

유한요소해석과 실험검증을 통한 콘크리트 직접인발 시험 방법 제안

Proposal of an Appropriate Method for Concrete Pull-out Test Through Finite Element Analysis and Experiments

김성환* · 권 혁** · 장흥균*** · 윤경구****

Kim, Seong Hwan · Kwon, Hyock · Jang, Heung Gyun · Yun, Kyung Ku

1. 서 론

교량상판의 덧씌우기나 노후 된 도로의 보수처럼 콘크리트 구조물은 종종 새로운 콘크리트가 기존 콘크리트에 적용되어 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. 부착강도 측정에는 경사전단시험, 직접전단시험, 일축전단시험의 세 가지 방법이 있으나, 건설현장에서는 실제보수나 덧씌우기한 부분을 평가하여 바로 관련자에게 시험결과의 승인여부를 파악할 수 있도록 하거나 공사를 조정하도록 할 수 있는 장점과 시험체의 인장강도에 의한 실제적 부착강도를 측정할 수 있기 때문에 일축인장에 기초한 직접인발 시험을 사용하고 있다.

직접인발 시험은 코어를 기존 콘크리트에 부착되어 있는 상태로 둔 채, 인장기구를 코어에 연결하여 코어가 기존 콘크리트로부터 파괴될 때까지 하중을 가하여 부착강도를 측정하는 방법이다. 부착강도의 크기는 파괴가 발생하였을 때의 하중을 코어의 단면적으로 나누어 구하게 된다. 그러나 이러한 계산 방법은 코어 깊이에 의한 응력집중의 영향을 무시한 것으로 실제적인 부착강도보다 과소하게 평가될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 응력집중계수를 산출하고, 이 응력집중계수를 비교하여 부착면에서 응력집중의 영향이 미소한 적절한 코어깊이를 구하여 최적의 직접인발 시험방법과 현장실험에서의 기준을 제시하고자 하였다. 유한요소 해석은 코어깊이, 덧씌우기 두께, 기존 콘크리트와 덧씌우기 재료의 탄성계수비를 변화시켰으며, 이에 따른 응력 특성을 비교하고 부착면에서의 응력집중계수를 산출하여 최적의 직접인발시험 기준을 마련하고자 하였고, 직접인발에 의한 콘크리트의 부착강도 특성 실험을 수행하기 위해서 보수나 덧씌우기 콘크리트에 전형적으로 나타나는 양생환경을

* 정희원 · 강원대학교 토목공학과 033-250-6240 (E-mail: ksh0304@korea.com)

** 정희원 · 강원대학교 토목공학과 033-250-6240 (E-mail: samteng@hanmail.net)

*** 정희원 · 강원대학교 토목공학과 033-250-6240 (E-mail: kukileng@kornet.net)

**** 정희원 · 강원대학교 토목공학과 033-250-6236 (E-mail: kkyun@cc.kangwon.ac.kr)



재현하고, 실제 교량 상판과 유사한 조건의 슬래브 두께를 설정하여 실내 실험을 실시하였다.

2. 직접 인발 시험의 유한요소 해석

2.1 직접 인발 시험

일축인장에 기초한 직접인발시험은 보수나 덧씌우기 콘크리트를 지나 기존의 콘크리트를 지나 기존의 콘크리트부분까지 절단된 시험체 코어의 상면에 에폭시를 이용하여 강판을 부착한 후에 인발하는 방법으로써 현장에서 많이 채택되어져 왔다. 그림 1은 직접인발에 의한 부착강도 시험의 개요도를 나타낸 것이고, 그림 2는 직접인발 부착강도 시험기 설치과정을 나타낸 것이다.

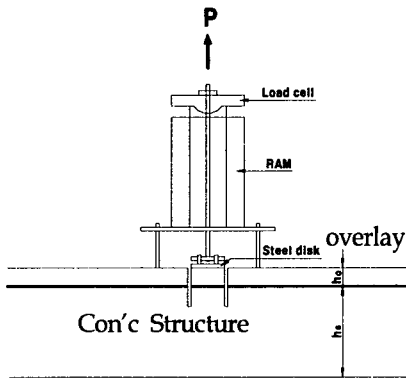


그림 1. 부착강도 시험의 개요도

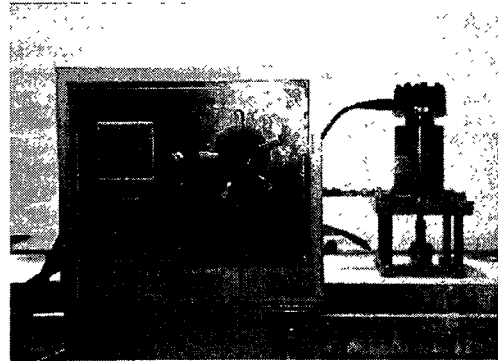


그림 2 직접인발 부착강도 시험기 설치과정

2.2 유한요소 해석

본 연구에서 부착강도 특성을 고찰하기 위하여 범용프로그램인 LUSAS[®]를 사용하여 모델링 하였다. 기본가정은 콘크리트는 탄성거동을 하며, 균질하다고 가정하였다. 모델링은 길이방향으로 100cm, overlay 두께 5cm, 콘크리트 구조물 두께 25cm의 크기로 모델링하였고, 요소는 y축에 대칭인 축대칭 요소를 사용하였으며, 하단의 경계조건은 힌지, 우측면의 경계조건은 roller로 처리하였다. 이때 코어깊이를 1cm~10cm로 변화시켰고, overlay 두께(h_0)를 1cm~10cm로 변화시켰으며, 탄성계수비를 변화시키면서, 40kgf/rad의 하중을 코어 상면에 작용하였다. 그림 3은 모델링 형태이며, 물성값은 다음과 같다.

$$E_i = 288000 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (lmc)} \quad E_o = 307000 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (opc)} \quad \nu = 0.18$$

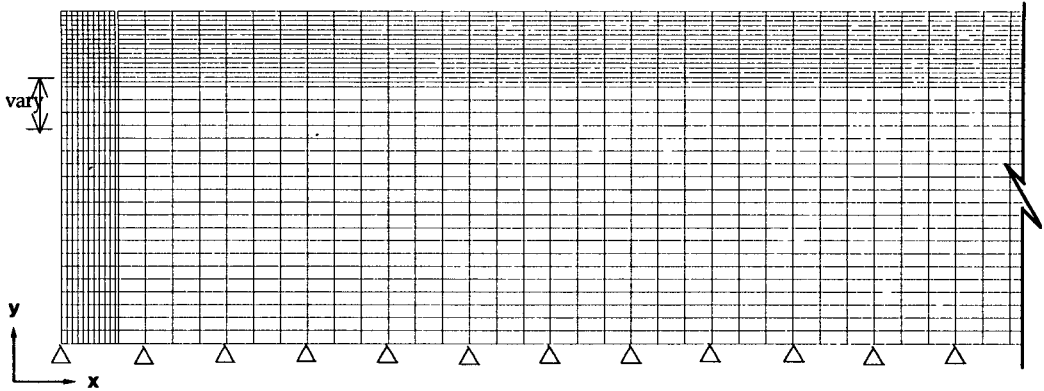


그림 3. 부착강도 시험의 해석 모델

3. 응력 해석 결과

유한요소 해석을 통해 코어 깊이, 덧씌우기 두께, 탄성계수비의 변화에 따른 응력을 고찰하여, 응력집중계수를 산출하였다. 응력집중계수는 부착면에 발생하는 최대응력에 대한 시험체에 발생하는 평균응력의 비로 산출하였다. 그림 4와 그림 5는 코어 직경 D10의 시험체에 발생하는 응력 변화를 보여준다.

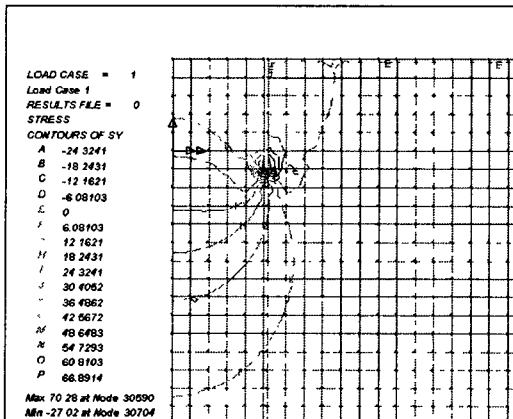


그림 4. σ_y 의 응력분포(코어깊이 1cm)

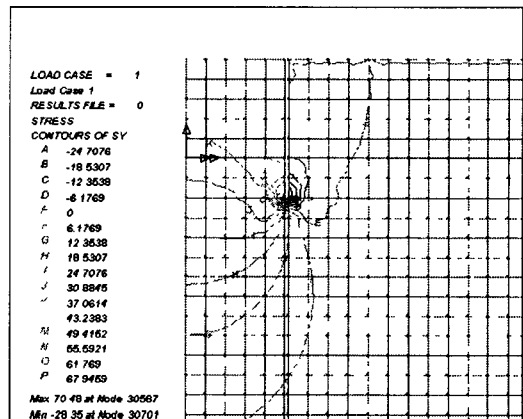


그림 5. σ_y 의 응력 분포(코어깊이 2cm)

3.1 코어깊이와 코어직경이 응력집중에 미치는 영향

코어깊이와 코어직경을 변화하였을 경우의 부착면에서의 응력집중 영향을 표 1과 그림 6~그림 9에 나타내었다. 부착면에서의 응력집중계수는 코어깊이의 증가에 따라 코어깊이 2cm까지는 36.14%~



38.21%의 급격히 감소율을 보였으며, 코어깊이가 2cm 이상 증가되었을 경우 5.16%~12.98%의 완만히 감소율을 보이며 1에 수렴하였다. 코어직경이 8cm에서 15cm로 증가함에 따라 응력집중계수도 0.3%~7.87%의 증가율을 보였다. 이와 같은 경향은 코어직경 보다는 코어깊이에 따라 응력집중의 영향이 크다는 것을 알 수 있었으며, 응력집중의 영향을 줄이기 위하여 코어깊이를 최소 2cm 이상으로 해야 할 것으로 판단된다.

표 1. 부착면에서의 응력집중계수

코어직경 \ 코어깊이	0cm	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm	6cm	8cm	10cm
8cm	1.66412	1.15590	1.05520	1.01409	1.00712	1.00334	1.00724	1.00325	1.00070
9cm	1.70131	1.21334	1.06805	1.02224	1.00765	1.00602	1.00655	1.00492	1.00168
10cm	1.73178	1.26589	1.07864	1.03073	1.01306	1.00689	1.00558	1.00600	1.00288
11cm	1.75631	1.31331	1.08669	1.03908	1.01912	1.00719	1.00582	1.00595	1.00399
12cm	1.77551	1.35556	1.09701	1.04688	1.02542	1.01103	1.00636	1.00503	1.00472
15cm	1.80622	1.45299	1.15348	1.07579	1.04273	1.02522	1.01396	1.00510	1.00373

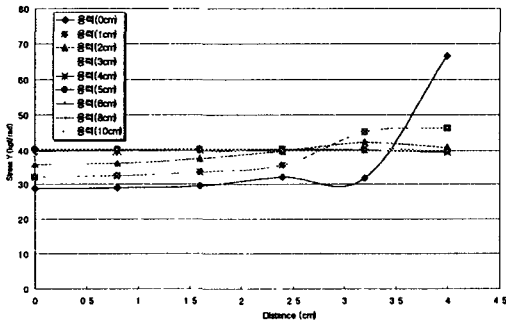


그림 6. 부착면에서의 응력(D8)

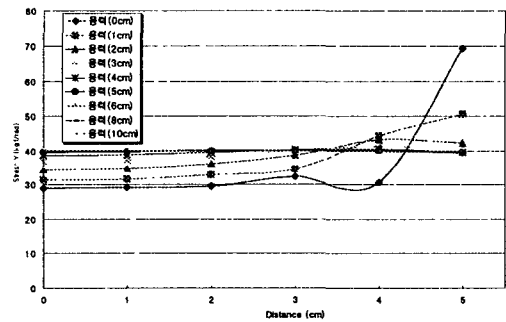


그림 7. 부착면에서의 응력(D10)

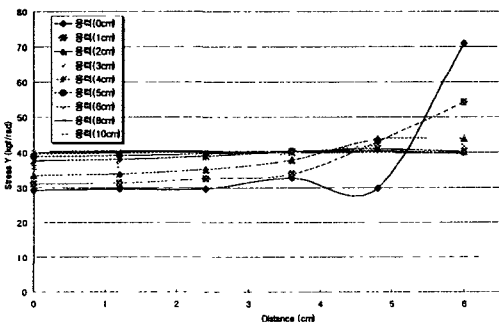


그림 8. 부착면에서의 응력(D12)

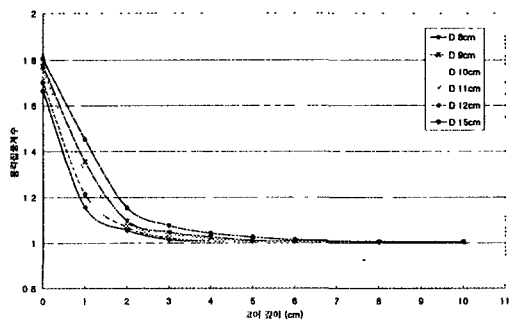


그림 9. 부착면에서의 응력집중계수



3.2 탄성계수비가 응력집중에 미치는 영향

탄성계수비를 변화 하였을 경우의 부착면에서의 응력집중 영향을 그림 10~그림 11에 나타내었다. 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.

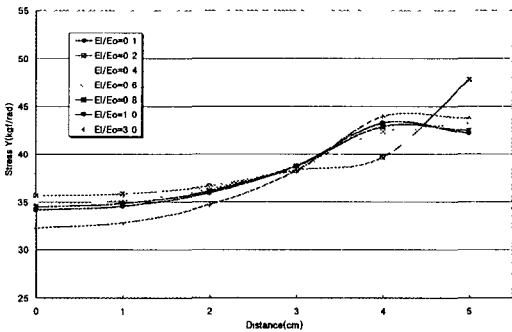


그림 10. 부착면에서의 응력(σ_y)

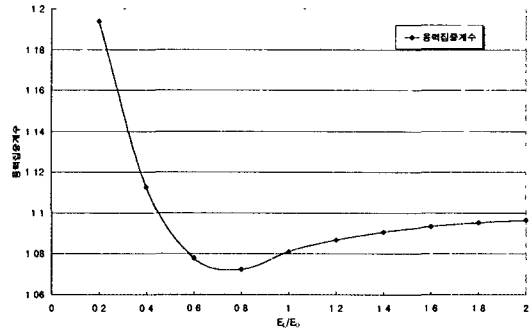


그림 11. 부착면에서의 응력집중계수

3.3 덧씌우기 두께가 응력집중에 미치는 영향

덧씌우기 두께를 변화 하였을 경우의 부착면에서의 응력집중 영향을 그림12~그림13에 나타내었다. 덧씌우기 두께를 3cm ~9cm로 변화함에 따라 응력은 거의 동일한 형태를 보였으며, 응력집중계수는 1.03의 일정한 형태를 보였다. 이는 덧씌우기 두께가 응력집중에 대하여 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

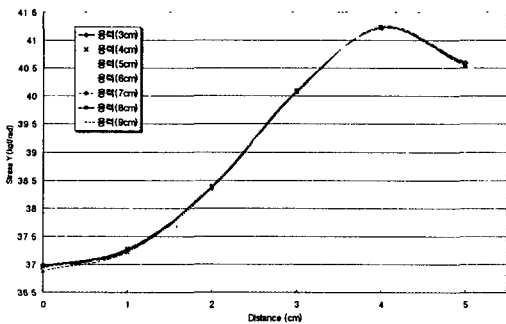


그림 12. 부착면에서의 응력(σ_y)

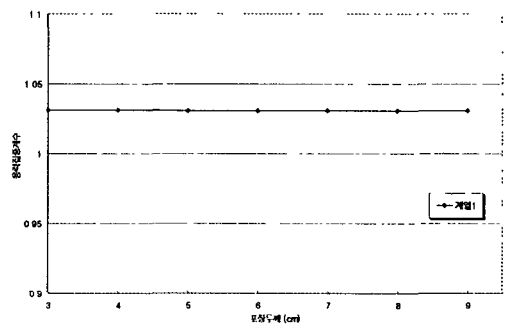


그림 13. 부착면에서의 응력집중계수



4. 실험

4.1 개요

본 연구는 제안된 실험 방법의 검증을 위하여 보통콘크리트와 라텍스 개질 콘크리트를 사용하여 실험을 실시하였다. 이 두 재료의 부착강도특성을 분석하기 위해서 보통콘크리트와 라텍스 개질 콘크리트로 구성된 복합콘크리트 슬래브를 제작하여 직접인발실험을 실시하였다. 주요 실험변수로서 라텍스 혼입율에 따른 라텍스 개질 콘크리트의 부착강도 특성을 측정하여 이를 보통 콘크리트와 상대비교 분석하였다.

4.2 시험체 제작 및 실험

본 연구에서 보통콘크리트에 대한 라텍스 개질 콘크리트의 부착강도특성을 평가하고자, 미국 D사의 Styrene- Butadiene 계열의 라텍스를 사용하였다. 구 콘크리트는 최대 치수가 25mm인 굵은 골재를 사용하였고, 덧씌우기용 라텍스 개질 콘크리트는 최대 치수가 13mm인 굵은 골재를 사용하여 실제교량 상판의 덧씌우기 환경과 동일하게 하여 그림 14와 그림 15같은 시험체를 제작하였다. 코어깊이는 유한요소 해석 결과에 따라 응력집중의 영향이 감소되는 2.5cm 적용하였으며, 그림 2의 시험기를 사용하여 직접인발을 실시하였다.

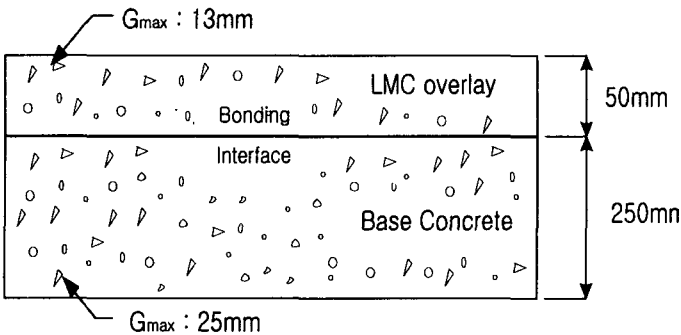


그림 14. 직접인발시험을 위한 콘크리트 슬래브

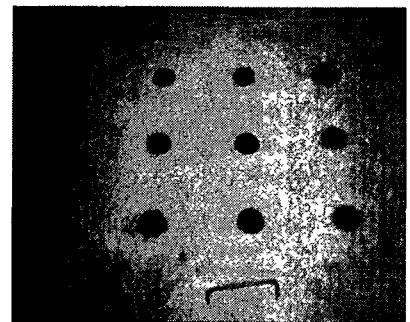


그림 15. 코어링된 부분에 강원반을 부착

물-시멘트비는 37%, 최적 잔골재율은 55%로 고정한 후, 라텍스의 치환은 단위체적당 시멘트에 대하여 혼입율에 따라 치환하였다. 또한, 각 변수에 따른 거동특성을 파악하고자 동일한 조건으로 배합계획을 하였으며, 이 콘크리트 배합 내용은 표 2에 나타내었다



표 2. 기존 콘크리트와 라텍스 개질 콘크리트의 배합설계 (Unit : kg/m³)

구분	W/C (%)	S/a (%)	Cement	Latex	Water	Sand	Gravel	S.P
LMC	37	55	400	0	148	1040	857	4
				40	128	1012	834	-
				80	108	984	811	-
				120	88	956	788	-
				160	68	927	765	-
Substrate	35	40	500	0	175	675	1041	-

시험체 제작은 직접인발에 의한 라텍스 개질 콘크리트의 부착강도 특성 실험을 수행하기 위해서 두께 250mm, 폭 1100mm, 그리고 길이 1400mm의 콘크리트 슬래브를 제작하였다. 콘크리트 슬래브를 28일 양생 후에 50mm 두께의 라텍스 개질 콘크리트 덧씌우기를 적용하여 실제 교량 상판과 유사한 조건으로 설정하였다. 표면처리와 표면함수상태에 따른 라텍스 개질 콘크리트의 부착강도 특성 평가에서는 라텍스 혼입을 15%를 기준으로 덧씌우기를 적용한 후 적정 기간동안 콘크리트 슬래브에 살수 양생을 실시하고 그후 기건양생을 실시하였다.

4.3 실험결과

직접인발에 의한 라텍스 혼입율에 따른 부착강도 측정결과를 표 3과 그림 16에 나타내었다. 실험결과, 라텍스 혼입율 20%의 부착강도는 21.24kgf/cm²를 나타내었으며 라텍스 혼입율 5%의 부착강도 보다 약 3배의 증가를 보였다. 덧씌우기한 LMC의 부착력은 라텍스/시멘트 비의 증가와 함께 증진되었다. 라텍스 혼입율에 따른 부착강도는 라텍스/시멘트 비 20%에서 최대를 나타내었다.

표 3. 라텍스-시멘트비에 의한 직접인발시험 결과와 파괴 모드

	Tensile stress at failure (kgf/cm ²)	Fracture mode (%)		
		LMC	Interface	Base con'c.
L/C 5%	8.93	45	40	15
	8.07	85	15	0
	4.42	85	5	10
L/C 10%	16.54	70	20	10
	16.45	80	20	0
	11.22	80	10	10
L/C 15%	20.36	20	0	80
	20.81	15	0	85
	19.36	20	0	80
L/C 20%	22.01	10	0	90
	21.25	15	5	80
	20.46	20	10	70

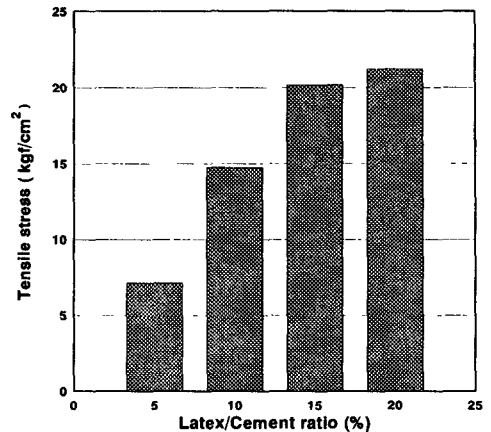


그림 16. 라텍스-시멘트비에 의한 부착강도



5. 결 론

본 연구에서는 건설현장에 사용되는 직접인발시험에서 코어 깊이와 덧씌우기 두께, 탄성계수비에 대한 유한 요소 해석과 실험을 수행하였다. 이때 응력의 영향을 고찰하여 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 코어깊이는 2.0cm 이상하여야 할 것으로 판단된다.
- 2) 덧씌우기 재료의 탄성계수와 기존 콘크리트의 탄성계수가 다른 이질재료를 사용할 경우 탄성계수비가 0.6~1.0사이의 재료가 응력집중의 영향이 감소됨을 알 수 있었고, 덧씌우기 두께는 응력집중에 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.
- 3) 덧씌우기된 콘크리트의 부착성능은 라텍스 혼입율이 증가할수록 라텍스 개질 콘크리트의 부착강도가 증가하였다. 직접인발에 의한 실험결과는 라텍스 개질 콘크리트의 부착강도가 증가하였으며, 라텍스의 혼입에 의해 콘크리트의 부착강도가 증진됨을 알 수 있었다.
- 4) 코어깊이는 응력집중과 구조물의 철근덮개와의 영향을 고려할 때 코어깊이는 2.5cm~3.0cm가 적정할 것으로 판단된다.
- 5) 코어깊이를 2.5cm로 하여 실험한 결과 응력집중의 영향을 최소화하여 부착강도를 측정할 수 있었다. 본문에 제시된 코어 깊이별 응력집중계수를 이용하면 여러 코어깊이에 따른 실제적인 부착강도를 산출할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 라텍스 개질 콘크리트 부착면의 부착강성모델을 개발하기 위하여 많은 연구와 실험이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Emmons, Peter H.(1994), "Concrete Repair and Maintenance illustrated," R. S. MEANS COMPANY, INC. pp. 155-164.
2. Louis A. Kuhlmann(1990), "Test Method for Measuring the Bond Strength of Latex-Modified Concrete and Mortar", ACI Materials Journal, V. 87, No. 4.
3. Ohama, Y.(1987), "Principle of Latex Modification and Some typical Properties of LMC," ACI Materials Journal, Vol. 84, No. 6, pp.511-518.
4. Austin, S ; Robins,P.J;Pan Y ; Tenile Bond Testing of Concrete Repairs. RILEM-Materials and Structures. Vol. 28. pg.249-259.1995



5. ASTM D4541-95e1 Standard Test Method for Pull-off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers, ASTM
6. Ohama, Y.(1987), "Principle of Latex Modification and Some typical Properties of LMC," ACI Materials Journal, Vol. 84, No. 6, pp.511-518.
7. 윤경구, 김경진 등(2000), "라텍스 개질 콘크리트의 부착강도 특성", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회논문집, Vol. 12, No. 2.
8. FEA. Ltd, "LUSAS Manual "