

선단확장형 파일(Ext-Pile, 이엑스티 파일)

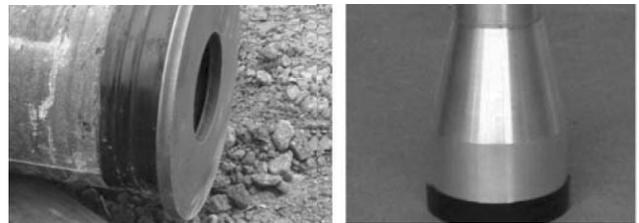
Ext-Pile을 적용한 파일기초의 설계 및 시공법

1. 개요

산업화의 가속 및 경제 성장과 더불어 건축 및 토목구조물이 대형화, 중량화 되어 가는 경향으로 인해 구조물의 하중을 지반에 전달하여 지지하는 깊은 기초 중 파일기초가 많이 이용되고 있다. 국내의 경우 풍화대가 비교적 발달되어 있고, 기반암의 깊이가 그다지 깊지 않은 지반 특성상 파일 선단의 지지력으로 구조물을 지탱하는 선단지말뚝이 주를 이루고 있다. 그러나 예전과는 달리 민원을 이유로, 또는 지반 특성에 의하여 직타공법에 의한 파일공사가 불가한 경우가 최근 들어 급증하면서 파일공사비는 시공주체로 하여금 고민의 대상이 아닐 수가 없게 되었다. 때문에 원가절감, 공기단축, 품질향상 등의 경제성 확보를 위한 방안으로 재료나 구조, 시공방법 등을 개선한 특수파일 및 시공법에 관한 기술개발이 활발히 진행되고 있다.

이러한 맥락에서 개발된 신공법 중 가장 획기적인 성과를 보여주고 있는 Ext-Pile(Pile with an Extended Head)은 일반적으로 사용되는 기성 PHC(Prestensioned Span High Strength Concrete Piles) 파일 선단의 확장을 통해 선단지지력을 증가시켜 파일의 자체내력 중 50~80% 만이 설계지지력으로 발현되는 문제점을 해결하여 파일 자체내력의 손실율을 최소화한 기술이다. 현재 이엑스티 파일은 상용화 단계인 Ext-ST1-Pile(그림1)의 왼쪽을 비롯하여 파일 자체의 선단을 확장한 Ext-CON1-Pile(그림1)의 오른쪽 등 10여개의 국내특허 및 국제특허를 출원 중에 있다.

더불어 지속적인 R&D를 통한 꾸준한 연구개발로 국내 파일기술 발전의 견인차 역할을 하고자 최선의 노력을 다 하고 있다.



〈그림1〉 선단확장보강판을 설치한 EXT 파일

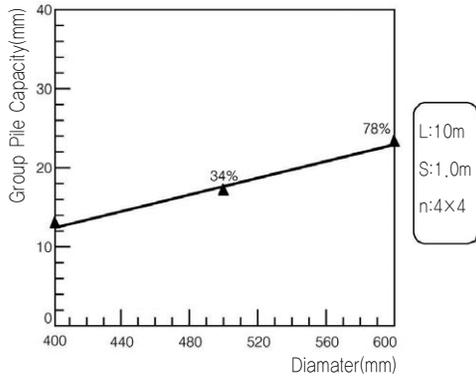
2. 선단지지력을 향상한 이엑스티 파일

2.1 이엑스티파일의이론적 배경

건축 및 토목공사 중 파일공사에 있어 PHC 파일의 사용량은 점차 증가하여 왔다. 더불어 기존에 많이 사용하던 직경 D350의 PHC 파일은 거의 사용치 않게 되었고 이제는 D400의 PHC 파일이 주를 이루고 있다. 하지만 근래 들어 점차적으로 D450, D500 및 D600 등의 좀 더 큰 직경의 파일을 사용하는 예가 많아지고 있다. 이러한 이유는 파일의 선단면적이 클수록 그 허용지지력 또한 증가한다는 이론적 배경에 의해 파일의 시공 수량을 줄여줌으로써 공사비의 절감, 공기단축 등의 효과를 기대하기 때문이다.

최근 이러한 사실을 입증하는 연구결과가 성균관대학교 토목환경공학부에서 발표되어 주목을 받고 있다. 이들의 연구 결과에 따르면 군말뚝의 지지력 거동 특성을 규명하기 위하여 3차원 유한요소해석을 통해 선단확장크기(D: 400~600)에 따른 선단지지력 변화양상을 고찰하였으며, 또한 파일의 길이(L: 10~20m), 개수(n: 2×2, 4×4, 6×6) 및 간격(S: 1.0~1.5m) 등의 다양한 설계인자에 대한 매

개변수연구를 수행하여 영향인자에 따른 선단 면적의 영향 및 선단지력 변화 추이를 분석하였고, 그 결과 선단의 면적이 증가함에 따라 그에 상응하는 선단지력의 상당한 증가효과(그림2)를 획득하였고, 파일간격 및 길이의 증가는 각각 선단면적의 영향을 증가, 감소시키는 인자로 작용하며, 파일개수가 선단면적에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 파악되었다 한다. <표1>



<그림2> 파일의 직경(D)의 증가에 따른 선단지력의 증가 효과

따라서 선단확장의 적용을 통해 파일 자체내력이 설계지지력으로 최대한 발휘되도록 유도한 이엑스트 파일은 매우 효율적인 공법으로 평가되었다.

<표1> 파일수량, 간격, 길이에 따른 선단지력 증가율의 변화

D (mm)	수량별 증가율(%)			간격별 증가율(%)				길이별 증가율(%)			
	2x2	4x4	6x6	4x4인 경우		6x6인 경우		4x4인 경우		6x6인 경우	
				1.0m	1.5m	1.0m	1.5m	10m	20m	10m	20m
500	36	34	36	29	35	25	34	34	29	36	25
600	79	78	77	58	67	54	64	78	58	77	54

2.2 이엑스트파일의 특징

(1) 손쉬운 이엑스트 파일의 제작

이미 알고 있듯이, 파일의 선단지력은 선단의 면적에 비례한다. 원의 면적은 반지름의 제곱에 비례한다는 점을 착안한다면, 단면이 원형으로 이루어진 파일의 선단 면적은 <표2>에서 보듯이 약간의 반지름을 확장해 줌으로써 파일의 선단면적이 반지름의 제곱으로 증가하게 되므로 그만큼의 선단지력을 손쉽게 높여 줄 수 있다.

<표2> 원의 반지름 증가율에 따른 면적의 증가율 비교

지름 (mm)	400	410	420	430	440	450
면적 (㎡)	0.1256	0.1384	0.1519	0.1661	0.1808	0.1962
지름의 증가율	0%	2.5%	5%	7.5%	10%	12.5%
면적의 증가율	0%	10%	21%	32%	44%	56%

통상적으로 사용될 파일의 규격에 비해 50~60mm 정도를 확장한 선단확장보강판(그림3)을 사용하는 것이 가장 효과적이면서 경제적이다.



<그림3> 선단확장보강판

이엑스트 파일의 장점 중 하나는 그 개념이 간단한 만큼 제작에 있어서도 매우 손쉽다는 것이다. <그림4>에서 보듯이 구동로라와 보조로라로 구성된 용접 좌대 위에 파일을 수평으로 거치한 후에 선단부 청소를 하고 선단확장보강판을 밀착하여 용접하여 줌으로써 이엑스트 파일의 제작이 완료되는 것이다. 이러한 방법은 작업의 안전성 및 용접품질에 있어서도 매우 효과적인 방법이라 할 수 있다.



<그림4> 이엑스트 파일 현장 제작 장면

(2) 뛰어난 현장 적용성

이엑스트 파일은 선굴착 후향타 공법에 사용하도록 고안되었다. 이는 직향타를 하게 될 경우, 선단의 직경이 본체의 직경에 비해 좀 더 커졌으므로 필연적으로 발생하는 문제점인데, 향후 선단확장부의 길이가 2~3m가 되도록 제작하게 될 Ext-CON1-Pile이 생산될 경우 충분히 극복될 수 있을 것으로 판단 된다.

이엑스트 파일의 시공 방법은 기존 공법(SIP, DRA)과 크게 다르지 않다. 다만, 선굴착 후향타 공법에 있어 기존 공법과 다른 점은 다음의 <표3>와 같다.

〈표3〉 선굴착 후향타 공법에 있어 시공법의 차이점

공법	기존 PHC 파일 사용	이엑스티 파일 사용
시공순서	Leader의 수직도 확인, Auger로 굴착	좌동
	설계심도까지 굴착	지지기반까지 굴착 (N치 50/10~6해당)
	시멘트 페이스트 주입하며 Auger로 선단 교반	제자리에서 고압분사로 Slime 제거
	Auger인발	Cement Paste 주입하며 Auger인발
	자중에 의한 파일 침설	좌동
	항타로 허용오차 이내 타입	경타로 안착

시공 방법에 있어 차이점은 굴착 완료 시점에서 선단 교반을 하지 않는다는 것이다. 이는 슬라임(Slime, 잔토)을 완전히 제거하고자 하는 의도에서 나온 것이다. 실제로 이엑스티 파일의 시공법대로 제자리에서 고압분사와 동시에 정회전을 유지해 주었을 때 슬라임이 완전히 배토되고 있음이 현장시공 과정에서 확인되었다.

물론, 장비면에 있어서는 기존의 장비를 100% 그대로 활용할 수 있다. 때문에 현장에 즉시 적용이 가능한 것이며, 이미 재료적 측면에서 시공지지력을 확보하였으므로 작업원들에게 별도의 기술지도도 필요치 않으면서 파일의 시공품질은 극대화 될 수 있는 것이다.

(3) 획기적인 원가 절감

파일 공사비를 줄이기 위해서는 시공되는 파일의 수량을 최소화해야 한다. 결론적으로 그 해답은 파일의 시공지지력을 극대화하는 것이다. 파일 자체는 공장에서 제작되고 KS표준규격에 의해 품질관리가 됨으로 그 품질이 매우 높다. 그러나 설계 시 적용되는 설계지지력은 파일 자체내력에 비해 약 50~80% 정도만 사용되는 실정이다. 〈표4〉

〈표4〉 파일의 규격별 자체내력과 설계지지력의 차이

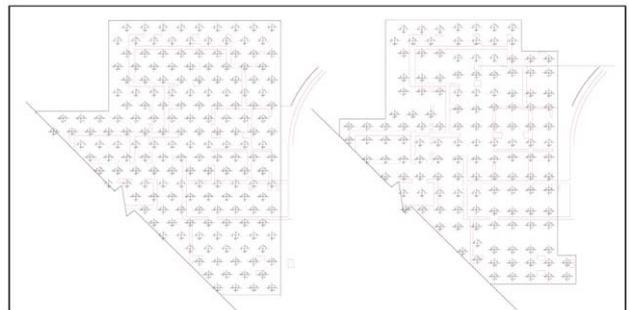
파일의 종류 (PHC A종)	D400	D450	D500	D600
파일 자체내력 (tf)	112	137	173	236
설계지지력 (tf)	60~80	80~100	100~120	120~140

파일 기초에서 이엑스티 파일의 축방향 허용지지력은 단일 파일로서의 축방향 항복지지력을 안전율의 하한치인 3이상(구조물기초설계기준, 건설부)으로 나눈 값을 허용지지력의 기준으로 한다. 이때, 축

방향 항복지지력을 구하기 위해서는 축방향 재하시험에 의해 추정하는 것이 가장 바람직하나, 일반적으로 비용이나 공기 문제로 설계전에 재하시험을 시행하는 것이 곤란한 경우가 많다. 따라서 정역학적 지지력 산정식에 의한 추정을 할 수 있는 것으로 되어 있다. 또한 현장에서 파일 공사를 하게 되면 시공초기에 재하시험을 실시하고 설계에 사용한 허용지지력의 타당성을 확인하여야 한다.

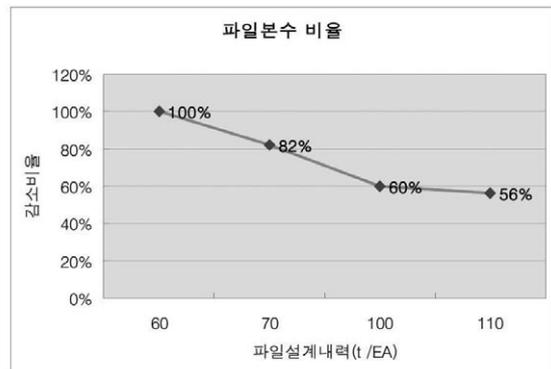
이엑스티 파일은 기존에 비해 높은 설계지지력을 가지기 때문에 현장에서 시공 시 특별한 관리시스템을 갖추고 있다. 이엑스티 파일 전문가가 현장에 상주하며 항타사에 대한 기술지도 및 품질관리기준에 의한 품질관리시스템은 현재까지 모든 현장에서 설계지지력을 100% 만족하는 성과를 이루고 있다.

〈그림5〉는 이엑스티 파일을 적용해 시공 완료된 어느 현장의 파일 기초 도면이다. 좌측의 기존 파일을 사용한 도면과 우측의 이엑스티 파일을 사용한 도면에서 보는 바와 같이 우선 파일의 수량이 많이 줄어든 상태임을 알 수 있다.



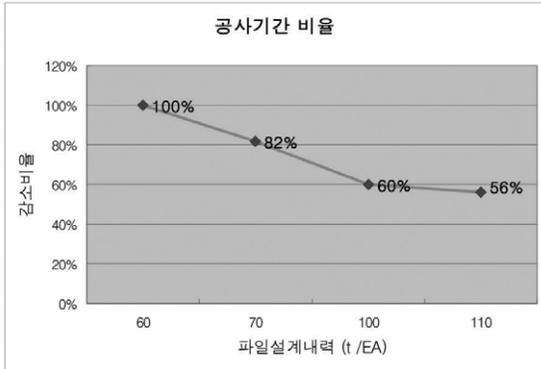
〈그림5〉 기존 PHC 파일(좌)과 이엑스티 파일(우) 설계 예

이렇듯 설계지지력에 따른 파일 수량의 차이를 도식화하면 〈그림6〉과 같다. 이 때에 60톤과 70톤은 기존 PHC 파일을 사용한 경우이고, 100톤과 110톤은 이엑스티 파일을 사용한 경우이며 평균 30% 정도의 수량을 줄이게 되고 그만큼의 공사비를 절감 할 수 있는 것이다.



〈그림6〉 설계지지력별 파일수량의 변화

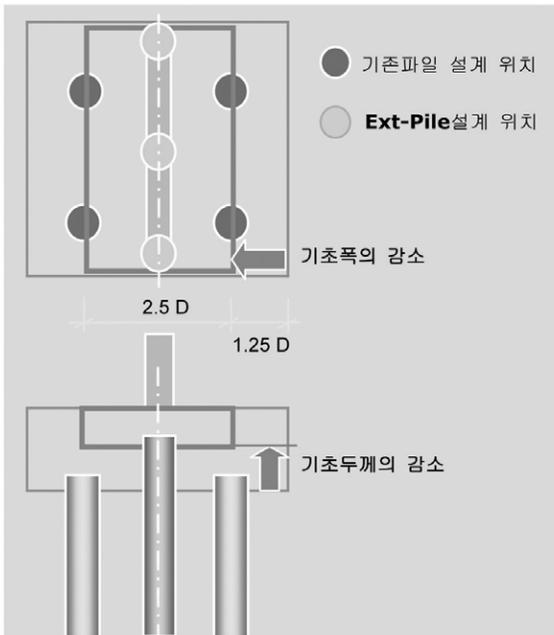
(4) 공기단축 및 간접비 절감



<그림7> 설계지지력별 파일 공사기간의 차이(1개동 예)

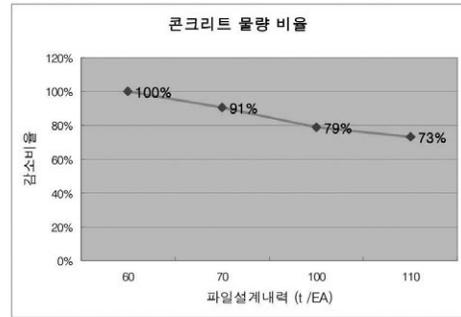
이엑스티 파일을 사용하여 파일의 시공 수량을 획기적으로 줄이게 되면, 절감된 수량만큼의 파일 공사 기간이 단축되게 된다. 따라서 단축된 공기만큼의 간접비, 금융비용 등이 추가로 절감되는 효과가 있으며, 줄어든 수량만큼의 건축폐기물이 발생하지 않아 매우 친환경적이며, 더불어 그만큼의 민원 소지도 제거하게 되는 덩까지 얻을 수 있게 된다.

(5) 파일 기초의 철근 및 콘크리트량 절감



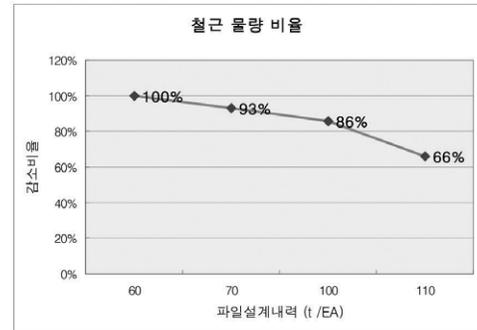
<그림8> 파일 기초의 철근, 콘크리트 절감에 관한 모식도

[그림8]은 벽식 구조를 가진 구조물의 단위 벽체에 있어 파일 기초를 설계하는 모식도이다. 중앙의 벽체를 통해 전달되는 하중은 기초를 통해서 파일에 전달되고, 파일은 그 하중을 각자 분담하여 지반으로 전달하게 된다.



<그림9> 파일 기초의 콘크리트 물량 절감에 관한 비율

따라서 설계지지력이 낮을수록 파일의 수량은 많아지게 될 것이고, 설계지지력이 높으면 그 반대가 될 것이다. 이때에 한정된 공간 안에 많은 수의 파일을 배치하려다 보면 그림의 기존 PHC 파일처럼 2열 또는 3열로 배치가 될 것이고, 수량이 적으면 이엑스티 파일처럼 벽체의 직하부에 1열로 배치할 수 있게 된다.



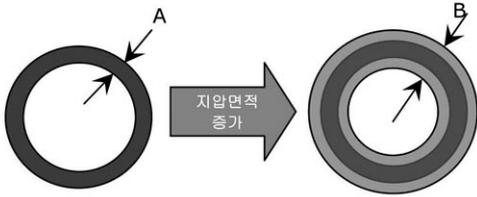
<그림10> 파일 기초의 철근 물량 절감에 관한 비율

따라서 이엑스티 파일을 적용하게 되면 파일 기초의 철근 및 콘크리트의 물량까지도 절감할 수 있게 되는 것이다. 그리고 설계지지력의 변화에 따른 철근 및 콘크리트의 물량 절감 비율은 <그림9> 및 <그림10>와 같다.

(6) 파일 선단의 폐색효과에 대한 고찰

이엑스티 파일의 선단부에 부착되는 선단확장보강판은 내경을 가진 도우넛 형태를 하고 있다. 이는 이엑스티(유)사의 구조설계팀에서 해당 현장의 지반에 대한 면밀한 분석과 설계지지력에 따라 구조 설계를 하여 그 규격을 결정하고 있다.

파일	기존 파일			이엑스티파일			초기시험 면적비율	비고
	기초두께 (A-mm)	지압면적 (cm)	초기시험 면적비율	확장 (mm)	확대두께 (B-mm)	지압면적 (cm)		
D400	65	684	100%	25	115	1,210	177%	
D450	70	835	100%	25	120	1,432	171%	
D500	80	1,055	100%	25	130	1,714	163%	
D600	90	1,441	100%	25	140	2,242	156%	



〈그림11〉 선단확장보강판에 의한 지압면적의 증가율

이 때 파일 살두께의 내, 외측으로 각 25mm를 확장하게 되면 파일의 단면적, 즉 지압면적이 평균 170%〈그림11〉이 증가하게 된다. 이 점은 현장을 책임지고 있는 시공기술자들에게는 매우 큰 의미를 지니게 된다.

이제 막 시공을 마친 파일의 주면에는 전혀 굳지 않은 시멘트 페이스트만 채워져 있고, 그나마도 유실 될 우려가 매우 큰 불안한 상황에서, 시공 된 파일의 지지력에 대해서 어떻게 확신을 할 수 있겠는가? 현재로서는 파일 동태하 시험 E.O.I.D (End Of Initial Driving) 을 해 보는 방법밖에는 없는 듯 하다.

책임이 있는 시공기술자는 이 시험 결과가 설계지지력에 최대한 가까이 만족시켜 주기를 간절히 바라게 될 것이다. 이 때에 선단확장보강판의 지압면적 170% 증가라는 사실은 그 진가를 발휘하게 되는 것이다. 지금까지 이엑스티 파일은 향상된 지압면적으로 인해 초기항타값, 즉 E.O.I.D 시험 결과치에서 매우 우수한 결과를 보여 왔다.

그러나, 선단 폐색효과라는 관점에서 보면 지압면적이 결코 170% 증가했다고 볼 수는 없다. 때문에 선단확장 효과가 그리 크지 않으리라는 주장이 제기 된 바가 있어 이에 대한 현장 실험을 실시하여 보았다.

〈표5〉 시험파일의 제원 및 시공 방법

파 일 종 류				시공법 : SIP(T4)	
종류	직경	두께	단면적	해머종류	낙하고
PHC-A	500 mm	90 mm	1,480 cm ²	DKH-7.0	0.8m

시험 방법은 선단확장보강판을 부착한 이엑스티 파일을 시공하되 시멘트 페이스트를 선단 주변에만 50cm 깊이로 채워주고 파일의 주면에는 전혀 주입하지 않았다. 그리고 주면의 토사가 붕괴되지 않도록 조치를 취한 후에 E.O.I.D 시험을 실시하여 지압면적의 증가로 인한 선단 지지력을 확인하였다. 이 후 5일이 경과하길 기다려 선단 부위의 시멘트 페이스트가 굳음으로 해서, 폐색효과에 의한 선단지지력의 변화를 확인하고자 하여 Restrike 시험을 실시하였다. 이 때에 주면마찰력은 전혀 발휘하지 않았으므로 그 결과값은 온전히 선단지지력의 변화량이 될 것이고, 선단 부위에 주입된 시멘트 페이스트에 의해 선단 폐색효과가 항타 초기의 지압면적 증가에 따른 선단지지력과 어떠한 차이를 보이는지를 판단하여 보았다.

〈표6〉 시험파일의 제원 및 시공 방법

구분	낙하고	CSX	TSX	RMX	EMX
E.O.I.D	0.8m	0.332	0.000	536	4.55
Restrike	0.8m	0.351	0.000	541	5.80

〈표7〉 시험파일의 제원 및 시공 방법

시험 방법	주면 마찰력 (ton)	선단 지지력 (ton)	전체 지지력 (ton)	허용 지지력 (ton/본)	안전율
E.O.I.D	25.1	498.8	524.0	209.6	2.5
Restrike	48.4	493.6	542.0	216.8	

결과에서 보듯이 선단지지력은 전혀 변화가 없었다. 이는 지지층의 지반 조건에 따라 차이는 있겠으나, 선단의 지압면적 증가가 곧 선단지지력을 결정하는 중요한 요소임을 입증하고 있는 것이다.

(7) 이엑스티 파일의 설계

이엑스티 파일은 설계지지력의 증대로 인해 벽체 하부에 일렬로 배치가 가능하게 되었다. 또한 기초의 철근 및 콘크리트 물량을 대폭 절감할 수도 있음을 이미 살펴 보았다. 여기에 더하여 초고층건물(30~50층)의 경우 배치 수량이 과다하여 PHC 파일을 사용할 수 없어, RCD나 PRD 등의 고비용, 장기간 공법을 부득이 택할 수 밖에 없었던 경우에 있어서도 이제는 PHC 파일을 사용한 설계가 가능하게 되었다.

3. 결 언

이엑스티 파일은 기성 PHC 파일에 직접 선단확장보강판을 붙이거나 파일 자체의 선단을 확장하여 공장제작 함으로써 품질에 대한 예측 가능한 설계를 할 수 있게 되었다. 이는 작은 직경의 파일 시공지지력을 파일 자체내력까지 끌어 올림으로써, 큰 직경의 파일을 사용한 것과 같은 효과를 얻어 파일의 사용 효율성 및 경제성을 크게 높일 수 있다.

또한, 파일 기초의 설계에 있어서도 파일의 수량이 줄어들어 따라 벽체나 기둥의 직하부에서 그 구조물의 하중을 효과적으로 지반에 전달하는 시스템이므로 이 기술을 이용하여 설계 할 때 파일의 수량을 절감함은 물론, 그에 따른 파일 기초의 두께 및 철근량도 자연스럽게 절감하게 되어 가장 경제적인 파일기초가 만들어 지게 되는 것이다.

이상과 같이 기존 PHC 파일을 사용하는 경우에 비하여 경제성, 안정성, 시공성을 확보할 수 있고, 파일의 수량이 줄어들어 해서 자연히 건축폐기물의 양도 감소하여 매우 친환경적이라 할 수 있다. 더욱이 공기가 단축되므로 경성비, 금융비 등도 함께 절감할 수 있는 부수적인 효과가 있는 매우 유용한 기술이다. 이러한 이유로 이엑스티 파일은 국내 건축공사의 발전에 있어 크게 기여할 것으로 기대된다.