

이종재료의 타설면을 가지는 접합계면의 전단전달 특성

Characteristics of Shear Transfer in Joint Interface Consisting of Different Materials

김 태 곤* 김 화 중**
Kim, Tae Gon Kim, Wha Jung

ABSTRACT

The interface necessarily exists in joints using cement mortar, UP(Unsaturated Polyester : UP) mortar and SBR(SBR-latex) mortar. Characteristics of shear transfer in joint interface consisting of different materials are studied with experimental and analytical methods. The uniaxial compressive shear experiments are accomplished with various angle of inclination (35, 45, 55, 65, 75°), materials of old and new-cast mortar.

In this study, The results are as follows

- ① Mohr-coulomb's slip theory be applied to the interface consisting different materials
- ② The cohesion of UP mortar is superior to that of cement mortar, SBR mortar.

1. 서론

건축재료의 발전은 건축에서 요구되는 성능이 다양해져서 그것에 맞는 재료를 연구하게 되었고 발전시키게 되었다. 앞으로 신재료에 대한 대책이나 특수한 성능을 가진 신재료가 개발되기를 기대하는 것도 중요하지만 현재 있는 건축재료의 활용성 증대 방안을 연구하는 것이 오히려 신재료의 개발에 더욱 도움이 될 것이다. 다시말해, 건축재료의 하이브리드화(복합재료화)로 한가지 재료로 이루어진 단순체에서 부위별 특성에 적합한 재료를 사용하는 복합체로 발전할 것이다. 일례로, 콘크리트 구조물의 보수재료로 널리 이용되고 있는 폴리머는 시멘트경화체의 단점인 중량이 무겁고, 중량에 비하여 강도가 약하다는(특히, 인장강도) 점을 대신하는 좋은 재료이다. 그러나, 재료를 순수체로 이용하는 경우는 이종재료의 접합에 의한 계면이 존재하지 않으나 복수의 재료를 이용하여 일체의 구조물로 했을때는 반드시 그 사이에 계면이 존재하게 된다.

이에 본 연구는 시멘트모르터, 불포화폴리에스테르모르터, SBR모르터를 사용한 이종재료의 타설면을 가지는 접합계면의 용력특성을 분석하기 위하여 모아-쿨롱의 미끄러짐 이론을 바탕으로한 압축전단실험을 행한 다음, 각각의 재료의 조합과 타설순서를 달리하였을 경우에 경사면에 생기는 계면용력을 조사, 분석하여 우수한 접착계면의 특성을 가지는 적절한 재료선정 및 타설방법을 결정하기 위한

* 정회원, 경북전문대 건축과, 전임강사

** 정회원, 경북대 건축공학과 교수

기초자료로 사용하고자 한다. 또한, 접합계면에 대한 실험 연구가 계속 수행중에 있으며 궁극적으로는 구조용 프리캐스트 영구거푸집의 개발을 위한 기초자료로 이용될 것이다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

이종재료(시멘트모르터, 불포화폴리에스테르모르터, SBR모르터)의 접합계면에서 발생하는 압축전단 특성을 파악하기 위하여 공시체의 접합계면에 경사각(35, 45, 55, 65, 75°)을 두어 1축압축전단실험을 실시한다. 또한, 접합계면에 대해 모아-콜롱의 미끄러짐이론을 적용함으로써 이질재료 상호간의 타설 순서에 따른 미끄러짐 발생시의 계면전단특성치에 관한 비교, 검토를 행한다.

2.2 사용재료

시멘트는 보통포틀랜드시멘트, 모래는 표준사를 사용하였으며 실험에 사용되는 폴리머는 비교적 저렴한 가격의 불포화폴리에스테르수지 및 SBR계수지를 사용하였다. 먼저, 불포화폴리에스테르(Unsaturated Polyester : UP)수지는 국내 E사의 올소타입(ortho type)으로 비중(25℃)이 1.12, 점도(25℃, PS)는 3±30%, 산가 23±4, 스티렌함유 38%인 액상레진이다. 코발트계 경화촉진제가 첨가되어 있는 불포화폴리에스테르수지는 촉매제(MEKPO 55%, DMP 45%로 구성)를 1%정도 첨가하면 경화반응이 일어난다. 본 연구에서는 촉매제를 불포화폴리에스테르수지에 대해 질량비로 1.2%를 첨가하여 실험하였다. SBR-latex는 스티렌(styrene)과 부타디엔(Butadien)을 주원료로 하여 유화 공중합에 의하여 제조되는 합성고무 에멀션으로 고형분(%TSC)이 48±1, pH(25℃) 8-11, 점도(20℃,cp) 70, 표면장력(dyne/cm)이 35정도이다.

이상의 재료를 이용한 각종 모르터배합은 질량비로써 먼저, 시멘트모르터의 경우는 시멘트:모래=1:2.5, W/C=50%, 불포화폴리에스테르모르터의 경우는 불포화폴리에스테르수지:모래=1:2.5, 불포화폴리에스테르수지:시멘트=1:0.5, SBR모르터의 경우는 시멘트:모래=1:2.5, 액상SBR/C=50%이다.

2.3 실험방법

본 실험에 사용된 공시체는 그림-1과 같이 4×4×16cm 뿔몰드를 사용하여 제작하였다. 1차타설 재료와 2차타설 재료사이에는 경사각도(35, 45, 55, 65, 75°)을 두었으며 두 재료의 마찰에 관계되는 표면거칠기는 균일하게 하기 위해 1차타설후 OHP필름을 두어 평탄하게 캠핑하였다. 그후 24시간후에 OHP필름을 제거하고 2차타설하였으며 다시 24시간후에 탈형을 실시하였다. 2차타설후 28일째에는 압축전단실험을 실시한다.

재하 및 측정방법으로는 먼저 재하장치로 만능시험기(UTM)를 사용하여 접합계면에 압축력과 전단 응력이 작용하도록 공시체의 상·하부면(4×4cm면)에 분당 약 2ton의 재하속도로 압축력을 가하였다. 변위장치는 접합계면에서의 상대 미끄러짐 변위를 측정하기 위하여 변위계(CDP-10)를 공시체의 양측면에 각 한 개씩 설치하고 상하 변위의 측정을 위해서는 상부재료부에 변위계를 하나 더 설치하여 여기서 나오는 값으로 상,하부면의 미끄러짐 발생여부 및 미끄러짐량을 계산하였다. 한편, 사용된 변위계와 하중계(5ton 로드셀)의 값은 변형률측정기(TDS-301)와 컴퓨터를 통해서 자동으로 저장된다.

3. 경사타설면을 가진 공시체의 이론적 해석

일반적으로 일체로 타설된 공시체의 경우와 같은 단일체 부재내의 경사면 x_1 평면에 작용하는 수직응력(σ_{x1})과 전단응력(τ_{x1y1})은 식(1)과 같이 경사각 θ 와 x 와 y 평면 위에 작용하는 응력 σ_x, σ_y 와 τ_{xy} ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 는 알려져 있다고 가정함)의 향으로 보여지고 이를 '평면응력의 변환식'이라 한다.

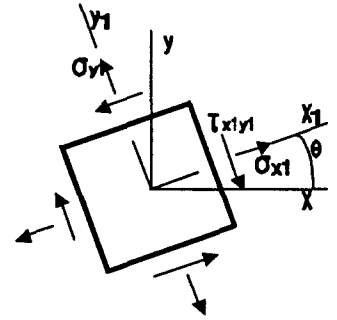


그림 1 평면응력의 요소

$$\sigma_{x1} = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2 \tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (1)$$

$$\tau_{x1y1} = -(\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

이 식을 Mohr원으로 알려진 도형으로 나타내면 식(2) 및 그림 2와 같이 응력을 받는 물체내의 어떤점에서 여러 가지 경사평면 위에 작용하는 수직응력과 전단응력과의 관계를 쉽게 알 수 있다.

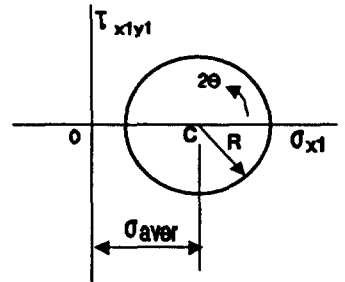


그림 2 평면응력에 대한 Mohr원

$$(\sigma_{x1} - \sigma_{aver})^2 + \tau_{x1y1}^2 = R^2 \quad (2)$$

중심 ($\sigma_{aver}, 0$), 반지름=R인 원의 방정식

$$\text{여기서, } \sigma_{aver} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}, \quad R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

특히, 본 실험과 같이 공시체가 1축응력상태에 놓이면 ($\sigma_y = 0,$

$\tau_{xy} = 0$) 평면응력의 변환식 식(1)은 식(3)과 같이 나타낼 수 있

고, Mohr원으로 그리면 그림 3과 같다. 그러나, 이것은 1축상태에 있는 일체타설 공시체가 미끄럼과 파괴가 아닌 압축과 파괴인 경우의 경사각 θ 에 대한 압축응력과 전단응력을 나타내는 것이고 경사타설면을 가진 공시체의 경우는 압축과 파괴가 아닌 미끄럼과 파괴가 발생하여 Mohr원을 따라가지 않고 $\tau = C + \sigma \tan \theta$ 와 같은 직선을 따라가게 된다. 따라서, 경사타설면을 가진 1축상태의 공시체의 계면응력은 그림 3과 같은 모아-쿨롱의 미끄러짐 이론을 적용하고 있다. 여기서, 직선의 점착력(C)와 마찰계수($\tan \theta$)는 실험에 의하여 1차 회귀분석으로 구할 수 있다. 즉, X축을 압축응력(σ), Y축을 전단응력(τ)으로 하는 좌표평면에서 y축절편은 점착력을, 기울기는 마찰계수를 나타낸다. 이것으로서 경사타설면을 가진 공시체의 계면에 대한 이론적 해석을 행할 수 있다.

$$\sigma_{x1} = \sigma_x \cos^2 \theta \quad (= P \cos \theta / A, = N/A) \quad (3)$$

$$\tau_{x1y1} = -\sigma_x \sin \theta \cos \theta \quad (= P \sin \theta / A, = V/A)$$

$$\left(\sigma_{x1} - \frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{x1y1}^2 = \left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 \quad (1\text{축응력시의 Mohr원})$$

여기서, P = 압축하중, A = 경사단면적

N = P의 수직분력, V = P의 수평분력

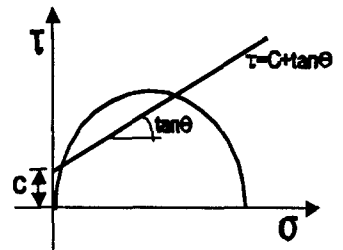


그림 3 경사타설면의 파괴곡선

4. 실험결과 및 분석

4.1 파괴양상

이종재료의 경사타설면을 가지는 공시체에 대한 1축압축전단실험으로부터 얻은 미끄러짐 발생시의 파괴하중 및 파괴양상을 정리하면 표 1과 같다. 전체적으로 접합경사각이 35° 인 경우는 압축파괴가 일어났고, 접합계면의 경사가 커짐에 따라 계면의 미끄러짐파괴가 발생하였으며 그 파괴하중은 두 접합재료의 종류와 타설순서에 따라서 차이를 보인다. 특히, P-M-시리즈(1차타설-불포화폴리에스테르모르터, 2차타설-시멘트모르터)의 경우는 접착불량으로 탈형시에 계면 분리파괴되어 실험에서 제외시켰다. 먼저, 압축파괴가 발생한 공시체의 경우는 타설된 두쪽의 재료 중 강도가 약한 쪽의 재료에 압축파괴가 일어났으며 그때의 파괴하중은 약한쪽의 재료로만 일체로 타설된 공시체의 강도값과 거의 일치한다. 특히, P-P-시리즈의 경우는 불포화폴리에스테르모르터간의 우수한 접착으로 접합면의 경사각에 관계없이 모든 접합각도(35, 45, 55, 65, 75°)의 공시체에서 압축파괴가 발생하였다. 계면미끄러짐파괴가 발생한 공시체의 경우는 두 접합재료 상호간의 미끄러짐이 일어날 때의

상대변위를 측정하였으며 미끄러짐이 발생하는 순간 하중은 급격히 떨어지고 급격한 계면분리 현상이 발생하였다. 그러나, P-S-시리즈의 경우는 계면미끄러짐파괴가 일어나는 45° 와 55° 에서는 특이하게 최대하중에서 급격한 전단계면분리가 일어나지 않고 하중 제거시 미끄러진 상태에서 붙어 있었다.

4.2 경사타설면의 계면특성

이질재료의 타설면을 가진 시험체에 1축압축하중을 가하면 경사면 위에 작용하는 응력을 수직성분(압축응력)과 수평성분(전단응력)의 분력으로 나타낼 수 있다. 표 1은 시험체 파괴시의 최대하중(P)를 측정하여 경사면 최대수직응력

표 1 파괴하중과 파괴양상

시험체명			파괴하중 (ton)	경사면 최대 수직응력 (kg/cm ²)	경사면 최대 전단응력 (kg/cm ²)	파괴양상
< M-M-시리즈 > 1차타설-시멘트모르터 2차타설-시멘트모르터	M-M-35	35°	2.419	(101.6)	(71.2)	×
	M-M-45	45°	1.107	34.6	34.6	Δ
	M-M-55	55°	0.566	11.6	16.6	Δ
	M-M-65	65°	0.541	6.0	12.9	Δ
	M-M-75	75°	0.441	1.8	6.7	Δ
< M-P-시리즈 > 1차타설-시멘트모르터 2차타설-불포화폴리에스테르모르터	M-P-35	35°	2.372	(99.6)	(69.7)	×
	M-P-45	45°	2.556	(80.0)	(80.0)	×
	M-P-55	55°	1.935	40.0	57.1	Δ
	M-P-65	65°	1.848	20.6	44.2	Δ
	M-P-75	75°	1.692	7.1	26.5	Δ
< P-P-시리즈 > 1차타설-불포화폴리에스테르모르터 2차타설-불포화폴리에스테르모르터	P-P-35	35°	6.768	(284.3)	(199.1)	×
	P-P-45	45°	6.447	(201.7)	(201.7)	×
	P-P-55	55°	7.659	(157.5)	(224.9)	×
	P-P-65	65°	6.768	(75.5)	(161.8)	×
	P-P-75	75°	6.559	(27.5)	(102.5)	×
< P-S-시리즈 > 1차타설-불포화폴리에스테르모르터 2차타설-SBR모르터	P-S-35	35°	3.069	(128.9)	(90.3)	×
	P-S-45	45°	1.022	32.0	32.0	Δ
	P-S-55	55°	0.687	14.1	20.1	Δ
	P-S-65	65°	0.688	7.7	16.5	Δ
	P-S-75	75°	0.564	2.4	9.0	Δ
< S-M-시리즈 > 1차타설-SBR모르터 2차타설-시멘트모르터	S-M-35	35°	2.372	(99.6)	(69.8)	×
	S-M-45	45°	1.979	61.9	61.9	Δ
	S-M-55	55°	1.475	30.3	43.3	Δ
	S-M-65	65°	0.986	11.0	23.6	Δ
	S-M-75	75°	1.308	5.5	20.5	Δ
시멘트모르터-동시타설			2.647	파괴양상: ×: 압축파괴 Δ: 계면미끄러짐파괴		
불포화폴리에스테르모르터-동시타설			6.984			
SBR모르터-동시타설			2.839			

- * P-M-시리즈는 접착불량으로 실험불가
- * ()안의 수치는 압축파괴가 일어난 시험체의 응력을 나타냄.
- * 시험체 기호: M-M-35
 └─ 경사각
 └─ 2차 타설재료
 └─ 1차 타설재료 (M-시멘트모르터, S-SBR모르터, P-불포화폴리에스테르모르터)

표 2 각 시리즈별 점착력과 마찰계수

시험체명	점착력 C (kg/cm ²)	마찰계수 tan θ	마찰각 θ	유효 경사각
M-M-시리즈	6.69	0.82	39°	42°
M-P-시리즈	22.03	0.91	42°	51°
P-S-시리즈	9.09	0.73	36°	36°
S-M-시리즈	16.97	0.75	37°	37°

($=P\cos\theta$ /경사단면적)과 전단응력($=P\sin\theta$ /경사단면적)을 구한 것이고 이들을 그림 5와 같이 1차 회귀분석하여 표 2와 같은 미끄럼 발생시의 전단내력 $\tau = C + \sigma \tan\theta$ 에 대한 점착력(C)과 마찰계수($\tan\theta$)를 구할 수 있다. 실험결과, 가장 우수한 점착력을 가진 시험체는 그림 4에서와 같이 M-M-시리즈의 점착력을 기준으로 한 각 시리즈별 점착력의 비로 볼 때 M-P-시리즈 3.29배, S-M-시리즈 2.54배, P-S-시리즈 1.36배, M-M-시리즈 1.00배의 순으로 나타났다. 이는 모든 경사각에서도 미끄럼 파괴가 발생하지 않는 P-P-시리즈에서와 같이 불포화폴리에스테르모르타의 우수한 점착성능 때문인 것으로 생각된다. 그러나, 불포화폴리에스테르모르타의 경화면이 치밀하고 평탄하여 먼저 타설하는 경우에 2차타설재료의 접합이 문제가 된다. 그 예로 P-M-시리즈의 경우를 예로 들 수 있다. M-P-시리즈의 경우는 현재 콘크리트구조물 보수의 방법으로써 널리 이용되고 있으나 P-M (1차타설-불포화폴리에스테르모르타, 2차타설-시멘트모르타)의 순서로 접합이 필요한 경우에는 심각한 문제가 발생할 수 있다. 이 경우 본 실험의 결과치를 볼 때 P-M 순의 바로 접합이 아닌 P(불포화폴리에스테르모르타)와 M(시멘트모르타) 사이에 S(SBR모르타)층을 두어 P-S접합과 S-M의 접합의 단계를 만드는 것이 유리할 것으로 생각이 되며 차후 여기에 관한 연구가 필요하다. 한편, 이질재료의 타설면을 가진 시험체에 대한 마찰계수는 그림 4에서 보는 바와 같이 M-M-시리즈의 마찰계수를 기준으로하여 각각 시리즈별로 크게 영향이 없는 것으로 나타났다. 이는 표면거칠기를 균질하게 하기 위해 OHP필름 캠핑처리한 이

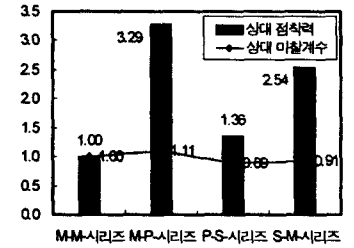


그림 4 상대점착력, 상대마찰계수

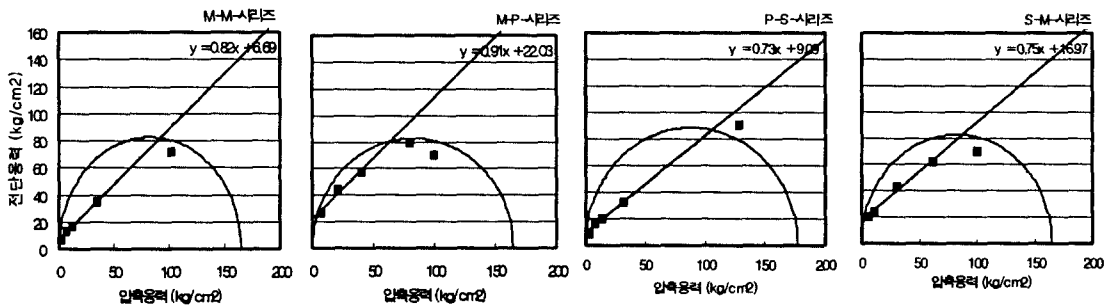


그림 5 전단응력과 압축응력의 관계

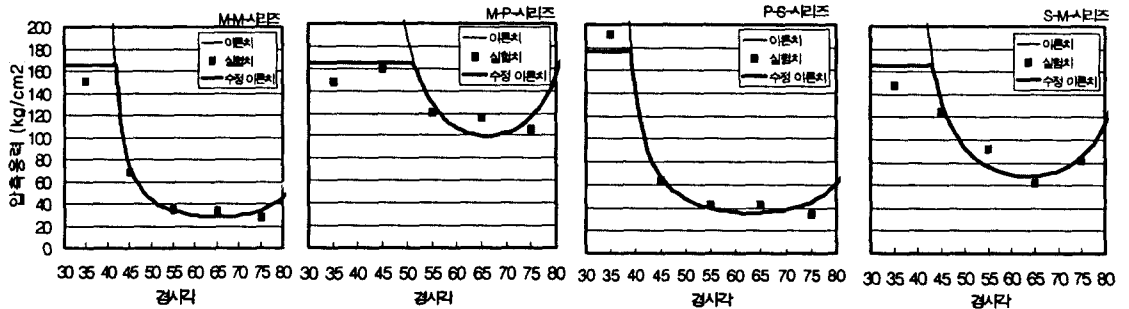


그림 6 경사각과 최대압축응력과의 관계

4.3 실험결과와 이론의 적용

(1) 전단 내력 추정

경사면을 가진 시험체에 대한 전단내력으로는 크게 점착력, 마찰력, 철근의 장부작용이나 전단키의 영향을 고려하여 $\tau = C + (\sigma + p \cdot fy) \tan \theta$ 가 일반적이다. 본 실험에서는 초기강도에 큰 영향이 있는 점착력과 마찰력만을 고려한 $\tau = C + \sigma \tan \theta$ 를 사용하여 이질재료 상호간의 타설순서에 따른 전단내력의 추정식을 나타낼 수 있다.

식 4는 1차타설후 OHP필름으로 평탄하게 캠핑처리한 후 24시간후에 2차재료를 타설하여 구한 값으로 추후, 1차타설후 2차타설시기에 따른 전단내력 특성과 경사타설면 처리방법에 따른 전단내력특성(점착력과 마찰계수)에 관한 연구가 계속적으로 필요하다.

$\tau = 6.69 + 0.82 \sigma \text{ (M-M-시리즈) (4)}$ $\tau = 22.03 + 0.91 \sigma \text{ (M-P-시리즈)}$ $\tau = 9.09 + 0.73 \sigma \text{ (P-S-시리즈)}$ $\tau = 16.97 + 0.75 \sigma \text{ (S-M-시리즈)}$

(2) 각 경사면 시험체의 최대압축응력 추정

이종재료의 타설면을 가진 계면위에 있어서 전단미끄러짐에 저항하기 위한 전단키등을 둘 경우에 계면의 경사각과 그때의 시험체가 받을 수 있는 최대 압축응력을

$$\sigma = \frac{c}{\sin \theta \cos \theta - \tan \theta \cos^2 \theta} \quad (5)$$

구하기 위해서는 경사각과 최대 압축응력의 관계가 필요하다. 경사면에서의 경사각 θ 와 압축응력 σ 은 식(3)을 $\tau = C + \sigma \tan \theta$ 에 대입하면 식(5)가 되며 여기서, C와 $\tan \theta$ 는 표 2와 같이 실험에서 얻어진 상수이다. 식(5)에서와 같은 이론치의 경사각은 마찰각(θ)에 근접할때 압축응력이 무한대가 되나 실제로는 약한쪽의 재료에서 압축파괴가 발생하여 무한대가 되지 않는다. 즉, 그림 6 및 표 2와 같이 압축응력의 최대치가 되는 각도는 마찰각보다 약간 큰 각도가 된다.

4. 결 론

시멘트모르터, 불포화폴리에스테르모르터, SBR모르터를 사용한 이종재료 상호간의 타설순서에 따른 계면의 전단특성에 관한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 모아-쿨롱의 미끄럼이론으로 이종재료 접합계면의 전단전달특성을 잘 나타낼 수 있었다.
- (2) 불포화폴리에스테르모르터가 2차타설재료로 가장 우수한 점착력을 발휘하였다.
- (3) P-P-시리즈의 경우는 불포화폴리에스테르모르터간의 우수한 점착으로 접합면의 경사각에 관계없이 모든 접합각도의 공시체에서 압축파괴가 발생하였다.
- (4) P-M (1차타설-불포화폴리에스테르모르터, 2차타설-시멘트모르터)의 순서로 접합이 필요한 경우에는 P-M 순의 바로 접합이 아닌 P(불포화폴리에스테르모르터)와 M(시멘트모르터) 사이에 S(SBR모르터)층을 두어 P-S접합과 S-M의 접합의 단계를 만드는 것이 유리할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 황충렬, 이종원, 김문생 공역, 재료역학(3권),
2. 최완철, 홍기섭, 신영수, 조성상, 정일영, 콘크리트접합부 계면의 전단전달특성, 대한건축학회논문집, 10권8호, 1994.8.
3. 池田 修 외 2인, ポリマ-セメントモルタルを用いた打継目の曲げ性状, コンクリート工學年次論文報告集, 1994.
4. 汁 幸和 외 3인, ポリマ-セメントモルタルを用いた新旧コンクリートの打継目施工, コンクリート工學年次論文報告集, 1989.