

쏘일네일링과 앵커가 결합된 하이브리드 공법의 거동 메커니즘

Behavioral Mechanism of Hybrid Model of Soil-nailing and Compression Anchor

서 형 준¹ Seo, Hyung-Joon

김 현 래² Kim, Hyun-Rae

정 남 수³ Jeong, Nam-Soo

이 인 모⁴ Lee, In-Mo

Abstract

A hybrid system of soil-nailing and compression anchor is proposed in this paper; the system is composed of an anchor bar (installed at the tip) with two PC strands and a steel bar. After drilling a hole, installing proposed hybrid systems, and filling the hole with grouting material, prestress is applied to the anchor bar to restrict the deformation at the head and/or to prevent shallow slope failures. However, since the elongation rate of PC strand is much larger than that of steel bar, yield at the steel bar will occur much earlier than at the PC strand. It means that the yield load of the hybrid system will be overestimated if we simply add yield loads of the two - anchor bar and PC strands. It might be needed to try to match the yielding time of the two materials by applying the prestress to the anchor bar. It means that the main purpose of applying prestress to the anchor bar should be two-fold: to restrict the deformation at the nail head; and more importantly, to maximize the design load of the hybrid system by utilizing load transfer mechanism that transfers the prestress applied at the tip to the head through anchor bar. In order to study the load transfer mechanism in a systematic way, in-situ pullout tests were performed with the following conditions: soil-nailing only; hybrid system with the variation of prestress stresses from 0 kN to 196 kN. It was found that the prestress applied to the anchor system will induce the compressive stress to the steel bar; it will result in decrease in the slope of load-displacement curve of the steel bar. Then, the elongation at which the steel bar will reach yield stress might become similar to that of PC strands. By taking advantage of prestress to match elongations at yield, the pullout design load of the hybrid system can be increased up to twice that of the soil-nailing system.

요 지

본 논문에서는 쏘일네일링 공법과 앵커 공법의 장점을 결합한 하이브리드 공법에 대한 연구를 수행하였다. 쏘일네일링과 앵커가 결합된 하이브리드 공법은 철근과 PC강연선을 보강재로 사용함으로써 일반적인 쏘일네일링에 비해 인발저항력이 증가하며, 프리스트레스를 가하기 때문에 지반의 변위를 억제하고 사면의 얕은파괴를 방지할 수 있다. 하지만 철근의 신장량이 PC강연선의 신장량보다 작기 때문에 철근에 하중이 집중되어 철근이 먼저 항복하게 된다. 따라서 PC강연선과 철근의 항복하중을 단순히 더하게 된다면 쏘일네일링과 앵커가 결합된 하이브리드 공법의 항복하중을 과대평가하는 것이다. 이에 본 연구에서는 두 보강재의 항복시점을 일체화하기 위해 앵커바에 프리스트레스를 가하였다. 즉, 하이브리드 공법에서 프리스트레스를 가하는 것은 지반의 변위를 억제하는 것과 동시에 선단에서부터 전이되는 압축력이 철근에 작용하는 인장하중을 감소시켜 전체 설계하중을 최대한 증가시키기 위한 것이다. 하이브리드

1 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.)

2 하리기술22(주) 대표이사 (CEO, Ghari Geotechnology 22 co., Ltd.)

3 (주)라운이엔지 대표이사 (CEO, Laon Engineering co., Ltd.)

4 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수 (Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ., inmolee@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

드 공법 내에서 하중전이 메커니즘을 체계적으로 분석하기 위하여 두 가지 비교대상을 정하여 현장인발시험을 실시하였다. 하이브리드 공법의 인발저항력 증가를 규명하기 위해 우선 쏘일네일링에 대한 인발시험을 실시하였으며, 또한 하이브리드 공법의 프리스트레스 변화에 따른 메커니즘을 규명하기 위해 프리스트레스를 0kN에서 196kN까지 변화시켜 인발시험을 실시하였다. 프리스트레스를 가하여 발생한 압축력은 철근에 전해지게 되어 철근의 하중-변위 곡선 기울기가 감소하게 된다. 즉, 철근은 신장량이 증가하여 PC강연선과 비슷한 항복하중을 가지게 되며, 본 논문에서는 하중전이 이론을 통해 이를 규명하였다. 프리스트레스를 가하여 삽입된 두 보강재가 일체거동을 보이게 되면 하이브리드 공법의 인발저항력은 쏘일네일링의 인발저항력보다 2배정도 더 증가하게 된다.

Keywords : Elongation, Load transfer mechanism, Hybrid model of soil-nailing and compression anchor, Prestress

1. 서론

쏘일네일링 공법은 지반에 네일을 삽입한 후 그라우팅을 수행하여 지반과 일체화함으로써 원지반의 전단저항력 및 네일의 인발저항력을 활용하는 보강공법이다. 종래에는 지층의 구별 없이 사면보강을 위하여 쏘일네일링 공법을 시공하였으며, 암반층에는 인장력을 가하여 지반의 활동을 억제시키는 앵커공법을 시공하였다. 그러나 쏘일네일링 공법은 수동적인 지보재로서 초기변위를 억제하기 힘들고 시공수량의 증가에 따른 경제성 확보에 있어서 문제점이 있었다. 또한 앵커공법은 복잡하고 다양한 지층여건에 유연하게 대처하지 못하는 어려움뿐만 아니라 공사비가 고가인 문제점이 있었다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 쏘일네일링과 앵커의 장점을 살린 하이브리드 공법이 개발되었다. 쏘일네일링과 앵커가 결합된 하이브리드 공법은 철근의 인장력 및 전단력과 PC강연선의 인장력이 동시에 작용하여 활동 파괴를 억제하고 선단에 정착장 설치 및 초기에 긴장력을 가하여 지반보강을 극대화할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 PC강연선과 철근의 일체화된 거동을 유도하여 하이브리드 공법의 장점을 현장시험 및 이론을 통하여 규명하고자 한다. 또한 쏘일네일링과 앵커가 결합된 하이브리드 공법은 간단히 ABG(Anchor Bar and Nail Grouting)공법이라 명명한다.

Tan과 Chow(2004)는 지반의 파괴모드를 인발파괴, 전단파괴, 얽은파괴로 구분하여 파괴메커니즘을 분류하였으며, John과 Wayne(2005)은 3가지 파괴모드를 바탕으로 현장시험을 실시하였다. 인발파괴는 그라우팅과 지반 사이의 주면마찰력과 가장 관계가 깊으며, 서형준 등(2009)은 인발마찰계수를 통해서 주면마찰력을 산정

하였으며, 김태섭 등(2009)은 지반의 N치에 따라 주면마찰력의 변화를 판별하였다. Liang과 Feng(1997)은 네일에 프리스트레스를 가하였을 때, 지반의 전단변형과 영향범위를 예측하여 프리스트레스에 따른 지반의 주면마찰력 증진에 대한 연구를 실시하였다. 지반과 그라우팅 사이의 주면마찰력에 대한 연구는 이미 앞선 논문들에서 다수 진행되었기 때문에 본 논문에서는 ABG에 삽입된 두가지 보강재의 메커니즘에 대한 연구를 중점적으로 다루고자 한다.

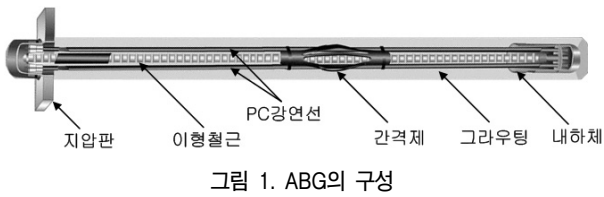
김홍택 등(1999)은 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 안정해석 및 신뢰도 분석에 관한 연구를 수행하였으며, 박시삼 등(2004)은 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 안정해석 및 설계에 관한 연구를 수행하였다. 프리텐션 쏘일네일링은 선단부에 고정너트를 장착하여 프리텐션 하중을 가할 경우, 네일 선단부에서 주면마찰력이 크게 발휘될 수 있도록 고안한 공법으로 주면마찰력이 선단에서 작용될 수 있도록 프리스트레스를 가하는 것은 ABG 하이브리드 공법과 동일하나, 본 연구에서는 프리스트레스를 지반변위 억제 및 선단에서의 주면마찰력 작용을 위한 것뿐만 아니라 삽입된 보강재의 기능을 최대화할 수 있도록 하는 것을 목적으로 한다. 김낙경(2001)은 인장형 앵커와 압축형 앵커의 하중전이에 관한 연구를 실시하였다. 본 연구에서 제안되는 ABG 하이브리드 공법은 쏘일네일링 기능과 함께 일종의 압축형 앵커의 기능을 가지고 있으나 삽입된 보강재의 거동을 최적화하기 위한 기능으로 프리스트레스를 가하기 때문에 압축형 앵커에 비해 가하는 하중의 크기가 작으며 보강재의 거동을 최대한 연장하기 위한 한계프리스트레스를 제안하였다.

ABG 하이브리드 공법은 쏘일네일링과 앵커의 장점

을 가지고 있지만 실무에 적용하기 위해서는 철근과 PC 강연선의 일체거동을 유도할 수 있는 최적의 프리스트레스를 규명하여야 하며, ABG 하이브리드 공법의 하중전이 메커니즘에 대한 정확한 분석이 필요하다. 따라서 본 연구는 현장시험 및 이론적 검증을 수행하여 ABG 하이브리드 공법의 메커니즘을 규명하였다.

2. ABG 하이브리드 공법

ABG 하이브리드 공법은 그림 1에서 보이는 것과 같

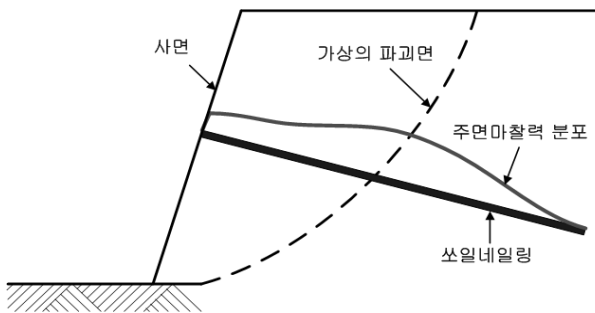


이 철근과 PC강연선이 결합된 신공법으로 쓰일네일링과 앵커의 장점을 모두 고려한 하이브리드 공법이라고 할 수 있다. ABG 하이브리드 공법에서 사용하는 보강재의 물성은 표 1에 나타나 있다. ABG 하이브리드 공법의 선단부를 보게 되면 PC강연선과 내하체가 연결되어 있어 PC강연선에 프리스트레스를 가하여 내하체에서 전면부로 하중이 전이되게 된다. 또한 인발거동이 발생하게 되면 선단부의 내하체로부터 하중이 전이되어 파괴면 밖에서의 주면마찰력은 작용하는 토압에 대하여 능동적으로 저항할 수 있다는 장점이 있다. 전면부에서는 PC강연선에 프리스트레스를 가한 후 콘을 이용해 PC강연선을 고정하여 지속적으로 내하체에 하중을 전달할 수 있도록 구성되어 있다.

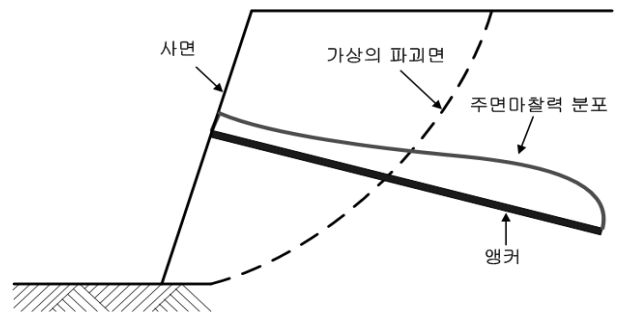
ABG 하이브리드 공법은 초기에 프리스트레스를 가하며, 앵커공법과 같이 선단에서부터 하중전이가 이루어

표 1. 보강재의 물성

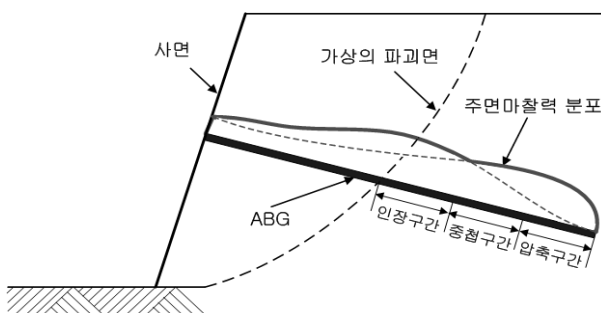
	탄성계수(GPa)	항복하중(kN)	직경(mm)	단면적(mm ²)
PC 강연선	200	318	12.7	197.4
철근	204	203	25	506.7



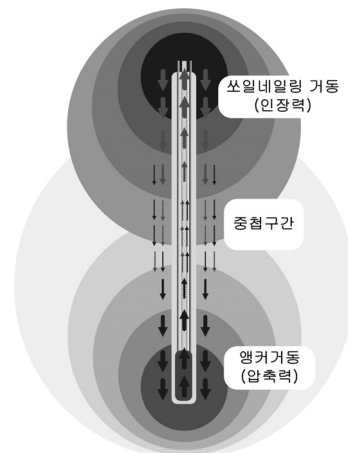
(a) 쓰일네일링의 주면마찰력 분포



(b) 앵커의 주면마찰력 분포



(c) ABG의 주면마찰력 분포



(d) ABG의 거동특성

그림 2. 쓰일네일링 및 앵커의 주면마찰력 분포 및 ABG의 거동특성

어진다(그림 2(b) 참조). 이후 파괴면에서 하중이 발생하게 된다면 선단에서는 PC강연선에서 전해오는 하중으로 인하여 내하체에 압축력으로 작용되며, 전면에서는 그림 2(a)와 같이 철근의 인장력에 의해 선단으로 하중이 전이되게 된다. 따라서 선단과 전면 모두 주면마찰력이 발휘된다(그림 2(c) 참조). 또한 그림 2(d)와 같이 선단에서의 압축력과 전면에서의 인장력이 중첩되는 구간이 발생하여 전면에서부터 전이되어 오는 인장력이 감소하게 된다.

ABG 하이브리드 공법은 철근과 PC강연선의 항복하중을 모두 이용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 단순히 이 두 보강재의 항복하중을 더하게 된다면 ABG 하이브리드 공법에서 보강재의 항복하중은 521kN 정도로 과대평가하게 된다. 이는 그림 3(a)에서도 보듯이 철근과 PC강연선의 신장량이 다르기 때문에 동시에 잡아당기게 되면 PC강연선이 항복하기 전에 이미 철근에서 항복이 발생하게 된다. 하지만 ABG 하이브리드 공법은 프리스트레스를 내하체에서 가하여 철근이 압축력을 받도록 하기 때문에 철근이 버틸 수 있는 인장력은 증가하게 되고, PC강연선과 철근이 일체거동할 수 있도록 해준다. 즉, 프리스트레스를 가하게 되면 철근은 압축력을 받아 철근의 하중-변형률곡선은 초기에 (-)하중에서 인장을 시작하게 된다. 파괴거동을 모사하는 동시인발 시에도 철근은 지속적으로 압축력을 받기 때문에 하중-변형률곡선의 기울기가 감소하게 된다. 프리스트레스를 가하게 되면 PC강연선의 하중-변형률곡선은 좌측으로 이동하여 프리스트레스 하중만큼 (+)하중에서 하중-변형률곡선이 시작하게 된다. 따라서 철근과 PC강연선은 일체거동을 보이게 된다. 본 연구에서는 그림

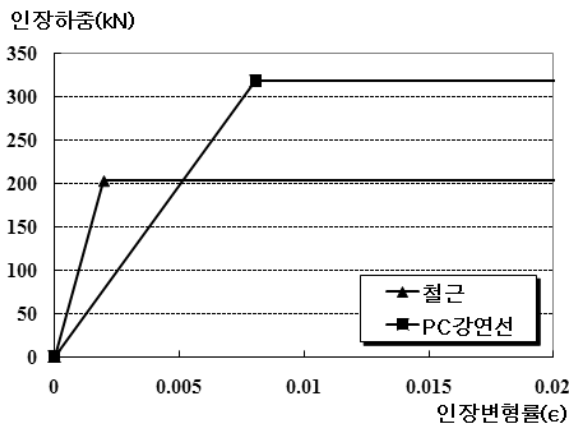
3(b)에서 보는 것과 같이 철근과 PC강연선이 일체거동을 이루기 위한 프리스트레스를 규명하고자 현장인발시험을 실시하였으며, 이에 대한 이론적 규명을 실시하여 최적화된 ABG 하이브리드 공법을 제안하고자 한다.

3. 현장인발시험

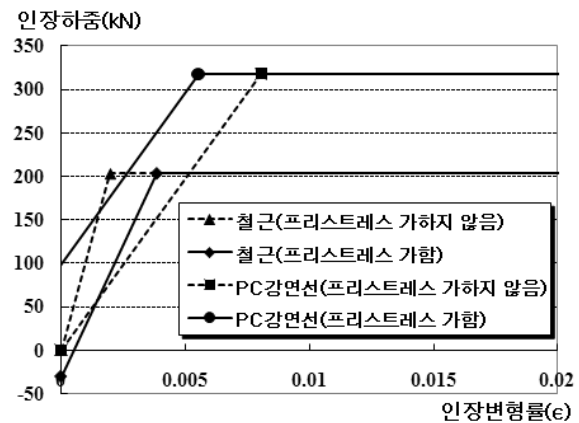
현장인발시험은 철근이 받는 압축력을 산정하고 철근과 PC강연선이 일체화된 거동을 보이는 프리스트레스 하중을 선정하여 ABG 하이브리드 공법이 버틸 수 있는 최대 항복하중을 산정하기 위해서 실시하였다. 또한 철근과 그라우팅에 변형률계를 설치하여 내하체 및 전면부에서부터 발생하는 하중전이 메커니즘을 파악하였다.

3.1 현장시험의 계획 및 대상지반

현장시험은 강원도 원주시 지정면에서 실시하였으며, ABG 6공 및 쓰일네일링 3공을 4.3m로 연직으로 시공하였다. 인발시험 시 ABG의 철근이 받는 하중과 그라우팅 내에서 작용하는 하중전이를 확인하기 위해서 그림 4와 같이 각 CASE 중 대표로 철근 변형률계와 그라우팅 변형률계를 설치하였다. 일반쓰일네일링에 비해 ABG 하이브리드 공법의 인발저항력 증대효과와 작용하는 하중전이 메커니즘의 차이를 비교하기 위해 CASE 1과 CASE 2로 나누어 비교시험을 수행하였다. 프리스트레스의 크기에 따라 철근에 작용하는 압축력을 측정하여 철근과 PC강연선의 일체거동을 유도할 수 있는 프리스트레스를 규명하기 위해 프리스트레스를 5가지로 변화



(a) 철근과 PC강연선의 하중-변형률 곡선



(b) 프리스트레스를 가할 경우 철근과 PC강연선의 하중-변형률 곡선

그림 3. 프리스트레스 유무에 따른 철근과 PC강연선의 하중-변형률곡선

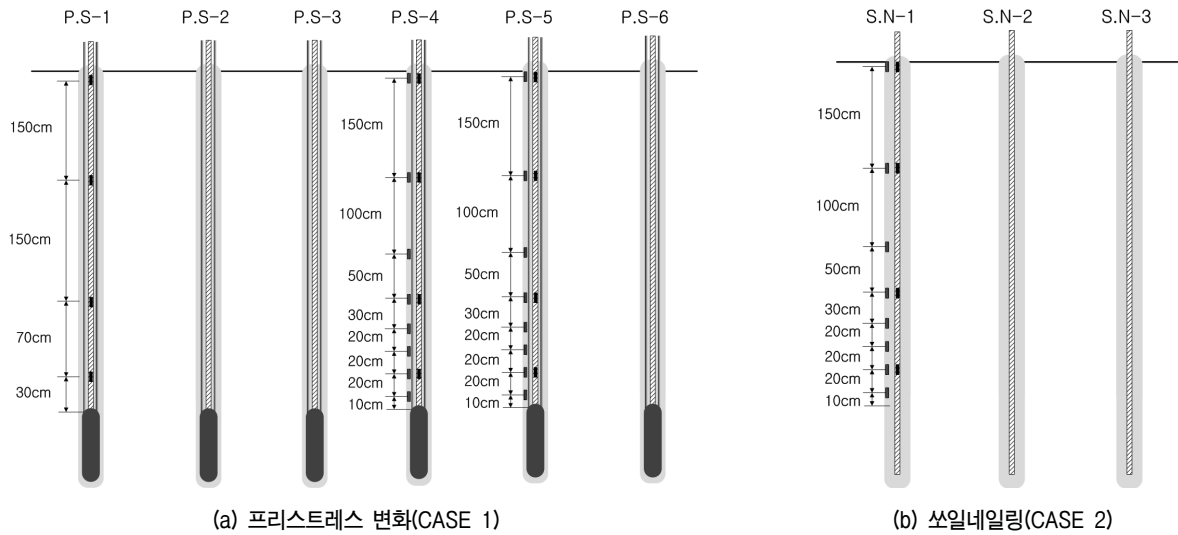


그림 4. 각 CASE별 계측기 설치위치

표 2. 각 시공 CASE별 정리

CASE	분류	주요 비교사항		
		계측기 삽입여부	프리스트레스(kN)	주면마찰력 작용시점
프리스트레스 변화 (CASE 1)	P.S-1	철근	0	선단부+전면부
	P.S-2	-	59	선단부
	P.S-3	-	98	
	P.S-4	철근+그라우팅	137	
	P.S-5	철근+그라우팅	196	
	P.S-6	-	196	
쏘일네일링 (CASE2)	S.N-1	철근+그라우팅	-	전면부
	S.N-2	-		
	S.N-3	-		

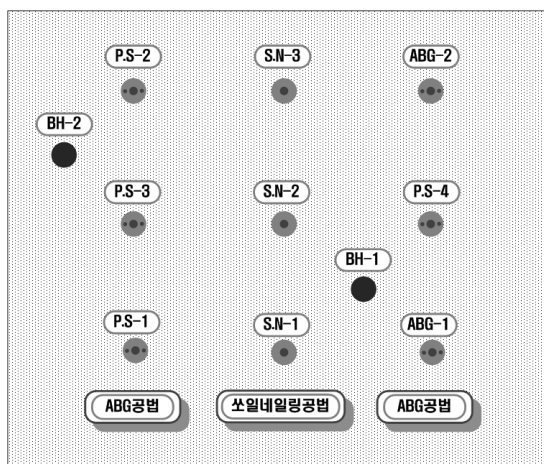


그림 5. 현장시험의 각 CASE별 시공개요

시키면서 시험을 실시하였다(표 2 참조). 계획된 시공개요는 그림 5에 나타나있다.

그림 5에서 보는 것과 같이 ABG 하이브리드 공법과 쏘일네일링 공법이 시공된 장소에 2공의 시추조사를 실

	BH-1	N치	BH-2	N치
0 m	매립층	8/30	매립층	14/30
1 m		20/30		5/30
2 m	봉적층	13/30	봉적층	28/30
3 m		22/30		21/30
4 m		50/9		50/8
5 m				

그림 6. 대상지반의 시추조사도

시하여 지층의 구성을 판단하였으며, 표준재하시험, 공내재하시험, γ 선을 이용한 밀도검측, 직접전단시험을 통해서 지반물성치를 산정하였다. 대상지반은 N치가 16정도인 지반으로 탄성계수는 5.5MPa, 단위중량은 17.8kN/m³, 내부마찰각 35.9°, 점착력 45.5kPa로 나타났다. 대상지



(a) 천공



(b) 보강재 조립



(c) 보강재 삽입



(d) 그라우팅



(e) 프리스트레스



(f) 지압판 설치 및 표면처리

그림 7. ABG 하이브리드 공법의 시공과정



그림 8. 시공전경

반의 시추주상도는 그림 6에 나타나 있다.

ABG 하이브리드 공법은 일반 쏘일네일링과 비교하여 보강재로 철근에 PC강연선을 조립해야 하는 과정과 시공이 완료된 후 지압판을 두어 프리스트레스를 가하는 추가적인 시공 과정이 있으며, 전체적인 시공과정은 그림 7에 나타나 있다.

그림 7과 같은 시공과정을 통해서 ABG 하이브리드 공법 및 쏘일네일링 공법이 시공되었으며, 전체 시공 전경은 그림 8과 같다.

3.2 현장인발시험

현장인발시험은 변형률제어 방식이 아닌 하중제어 방식을 통해 실시하였으며, 재하(Load)과정만을 통해 하중단계별 인발시험을 실시하여 하중-변위 관계를 규명하였다. ABG 하이브리드 공법은 공법의 특성 상 프리스트레스를 준다는 점과 철근과 PC강연선이 동시에 인발된다는 점을 고려하여 인발시험을 실시하였다. 일반적인 쏘일네일링의 인발시험은 철근을 인장하여 시험을 실시하지만 ABG 하이브리드 공법 같은 경우 프리스트레스를 가할 때는 PC강연선만을 인장하고, 그 후 실제 파괴거동을 모사할 경우에는 PC강연선과 철근을 동시에 인장하여야 한다. 따라서 본 현장인발시험에서는 그림 9에서 보는 것과 같이 인장기 2개가 사용되었으며, 인장기 A로 PC강연선만 체결하여 프리스트레스를 가한 후 인장기 B에 철근을 체결하여 인장기 A로 PC강연선과 철근을 모두 인장하였고 철근이 받는 하중은 인장기 B로 측정하였다.

현장인발시험은 ABG 하이브리드 공법에서 프리스트레스를 변화시키는 경우와 쏘일네일링공법으로 나누어 시험을 실시하였다. ABG 하이브리드 공법은 총 6공에 대해서 프리스트레스를 각각 0kN, 59kN, 98kN, 137kN, 196kN까지 가한 후 철근과 동시인발하였으며(CASE 1),

표 3. 각 CASE별 인발시험 하중량

구 분	종류	하중 증가(kN)						
		0	59	98	137	167	196	196이상
CASE1 (ABG 하이브리드 공법의 프리스트레스 변화)	P.S-1	동시인발						
	P.S-2	프리스트레스		동시인발				
	P.S-3	프리스트레스			동시인발			
	P.S-4	프리스트레스				동시인발		
	P.S-5	프리스트레스						동시인발
	P.S-6	프리스트레스						동시인발
CASE2 (쏘일네일링)	S.N-1	인 발						
	S.N-2	인 발						
	S.N-3	인 발						

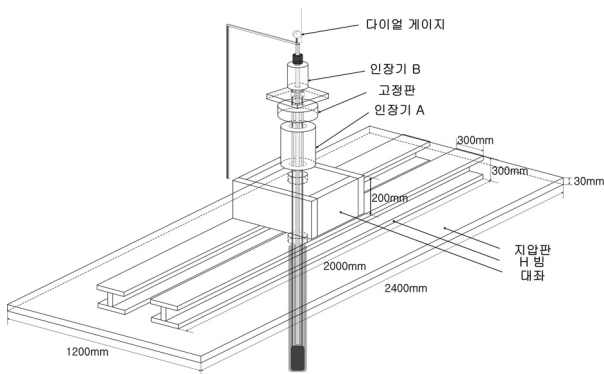


그림 9. 인발시험 장비

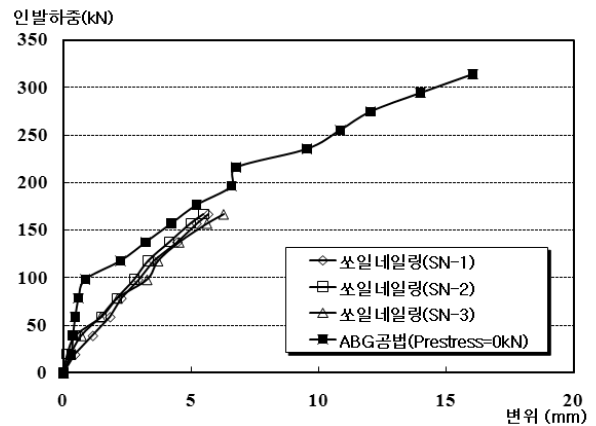


그림 10. 쏘일네일링 공법(CASE 2)의 하중-변위곡선

최적화된 프리스트레스 하중을 판단하였다. ABG 하이브리드 공법의 인발저항력 증가를 비교하기 위하여 쏘일네일링 3공에 대해서도 인발시험을 실시하였으며, 3공 모두 167kN까지 인발하였다. 이를 종합적으로 정리해 보면 표 3과 같다.

3.3 현장인발시험 결과분석

현장인발시험은 크게 2가지 CASE로 나누어 실시하였다. 먼저, ABG 하이브리드 공법의 인발저항력 증가를 규명하기 위해 ABG 하이브리드 공법과 쏘일네일링 공법을 시공한 후 인발시험을 실시하였다. 두 번째로, 프리스트레스를 변화시켜 철근과 PC강연선의 일체거동

을 이루는 프리스트레스를 찾기 위한 인발시험을 실시하였다. 쏘일네일링 공법은 167kN까지 하중단계를 총 9단계로 나누어 인발시험을 실시하였다. 쏘일네일링의 인발시험 결과 및 ABG 하이브리드 공법 중 프리스트레스를 가하지 않은 결과는 그림 10에 나타나 있다.

프리스트레스를 가하지 않고 시험한 ABG 하이브리드 공법의 전체 인발하중은 315kN정도로 나타났으며, 이때 삽입된 철근이 받는 인장력은 150kN정도였다. 철근의 받는 하중은 쏘일네일링과 ABG모두 비슷하지만 전체 인발하중은 ABG 하이브리드 공법이 쏘일네일링에 비해 2배 정도 더 큰 것으로 나타났다. 인발시험과 동시에 쏘일네일링의 하중전이 메커니즘을 파악하기 위해 철근 및 그라

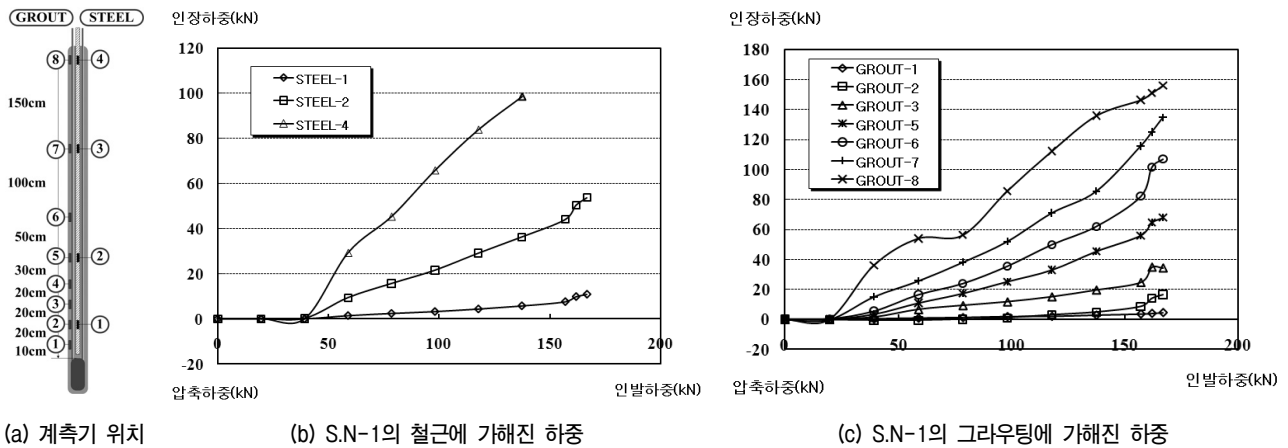


그림 11. S.N-1의 계측결과

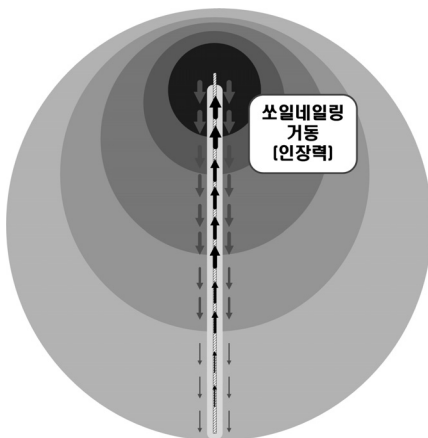


그림 12. 쏘일네일링의 하중전이 모식도

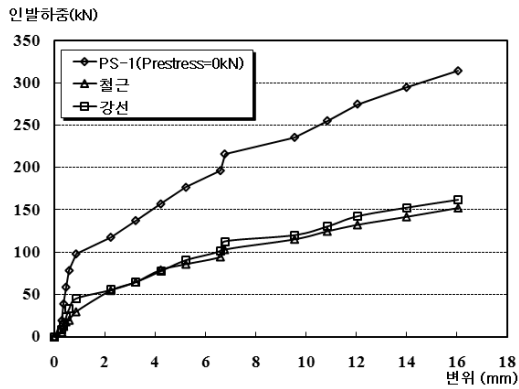
우팅 변형률계를 쏘일네일링 1본(S.N-1)에 삽입하였으며, 인발하중 단계별 계측된 하중은 그림 11에 나타나 있다.

그림 11에서도 보이듯이 철근의 모든 계측지점에서 인장력이 작용하고, 전면부와 근접할수록 인장력이 크게 작용하는 것을 알 수 있다. 따라서 쏘일네일링공법은 전면부에서 선단으로 하중이 전이되는 양상을 보인다. 또한 내하체와 가장 가까운 변형률계에서도 인장력이 작용하는 것으로 보아 철근 하부까지 하중이 전이되는 것으로 판단되며, 이에 대한 모식도를 나타내면 그림 12와 같다.

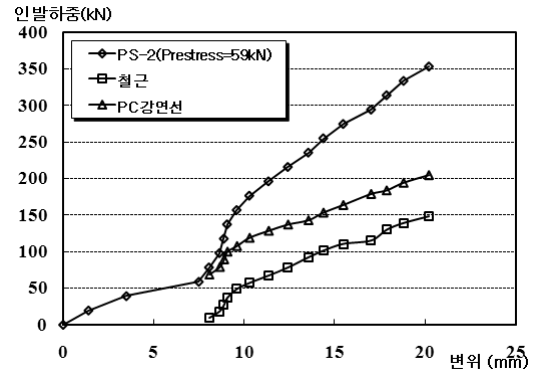
프리스트레스 변화시험(CASE 1)은 각각의 ABG에 대해 프리스트레스를 0kN, 59kN, 98kN, 137kN, 196kN을 가한 후 철근과 PC강연선을 동시인발하였으며, 철근이 받는 하중이 150kN을 넘게 되면 시험을 중단하였다. 인발시험을 통한 ABG의 하중-변위곡선은 그림 13에 나타나 있으며, 인장기 B에서 측정된 철근이 받는 하중을 통해서 PC강연선이 받는 하중을 산정할 수 있었다.

그림 3(a)에서 하중-변형률곡선의 개념도를 보여준 대

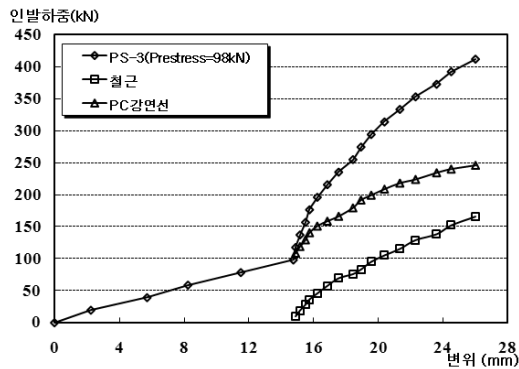
로, PC강연선과 철근을 각각 인장하는 경우 철근의 신장량이 PC강연선의 신장량보다 작아 철근이 인장강도에 다다른 변형률 이내에서 철근이 인장강도에 2.6배 정도 하중을 더 받게 된다. 그러나 프리스트레스 또는 동시인발을 하게 되면 내하체에서 발생하는 압축력이 철근의 인장력과 중첩을 이루면서 철근과 PC강연선이 받는 하중이 크게 차이나지 않는 것을 알 수 있다. 즉, 철근의 하중-변형률곡선의 기울기가 감소하게 된다. 하지만 프리스트레스 크기에 따라 철근과 PC강연선의 거동이 일체화되는 시기에는 차이가 있다. 그림 13(a)에서 보는 것과 같이 프리스트레스를 주지 않은 경우, 내하체에서 발생하는 압축력이 전면부까지 전이되지 않기 때문에 동시인발 초기에 철근은 일반적인 쏘일네일링의 인발거동과 같은 양상을 보이며 PC강연선과 일체화된 거동을 나타내지 못한다. 그림 13(b)와 같이 프리스트레스를 59kN으로 준 후 동시인발하였을 경우 역시 초기에 하중-변위곡선의 기울기가 가파른 구간이 나타나며, 이 경우에도 내하체의 하중이 전면으로 전이되지 않은 것을 의미한다. 프리스트레스를 98kN으로 주었을 경우 내하체에서 발생하는 압축력이 전면까지 전이되어 동시인발 시 압축력과 인장력의 중첩효과가 즉시 발휘되며, 그림 13(c)에서 보는 것과 같이 PC강연선과 철근이 일체거동을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 ABG 하이브리드 공법에서 프리스트레스를 최대 98kN 정도로 가하게 된다면 ABG 하이브리드 공법의 기능을 최적화할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 13(d)와 그림 13(e)와 같이 프리스트레스가 상대적으로 큰 경우, PC강연선이 저항할 수 있는 여유하중이 줄어들게 된다. 따라서 철근이 항복하중에 도달하기 전에 PC강연선이 먼저 항



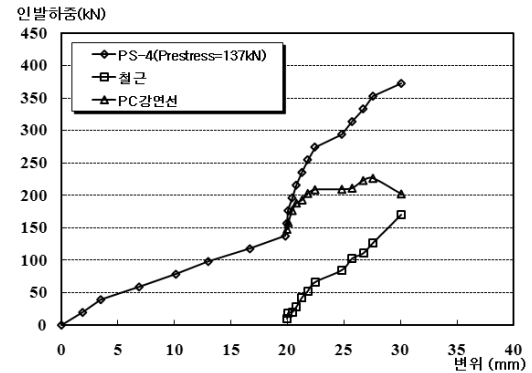
(a) P.S-1의 하중-변위곡선(Prestress=0kN)



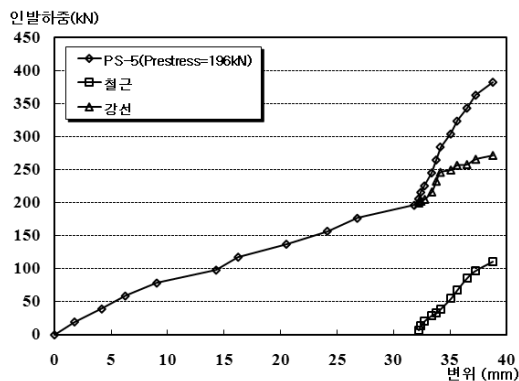
(b) P.S-2의 하중-변위곡선(Prestress=59kN)



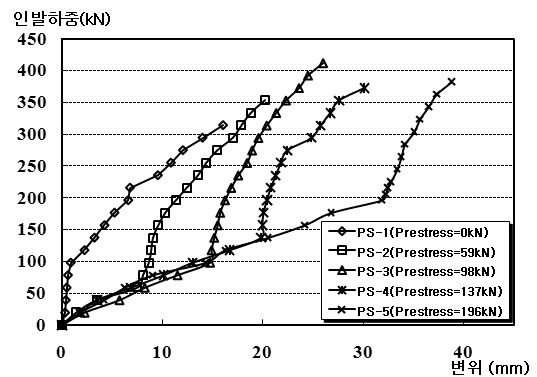
(c) P.S-3의 하중-변위곡선(Prestress=98kN)



(d) P.S-4의 하중-변위곡선(Prestress=137kN)



(e) P.S-5의 하중-변위곡선(Prestress=196kN)



(f) 프리스트레스 변화에 따른 하중-변위곡선

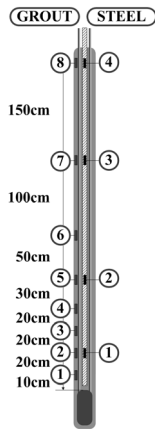
그림 13. CASE 1(프리스트레스 변화)의 하중-변위곡선

복하중에 도달하게 된다. PC강연선이 파단이 나게 되면 PC강연선의 항복하중이 318kN이고 철근의 항복하중이 200kN인 것을 감안하였을 때, PC강연선이 받는 하중을 철근이 대신 받을 수 없으므로 ABG의 보강재는 기능을 더 이상 할 수 없게 된다. 따라서 본 현장시험과 같은 경우 철근과 PC강연선의 일체거동을 유도할 수 있고, 철근의 항복하중이 PC강연선의 항복하중 안으로 들어올 수 있게 하기 위해서 프리스트레스를 100kN 이하로 주어야 할 것으로 판단된다. 하지만 본 현장시험은 길이

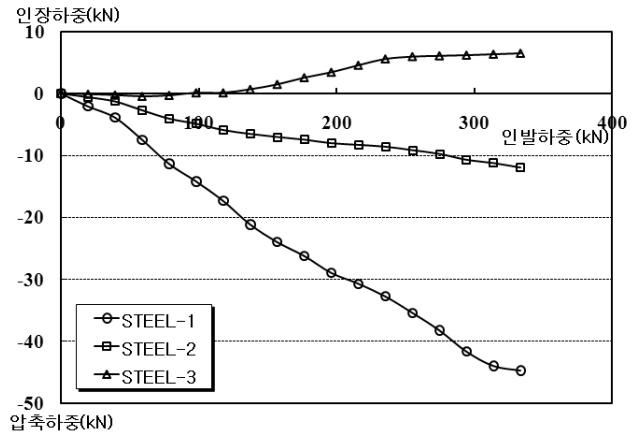
4.3m의 ABG에 대한 시험이므로 길이가 길어진다면 이 값은 더 증가할 것으로 판단된다.

프리스트레스 변화에 따른 하중전이 메커니즘을 파악하기 위해 철근 변형률계를 P.S-1에 삽입하고 P.S-4와 P.S-5에는 철근 및 그라우팅 변형률계를 삽입하여 인발시 계측을 실시하였다. 인발하중 단계별 측정된 계측 결과는 그림 14에 나타나 있다.

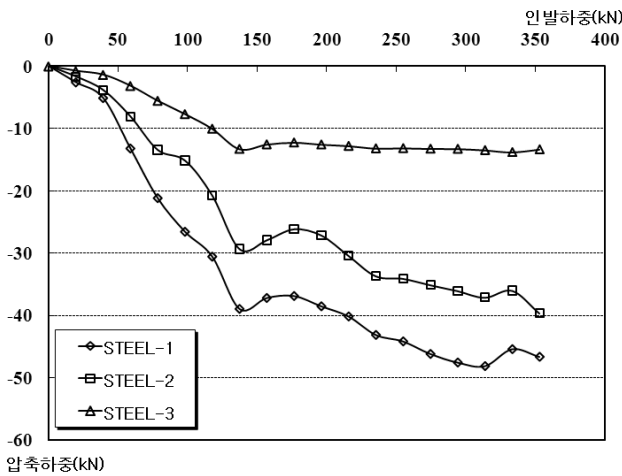
그림 14(b)에서 보는 것과 같이 프리스트레스를 주지 않고 동시인발한 경우(P.S-1), 내하체로부터 1m 떨어진



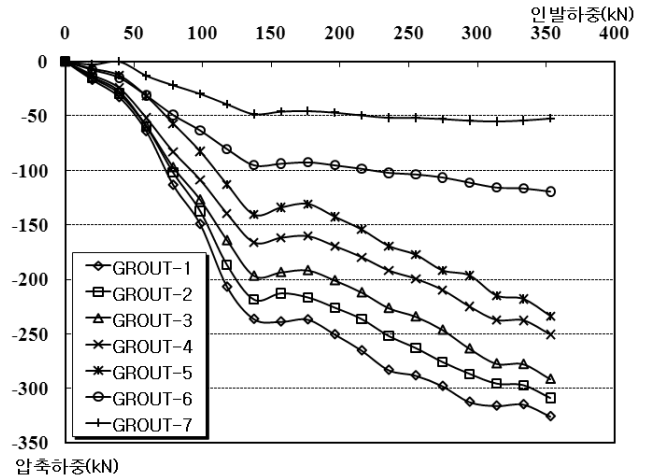
(a) 계측기 위치



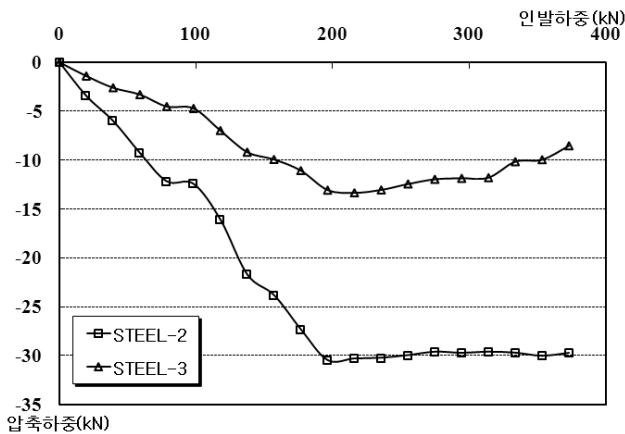
(b) P.S-1의 철근에 가해진 하중



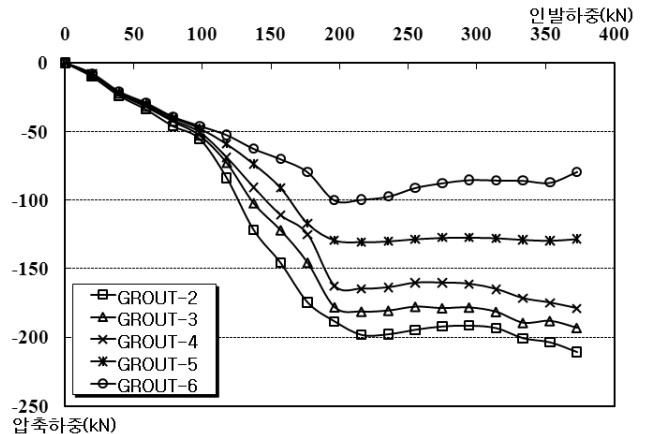
(c) P.S-4의 철근에 가해진 하중



(d) P.S-4의 그라우팅에 가해진 하중



(e) P.S-5의 철근에 가해진 하중



(f) P.S-5의 그라우팅에 가해진 하중

그림 14. 프리스트레스 변화에 따른 철근 및 콘크리트의 하중 계측결과

지점(철근변형률계①, ②)까지는 내하체에서 작용하는 하중에 의해 지속적으로 압축력을 받게 된다. 내하체로부터 2.5m 떨어진 지점(철근변형률계 ③)에서는 철근의 인장거동에 의해 인장력을 받는 것으로 나타났다. 초기의 인발거동을 보게되면 압축력이 전면부까지 전이되

지 않기 때문에 내하체로부터 2.5m 떨어진 지점 이후부터는 압축력에 대한 영향을 크게 받지 않는 것을 알 수 있다. 즉, 선단부에서는 앵커거동을 나타내고 전면부에서는 쏘일네일링 거동을 보여 선단부와 전면부가 일체 거동하지 못하고 있다. 프리스트레스를 137kN(P.S-4)만

큼 준 경우, 초기에 프리스트레스를 가하게 되면 지속적으로 철근이 받는 압축력이 증가한다. 동시인발 이후에는 내하체에서 전해오는 압축력과 철근의 인장력이 중첩되면서 그래프의 기울기가 완만해지는 것을 알 수 있다(그림 14(c)와 그림 14(d) 참조). 내하체로부터 약 2.5m 인 지점(철근변형률계 ③, 그라우트변형률계 ⑦)에서 압축력과 인장력의 중첩이 발생하는 것으로 보이며, 2.5m 이하 지점은 압축력의 영향이 큰 것으로 나타났다. 프리스트레스를 137kN으로 가한 경우 철근은 충분한 압축력을 받고 있으며 PC강연선과 일체거동을 보이게 된다. 그림 14(e)와 그림 14(f)에서 보는 것과 같이 프리스트레스를 0kN에서부터 196kN으로 주는 동안 계속 압축력을 받다가 동시인발하게 되는 순간부터 그래프의 기울기가 감소하는 것을 알 수 있다. 동시인발 시 내하체로부터 1m 아래 지점(그라우트변형률계 ②, ③, ④)에서는 기울기가 감소한 양상이나 내하체로부터 1m 보다 위 지점(그라우트변형률계 ⑥)에서는 기울기가 (+)를 나타낸다. 압축력이 선단에서부터 발생하나, 동시인발 시 전면부에서 선단으로 인장력이 전이되기 때문에 전면에서 가까운 계측기에서 인장력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 ABG 하이브리드 공법이 앵커와 쏘일네일링 거동을 모두 보이기 때문이다.

철근 변형률계와 그라우팅 변형률계의 계측결과를 종합적으로 보았을 때, ABG 하이브리드 공법의 하중전이 메커니즘을 파악할 수 있다. ABG 하이브리드 공법은 초기 프리스트레스를 가할 시에 내하체가 설치된 선단 부근에서 압축력을 크게 받으며, 프리스트레스 증가에 따라 압축력이 선형적으로 증가한다. 하지만 PC강연선과 철근을 동시인발하게 되면 전면에서는 쏘일네일링과 같은 양상이 나타나 인장력이 작용하게 되며, 선단에서는 압축력이 발생하게 되고, 압축력과 인장력이 만나는 중심부에서는 하중의 변화가 일정하게 나타나는 양상을 보였다. 따라서 현장인발시험에서 철근이 받는 하중은 생각보다 크지 않았다. 이는 그림 2에서 예측하였던 것과 같이 철근의 인장력이 내하체에서 가하는 압축력을 만나게 되면서 상쇄되기 때문이다.

4. 배경이론

4.1 최대프리스트레스(P_{max})

ABG 하이브리드 공법은 쏘일네일링공법 중 하나이

지만 프리스트레스를 가한다는 점에서 일반적인 쏘일네일링과 차이가 있다. ABG 하이브리드 공법의 프리스트레스는 앵커공법과 달리 철근과 PC강연선이 일체거동할 수 있을 정도의 프리스트레스만 가하면 된다. 따라서 본 연구에서는 최대프리스트레스라는 개념을 도입하여 최대프리스트레스까지만 프리스트레스를 가하도록 제안하였다. 최대프리스트레스는 내하체에서 프리스트레스에 의한 압축력이 ABG의 전면부로 전이되기 시작한 시점을 의미한다. 즉, 내하체에서 발생한 압축력이 전면부로 도달하게 되면 충분히 철근에 압축력이 전달된 것이므로 더 이상 프리스트레스를 가할 필요가 없다. 본 연구에서는 최대 프리스트레스를 이론적으로 규명하기 위하여 그림 15와 같이 ABG의 저항개념도를 나타내었다. ABG 하이브리드 공법은 내하체로부터 프리스트레스를 가하기 때문에 저항요소는 주면마찰력(T_s), 전면부 전이하중(Q_{trans})으로 나누어진다. ABG 하이브리드 공법에 하중전이 이론을 통하여 이론해를 구하기 위해서는 기본적으로 3가지의 가정이 필요하며 다음과 같다.

- 철근과 그라우팅은 탄성거동을 보인다.
- 철근과 그라우팅은 일체거동한다.
- ABG 하이브리드 공법에서의 발생하는 주면마찰력은 평균주면마찰력으로 가정한다.

그림 15에서 보는 것과 같이 ABG의 내하체에서 프리스트레스 하중(Q_i)을 가하였을 때 이 하중은 초기에 주면마찰력(T_s)에 의해서 저항하게 된다. 하지만 프리스트레스 하중(Q_i)이 점점 커지게 됨에 따라 선단으로 하중이 전이되어 전면부에 전이하중(Q_{trans})이 발생하게 된다.

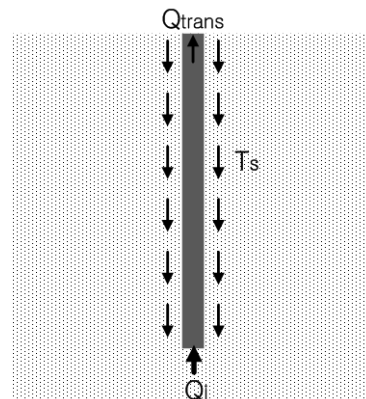


그림 15. ABG 하이브리드 공법에서 저항개념도

$$Q_i - T_s + Q_{trans} = 0 \quad (1)$$

최대프리스트레스는 ABG의 전면에서 프리스트레스 하중이 전이되는 시점($Q_{trans} > 0$)으로, 이때의 프리스트레스 하중(Q_i)은 모두 주면마찰력(T_s)에 의해 저항하게 된다.

$$Q_i = T_s \quad (2)$$

철근과 그라우팅에 의해서 전이되는 하중은 모두 그라우팅과 지반사이의 주면마찰력에 의해서 저항한다고 볼 수 있으며, 이를 나타내면 식 (3)과 같다.

$$T_s = E_{eq} \epsilon A_{eq} \quad (3)$$

여기서, E_{eq} 는 철근과 그라우팅의 등가탄성계수, ϵ 은 변형률, A_{eq} 는 그라우팅과 철근의 단면적을 뜻한다. 최대프리스트레스가 발생하는 시점, 즉 내하체의 압축력이 전면에서 도달할 때의 주면마찰력을 하중전이주면마찰력(τ_{trans})으로 정의하며, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{trans} PL = E_{eq} \epsilon_{trans} A_{eq} \quad (4)$$

여기서, P 는 그라우팅의 원주, L 은 정착장의 길이, ϵ_{trans} 은 프리스트레스가 전면에서 도달했을 때의 변형률을 뜻한다. 하중전이 주면마찰력을 산정하기 위해서는 프리스트레스가 전면에서 도달했을 때의 변형률(ϵ_{trans})을 판단하여야 한다. 따라서 본 현장시험에서 실시한 프리스트레스가 0kN인 시험(P.S-1)에서 철근이 받는 하중-변위곡선과 쓰일네일링의 하중-변위곡선을 그림 16과 같이 서로 비교해 보았다.

그림 16에서 보는 것과 같이 인발초기에는 ABG 하이브리드 공법에 삽입된 철근의 거동과 쓰일네일링에 삽입된 철근의 거동이 거의 일치한다. 그러나 변위가 0.86mm 발생하는 지점(철근이 받는 하중=45.18kN, ABG전체가 받는 하중=98kN)부터 인장력이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 내하체의 압축력이 전면으로 도달하여 실제 철근이 받는 인장력보다 작은 힘을 받기 때문이다. 따라서 이 시점을 하중이 전면으로 전이된 시점으로 정의할 수 있으며, 이때의 변형률을 산정하고 이 값을 이용하여 하중전이 주면마찰력(τ_{trans})을 산정하면 식 (5)와 같다(단, 길이(L)=4.3m의 경우).

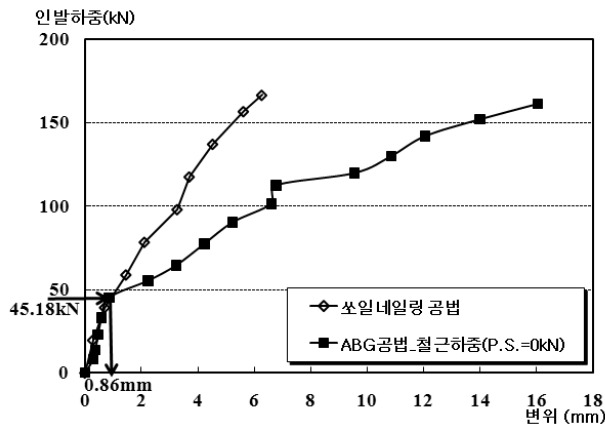
$$\tau_{trans} = \frac{E_{eq} \epsilon A_{eq}}{PL} = \frac{33,000,000 \times \frac{0.00086}{4.3} \times \frac{0.1455^2 \times \pi}{4}}{0.1455 \times \pi \times 4.3} = 55.83 \text{ kPa} \quad (5)$$

하중전이 주면마찰력을 바탕으로 최대프리스트레스를 산정할 수 있다. 다만, 최대프리스트레스는 ABG의 정착장 길이에 비례하게 되므로 다음 식으로 구할 수 있다.

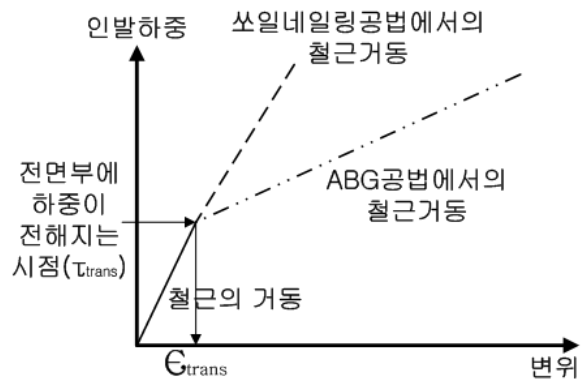
$$Q_i = \tau_{trans} PL \quad (6)$$

따라서 최대프리스트레스를 길이에 따라 나타내게 되면 그림 17과 같다.

그림 17에서 보는 것과 같이 길이에 따라서 최대프리스트레스가 점점 커지는 것을 알 수 있다. 하지만 PC강연선의 항복하중을 고려하였을 때 프리스트레스는 한계를 가지며 이를 한정시켜야한다. 본 연구의 현장시험에서 실시한 ABG의 내하체 길이를 제외하고 정착장 길



(a) ABG 하이브리드 공법에서 철근이 받는 하중



(b) 전면부 하중도달 시점

그림 16. 전면부에 프리스트레스 하중이 도달하는 시점 판단

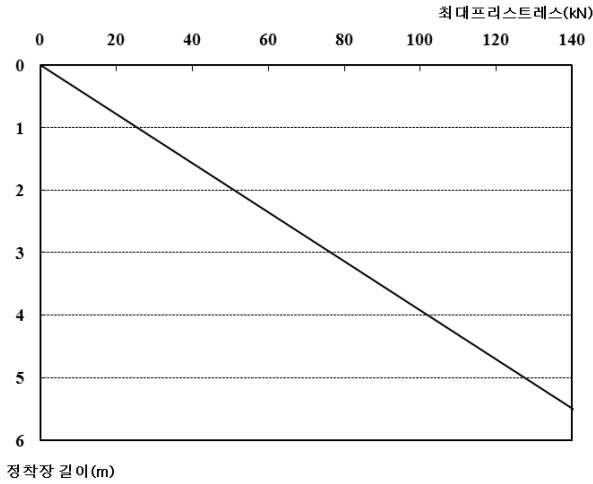


그림 17. 길이에 따른 프리스트레스(직경 0.145m의 경우)

이를 4m로 보았을 때 최대프리스트레스 하중은 약 100kN 정도로 볼 수 있다. 따라서 본 연구와 같이 4.3m 정도의 ABG를 시공할 경우, 프리스트레스를 100kN 이하로 주어 야 한다. 이는 현장시험 결과와도 유사한 것을 알 수 있다.

4.2 철근의 압축력 산정

프리스트레스를 가하게 되면 PC강연선을 통해 전해진 하중이 내하체에서 그라우팅과 철근으로 전이된다. 본 논문에서는 프리스트레스에 따라 철근이 받는 압축력이 얼마나 될 것인지를 판단하고자 하며, 프리스트레스에 따른 그라우팅과 철근의 하중분배 양상은 그림 18과 같다.

프리스트레스를 가하게 되면 철근과 그라우팅으로 하중이 분배되게 된다. 따라서 철근과 그라우팅이 받는 응력은 각각 식 (7), 식 (8)과 같다.

$$\sigma_s = E_s \epsilon \quad (7)$$

$$\sigma_g = E_g \epsilon \quad (8)$$

여기서, σ_s 는 철근이 받는 응력, σ_g 는 그라우팅이 받는 응력, E_s 는 철근의 탄성계수, E_g 는 그라우팅의 탄성계수, ϵ 은 변형률을 뜻한다. 철근과 그라우팅이 일체거 동한다고 가정한다면 식 (7)과 식 (8)에서 변형률이 동일하므로, 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_g = \frac{E_g}{E_s} \sigma_s \quad (9)$$



그림 18. 프리스트레스(Q_i)의 하중분배

프리스트레스 하중은 철근이 받는 하중(F_s)과 그라우팅이 받는 하중(F_g)으로 나타낼 수 있으므로 식 (10)과 같다.

$$Q_i = F_s + F_g = \sigma_s A_s + \sigma_g A_g \quad (10)$$

여기서, A_s 는 철근의 단면적, A_g 는 그라우팅의 단면적을 뜻한다. 식 (9)를 식 (10)에 대입하게 되면 다음과 같다.

$$Q_i = \sigma_s A_s + \frac{E_g}{E_s} \sigma_s A_g \quad (11)$$

식 (11)을 정리하여 철근이 받는 하중(F_s)으로 나타내면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = \frac{Q_i}{\left(A_s + \frac{E_g}{E_s} A_g \right)} A_s \quad (12)$$

본 현장시험의 결과로 ABG의 길이가 4.3m이고 구근 직경이 0.145m에 대한 최대프리스트레스 하중이 102kN 정도로 나타났으며, 프리스트레스가 102kN 일 경우 철근이 받는 하중을 산정하게 되면 다음과 같다.

$$F_s = \frac{102.03}{\left[\frac{0.025^2 \pi}{4} + \frac{28}{200} \left(\frac{0.145^2 \pi}{4} - \frac{0.025^2 \pi}{4} \right) \right]} \times \frac{0.025^2 \pi}{4} = 18.21kN \quad (13)$$

그라우팅의 직경이 0.145m, 길이가 4.3m인 ABG에 프리스트레스를 약 100kN로 가하였을 때 철근이 받는 하중은 약 18kN정도인 것을 알 수 있다. 이는 현장인발 시험에서 철근변형률계의 측정값과 비교해 보았을 때 도 비슷한 수치를 나타낸다.

본 연구에서 철근에 작용하는 압축력을 약 18kN으로

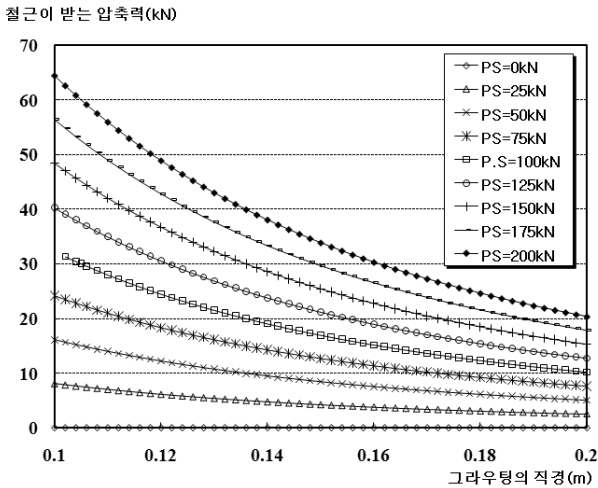


그림 19. 프리스트레스와 그라우팅 직경에 따른 철근의 압축력 산정

산정하였지만 이는 프리스트레스가 100kN에 그라우팅의 직경이 0.145m인 경우에 국한된 것으로, 철근에 작용하는 압축력은 그라우팅의 직경과 프리스트레스의 크기에 따라 변화하는 것을 알 수 있다. 프리스트레스가 증가함에 따라 비례하여 철근에 작용하는 압축력은 증가하게 되며, 그라우팅의 직경이 증가함에 따라 철근에 작용하는 압축력은 직경의 제곱에 반비례하게 된다. 따라서 그라우팅의 직경과 프리스트레스의 크기에 따라 철근이 받는 하중을 나타내면 그림 19와 같다.

4.3 프리스트레스에 따른 보강재의 항복하중

하중전이 이론을 통해서 최대 프리스트레스를 규명하였으며, ABG 하이브리드 공법을 적용할 경우 항복하중이 얼마나 될 것인지에 대한 규명을 하여야 한다. 현장 시험에서 실측된 그라우팅 직경은 0.145m로 다소 크게 나타났다. 그러나 설계에 적용되는 그라우팅의 직경은 0.105m이므로 이 경우로 가정하여 보강재의 항복하중을 산정하고자 한다. 보강재의 항복하중을 산정하기 위해서는 철근의 거동이 가장 중요한 요소로 작용한다. 철근의 거동은 프리스트레스와 동시인발에 의해서 결정되며, 두 가지 요소 중 프리스트레스에 의한 철근의 압축력은 식 (12)에 의해서 산정할 수 있다. 따라서 동시인발 시 철근의 거동을 파악하여야 하며, 작용하중의 모식도는 그림 20과 같다.

동시인발을 하게 되면 선단부의 내하체에서는 하중 Q_i 가, 전면부의 철근에서는 인장하중 Q_{i+1} 이 작용하게 되며, 이 둘을 합한 하중은 철근과 그라우팅이 받는 하

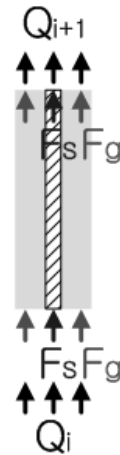


그림 20. 동시인발 시 하중분배

중으로 분리되게 된다. 즉, 다음 식이 성립한다.

$$Q_i + Q_{i+1} = F_s + F_g = \sigma_s A_s + \sigma_g A_g \quad (14)$$

식 (9)를 식 (14)에 대입하게 되면 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_i + Q_{i+1} = \sigma_s A_s + \frac{E_g}{E_s} \sigma_s A_g \quad (15)$$

식 (15)를 정리하여 철근이 받는 하중(F_s)으로 나타내면 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = \frac{Q_i + Q_{i+1}}{\left(A_s + \frac{E_g}{E_s} A_g \right)} A_s \quad (16)$$

철근의 인장력(Q_{i+1})은 탄성계수(E_s)와 변형률(ϵ_s)의 관계로 나타낼 수 있다.

$$Q_{i+1} = E_s \epsilon_s A_s \quad (17)$$

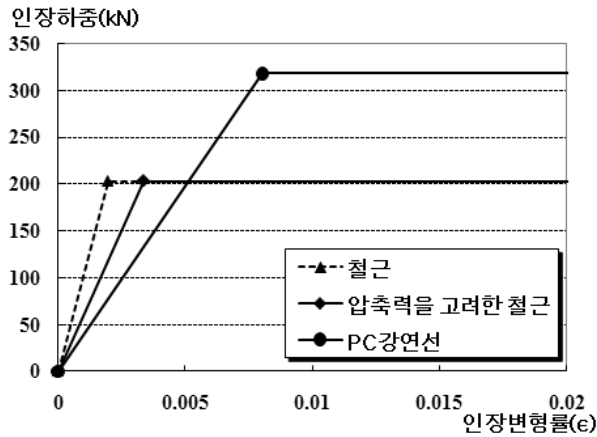
철근과 PC강연선을 동시에 인발하면 PC강연선의 변형률(ϵ_{pc})과 철근의 변형률(ϵ_s)이 동일하기 때문에 철근과 PC강연선의 물성을 이용하여(표 1 참조) 식 (17)을 정리하게 되면 식 (18)과 같다.

$$Q_{i+1} = \frac{E_s}{E_{pc}} E_{pc} \epsilon_{pc} \frac{A_s}{A_{pc}} A_{pc} = \frac{204}{200} E_{pc} \epsilon_{pc} \frac{506.7}{197.4} A_{pc} = 2.6 Q_i \quad (18)$$

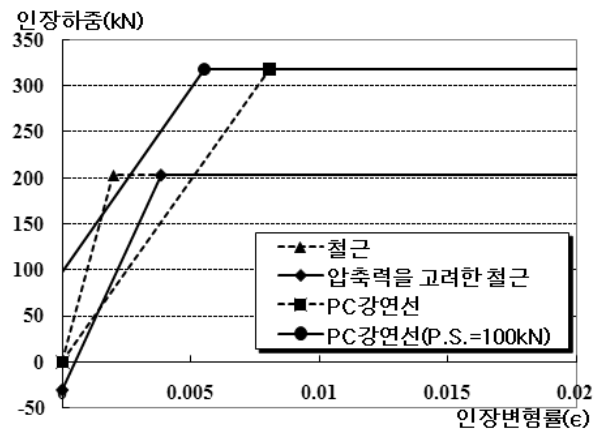
즉, 철근과 PC강연선을 동시인발 시 프리스트레스에 의한 압축력을 고려하지 않는다면 그림 3(a)에서 보는

것과 같이 철근의 인장력(Q_{i+1})이 PC강연선에서 잡아 당기는 하중(Q_i)보다 약 2.6배 정도 더 큰 것을 알 수 있다. 하지만 현장시험에서는 철근과 PC강연선과 비슷한 하중을 받았다. 이는 PC강연선의 압축력과 철근의 인장력이 중첩하여 철근이 받는 인장력이 감소하였기

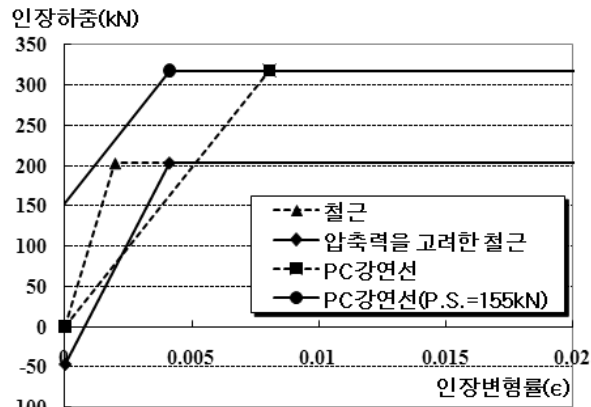
때문이다. 따라서 식 (18)에서 구한 철근의 인장력에서 식 (16)에서 산정한 철근이 받는 하중(F_s)를 빼주게 되면 동시인발 시 압축력을 고려한 철근의 인장력 증가량($\Delta Q_{i+1,comp}$)을 산정할 수 있다.



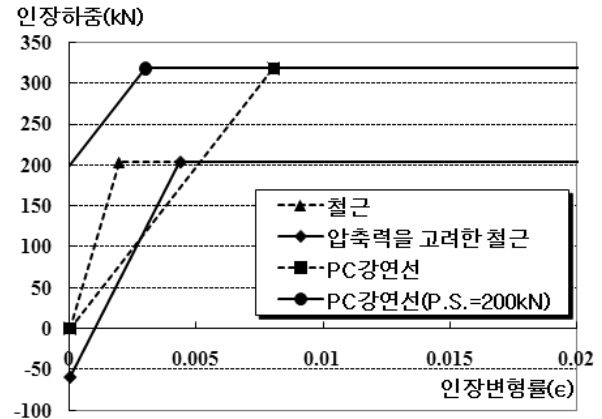
(a) 프리스트레스가 0kN인 경우(항복하중:336kN)



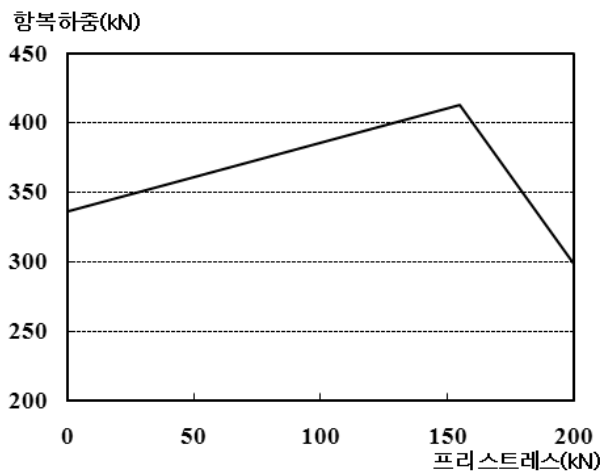
(b) 프리스트레스가 100kN인 경우(항복하중:385kN)



(c) 프리스트레스가 155kN인 경우(항복하중:413kN)



(d) 프리스트레스가 200kN인 경우(항복하중:298kN)



(e) 프리스트레스 증가에 따른 항복하중의 변화양상

그림 21. 프리스트레스 변화에 따른 항복하중 산정

$$\Delta Q_{i+1,comp} = 2.6Q_i - \frac{3.6Q_i}{\left(A_s + \frac{E_g}{E_s}A_g\right)}A_s \quad (19)$$

식 (12)는 프리스트레스를 가하였을 때 철근이 받는 압축력이고, 식 (19)는 동시인발 시 철근이 받는 압축력을 고려한 철근의 인장력 증가분을 나타낸 것이다. 두 식을 바탕으로 프리스트레스 변화에 따른 항복하중을 산정할 수 있으며, 그래프의 y절편 값은 식 (12)에 의해 결정되고 그래프의 기울기는 식 (19)에 의해 결정된다. 프리스트레스 하중이 0kN, 100kN, 155kN, 200kN일 때의 하중-변형률곡선 및 프리스트레스 변화에 따른 항복하중 변화는 그림 21에 나타나 있다.

그림 21(a)에서 보는 것과 같이 프리스트레스가 0kN인 경우, 식 (19)를 통해서 철근의 하중-변위곡선을 산정하였으며 압축력이 고려되었기 때문에 곡선의 기울기가 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 철근의 항복시점이 PC강연선의 항복시점에 비해 빠르다는 것을 알 수 있으며, 철근이 203kN 만큼 항복하중을 받을 때 PC강연선은 133kN의 하중을 받아 총 보강재의 항복하중이 336kN 정도로 나타났다. 프리스트레스가 100kN인 경우, 식 (12)를 통해서 초기에 철근이 받는 압축력이 30kN 정도로 나타났다. 그림 21(b)에서 볼 수 있듯이 철근이 30kN의 하중을 더 저항할 수 있을 뿐만 아니라 동시인발 시 철근에 발생하는 압축력 때문에 철근의 하중-변위곡선의 기울기가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 철근의 인장저항범위가 PC강연선의 저항범위 안에 위치하기 때문에 두 보강재의 일체거동 뿐만 아니라 항복하중이 385kN으로 철근의 항복하중보다 약 2배 정도 더 큰 항복하중을 가지게 된다. 프리스트레스가 155kN인 경우, 프리스트레스에 의한 압축력이 46kN이며, 전체 항복하중은 413kN으로 가장 높은 항복하중을 가진다. 그림 21(c)에서도 보이듯이 철근의 항복시점과 PC강연선의 항복시점이 동일한 구간이라는 것을 알 수 있다. 따라서 이론적으로 항복하중을 최대로 증가시킬 수 있는 프리스트레스 하중은 155kN이다. 그러나 만약 PC강연선이 먼저 항복하여 파단이 발생하게 되면 철근은 PC강연선의 하중을 견딜 수 없으므로 더 이상 보강재의 효과를 볼 수 없다. 따라서 철근의 저항범위가 PC강연선의 저항범위에 충분히 들어와서 항복하중이 작은 철근에서 먼저 파단이 발생하는 방향으로 보강재의 저항시스템을 유도해야 한다. 그림 21(d)에서도 보이듯이 프리스트레스를 200kN으로 가하게 되면 PC강연선이 저항할

수 있는 여유하중이 작아서 철근보다 먼저 항복이 발생하는 것을 알 수 있다. 철근에 비해 항복하중이 큰 PC강연선이 먼저 항복하기 때문에 보강재의 항복하중 역시 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 프리스트레스에 따른 항복하중의 분포를 보았을 때 프리스트레스가 0kN에서부터 155kN까지 지속적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 155kN 이후 PC강연선의 항복이 철근보다 먼저 발생하여 보강재의 항복하중이 급격히 감소하게 된다. 따라서 철근과 PC강연선이 일체거동을 보이기 위해서 155kN 이하로 프리스트레스를 주어야 하며, 철근의 항복이 먼저 발생하도록 하는 안정적인 보강재 시스템을 위해서 100kN 정도의 프리스트레스를 가하는 것이 타당하다고 판단된다.

그림 17에서 제안한 것과 같이 정착장의 길이가 무한히 길어진다고 해서 프리스트레스를 무한히 증가시킬 수 없다. 이는 프리스트레스를 가한 후 남아있는 PC강연선의 여유하중이 작을 경우 PC강연선이 먼저 항복하기 때문이다. 따라서 철근의 항복시점과 PC강연선의 항복시점이 동일한 프리스트레스를 정착장의 길이와 상관없이 한계프리스트레스(P_{lim})로 정의하였으며, 그림 21(e)에서도 보이듯이 일반적인 경우 한계프리스트레스(P_{lim})는 155kN으로 한다.

5. 결론

본 논문에서는 ABG 하이브리드 공법의 인발저항력의 증가양상과 철근과 PC강연선이 일체거동 할 수 있는 최적의 ABG 하이브리드 공법을 제안하기 위하여 현장인발시험 및 배경이론을 제시하였으며, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 최적의 ABG 하이브리드 공법을 제안하기 위하여 프리스트레스를 변화하여 현장인발시험을 한 결과 (구근직경=0.145m), 프리스트레스가 작은 경우(0kN, 59kN), 초기에 내하체에서 발생하는 압축력이 전면부까지 전이되지 않아 철근과 PC강연선의 일체거동을 보이지 않았으며, 프리스트레스가 큰 경우 (137kN, 196kN), PC강연선의 여유하중이 작아 철근보다 먼저 항복하였다. 프리스트레스를 98kN으로 주었을 경우 내하체의 압축력이 전면까지 전이되어 동시인발 시 압축력과 인장력의 중첩효과가 즉시 발휘되었고 PC강연선과 철근이 일체거동을 보이는

것을 알 수 있었으며, 이때 ABG 하이브리드 공법의 기능을 최적화할 수 있을 것으로 판단된다.

- (2) 현장인발시험 시 각 CASE별로 철근 및 그라우팅 변형률계의 측정결과, ABG 하이브리드 공법은 프리스트레스를 가할 때 ABG는 지속적으로 압축력을 받다가 동시인발 시 내하체로부터 2.5m 지점에서 압축력과 인장력이 중첩되는 구간이 발생하였다. 이에 반하여 쏘일네일링에 대한 인발시험 결과 네일의 전체 구간에서 인장력이 작용하였으며 전면에서부터 선단으로 하중이 전이되는 양상을 보였다.
- (3) 하중전이 이론을 바탕으로 프리스트레스 하중이 전면부로 전이되는 것을 규명하였다. 하중전이 주면 마찰력과 최대프리스트레스를 제안하였으며, 최대 프리스트레스는 100kN 정도로 실제 현장인발시험 값과 유사한 값을 나타냈다.
- (4) 프리스트레스와 동시인발 시에 철근이 받는 압축력을 이론적으로 규명하였으며, 이를 바탕으로 프리스트레스 변화에 따른 ABG 하이브리드 공법의 항복하중을 산정하였다. 프리스트레스가 155kN일 때 항복하중이 413kN으로 가장 크며, 155kN을 넘어가게 되면 철근이 항복하기 전에 PC강연선이 항복하게 되어 보강재의 기능을 더 이상 할 수 없게 된다. 따라서 한계프리스트레스를 155kN으로 제안하고자 하며, 실제 설계에서는 최대 프리스트레스를 100kN 정도로 가하여 철근과 PC강연선이 일체된 거동을 하도록 함이 바람직하다.

- (5) 프리스트레스를 100kN 정도로 하여 시공하였을 경우 ABG 하이브리드 공법에 삽입된 보강재의 항복하중은 385kN으로 산정되었으며, 이는 쏘일네일링 공법과 비교해 약 2배정도 더 큰 값을 나타낸다.

참 고 문 헌

1. 김낙경 (2001), 인장형 앵커와 압축형 앵커의 하중전이에 관한 연구, *한국지반공학회논문집*, 제17권 3호, pp.59-68.
2. 김태섭 (2009), 가압식 압축형 지반 앵커의 인발저항 증대효과 연구, 박사학위논문 고려대학교.
3. 김홍택, 강인규, 박사원, 고용일, 권영호 (1999), 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 안정해석 및 신뢰도 분석, *한국지반공학회지*, 제 15권 2호, pp.105-127.
4. 박시삼, 김홍택, 최영근 (2004), 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 안정해석 및 설계, *한국지반공학회 논문집*, 제20권 7호, pp.197-206.
5. 서형준, 박성원, 정경환, 최항석, 이인모 (2009), 공평장이론에 의한 압력식 쏘일네일링의 인발저항력 산정, *한국지반공학회논문집*, 제25권 7호, pp.35-46.
6. John, P. T. and Wayne, G. J. (2005), "Landslide Stabilization Using Soil Nail and Mechanically Stabilized Earth Walls: Case Study", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No.2, pp.141-150.
7. Liang, Y. R. and Feng, Y.X. (1997), "Development and Application of Anchor-Soil Interface Models", *A Short Course on Soil Nailing, Ground Anchoring, and Anchored Excavation*, The Graduate School of Industrial Technology and Environment, Dongguk University.
8. Tan, Y., Chow, C. (2004), "Slope Stabilization Using Soil Nails: Design Assumption and Construction Realities", *Malaysia-Japan Symposium on Geohazards and Geoenvironmental Engineering*, Bangi, Malaysia.

(접수일자 2010. 4. 26, 심사완료일 2010. 7. 22)