

신·구 콘크리트 부착강도 측정을 위한 직접인발시험 방법

Appropriate Method of Concrete Pull-out Test for Measure Bond Strength between New and Existing Concrete

김성환* · 정원경** · 장흥균*** · 김기현**** · 윤경구*****

Kim, Seong Hwan* · Jung, Won Kyong** · Jang, Heung Gyun*** · Kim, Ki Hun · Yun****, Kyong Ku*****

1. 서 론

콘크리트 보수와 교량 상판의 덧씌우기는 싼 원가와 빠른 시공, 우수한 내구성 때문에 아스팔트 덧씌우기로 수행되어져 왔다. 콘크리트 덧씌우기의 경우 아스팔트 콘크리트 포장 기술에 비해 상대적으로 새로운 기술이었으며 높은 비용과 낮은 신뢰성 때문에 아스팔트 콘크리트에 비하여 활용도가 낮았다. 그러나, 아스팔트 콘크리트의 비용 증가와 콘크리트 포장 기술의 향상으로 콘크리트 보수와 덧씌우기는 급속도로 확산되는 현상을 보이고 있다. 이러한 덧씌우기나 도로의 보수재료는 콘크리트 구조물에서 신·구 콘크리트로 구성된 복합 구조체를 이룬다. 두 가지의 서로 다른 콘크리트로 구성된 신·구 콘크리트 구조물의 성능은 신·구 콘크리트 사이의 부착강도에 의해서 구조물로서의 성능이 크게 좌우된다. 국내에서는 신·구 콘크리트의 부착강도 측정 시험방법에 조깅인장시험, 경사전단시험 등 일부 사용하고 있으나 아직 시험 규정이 확립되어 있지 않다. 본 연구에서는 재현성의 결과가 좋고 파괴형상을 관찰할 수 있는 일축인장에 기초한 직접인발 시험(Pull-off Test)을 대상으로 하여 연구를 진행하였다(Emmons,1994). 이 직접 인발 시험 또한 편심하중, 응력집중 등 몇 가지 문제를 앓고 있다. 편심하중의 경우 균일한 인장 응력 상태에서 편심 하중을 최소화하기 위하여 많은 연구가 진행되어져 왔으며, 어느 정도 해결되어 있는 상태이다. 그러나 시험체의 형상과 시험체 경계조건에 따른 응력집중의 영향에 대한 연구는 아직 까지 미비한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 코어 형상과 시험체 경계조건에 따른 응력집중계수를 비교하여 부착면에서 응력집중의 영향이 미소하게 작용하는 최적의 직접인장시험(Pull-off Test) 기준을 제시하고 실험을 통하여 검증하고자 하였다.

2. 유한요소 해석

2.1 해석계획

직접인발 시험 시 발생하는 응력의 형태를 알아보기 위해 범용 유한요소 프로그램인 LUSAS[FEA.Ltd]를 사용 모델링 하였다. 그림 1은 모델링에 사용된 개념도를 나타낸 것이다. 기존의 교량상판위에 덧씌우기 된 슬래브 형태로 구성되어 졌다. 기본 가정은 콘크리트는 선탄성거동을 하며, 균질하다고 가정하였다. 모델링은 100cm×140cm, 덧씌우기 두께 5cm, 콘크리트 구조물두께는 25cm 의 크기로 모델링 하였고, 경계조건은 하단부를 고정, 나머지 부분을 자유조건으로 고려하였다.

* 정회원 · 강원대학교 토목공학과 · 박사과정 · 공학석사 · 033-250-6240(E-mail:ksh0304@korea.com)
** 정회원 · 강원대학교 토목공학과 · 박사과정 · 공학석사 · 033-250-6240(E-mail:wonkyong@hanmail.net)
*** 정회원 · (주)국일건설, 대표이사 · 공학석사 · (E-mail:kukil001@empal.com)
**** 정회원 · (주)승화 E&C · 상무이사 · 공학석사 · (E-mail:khkim@seunghwa.co.kr)
***** 정회원 · 강원대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 033-250-6236 (E-mail : kkyun@cc.kangwon.ac.kr)

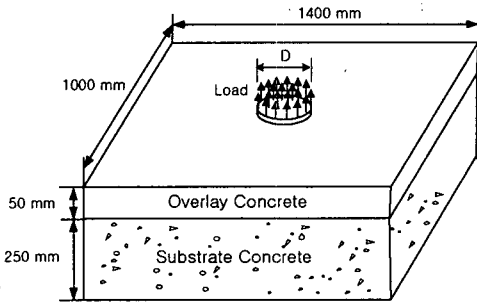


그림 1 직접인장 시험의 개념도

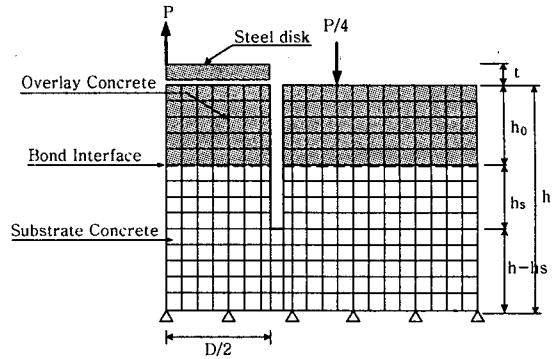


그림 2 직접인장시험의 유한요소 모델

표 1 유한요소 해석에 사용된 물성.

Type of Concrete	Modulus of Elasticity (kgf/cm ²)	Poissons ratio
Substrate Concrete (OPC)	307,000	0.18
Overlay Concrete (LMC)	288,000	0.18

표 2 해석에 사용된 변수

Variable	Applied Vaues
T/D	0.05~0.45
H _s /D	0.05~0.45
H _o /D	0.10~0.90
E _i /E _o	0.60~3.00
L _{corner}	1.0 D~5.0 D
L _{core}	1.0 D~5.0 D

그림 2는 고려된 부착강도 해석 모델을 나타낸 것이며, 이때 사용된 물성은 표 1에 나타내었다. 유한요소 해석 시 적용된 변수는 절삭 직경에 대한 절삭깊이(h_s/D), 절삭 직경에 대한 덧씌우기 두께(h_o/D), 절삭 직경에 대한 부착강판 두께(t/D), 기존 콘크리트와 덧씌우기 재료의 탄성계수비, 시험체에서 모서리 경계까지의 거리(L_{corner}), 시험체 사이의 거리(L_{core})에 따른 부착 특성을 고찰하고자 하였다. 이때 부착면에 발생한 응력의 특성을 비교하고 응력집중계수를 산출하여 최적의 직접인장시험 기준을 마련하고자 하였다. 적용된 변수의 자세한 내용은 표 2에 나타내었다.

2.2 유한요소해석 결과 및 고찰

유한요소 해석을 통해 절삭 깊이, 덧씌우기 두께, 탄성계수비의 변화, 부착강판 두께변화, 시험체에서 모서리 경계까지의 거리, 시험체 사이의 거리에 따른 응력을 고찰하여, 응력집중 계수를 산출하였다. 응력집중 계수는 부착면에 발생하는 최대응력에 대한 시험체에 발생하는 평균응력의 비로 산출하였다.

2.2.1 절삭직경과 깊이에 따른 영향

절삭 직경과 깊이가 콘크리트 인발부착강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 3종류의 직경($D=7.5\text{cm}$, 10cm , 15cm)을 가지는 시험체를 직경에 대한 절삭깊이 비(h_s/D)를 0.05~0.45까지 변화시켜 유한요소해석을 수행하였다. 이때 콘크리트의 재료특성 및 덧씌우기 두께($h_o=5\text{cm}$)는 일정하게 고정하였으며, 경계조건의 영향이 미치지 않도록 슬래브는 충분히 크게 모델링하였다. 그림 3은 D7.5, 10, 15 시험체에 작용하는 최대응력을 평균응력으로 나눈 응력집중계수를 직경에 대한 절삭깊이 비(h_s/D)에 따라 나타낸 것이다. 모든 시험체의 경우 직경에 대한 절삭깊이 비(h_s/D)가 0.2~0.25일 때 응력집중의 영향이 최소가 됨을 알 수 있었다.

2.2.2 탄성계수비의 영향

그림 4는 탄성계수비의 영향을 나타낸 것으로, 이때 해석은 절삭직경($D=10\text{cm}$), 절삭깊이($h_s=2.5\text{cm}$)로 고정하고 탄성계수비를 0.6에서 3까지 변화시키며 수행하였다. 해석결과 탄성계수비가 0.6~3의 경우 유사한 응력분포 경향을 보였으며, 탄성계수비가 0.4보다 감소하였을 경우 코어 표면에서 응력이 증가함을 보였다. 응력집중계수는 탄성계수비가 0.2~0.8사이 급격한 감소를 보였으며, 0.8 이상일 경우 응력집중계수는 완만히 증가하는 것을 알 수 있었다.



2.2.3 덧씌우기 두께의 영향

덧씌우기 두께를 변화하였을 경우 부착면에서의 응력집중 영향을 분석하기 위하여 3종류(D=7.5cm, 10cm, 15cm)의 직경을 가지는 시험체를 직경에 대한 덧씌우기 두께 비(h_0/D)를 0.10~0.90까지 변화시켜 유한요소 해석을 수행하였다. 이때 콘크리트의 재료특성 및 절삭깊이($h_s=2.5cm$)는 일정하게 고정하였다. 그림 5는 덧씌우기 두께의 영향을 나타낸 것으로, 모든 시험체의 경우 h_0/D 비가 0.30부터 응력집중계수가 1에 수렴해 갈 수 있었으며 응력집중에 미치는 영향이 적음을 알 수 있었다.

2.2.4 모서리 경계의 영향

시험체로부터 모서리 경계까지의 거리가 응력집중에 미치는 영향을 알아보기 위하여 시험체로부터 모서리 경계까지의 거리를 D~5D까지 변화하며 유한요소 해석을 실시하였다. 시험체의 직경은 D10 크기의 시험체를 사용하였고, 콘크리트의 재료특성 및 덧씌우기 두께($h_0=5cm$), 절삭깊이($h_s=2.5cm$)는 일정하게 고정하였다. 그림 6에서 알 수 있듯이 모든 거리에서의 응력집중계수는 1.2 이하의 값을 나타내어 응력집중에 미치는 영향은 미소함을 알 수 있었다.

2.2.5 부착강판 두께의 영향

부착강판 두께를 변화하였을 경우에 부착면에서의 응력집중 영향을 분석하기 위하여 3종류(D=7.5cm, 10cm, 15cm)의 직경을 가지는 시험체를 직경에 대한 부착강판 두께 비(T/D)를 0.05~0.45까지 변화시켜 유한요소해석을 수행하였다. 그림 7에서 보면 알 수 있듯이 직경에 대한 부착강판 두께 비를 변화시켰을 때 디스크와 콘크리트 부착면에 작용하는 응력집중계수를 나타낸 것이다. 직경 7.5cm, 10cm, 15cm 모두에서 T/D가 0.3에 가까워 질 때 응력집중의 영향이 최소가 됨을 알 수 있었고 신·구 콘크리트 사이의 부착면에서는 응력 집중의 영향이 미소함을 알 수 있었다.

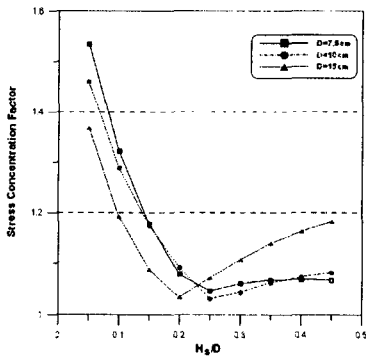


그림 3 H_s/D 에 따른 직경별 응력집중계수

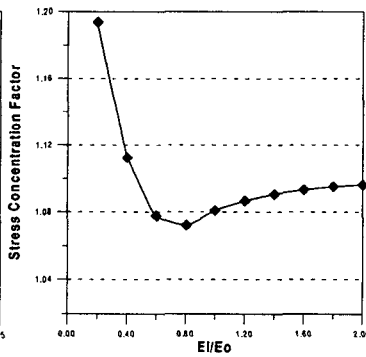


그림 4 탄성계수비에 따른 응력집중계수

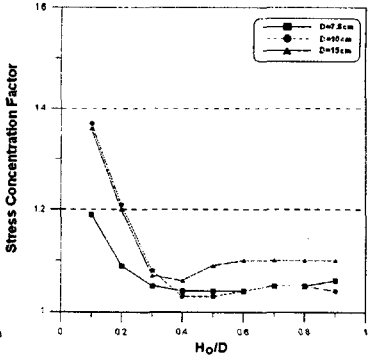


그림 5 H_0/D 에 따른 직경별 응력집중계수

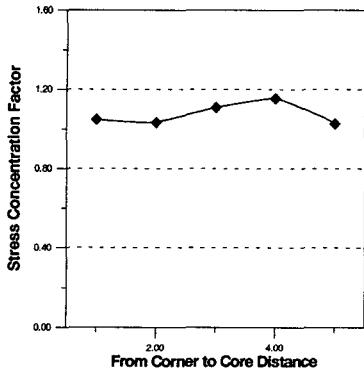


그림 6 모서리 경계에 따른 응력집중계수

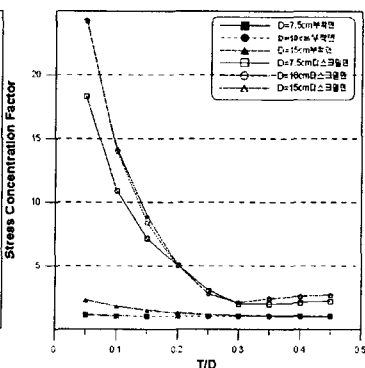


그림 7 T/D에 따른 부착면의 응력집중계수

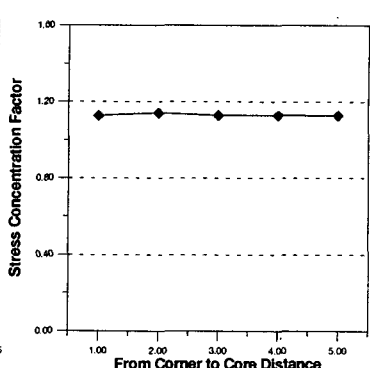


그림 8 코어간 거리에 따른 응력집중계수

2.2.6 코어간 거리의 영향

코어간의 거리가 응력집중에 미치는 영향을 알아보기 위하여 코어로부터 다음 코어까지의 거리를 D~5D 까지 변화하며 유한요소 해석을 실시하였다. 이때 콘크리트의 재료특성 및 덧씌우기 두께($h_o=5cm$), 절삭깊이 ($h_s=2.5cm$)는 일정하게 고정하였으며, 코어의 직경은 D10 크기의 코어를 사용하였다. 그림 8은 코어 사이의 거리에 따른 응력집중계수를 나타낸 것이다. 모든 거리에서의 응력집중계수는 1.2 이하의 일정한 값을 나타내어 코어간 거리가 응력집중에 미치는 영향은 미소함을 알 수 있었다.

3. 실험에 의한 제시된 방법 검증

3.1 실험계획

본 연구는 기하학적 형상과 재료적 성질에 따른 부착강도의 영향을 알아보기 위하여 보통콘크리트와 라텍스 개질 콘크리트를 사용하여 실험을 실시하였다. 이 두 재료의 부착강도특성을 분석하기 위해서 보통콘크리트와 라텍스 개질 콘크리트로 구성된 복합콘크리트 슬래브를 제작하여 직접인발실험(Pull-out test)을 실시하였으며, 이를 비교평가하기 위하여 직접인장 시험과 휨부착 시험을 실시하였다. 또한 부착경계면 조건 변수는 기하학적 변수로 코어직경과 코어 깊이를 고려하였으며, 재료적 변수로 부착면의 습도조건, 물-시멘트 비를 선정하였다.

3.2 배합설계

배합설계는 재료적 실험변수를 고려하여 설계하였다. 물-시멘트비에 대한 부착강도의 특성을 알아보기 위하여 SBR 라텍스는 단위체적당 시멘트에 대하여 15% 혼입한 후, LMC의 경우 물-시멘트비는 31%, 34%, 38% 로 변화하였으며, RSLMC의 경우 36%, 38%, 40% 으로 변화하였다. 또한, 각 변수에 따른 거동특성을 파악하고자 동일한 조건으로 배합계획을 하였으며, 콘크리트 배합 설계는 표 3에 나타내었다

표 3. 사용된 콘크리트의 배합특성

Type of Concrete	Latex Contents(%)	W/C (%)	Mix Proportion (kg/m ³)				S/a (%)	Antifoamer Contents	Super-plasticizer Contents
			Cement	Latex	Water	Sand			
OPC	0	49	390	0	191	950	731	58	
LMC	15	31		130	49	969	746		
		34			61	952	733		
		38	77		929	715			
RSLMC	15	36	390	122	74	952	716	58	1.0%
		38			82	940	707		
		40			89	958	698		

3.3 시험체 제작 및 실험방법

직접인발에 의한 라텍스 개질 콘크리트의 부착강도 특성 실험을 수행하기 위해서 두께 250mm, 폭 1200mm, 그리고 길이 1400mm의 콘크리트 슬래브를 제작하였다. 콘크리트 슬래브를 28일 양생 한 후에 기하학적 형상에 따른 영향을 고찰하기 위하여 50mm 두께의 초속경 라텍스 개질 콘크리트 덧씌우기를 적용하였고, 재료적 영향과 기존부착 측정방법과의 연관성을 고찰하기 위하여 동일 두께의 개질 콘크리트 덧씌우기를 적용하여 실제 교량 상판과 유사한 조건으로 그림 9와 같은 시험체를 제작하였다. 코어직경의 영향을 알아보기 위하여 직경을 5cm, 7.5cm, 10cm, 15cm 로 변화하였으며, 절삭깊이의 영향을 보기 위하여 부착면으로 부터 1cm~5cm까지 절삭하여 직접인발을 실시하였다.

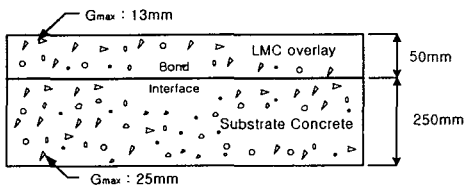


그림 9. 직접인발시험을 위한 콘크리트 슬래브

100×100×400mm 크기의 휨 부착 시험체를 직접인발 시험체 타설 시 함께 제작하였다. 직접인장 시험은 일축인장에 기초한 직접인장에 의한 부착강도 실험으로 Kuhlmann이 제안한 실험방법으로 실시하였고(Kuhlmann,1990), 휨 부착 시험은 Ohama에 의해 사용되어진 휨 부착시험을 사용하여 실험을 실시하였다(Ohama,1982).



3.4 실험 결과 및 고찰

3.4.1 기하학적 형상에 따른 영향

그림 10은 초속경 라텍스 개질 콘크리트를 덧씌우기로 적용하였을 때, 절삭직경에 대한 절삭 깊이비 (Hs/D)에 따른 부착강도 특성을 나타낸 것이다. 절삭직경이 100mm일 때 절삭 깊이비(Hs/D)가 0.3인 경우는 0.1인 경우에 비하여 약 31%, 0.2인 경우에 대하여서는 약 25% 증진된 부착강도를 나타내었다. 이러한 절삭 깊이비에 따른 부착강도의 차이는 응력집중에 기인하는 것으로 판단되어진다. 절삭 직경이 75mm일 때 절삭 깊이비가 증가함에 따라 부착강도가 증진되는 현상을 볼 수 있다. 즉, 절삭 깊이비가 0.4인 경우는 0.13인 경우보다 부착강도가 약 14.6% 증진된 값을 나타내었다. 절삭 직경이 50mm경우도 절삭 깊이비가 0.6인 경우는 0.2인 경우에 비하여 부착강도가 약 20.5% 증진된 값을 보임으로써 모든 경우에 있어 동일한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

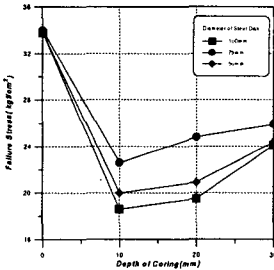


그림 10. 코어깊이에 따른 인장응력 비교

3.4.2 재료적 성질에 따른 영향

그림 11와 12는 물-시멘트비 변화에 따른 라텍스개질 콘크리트의 부착강도 특성을 직접인발시험(Pull-off Test)방법과 직접 인장법 그리고 휨부착 시험법에 의한 결과를 구분하여 나타낸 것이다. 이를 살펴보면, 세 가지의 실험방법 모두에 있어 물-시멘트비가 낮을수록 부착강도가 증진되는 것을 알 수 있다. 이러한 물-시멘트비와 부착강도의 관계는 일반적인 콘크리트의 강도발현과 동일한 결과로 판단된다.

그림 13과 14는 부착면의 수분조건에 따른 부착강도를 세가지 실험방법에 의한 결과를 나타낸 것이다. 그림 13은 물-시멘트비 31%에 대한 부착강도 특성을 나타낸 것이다. 모든 실험방법에 있어서 부착면이 건조한 조건에서의 부착강도가 다소 높게 나타났다. 그림 14는 물-시멘트비 38%에 대한 부착강도 결과를 나타낸 것으로, 그림 13의 결과와 비교하면, 물-시멘트비 31%에서 얻은 결과와 상반됨을 알 수 있다. 즉, 물-시멘트 38%의 경우에는 부착면이 표면건조포화상태일 경우의 부착강도 측정치가 건조상태의 부착강도보다 다소 향상된 경향을 나타내었으며, 이러한 경향은 모든 시험방법에서 동일하게 나타났다.

3.4.3 시험방법에 따른 결과 고찰

그림 13와 14를 살펴보면 실험들간의 부착강도는 물-시멘트비의 변화와 상관없이 직접인발시험(Pull-off Test) 방법이 다른실험에 비하여 약 13% 증진된 부착강도 값을 나타내었다. 또한 휨부착 실험방법에 의한 부착강도와 니플 파이프에 의한 부착강도 값이 거의 동일한 결과를 보이는 것을 알 수 있었다.

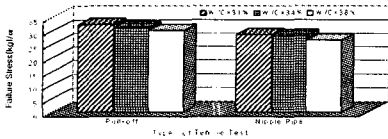


그림 11. 시험방법에 따른 비교 (Pull-off 와 Nipple Pipe)

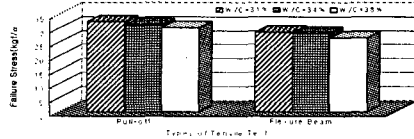


그림 12. 시험방법에 따른 비교 (Pull-off 와 Flexure Beam)

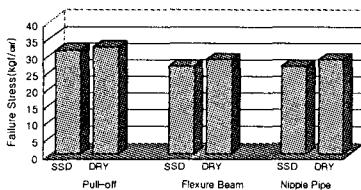


그림 13. 부착면 수분조건에 따른 부착강도 비교 (W/C=31%)

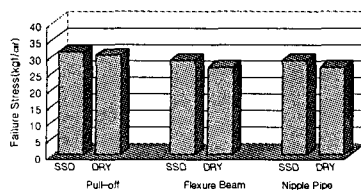


그림 14. 부착면 수분조건에 따른 부착강도 비교 (W/C=38%)



4. 결 론

본 연구에서는 본 연구에서는 건설현장에 사용되는 직접인발시험에서 코어-깊이와 덧씌우기 두께, 탄성계수비, 부착강판두께, 절삭면에서 모서리 경계까지의 거리, 절삭면들 사이의 거리에 대한 유한 요소 해석을 통하여 직접인발시험의 적절한 실험기준을 마련하고자 하였으며, 보다 객관화된 직접인발 시험(Pull-off Test)의 기준설정을 위하여 절삭깊이와 절삭직경 그리고, 현장에서 가장 문제 시 되고 있는 표면함수 상태를 변수로 설정하여 실험을 실시하였으며, 이러한 인자들에 의한 부착강도 변화를 비교 분석하였다. 또한 직접인발 시험과 직접인장 시험, 휨 부착강도 실험을 비교분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 덧씌우기 된 슬래브를 유한요소 해석을 한 결과 코어깊이가 증가함에 따라 응력집중의 영향이 현저히 감소함을 알 수 있었다. 이는 응력집중의 영향을 최소화하기 위한 시험체 직경에 대한 절삭깊이의 비(H_s/D)는 0.20~0.25사이가 적절한 것으로 판단된다.
- 2) 덧씌우기 재료의 탄성계수와 기존 콘크리트의 탄성계수가 다른 이질재료를 사용할 경우 탄성계수비가 0.6~1.0사이의 재료가 응력집중의 영향이 감소됨을 알 수 있었다.
- 3) 덧씌우기 두께는 모든 시험체의 경우 H_s/D 비가 0.30부터 응력집중계수가 1에 수렴해 감을 알 수 있었으며, 콘크리트 교면포장이 5cm 일때 덧씌우기 두께가 부착면에 응력집중의 영향을 적게 미침을 알 수 있었다.
- 4) 모서리 경계의 영향과 코어간 거리의 영향은 모든 경우 응력집중계수 값이 1.2 이하의 값을 나타내었다. 따라서 시험체로부터 모서리경계까지의 거리와 코어간 거리가 응력집중에 미치는 영향은 미소함을 알 수 있었다.
- 5) 부착강판 두께의 변화는 신·구 부착면에 대하여 매우 미소한 영향을 나타내었으나, 부착강판과 콘크리트 부착면에 대한 영향은 매우 크게 나타났다. 이 영향은 시험체 직경에 대한 강판 두께의 비가 3.0이었을 때 응력집중의 영향이 최소가 됨을 알 수 있었다.
- 6) 덧씌우기 된 슬래브를 직접인발 시험을 한 결과 절삭깊이 깊이버가 증가함에 따라 응력집중의 영향이 현저히 감소함으로써 부착강도가 크게 측정됨을 알 수 있었다.
- 7) 물-시멘트비 변화에 따른 부착강도 특성은 직접인발 시험(Pull-off Test)에 의한 결과가 니플 파이프시험과 휨 부착 시험보다 약 13% 증진된 부착강도 값을 나타내었다.
- 8) 물-시멘트비 31%에 대한 부착강도 특성은 모든 실험방법에 있어서 부착면이 건조한 조건에서의 부착강도가 다소 높게 나타났으나, 물-시멘트 38%의 경우에는 부착면이 표면건조포화상태일 경우의 부착강도 측정치가 건조상태의 부착강도보다 다소 향상된 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 물-시멘트비에 따른 부착면의 함수상태와 부착강도가 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Austin, S., P. J. Robins, and Y. Pan(1995), "Tensile Bond Testing of Concrete Repairs". *RILEM-Materials and Structures*. Vol. 28. pp.249-259
2. Emmons, Peter H.(1994),"Concrete Repair and Maintenance illustrated", R. S. MEANS COMPANY, INC. pp. 155-164.
3. Kuhlmann, L. A.(1990),"Test Method for Measuring the Bond Strength of Latex-Modified concrete and Mortar", *ACI Materials Journal*, V.87, No.4.
4. Ohama, Y.(1982),"Adhesion Durability of polymer-Modified Mortars through Ten-Year Outdoor Exposure", *Proceeding, 3th International Congress on Polymers in Concrete*, College of Engineering, V.1., pp. 209-221.
5. 장홍균, 윤경구 등(2002), "교면 덧씌우기 콘크리트의 부착강도 평가 방법 제안", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회논문집, Vol. 14, No. 1, pp. 349-354.
6. FEA. Ltd, "*LUSAS Manual* "