

스테인레스 강섬유를 이용한 고성능 영구거푸집적용 벽체구조물의 설계변수 연구

A Study of Design Parameter for the Field Application of High Performance Permanent Form (HPPF) Using Stainless Steel Fiber

심종성* 오홍섭** 주민관*** 하우진****
Sim, Jong Sung Oh, Hong Seob Ju, Min Kwan Ha, Woo Jin

Abstract

In the construction site, to improve the man-dependent form work, non-stripping form has been studied but the developed non-stripping form was hard to applied with respect to the cost, form size and performance. This study is for evaluating the adaptability of the developed non-stripping form named as high performance permanent form (HPPF). To do this, the analytical approach and parametric study were performed based on the research for fundamental material characteristic of the HPPF. The target concrete structure is a wall structure because of its effectiveness of HPPF. To evaluate the structural efficiency of the HPPF applied wall structure, FEM analysis was performed to decide the maximum placing height at one time then it was applied to design the wall structure. In the result of the analysis, the HPPF applied wall structure showed the lots of advantages that it can reduce the cost resulted from reducing concrete and steel rebar even if it has same structural performance to the conventional concrete wall structure with same dimension. With this analysis result, it can be evaluated that the HPPF applied concrete structure can be a concrete structure with the long term durability in site.

요 지

건설현장에서 노동집약적 공정과정인 거푸집공정을 개선하고자 비탈형 영구거푸집에 대한 연구가 진행되어 왔지만 지금까지 개발된 영구거푸집의 경우, 그 크기 및 성능 등에 있어서 현장에 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 본 논문은 개발된 고성능 영구 거푸집(HPPF)이 적용된 구조물의 현장적용성 분석에 대한 연구로써, 기 실험된 HPPF의 재료 및 구조적 특성을 바탕으로 해석적 접근을 수행하였다. 대상 구조물로는 HPPF 재료특성이 효율적으로 발휘될 수 있는 벽체 구조물을 선정하였으며, 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 1회 최대 타설높이를 분석한 후, 이를 실제 벽체설계에 적용하여 HPPF 적용단면의 현장적합성을 검증하였다. 분석결과, 기존 콘크리트만으로 제작된 벽체구조물에 비해, HPPF의 추가적인 성능향상 효과로 인해 기존 콘크리트 벽체구조물 대비 콘크리트 및 철근량의 절감효과는 물론, 장기적으로 HPPF 적용 고내구성 벽체 구조물에 의한 직·간접적인 경제적 효과를 확보할 것으로 분석되었다.

Keywords : HPPF, Stainless steel fiber, Permanent form, High performance

핵심 용어 : HPPF, 스테인레스 스틸화이버, 영구거푸집, 고성능

* 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수

** 정희원, 진주산업대학교 토목공학과 조교수

*** 정희원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

**** 정희원, 평화엔지니어링 사원

E-mail : jssim@hanyang.ac.kr 010-6236-5143

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2008년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

지금까지 건설공사에서 거푸집 공정은 전체 공정의 20%~40%를 차지하는 고비용 노동집약적 공정이며 건설폐자재의 양상 등 추가적인 비용소모가 필연적으로 발생된다. 이를 해결하기 위한 방안으로 비탈형 영구거푸집에 대한 연구가 국내·외적으로 진행되어 왔지만 지금까지 개발된 영구거푸집의 경우, 그 크기 및 성능 등에 있어서 현장에 적용하기에는 많은 어려움이 있다.⁽¹⁾ 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결할 수 있도록 고안된 고성능 박판 영구거푸집(HPPF) 공법에 대해 심층성⁽²⁾에 의해 연구된 HPPF의 재료 및 구조적 특성검증을 바탕으로 실구조물에 적용할 수 있는 설계변수를 분석하고자 한다.

현장적용성 분석에 필요한 HPPF 적용구조물로는 벽체구조물을 선정하였다. 이는 HPPF 시공구조물 중 시공성 및 현장적용성에 대한 기본적인 성능이 분석될 수 있는 구조물 형식으로 분석되었기 때문이다.⁽⁶⁾

따라서 본 연구에서는 HPPF 적용 벽체구조물에 대한 설계 시 축압안전도 분석을 바탕으로 한 1회 최대 콘크리트 타설높이 제한 및 고성능의 HPPF 적용 벽체구조물의 단면감소효과 분석을 바탕으로 HPPF 벽체구조물의 현장적용성을 분석하고자 한다.

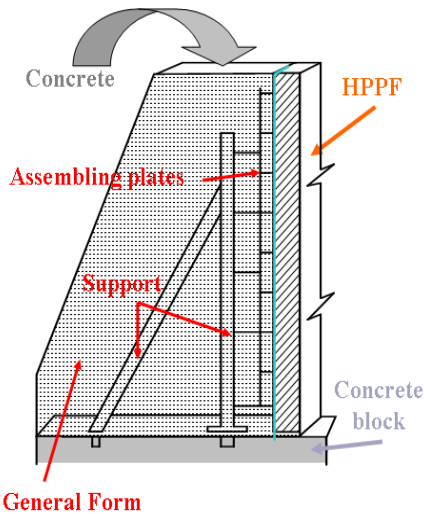


Fig. 1 Outline of installing HPPF to the wall structure

2. HPPF의 축압안전도 분석

2.1 해석개요

HPPF 적용구조물의 현장안전성 분석을 위하여 콘크리트 타설 시 발생 가능한 최대 축압에 대한 HPPF가 안정적인 구조특성을 발휘할 수 있는 구조기능을 정의한 후 이를 바탕으로 HPPF에 대한 콘크리트 허용타설 속도를 산정하여 현장 시공 평균타설 속도와 비교 분석하고자 한다.

HPPF의 안정적 구조기능의 정의 시 HPPF의 휨강도는 고려하지 않았으며, 대신 모든 외력을 HPPF에 매설된 인서트 볼트의 인발력이 지지하는 것으로 정의하였다. 이는 실제 대형구조로 조립된 HPPF이 축압을 받을 경우 축압에 대한 거푸집 패널자체의 휨저항성은 조립된 줄눈들의 힌지작용으로 인해 외력저항성에는 충분한 유효성이 없다고 판단했기 때문이다. Fig. 1은 HPPF의 설치개요도를 보이고 있으며 Fig. 2는 HPPF의 조립상세를 보여준다.

축압에 따른 콘크리트 타설속도는 콘크리트 표준시방서에서 제시하고 있는 시방기준을 바탕으로 산정하였으며 적용식은 다음과 같다.⁽⁵⁾

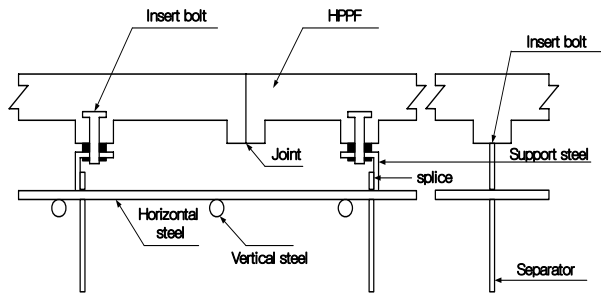


Fig. 2 Detail of assembling HPPF

㉠ 벽체로서 $R \leq 2\text{m/h}$ 인 경우

$$p = 7.8 \times 10^{-3} + \frac{0.78R}{T+20} \leq 0.1 \text{ MPa}$$

또는 $p = 2.4 \times 10^{-2}H \text{ (MPa)}$

㉡ 벽체로서 $R > 2\text{m/h}$ 인 경우

$$p = 7.8 \times 10^{-3} + \frac{1.18 + 0.245R}{T+20} \leq 0.1 \text{ MPa}$$

또는 $p = 2.4 \times 10^{-2}H \text{ (MPa)}$

여기서, p : 측압(MPa)

R : 타설속도(m/h)

T : 거푸집 속의 콘크리트 온도($^{\circ}\text{C}$)

H : 고려하고 있는 위치보다 위에 있는 균치
않은 콘크리트 높이(m)

Table 1 Definition of allowable strength of the HPPF form

Allowable strength of a permanent form		
Number of Insert bolts a HPPF	15	324kN
A Pull-out resistance of insert bolt	21.6kN	

* The result from experimental data(한양대학교, 2004)

앞서 언급한 바와 같이 콘크리트 타설시 발생하는 측압에 대한 저항은 HPPF 조립을 위해 매설된 인서트 볼트가 부담하는 것으로 해석상 가정하였다. 총 세 차례의 인서트볼트 실험결과와 산술평균값과 비교분석해보면 본 벽체구조물 해석에 적용된 극한인발강도는 약 21.6kN이다.⁽²⁾ 따라서 Fig. 1에서 보이듯이 HPPF 한 판당 매설된 인서트 볼트의 수는 15개이며 HPPF 한 판이 콘크리트 타설측압에 저항할 수 있는 허용강도는 324kN으로 정의될 수 있다. 다음 Table 1은 본 연구에서 사용된 HPPF 패널 하나당 허용강도를 정리한 표이다.

2.2 유한요소 해석

현장에 실스케일로 조립된 HPPF의 콘크리트 타설 측압 안전도를 분석하기 위하여 MIDAS/CIVIL을 사용하여 유한요소 해석모델을 구성하였으며, 박판형식의 HPPF의 재료모델링의 경우 유효두께 40mm 박

판 특성에 대해 측방향 응력지배효과를 반영하기 위하여 Plate 모델을 적용하였으며 압축강도, 휨 인장강도 및 탄성계수의 경우 각각 100MPa, 10.5MPa, 35,000MPa이 적용되었다.⁽⁶⁾ 또한 지점조건의 경우, 모든 외력을 인서트볼트가 부담하도록 인서트볼트 위치에 지점조건을 설정하였다. HPPF 시공형상에 대한 유한요소 모델링의 경우, 원판당 2,000 × 1,000mm의 크기로 규격화된 HPPF 패널을 대형구조물 크기의 확장을 위해 적합한 원판조립형상을 분석하였으며, 분석결과 가장 효과적인 조립형상으로서 장변 가로방향, 단변 세로방향 적용형식을 선정하였다.

콘크리트 타설 시 HPPF에 직접 작용하는 측압효과를 반영하기 위하여 깊이에 따른 콘크리트 단위중량에 의한 측압효과를 반영할 수 있는 Hydrostatic Pressure Load 형식을 적용하였다. 또한 측압적용시 현장타설 콘크리트 측압효과와 안전성을 확보하기 위하여 측압 적용시 콘크리트의 단위중량을 일반콘크리트에 사용하는 25kN/m³에 대해 활하중 계수인 1.7배에 해당하는 안전율을 적용한 42.5kN/m³을 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 3과 4는 HPPF 지점조건 및 측압적용 FEM 모델을 보여주고 있다.

Fig. 5는 콘크리트 타설측압에 의한 HPPF 응력분포를 나타내고 있는 그림이다. 그림에서 보이듯이 깊이에 따른 측압의 증가로 인해 하단부에서 최대 응력을 보이는 반면, 전반적으로 응력배분이 원활히 이루어지는 것으로 분석되었다. 또한 Fig. 6은 타설측압 작용시 발생하는 HPPF의 변형도를 보이고 있으며 박판형의 HPPF가 작용외력에 대해 충분한 강성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

2.3 1회 최대 타설높이의 제안

현장타설 시 벽체구조물에 적용가능한 콘크리트 1회 최대 타설높이를 분석하기 위하여 타설높이와 타설폭에 대해 변수해석을 수행하였으며 그 결과는 다음 Table 2에 나타내었다. 해석결과, 타설 폭에 대한 영향은 거의 없었으며 HPPF에 최대 허용강도인 21.6kN을 만족하는 안정적인 타설높이는 3m로 분석되었다.

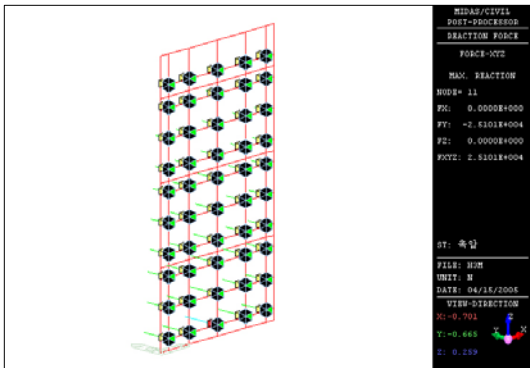


Fig. 3 Modeling and boundary condition

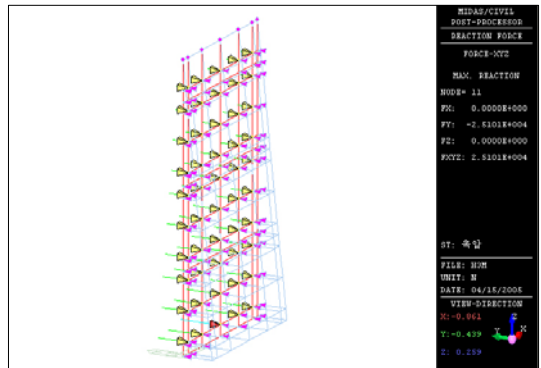


Fig. 4 Reaction force of HPPF

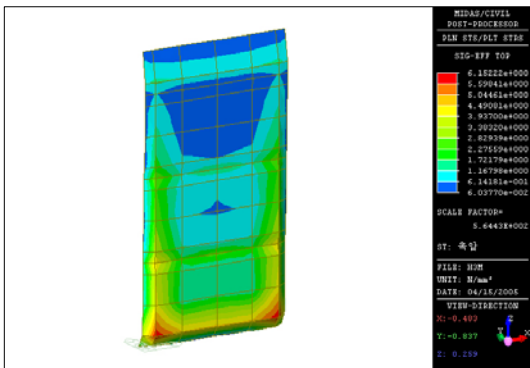


Fig. 5 Stress distribution diagram of HPPF

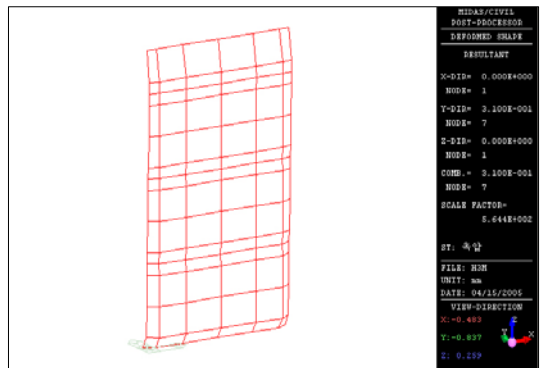


Fig. 6 Deformed shape of HPPF

Table 2 Maximum and allowable value for each analysis parameter

Maximum concrete placing height(m)	Concrete placing width(m)	Reaction force of insert bolt(kN)		Lateral pressure(MPa)	
		Analysis	Allow.	Analysis	Allow.
3	2	21.3	21.6	0.064	0.1
	6	21.2			
	10	21.2			
3.5	2	25.1	24.9	0.072	0.1
	6	24.9			
	10	24.9			

3. 설계 예

해석적으로 얻어진 1회 최대 타설높이에 근거하여 HPPF를 적용한 벽체구조물의 설계를 실시하였다. 대상이 된 구조물은 가장 일반적인 연속구조물이며 HPPF의 효율적인 사용성을 보일 것으로 판단되는 캔틸레버 옹벽을 선택하였다.

3.1 일반옹벽의 설계 및 안전도평가

설계를 위한 조건으로는 높이 3m의 흙 제방을 지지하는 캔틸레버 옹벽으로 뒷채움 흙에 16kN/m^2 의 사하중이 작용하며 뒷채움재의 단위중량 $\gamma=18\text{kN/m}^3$, 내부마찰각 $\phi=35^\circ$, 콘크리트와 흙의 마찰계수 $\mu=0.5$, 토층간의 마찰계수 $\mu=0.7$, 허용지저력 $q_{all}=16\text{kN/m}^2$,

콘크리트 압축강도 $f_{ck} = 21\text{MPa}$, 철근항복강도 $f_y = 280\text{MPa}$, 단위폭당 인장철근량 $A_s = 1,986\text{mm}^2$ 가 적용되었다. 다음의 Fig. 7과 같이 벽체의 두께는 하단에서 500mm, 상단에서 300mm로 결정하였고 일반 웅벽의 설계 이론을 바탕으로 전도 및 침하에 대한 안전성이 확보되었다.

내부저항력 검토 및 위험 단면에서의 안전성 검토는 본 설계에서 주어진 조건에서 높이 3m의 웅벽에서의 위험단면은 벽체의 바닥에서거리 $d = 340\text{mm}$ 에 위치하며 토압으로 인하여 작용하는 계수 전단력 V_u 는 119kN이며 마찬가지로 토압으로 인하여 발생하는 벽체에서의 계수 모멘트 M_u 는 117 kN·m이다. 전단력에 대한 안전도 평가 결과 콘크리트 구조 설계기준에 명기된 방법으로 산출된 전단저항력이 269kN의 값을 나타내어 작용 최대 전단력 $V_u = 119\text{kN}$ 과 비교하여 충분한 전단저항력을 나타냄을 확인하였으며 휨 모멘트에 대한 안전도 평가 결과 사용된 철근비와 단면으로부터 산출된 웅벽의 극한 모멘트 저항력 M_u 는 202kN·m으로 계수 모멘트 $M_u = 117\text{kN} \cdot \text{m}$ 을 상회하는 것으로 평가 되었다.

3.2 HPPF 적용웅벽의 설계 및 안전도평가

HPPF가 적용된 웅벽의 경우 일반 콘크리트 웅벽과

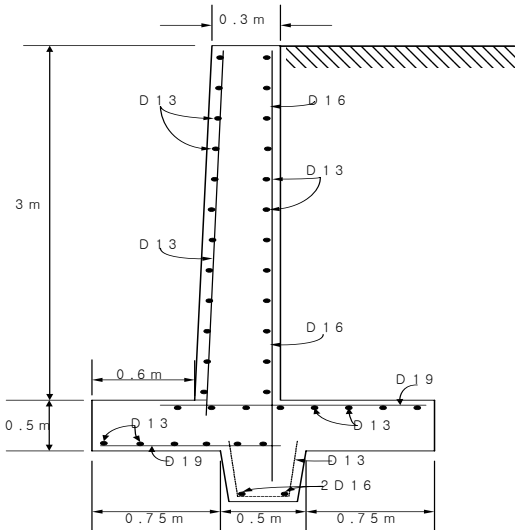


Fig. 7 Retaining wall structure

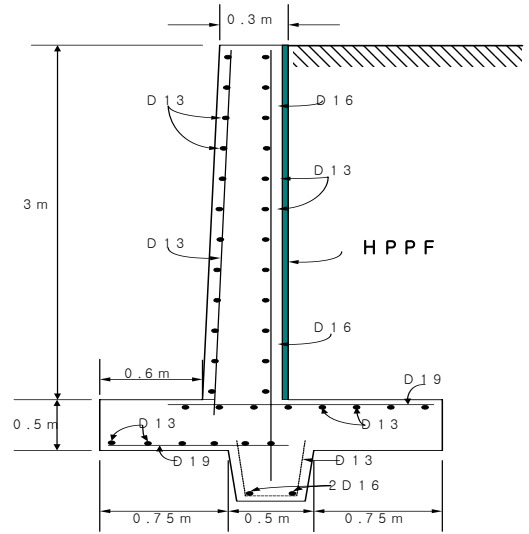


Fig. 8 Typical Retaining wall structure with HPPF adopting section

동일한 조건으로 설계가 되었으며 HPPF 구조실험 결과, 압축부에 비해 효율적인 구조거동이 검증된 인장부에 HPPF 일체구조로 벽체를 구성하였다.⁽²⁾

전단에 대한 안정성 검토에 있어 콘크리트의 경우는 구조설계기준에 의한 전단저항력을 산출하였으며 HPPF 적용부분의 경우, 일반 콘크리트 전단강도식이 아닌 고강도 콘크리트 전단저항력 산출식을 적용하였다.⁽⁹⁾

$$V_{total} = V_c + V_{HPPF}$$

$$V_{c(HPPF)} = [0.225\xi(100\rho)^{1/2}f_{ck}^{0.2}]b_w d \quad (1)$$

여기서,

ξ : $f_{ck} \geq 25\text{MPa}$ 인 경우 사용하는 Size effect⁽⁸⁾

$$\xi = \left(\frac{135,000f_{ck}^{-1.1}}{d_v} \right)^{0.25} \left(1 + \frac{f_{ck} - 25}{75} \right)$$

d_v : 전단유효 깊이 (일반적으로 $0.9d$)

휨에 대한 안전도 검토의 경우, 다음 Fig. 9와 같은 해석개념을 도입하여 HPPF의 인장강도를 반영한 내부저항 모멘트를 산출하였으며 인장철근으로 인하여

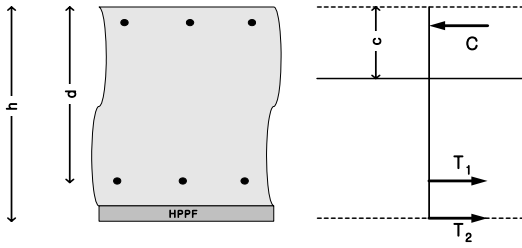


Fig. 9 Force compatibility diagram

발생된 인장력 T1과 HPPF으로 인하여 발생된 인장력 T2의 합력으로부터 식(2)를 이용하여 내부저항 모멘트를 산출하였다.⁽⁷⁾ 따라서 HPPF 적용벽체의 안전도 평가 결과, 전단저항력이 295kN으로 외부계수 최대 전단력 $V_u = 119\text{kN}$ 과 비교하여 충분한 전단저항력을 나타냄을 확인하였으며 위험단면으로부터 산출된 HPPF 적용벽체의 극한 모멘트 저항력은 $310\text{kN} \cdot \text{m}$ 으로 토압에 의한 계수 모멘트 $117\text{kN} \cdot \text{m}$ 을 상회하는 것으로 나타났다.

$$M_n = \phi \left[C \left(c - \frac{a}{2} \right) + T_1 (d - c) + T_2 (h - c) \right] \quad (2)$$

3.3 HPPF 적용으로 단면감소된 옹벽의 설계 및 안전도평가

계수외력에 대한 일반 콘크리트 벽체과 HPPF가 적용된 옹벽의 휨 및 전단에 대한 저항력을 비교한 결과, HPPF 적용 벽체의 전단 저항력과 모멘트 저항력이 모두 옹벽의 벽체에 작용하는 계수 전단력과 외부 계수 모멘트에 비해 약 57% 이상의 과도한 성능을 발휘하고 있음을 알 수 있다. 따라서 HPPF가 적용된 옹벽의 효율적인 성능발휘를 위해서는 경제적인 단면으로의 개선이 필요하다. HPPF 적용벽체의 효율적인 단면형상을 제안하기 위하여 벽체의 두께와 철근량을 설계 변수로 설정하여 변수해석을 실시하였다. 철근량의 경우, 일반 콘크리트 적용벽체에 배근된 철근량을 기준으로 10%씩 철근량을 감소시켰으며 벽체두께의 경우, 일반 콘크리트 적용벽체의 상부두께를 기준으로 50mm씩 감소시켜가며 실제 철근배근 및 시공성을 고려하여 100mm 두께까지 해석을 수행하였다. Table 3은 변수해석 결과를 요약한 표이다. 본 해석결과를 바탕으로 일반 콘크리트 벽체의 저항성능 대표값인

Table 3 Parameter study of HPPF adopting wall structure

Thickness of top (mm)	$A_s = 1,986\text{m}^2$ (100%)		$A_s = 1,588\text{m}^2$ (80%)		$A_s = 1,192\text{m}^2$ (60%)		$A_s = 794\text{m}^2$ (40%)		$A_s = 397\text{m}^2$ (20%)	
	ϕV_{hn} (kN)	ϕM_{hn} (kN · m)	ϕV_{hn} (kN)	ϕM_{hn} (kN · m)	ϕV_{hn} (kN)	ϕM_{hn} (kN · m)	ϕV_{hn} (kN)	ϕM_{hn} (kN · m)	ϕV_{hn} (kN)	ϕM_{hn} (kN · m)
300	295	310	291	276	285	241	279	205	271	169
250	268	273	263	243	257	213	250	182	241	151
200	241	236	236	211	229	185	222	159	213	132
150	215	198	209	178	203	157	194	134	184	114
100	191	161	184	145	177	129	167	112	156	95

Table 4 The matrix of representative value of shearing and moment capacity

Thickness of top (mm)	The ratio of decrease, A_s									
	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	0%
300mm	1.10	1.09	1.08	1.06	1.06	1.05	1.01	0.93	0.84	0.66
250mm	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.90	0.82	0.75	0.59
200mm	0.90	0.89	0.88	0.87	0.85	0.84	0.79	0.72	0.65	0.52
150mm	0.80	0.79	0.78	0.77	0.75	0.72	0.66	0.62	0.56	0.45
100mm	0.71	0.70	0.68	0.67	0.64	0.60	0.55	0.51	0.47	0.38

ϕV_{tn} 와 ϕM_{tn} 을 기준으로 변수해석 결과를 표준화하여 철근량/단면두께에 대한 전단력 및 모멘트성능 대표값 매트릭스를 구성하였다.

$$\text{Min} \left\{ \frac{V_{tn}}{V_{tn}} \text{ or } \frac{M_{tn}}{M_{tn}} \right\} \quad (3)$$

따라서 본 해석결과를 바탕으로 성능비 1을 기준으로 한 관계그래프는 다음 Fig. 10과 같다. 성능비 분

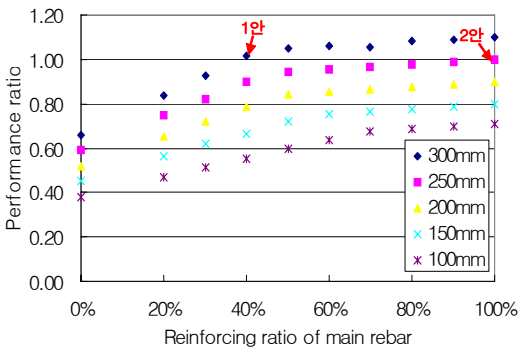


Fig. 10 The result of parametric study of effective section for cantilever wall

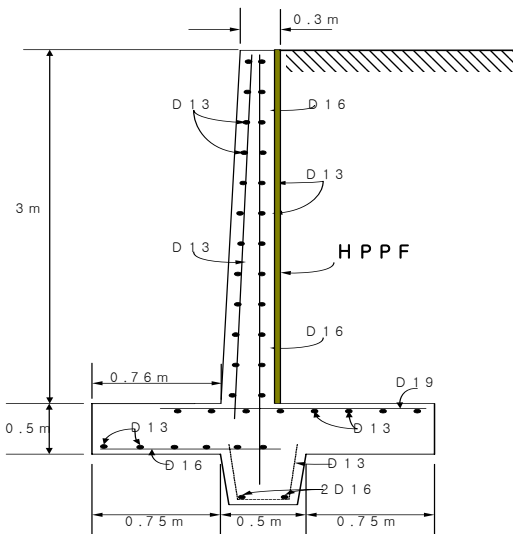


Fig. 11 Reduced dimension of HPPF adopting wall structure from optimum parametric study

석결과, 철근량 40%, 단면두께 300mm인 1안과 철근량 100%, 단면두께 250mm인 2안이 선정되었으며 철근 및 콘크리트의 단가를 감안한 물량감소량에 따른 경제성 분석결과, 제 1안이 경제성과 성능을 동시에 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 변수해석결과와 과정을 거쳐 설계된 HPPF의 적용 용벽의 단면은 Fig. 11에 나타나 있다.

4. 결론

- 1) HPPF 일체구조물에 대한 콘크리트 1회 최대 타설 높이는 3m 이내로 분석되었으며 이 때의 축압 작용에 따른 영구 거푸집 자체의 저항 휨 강도 및 인서트 인발저항력은 외력 및 설계기준에 대해 충분한 안전성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었으며 콘크리트 타설 폭의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.
- 2) 전단력 및 모멘트 대표값 매트릭스 변수해석을 통한 HPPF가 적용된 용벽의 성능대비 경제적인 단면형상의 경우, 콘크리트 단면형상의 감소보다는 오히려 HPPF의 고인성을 고려한 보강철근 감소 방안이 경제적인 방안으로 분석되었으며, 또한 HPPF의 고내구성에 따른 장기적인 유지관리의 용이성으로 인해 추가적인 경제성 효과가 확보될 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구를 통하여 추후 HPPF가 적용된 콘크리트 구조물의 실시공을 통해 고내구성 영구거푸집 일체구조물에 대한 설계 및 시공지침 등의 추가적인 연구를 바탕으로 극한환경하에서 고내구성 및 경제성이 확보된 HPPF적용 콘크리트 구조물의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산(주) 건설부문의 지원에 의한 “스테인레스 스틸화이버를 이용한 고내구성 영구거푸집의 현장적용성에 대한 연구”, 연구의 일환으로 수행되었으며, 삼성물산 관계자 여러분들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김형남 외 3인, "비탈형 영구거푸집의 시공성능과 경제성평가에 관한 실험적 연구," 대한건축학회 논문집 구조계, 제15권, 4호, 1999, pp. 91-99.
2. 심종성, 오홍섭, 주민관, 김길중, 신현양, "스테인레스 강섬유를 이용한 고성능 영구거푸집의 재료 및 구조적 거동특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제 18권, 1호, 2006, pp. 73-82.
3. 심종성, "철근콘크리트구조설계 제3판", 구미서관, 2006, p. 628.
4. 한국콘크리트학회, "콘크리트 구조 설계기준", 2003.
5. 한국콘크리트학회, "콘크리트 표준시방서", 2003.
6. 한양대학교, "스테인레스 스틸 화이버를 이용한 고내구성 영구거푸집의 현장 적용성에 대한 연구", 연구보고서, 2004.
7. M. Arduini, and A. Nanni, "Parametric Study of Beams with Externally Bonded FRP Reinforcement", ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 5, 1997. pp. 493-501.
8. Fujita M, Sato R, Matsumoto K, Takaki Y. "Size effect on shear capacity of RC Beams using HSC without shear reinforcement." Proc. 6th Int Sympon Utilization of HS/HP Concrete. 2002, pp. 235-245.
9. Cladera A, Marí AR. "Shear design procedure for reinforced concrete beams using artificial neural networks. Part I: Beams without stirrups." Engineering Structure, Vol. 26, No. 7, 2004, pp. 917-926.

(접수일자 : 2007년 1월 26일)