqrt{f_c}(B + 2D + 2d_f + \ell)d_f$

3.2.2. hanger force < punching shear force일 때

punching shear force가 hanger force보다 큰 경우에는 hanger failure가 먼저 일어나며, hanger는 더 이상 제 역할을 못하여 콘크리트 벽체를 잡아주지 못하기 때문에 punching shear failure는 그림 9와 같이 2가지 형태의 파괴가 일어난다고 가정할 수 있다.

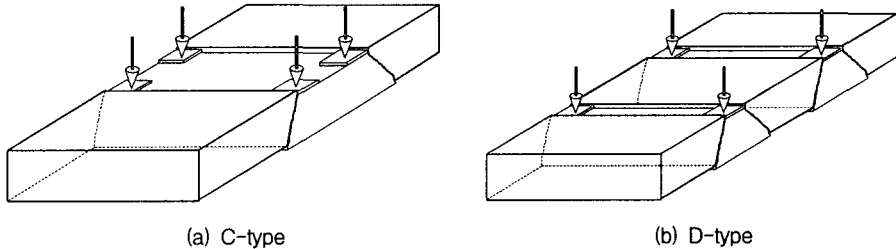


그림 9 C, D-type punching shear failure

위의 2가지 형태의 파괴는 하중점 사이의 거리에 상관없이 콘크리트벽체의 전체단면이 전단면이며 전단면의 면적과 내력식은 표4과 같다. C-type failure는 하중점 사이의 거리가 일정하라고 가정할 때, 양쪽 4개의 하중판과 그 사이의 콘크리트 벽체가 동시에 punching shear failure를 일으키는 경우로 벽체의 단면적과 동일한 전단면이 2개 생긴다. D-type failure는 하중점 사이의 거리가 일정이상이라고 가정할 때, 양쪽의 2개의 하중판과 그 사이의 콘크리트 벽체가 동시에 각각 punching shear failure를 일으키는 경우로 C-type과 마찬가지로 벽체의 단면적과 동일한 전단면이 4개 생긴다. C-type과 D-type을 비교해보면 D-type의 내력이 C-type의 내력의 2배이므로 하중점 사이의 거리 l 에 관계없이 C-type Failure만이 가능한 파괴형태가 되며, D-type failure는 일어나지 않는다.

표 4 failure type별 전단면적과 내력식

구 분	C-type failure	D-type failure
전단면의 면적	$2bd_f$	$4bd_f$
내 력 식	$P_u = 1.06\sqrt{f_c} \times 2bd_f$	$P_u = 1.06\sqrt{f_c} \times 4bd_f$

3.3. Flexural Strength

역 T형 합성지하벽의 휨강도는 합성단면의 휨성능으로 구해낼 수 있다. H-pile과 콘크리트벽체의 단면이 완전합성단면이라고 가정하고 합성단면의 중립축을 구해보면, 인장에 기여하는 콘크리트 역할은 무시되고, 철근만이 인장을 받아주게 되므로 중립축은 H-pile측에 생기게 된다. 따라서 합성단면이 받는 공칭모멘트 M_n 은 다음과 같다.

$$M_n = A_1F_y \times (d - d_1) + A_2F_y \times (H - d - d_2) + A_{sr}f_y \times (d_r - d) \quad (6)$$

여기서, A_1 은 압축측 철골의 단면적, A_2 는 인장측 철골의 단면적, A_{sr} 은 인장철근의 단면적, F_y 는 철골의 항복강도, f_y 는 철근의 항복강도, H 는 H-pile의 높이, d 는 철골상단에서 합성단면의 중립축까지의 거리, d_r 은 철근까지의 거리, d_1 은 압축측 철골중심까지의 거리, d_2 는 인장측 철골중심까지의 거리이다.

4. 내력식 검증과 예상파괴기구

본 논문의 기초자료를 제공한 실험의 제원을 내력식에 대입하여 표 5에서는 내력식을 통해 나온 값과 실제로 측정된 실험하중과 비교하였다. 그 결과, 실험체의 대부분이 hanger failure가 가장 먼저 일어나는 것으로 예상되었다. 특히, 스테드 길이를 늘린 TR-LB110을 제외한 모든 실험체에서 콘파괴의 내력이 스테드파괴의 내력보다 작아 콘파괴형태의 hanger failure를 일으키는 것으로 나타났다.

표 5 실험체별 내력과 실험하중 비교

실험체명	변 수	내력 P_u (tf)												최대 실험하중 (tf)
		Hanger Force				Punching Shear Force						Flexural Force		
		스테드 인장파괴		콘파괴		A-type		B-type		C-type		P_u	ψP_u	
		P_u	ψP_u	P_u	ψP_u	P_u	ψP_u	P_u	ψP_u	P_u	ψP_u			
TR-NB10	기준실험체	-	-	19.859	16.88	68.97	58.624	59.117	50.249	24.632	20.937	23.83	20.255	20.84
TR-NB14	스테드개수	-	-	22.876	19.444	68.97	58.624	59.117	50.249	24.632	20.937	23.83	20.255	21.13
TR-NB6	(합성율)	-	-	16.716	14.208	68.97	58.624	59.117	50.249	24.632	20.937	23.83	20.255	19.95
TR-LB95	스테드 길이	-	-	22.952	19.509	68.97	58.624	59.117	50.249	24.632	20.937	23.83	20.255	21.5
TR-LB110		25.051	21.294	-	-	68.97	58.624	59.117	50.249	24.632	20.937	23.83	20.255	22.32
TR-TW100	벽체 두께	-	-	14.182	12.054	39.411	33.499	36.127	30.708	16.421	13.958	20.946	17.807	18.54
TR-TW200		-	-	25.535	21.705	105.09	89.332	85.391	72.528	32.842	27.916	26.754	22.741	24.54

5. 결 론

- 1) flexural failure의 경우 내력식을 통해 실험체의 내력을 계산한 결과와 실험값이 좋은 대응을 보이는 것으로 나타났다.
- 2) 실험체의 대부분이 콘파괴에 의한 hanger failure를 가장 먼저 일으키는 것으로 예상되었다. 이는 hanger failure가 콘파괴의 형태로 일어날 경우 선행되는 국부적인 파괴기구임을 나타내며, 파괴가 일어나더라도 합성벽 전체의 내력에는 큰 영향을 주지 않는 독립적인 파괴기구임을 알 수 있다.
- 3) 스테드 길이를 늘린 TR-LB110 실험체에서는 콘파괴 내력이 강해져 스테드 인장파괴의 형태로 hanger failure가 일어나는 것으로 나타났으며, 이 경우 hanger failure가 합성벽 전체의 내력을 지배하는 것으로 나타났다.
- 4) A-type, B-type punching shear failure의 내력은 다른 failure의 내력에 비해 상당히 큰 값을 나타내는 것으로 보아 일어나기 힘든 파괴기구이다.

참고문헌

1. 삼성중공업(주), 초대형구조시스템 연구센터, "CBS공법의 개발 및 성능평가에 관한 연구", 2001.3.
2. 권영준, 이성호, 서수연, 이리형, "역 T형 합성지하벽의 휨성능에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집, 제 17권 12호, 2001.12, pp 61~68.
3. 이태석, 김승훈, 서수연, 이리형, 홍원기, "스테드볼트 접합부의 인장거동에 관한 연구", 한국콘크리트 학회 논문집, 제 13권 4호, 2001. 8, pp 321~328.
4. Sher Ali Mirza, Richard W.Furlong, "Serviceability Behavior and Failure Mechanisms of Concrete Inverted T-Beam Bridge Bentcaps", ACI Journal, July-August 1983, pp 294~304.
5. Sher Ali Mirza, Richard W.Furlong, "Strength Criteria For Concrete Inverted T-Girders", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 109, No. 8, August 1983, pp 1836~1853.
6. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-02) and Commentary(ACI 318R-02)", American Concrete Institute, 2002.
7. 대한건축학회, "한계상태 설계기준에 의한 강구조설계 예제집", 2002.