직접인장 및 간접인장 실험방법에 따른 접착식 콘크리트 덧씌우기의 부착강도 비교 고찰

김영규* · 이승우**

Kim, Young Kyu*, Lee, Seung Woo**

Comparative Study on the Bond Strength between Direct Tensile Test and Indirect Tensile Test for Bonded Concrete Overlay

ABSTRACT

Bonded concrete overlay is a favorable maintenance method since the material properties are similar to existing concrete pavements. In addition, bonded concrete overlay has advantage of structural performance based on being bonded together, both for the overlay layer and the existing pavement which perform as one monolithic layer. Therefore, it is important to have a suitable bond strength criteria for long term performance of bonded concrete overlay. This study aimed to investigate the affecting of bond strength on various bond characteristics, and to compare the bond strength between direct tensile test and indirect tensile test due to various conditions such as overlay materials, compressive and flexure strength of existing pavement, and deterioration status of existing pavement. As a result of this study, bond strength occurred by both of direct and indirect tensile test due to monotonic load is highly correlated such as coefficient of determination of 0.75 and P-value of 0.002. However, bond strength by indirect tensile test was relatively higher than bond strength by direct tensile test. It was known that correlation between direct and indirect tensile test was possible to use the characteristics analysis of bond fatigue behavior based on bond strength due to cyclic load which can simulate real field behavior of bonded concrete overlay.

Key words : Bonded concrete overlay, Bond strength, Direct tensile test, Indirect tensile test

초 록

접착식 콘크리트 덧씌우기는 기존 콘크리트 포장과의 재료물성이 유사하여 적절한 유지보수 공법으로 제시되고 있으며, 덧씌우기층과 기존 포장층이 완전부착을 통한 일체화 거동을 하여 우수한 구조적 성능을 확보할 수 있다. 따라서 접착식 콘크리트 덧씌우기의 장기 공용성을 위하여 적절한 부착강도 기준을 확보하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 다양한 부착 특성이 부착강도에 미치는 영향을 고찰하고자 하였으며, 덧씌우기 재료, 기존 포장의 압축강도 및 휨강도 변화, 기존 포장의 열화상태 등 다양한 부착조건에 대한 직접인장 및 간접인장 실험을 실시하여 도출되는 부착강도를 비교 분석하고자 하였다. 연구 결과, 직접인장실험에 의한 부착강도가 간접인장실험에 의한 부착강도보다 상대적으로 높게 분포하는 경향을 나타내고 있으나, 결정계수 0.75 및 P-value 0.002의 높은 부착강도 상관관계를 확보하였다. 이를 통하여 접착식 콘크리트 덧씌우기의 실제 현장 거동을 모사할 수 있는 반복하중에 의한 부착 피로 특성 분석 시 직접인장 및 간접인장 실험의 상관관계를 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

검색어 : 접착식 콘크리트 덧씌우기, 부착 강도, 직접인장실험, 간접인장실험

* 강릉원주대학교 토목공학과 박사과정 (kingdom1980@nate.com)

** 정회원 · 교신저자 · 강릉원주대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Gangneung-Wonju National University, Professor · swl@gwnu.ac.kr)

Received February 12 2013, Revised March 12 2013, Accepted March 15 2013

1. 서론

국내의 콘크리트 포장은 88고속도로가 개통된 이후 산업의 급격한 발달과 차량량의 증가로 꾸준히 신설 및 확장되었으나, 최근 콘크리트 포장의 내구연한이 20년에 가까워짐에 따라 많은 구간에서 열화에 의한 파손이 발생되어 유지보수 및 재건설을 필요로 하고 있다. 노후화된 콘크리트 포장은 구조적/기능적 성능이 감소하여 도로이용자의 불편을 초래하고 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 방안으로 노후화된 콘크리트 포장의 유지보수 시 덧씌우기 공법을 적용하고 있으며, 이를 통한 기존 콘크리트 포장의 구조적/기능적 성능을 회복시키고 있다(ACPA, 2008).

덧씌우기 공법은 노후화된 콘크리트 포장과의 단일거동을 위하여 유사한 물성을 나타내는 포장 재료를 사용하는 것이 유리하나, 국내의 경우 시공경험이 풍부하고 조기교통개방을 실시할 수 있는 아스팔트 덧씌우기 공법을 일반적으로 사용하고 있다. 특히 호남고속도로 대전~광주 구간의 경우 1986년 개통 후 현재까지 170km 구간 중 약 65%인 109km가 아스팔트 덧씌우기로 시공되었다(정종덕 외, 2006). 그러나 아스팔트 덧씌우기의 경우 기존 콘크리트 포장과의 재료물성 및 열팽창계수 등의 특성이 상이하여 준부에서 발생하는 반사균열과 함께 포트홀 등의 다양한 포장 파손으로 인하여 잦은 유지보수를 시행 하고 있다. 이로 인하여 국내의 경우 콘크리트 포장의 효과적인 유지보수 공법을 필요로 하게 되었으며, 아스팔트 덧씌우기 공법의 구조적 파손을 예방하고 공용성을 확보하기 위한 방안으로 접착식 콘크리트 덧씌우기에 관한 연구를 수행하였다(한국도로공사, 1997). 접착식 콘크리트 덧씌우기는 교통량 증가 및 차량량에 대한 하중지지 능력이 우수하고, 기존 콘크리트 포장과의 재료물성이 유사하여 유지보수 후 포장 파손 발생이 적다는 장점이 있다. 또한 최근 들어 다양한 초속경성 재료의 도입으로 콘크리트 덧씌우기의 조기 교통개방 성능을 확보하여 국내 현장 적용실적이 증가하고 있는 추세이다(이승우 외, 2011).

접착식 콘크리트 덧씌우기의 장단기 공용성을 확보하기 위한 방안으로는 기존 콘크리트 포장층이 건전해야 하며, 적정 부착성능을 확보하여 완전부착을 통한 일체화 거동을 나타내야 한다. 접착식 콘크리트 덧씌우기의 공용성을 저하시키는 원인으로는 크게 부착면 파손에 의하여 구조적 성능이 감소하는 것으로, 부착면에서 수직 인장응력 및 수평 전단응력이 임계치에 도달하여 부착강도 이상 발생할 경우 파괴되는 것이다. 따라서 이에 대한 적절한 부착강도 품질관리 기준이 요구된다. Peter M. Semen 등(2005)의 연구에 의하면 1950년대 후반 이후 전단에 의한 부착면 파손을 고려하여 전단강도 1.4MPa(200psi)를 품질관리기준으로 제시하였으며, 이에 따른 우수한 장기 부착성능을 확보한 것으로 나타났다. 그러나 근래에 들어 Granju (2001) 및 Lange 등(2001) 등이 실험과 함께

수치해석을 병행한 연구 결과를 살펴보면 건조수축과 함께 온도 변화에 따른 수축팽창으로 인하여 슬래브 컬링현상을 야기해 단부와 모서리에서 발생하는 높은 수직인장응력에 의한 부착면 인장파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 Medina Chavez 등(2007)의 연구에 의하면 California 주에서 시공한 노후 콘크리트 포장(JPCP) 위에 접착식 콘크리트 덧씌우기 공법을 적용한 사례를 통하여 덧씌우기 시공초기 건조수축으로 덧씌우기 층이 수축하면서 경계면에서 발생하는 과도한 전단응력으로 인하여 부착면 파손이 발생한다고 보고하였다. 그러나 Texas 주에서 시험시공 및 평가한 결과를 통하여 컬링(curling)이나 와핑(warping)에 의한 수직 인장응력으로 부착면 파손이 발생한다고 결론 내렸다(Medina Chavez et al., 2007). 이와 같이 기존 연구에서는 재료, 공법, 시공 및 환경 특성이 상이함으로 인하여 부착면에서 발생하는 주요 부착파괴모드에 대한 상반된 결론을 제시하고 있으나 수직 인장응력과 수평 전단응력으로 나타낼 수 있는 부착응력이 부착강도 이상 발생하게 되면 파손이 발생하게 되는 것을 확인할 수 있다.

최근 들어, 이승우 등(2012)의 연구에서는 기존 문헌에서 제시된 다양한 특성을 고려하는 수치해석을 실시하여 접착식 콘크리트 덧씌우기의 부착파괴 발생 메커니즘 및 주요 영향인자를 검토하였다. 연구 결과, 부착 파손은 수직 인장응력과 수평 전단응력의 복합적인 거동에 의하여 발생할 수 있으나 수직 인장응력의 영향이 지배적이므로 품질관리 시 수직 인장에 의한 부착강도 기준을 사용하는 것이 합리적인 것으로 나타났다. 또한 접착식 콘크리트 덧씌우기에 대한 교통 및 환경하중 재하 시 덧씌우기 재료의 열팽창계수 증가에 따른 최대 수직 인장응력(부착응력)의 변화가 0.63~2.20MPa 범위로 제시되었으며, 극한의 해석조건을 제외하더라도 현행 부착강도 기준 1.4MPa에 근접하는 0.60MPa 이상의 부착응력이 발생하여 품질관리 시 단조하중(monotonic load)에 대한 부착강도의 검토뿐만 아니라 반복하중(cyclic load)에 대한 부착 피로파괴 특성을 고려해야 할 것으로 판단하였다(이승우 외, 2012 / Lee et al., 2012). 그러나 일반적으로 수직인장에 대한 부착강도 품질관리 시 pull-out test를 실시하여 단조하중에 대한 만족여부를 판단하고 있으나 반복하중에 대한 부착 피로파괴 특성 검토 시 pull-out test의 적용은 용이하지 못하므로 정량적인 부착 피로 특성을 모사하기 위하여 반복하중의 적용이 용이한 간접인장시험(IDT, Indirect Tensile Test)의 적용을 모색하고자 하였다.

이를 위하여 본 연구에서는 접착식 콘크리트 덧씌우기의 부착 특성이 부착강도에 미치는 영향을 검토하였으며, 단조하중 및 반복하중 적용에 따른 합리적이고 정량적인 부착 특성을 고찰하기 위한 기초연구단계로 직접인장시험(pull-out test)과 간접인장시험(IDT; Indirect Tensile Test)을 통하여 도출되는 부착강도의 상관관계를 분석하여 IDT의 적용성을 판단하고자 하였다. 본 연구의

최종목적은 실제 현장거동을 모사할 수 있는 반복하중에 의한 부착 피로파괴 특성을 분석하는 것이며, 부착강도/부착피로 품질관리를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 접착식 콘크리트 덧씌우기의 특성

2.1 콘크리트 덧씌우기의 분류

일반적으로 도로포장은 공용성이 감소함에 따라 많은 구간에서 파손이 발생하여 유지보수 및 재건설을 필요로 하게 된다. 노후 콘크리트 포장의 덧씌우기는 주로 경험에 의하여 발전되어 왔으며, 현재 다양한 조건하에서 여러 형태의 덧씌우기 공법이 시행되고 있다. 이 중 접착식 콘크리트 덧씌우기(BCO; Bonded Concrete Overlay)는 포장 재료적인 측면의 파손이 적으며 비교적 포장상태가 양호한 경우 시행하여 콘크리트포장의 구조적, 기능적 개선을 위한 것으로 기존 콘크리트 포장 위에 콘크리트를 접착시키는 공법이다. 접착식 콘크리트 덧씌우기는 Fig. 1(a)와 같이 일반적으로 기존 포장층과 덧씌우기층을 단일체(monolithic)에 가깝게 접착시키는 것이 포장체의 구조적 강화에 매우 효과적이라는 관점에서 비롯된 것이다. 층간 부착이 중요하기 때문에 milling 또는 blasting 등을 통하여 기존 포장의 열화부위를 제거한 후 직접시공하거나 bonding agent를 사용하기도 한다. 덧씌우기 층의 응력상태를 살펴보면 기존 포장과 덧씌우기층이 일체거동을 통하여 중립축이 아래로 내려가므로 포장층 하부에 인장응력이 발생하게 된다. 덧씌우기 설계 시 열화부위를 제외하는 기존 포장의 유효단면을 사용하

므로 국내의 경우 약 5cm 내외로, 국외의 경우 약 8~16cm 범위의 비교적 얇은 두께로 시공된다. 기존 포장이 실질적으로 재시공이 필요하거나 D형 균열 등의 내구성에 문제가 있는 경우를 제외하면 콘크리트포장에 널리 사용할 수 있는 유지보수 대안이다.

반면에 비접착식 콘크리트 덧씌우기(UBCO; Unbonded Concrete Overlay)는 콘크리트포장의 구조적, 기능적 개선하기 위하여 접착식 콘크리트 덧씌우기보다 기존포장의 열화상태가 심각한 곳에 사용하는 것이 일반적이다. UBCO는 Fig. 1(b)와 같이 기존의 콘크리트포장 위에 분리층을 두고 그 위에 새로운 콘크리트 층을 덧씌우는 공법이다. 이 공법은 접착식 콘크리트 덧씌우기 공법과는 상반되는 개념을 갖고 있으며, 두 콘크리트층을 완전히 분리시킴으로서 기존 포장체의 결함이 덧씌우기층으로 전달되는 것을 막고 덧씌우기층이 독립적인 포장체로 거동할 수 있도록 하는 것을 목적으로 하는 공법이다. 독립적인 덧씌우기층은 포장 파손이 발생할 가능성이 크기 때문에 일반적으로 두껍게 시공하고 있으며, 경우에 따라 기존 포장층 두께 이상으로 시공하는 경우도 있다. 두 층이 완전히 분리되어 있기 때문에 각각의 층에 중립축이 형성되며 각 층의 하부는 인장응력을 받아 덧씌우기 층에서의 파손 발생 확률이 높아진다.

2.2 부착면 파괴모드

노후 콘크리트 포장에 대한 접착식 콘크리트 덧씌우기 적용 시 발생할 수 있는 조기파손을 방지하기 위해서는 반드시 일체화 거동을 해야 하며 부착면이 파손된 경우 구조적으로 취약해진다. 따라서 접착식 콘크리트 덧씌우기의 구조적 파손 중 상당부분은 덧씌우기 부착면에서 발생하는 부착 파괴라 할 수 있다. 그러나

Fig. 1. Mechanistic Characteristics of Concrete Overlays (Huang, 2003)

Fig. 2. Bond Failure Mode of BCO

그 원인에 대한 해석은 연구자에 따라 다소 상이하지만 Fig. 2와 같이 크게 수직 인장응력과 수평 전단응력으로 구분할 수 있다. 수직 인장응력의 경우 교통하중과 컬링/와핑의 영향에 의해 발생할 수 있으며, 수평 전단응력의 경우 온도변화에 따른 수축/팽창 및 교통하중의 영향에 의해 발생할 수 있다(Medina Chavez et al., 2007).

Peter M. Semen 등의 연구에 의하면 전통적으로 1950년대 후반부터 전단에 의한 부착면 파괴를 고려하여 전단강도에 대한 기준을 제시하였으나, Granju (2001) 및 Lange 등(2001) 등이 실험과 함께 수치해석을 병행한 연구 결과에 의하면 건조수축과 함께 온도변화에 따른 수축·팽창으로 인한 슬래브 컬링현상이 발생하여 단부와 모서리에서의 높은 수직인장응력에 의한 부착면 인장파괴가 발생하는 것으로 나타났다(Peter M. Semen et al., 2005). 또한 Medina Chavez 등의 연구에 의하면, California 주에서 노후 콘크리트 포장(JPCP ; Jointed Plain Concrete Pavement) 위에 접착식 콘크리트 덧씌우기를 적용한 시공사례를 통하여 시공 초기 재료들의 건조수축으로 인한 덧씌우기 층이 수축하면서 경계면에서 과도하게 발생한 전단응력으로 인하여 부착면 파손이 발생한 것으로 결론 내리고 있다. Texas 주의 경우, CRCP (Continuous Reinforced Concrete Pavement) 위에 Steel Fiber 및 WWF(Welded Wire Fabric)로 보강된 CRCO(Continuous Reinforced Concrete Overlay) 시공 사례에서는 재료, 시공 상의 품질관리 등의 다양한 원인으로 인하여 두 가지 모드에 의해서 복합적으로 발생한다고 하였다. 그러나 Texas의 추가 연구에서는 경계면 분리의 메커니즘을 두 가지로 간주하고 시험 시공 및 평가한 결과, 컬링이나 와핑에 의해 발생한 수직 인장응력이 부착면 파손에 지배적인 것으로 결론지었다(Medina Chavez et al., 2007).

이와 같이 기존 연구에서는 재료, 공법, 시공 및 환경 특성의 요인이 상이함으로 인하여 부착면에서 발생하는 주요 부착파괴모드에 대한 상반된 결론을 제시하고 있으나, 부착면에 작용하는 수직 인장응력과 수평 전단응력으로 나타낼 수 있는 부착 응력이

부착강도 이상 나타나게 되면 부착면 파손이 발생한 것을 확인할 수 있다. 최근 들어, 이승우 등(2012)의 연구에서는 기존 문헌에서 제시된 다양한 특성을 고려하여 접착식 콘크리트 덧씌우기의 부착면에서 발생하는 수직 인장응력 및 수평 전단응력을 수치해석을 통하여 검토하였다. 연구 결과, 부착응력의 경우 교통하중과 환경하중의 상호작용에 의하여 발생하나 수직 인장응력은 환경하중의 영향을 받으며, 수평 전단응력은 교통하중의 영향이 큰 것으로 나타났다. 또한 부착면 파손의 경우 수직 인장응력과 수평전단응력의 복합적인 거동에 의하여 발생할 수 있으나 수평 전단응력보다는 수직 인장응력의 영향이 지배적인 것으로 나타났다(이승우 외, 2012 / Lee et al., 2012).

2.3 부착강도 측정 방안 고찰

접착식 콘크리트 덧씌우기는 공용수명 동안 본래의 기능을 수행할 수 있도록 기존 콘크리트와 일체가 되어 외부의 물리적 또는 환경적 하중에 견딜 수 있어야 한다. 따라서 품질관리 시 덧씌우기 층의 부착력 확보가 중요한 요인이라 할 수 있으나 이에 대한 측정방법 및 기준의 경우 Table 1과 같이 각 기관에 따라 차이를 보이고 있다(K. D. Smith et al., 2002 / 한국도로공사, 2009).

이와 같이 각각의 연구자 및 기관에서 상이한 부착강도 품질관리 기준을 제시하고 있는 이유는 앞서 기술한 바와 같이 부착면에서 발생하는 주요 부착파괴모드에 대한 상반된 연구 결과에서 비롯되는 것이다. 본 연구에 앞선 접착식 콘크리트 덧씌우기의 다양한 해석조건별 부착응력 발생 특성을 확인한 결과 수직 인장응력에 의한 주요 부착파괴모드를 확인하였다(이승우 외, 2012 / Lee et al., 2012). 따라서 품질관리를 위한 부착강도 측정 시 수직 인장강도 기준을 사용하는 것이 합리적이며, 국내에서 시행하고 있는 Pull-out test(KS F 2762)의 경우 수직 인장에 대한 부착강도를 제시하는 것으로 적용 타당성이 있는 것으로 판단된다. 또한 이승우 등(2012)의 연구에서는 접착식 콘크리트 덧씌우기에 대한 교통 및 환경하중 재하 시 덧씌우기 재료의 열팽창계수 증가에

Table 1. Bond Strength Criteria of BCO.

	Criteria		Reference
Bond strength (shear)	1.4MPa		ACPA, 1990
Bond strength (tensile)	0.9MPa		Canadian Standard (Stark and Polyzois, 1999)
	2.1MPa	Excellent	Sprinkel and Ozyildirim, 2000
	1.7 ~ 2.1MPa	Very good	
	1.4 ~ 1.7MPa	Good	
	0.7 ~ 1.4MPa	Fair	
	0 ~ 0.7MPa	Poor	
	1.4MPa		Korea Expressway Corporation, 2009

Fig. 3. Bond failure characteristics due to pull-out test (M. A. Issa *et al.*, 2008)

따른 최대 수직 인장응력(부착응력)의 변화가 0.63~2.20MPa로 나타났으며, 극한의 해석조건을 제외하더라도 현행 부착강도 기준 1.4MPa에 근접하는 0.60MPa 이상의 부착응력이 발생하므로 품질 관리 시 단조하중(monotonic load)에 대한 부착강도의 검토뿐만 아니라 반복하중(cyclic load)에 의한 부착 피로파괴 특성을 고려해야 할 것으로 판단된다. 그러나 기존 Pull-out test의 경우 Fig. 3과 같은 다양한 실험적 오차로 인하여 부착면에서 발생하는 정량적인 부착강도를 측정하는 것이 현실적으로 어려우며 단조하중(monotonic load)에 대한 만족여부를 판단하는 것으로, 실제 현장 조건을 모사할 수 있는 반복하중(cyclic load)의 적용이 용이하지 못하여 부착 피로파괴 특성을 고찰하기 위한 추가적인 실험방법의 검토가 필요하다.

따라서 단조하중에 의한 부착강도 측정과 함께 정량적인 부착 피로 특성을 모사하기 위하여 반복하중의 적용이 용이한 간접 인장시험(IDT, Indirect Tensile Test) 중 하나인 쪼갬인장시험(splitting tensile test)을 참조하여 수행하고자 하였다(ASTM C 496). IDT의 경우 Fig. 4와 같이 직경의 양단 부분을 제외하고 일정한 인장응력을 발생시킬 수 있으므로 중립축을 기준으로 기존 콘크리트포장과 덧씌우기 재료를 모사하여 실험할 경우 부착면에서 발생하는 정량적인 부착강도 측정이 가능할 뿐만 아니라 부착강도에 대한 부착피로 특성 검토 시 실험의 적용이 용이할 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 접착식 콘크리트 덧씌우기의 반복하중 적용에 따른 부착 피로파괴 특성을 검토하기 위한 사전단계로써, 단조하중 재하 시 기존 pull-out test와 IDT를 통하여 도출되는 부착강도를 비교분석한 후 상관관계를 검토하여 IDT의 적용성을 판단하고자 하였다.

3. 직접인장 및 간접인장에 따른 부착강도 평가 방안

3.1 실험 조건

접착식 콘크리트 덧씌우기의 재료적 특성, 하부층 강도, 하부층 열화 정도에 따른 부착특성을 검토하기 위하여 Table 2와 같은 다양한 부착실험 조건을 설정하였으며, 각각의 실험조건에 대하여 직접인장(direct tensile test) 및 간접인장(indirect tensile test)

(a) Diagrammatic arrangement of the test

(b) Stress distribution across the loaded diameter

Fig. 4. Indirect tensile test (splitting tensile test based on ASTM C 496)

실험방법을 적용하여 부착강도를 측정하였다. 덧씌우기 재료의 경우 보통포틀랜드시멘트(OPC; Ordinary Portland Cement)를 사용하는 포장용 콘크리트, 초속경 시멘트(URHC; Ultra Rapid Hardening Cement)를 사용하는 콘크리트와 함께 현재 현장에 적용 중인 초속경 라텍스 및 아크릴계 폴리머 개질 콘크리트를 사용하였다. 일반적으로 8~10시간 동안의 야간시공이 이루어지는 접착식 콘크리트 덧씌우기의 경우 교통개방시간을 기준으로 재령 3~4시간 내외의 부착강도 품질관리 기준을 만족해야 하므로 OPC의 경우 초속경을 요구하는 덧씌우기 재료로 사용은 불가능하나 이에 대한 부착 특성을 분석하고자 실험조건에 추가하였다.

기존 콘크리트 포장층을 모사하기 위하여 사용된 OPC의 경우

굵은골재 최대치수 25mm에 대하여, 30~35MPa 범위의 표준배합은 도로공사 전문시방서를 참조 후 사용하였으며, 25~30MPa 및 35~40MPa 범위의 OPC는 단위시멘트량의 증감을 통하여 슬럼프와 공기량의 기준을 만족시킨 후 적용하였다. 상부층 덧씌우기 재료로 사용된 콘크리트의 경우 굵은골재 최대치수 13mm를 사용하였으며, OPC의 경우 하부층과 동일한 배합비를 적용 후 각각 슬럼프와 공기량은 혼화제 사용을 통하여 시방기준 범위에 들게 하였다. 또한 Overlay URH-LMC 및 Overlay URH-APMC 콘크리트의 경우 제시된 표준배합을 사용하였다. 실험에 사용된 콘크리트 재료에 대한 표준 배합은 Table 3과 같다.

Table 2. Bond strength test due to various conditions.

Type of Existing PCC	Deterioration Status of existing PCC	Overlay Material
OPC ¹⁾ (25 ~ 30 MPa)	-	URHC ²⁾
		URH-LMC ³⁾
		URH-APMC ⁴⁾
OPC (30 ~ 35 MPa)	-	OPC (30 ~ 35 MPa)
		OPC (35 ~ 40 MPa)
		URHC
		URH-LMC
	Surface Scaling Resistance Test (after 25 cycles)	URH-APMC
		URHC
		URH-LMC
OPC (35 ~ 40 MPa)	-	URH-APMC
		URHC
		URH-LMC

1) OPC : Ordinary Portland Cement Concrete

2) URHC : Ultra Rapid Harding Cement Concrete

3) URH-LMC : Ultra Rapid Harding Latex-Modified Concrete

4) URH-APMC : Ultra Rapid Harding Acrylic Polymer-Modified Concrete

3.2 시편 제작

Fig. 5는 부착실험을 위한 시편 제작 과정을 나타낸 것으로 각각의 콘크리트 재료에 대하여 압축강도 및 휨강도 시편을 제작하여 재료적 특성을 확인하였다. 하부층 시편을 28일 대기양생한 후 상부 덧씌우기층을 제작하였다. 이때 일부 시편의 경우 하부층 열화 조건을 모사하기 위하여 표면박리저항성 실험을 진행하였으며, ASTM C 672를 참조하여 3%의 염화칼슘 수용액을 침투시켰다. 표면박리저항성을 평가하기 위하여 17시간동안 (-)18℃에서 동결하였으며, 7시간은 상온에서 융해과정을 거치는 1사이클을 총 25회 반복 수행 하였다. 실험 오차를 줄이고 현장 사공 조건을 일부 모사하기 위하여 하부층 표면의 모르타르층은 steel brushing을 통하여 제거하였다. 이후 상부 덧씌우기층을 포설한 후 28일 대기양생을 실시하였다.

3.3 콘크리트 기초 물성 및 부착강도 측정 과정

부착강도 특성을 확인하기 위하여 사용된 콘크리트는 28일 항온 항습 양생 후 압축 및 강도 등의 기초 물성을 측정하였다. 부착강도 측정은 Fig. 6과 같이 기존 콘크리트층을 28일 양생 후 상부 덧씌우기를 실시하였으며, 덧씌우기 콘크리트의 재령 28일 후 코어링을 실시하여 부착강도를 측정하였다. Pull-out test의 경우 KS F 2762를 참조하여 수행하였으며, 하부층 15cm위에 상부층 5cm 덧씌우기를 실시한 후 직경 10cm의 코어비트를 사용하여 깊이 7cm의 코어링 후 부착강도를 측정하였다. IDT는 하부층 15cm위에 상부층 15cm 덧씌우기를 실시한 후 부착면과 일치하는 위치인 시편의 측면을 정확하게 코어링하여 부착강도 시편을 제작하였으며, 시편 길이 20cm로 컷당한 후 쪼갬 인장강도 측정방법과 동일하게 부착강도를 측정하였다.

4. 접착식 콘크리트 덧씌우기의 부착강도 특성 평가

4.1 접착식 콘크리트 덧씌우기 재료의 기초물성 검토

Table 4는 접착식 콘크리트 덧씌우기의 부착특성 평가 시 사용된

Table 3. Mixture proportion of concrete

	Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	Content (kg/m ³)				
						Water	Binder	Fine Agg.	Coarse Agg.	Etc.
OPC (30 ~ 35MPa)	13, 25	4	6	45	42	148.5	330	759	1,067	AE Water Reducing Agent (B×0.3%)
Overlay URHC	13	8	3~6	40	35	160	400	631	1,172	Reducing Agent (B×0.3%) Retarder (B×0.3%)
Overlay URH-LMC	13	16~22	3~6	38	55	74	360	960	787	Latex 115
Overlay URH-APMC	13	15~17	6	36	44	106	390	756	979	Acrylic Polymer 66 AE (B×0.03%)

Fig. 5. Specimen preparation and curing of existing concrete pavement

Fig. 6. Bond strength measurement

콘크리트에 대하여 각각 3개의 시편을 제작한 후 압축강도 및 휨강도를 측정한 결과이다. OPC의 경우 기존 포장층과 덧씌우기층

의 배합비를 동일하게 사용하였으나 굵은골재 최대치수 및 배합 시 온/습도 등의 영향으로 미소한 차이를 나타내었다. 덧씌우기층의

Table 4. Material properties of concrete

Layer	Overlay Material	Material Property (MPa)	
		Compressive Strength	Flexural Strength
Existing PCC	OPC (25 ~ 30MPa)	25.0	4.8
	OPC (30 ~ 35MPa)	30.5	5.1
	OPC (35 ~ 40MPa)	35.6	5.3
Overlay	URHC	44.0	9.1
	URH-LMC	33.5	12.5
	URH-APMC	40.2	10.6
	OPC (30 ~ 35MPa)	30.0	6.5
	OPC (35 ~ 40MPa)	33.2	6.6

Table 5. Results of bond strength by Pull-out test and IDT

Type of Existing PCC	Type of Overlay Material	Bond Strength (MPa)	
		by Pull-out test	by IDT
OPC (Compressive Strength of 25.0 MPa)	URHC	0.7	1.5
	URH-LMC	1.4	1.6
	URH-APMC	1.8	2.3
OPC (Compressive Strength of 30.5 MPa)	OPC (Compressive Strength of 30.0 MPa)	2.3	3.0
	OPC (Compressive Strength of 33.2 MPa)	2.2	3.5
	URHC	1.2	1.7
	URH-LMC	1.5	1.6
	URH-APMC	1.9	2.4
OPC (Compressive Strength of 35.6 MPa)	URHC	N/A	1.8
	URH-LMC	2.2	2.2
	URH-APMC	2.1	2.6

경우 바인더의 함량이 일반적인 콘크리트 재료와 비교하여 높기 때문에 비교적 높은 압축강도 특성을 나타내었으며, 특히 라텍스 및 아크릴계 폴리머를 사용하는 개질 콘크리트 URH-LMC와 URH-APMC의 경우 OPC와 비교하여 매우 높은 휨강도 특성을 확보하였다.

4.2 Pull-out 및 IDT에 의한 부착강도 특성 검토

접착식 콘크리트 덧씌우기의 부착특성을 평가하기 위하여 Pull-out test 및 IDT에 의한 수직 인장 부착강도 실험 결과를 Table 5에 나타내었다. 부착강도는 각 3개의 결과에 대한 평균을 의미한다. Pull-out test에 의한 직접인장 부착강도 측정 결과 URHC(초속경 시멘트) 콘크리트를 제외하고는 현행 도로공사 부착강도 기준인 1.4MPa를 상회하고 있다. URHC의 경우 배합 시 적정 응결지연제를 첨가하여 초기 작업성을 확보하였으나 몰드에 타설 및 다짐 시 조기 경화하여 기존 콘크리트 포장층과의 일체화 거동을 위한 충분한 부착 성능을 발현하지 못한 것으로

판단된다. 초속경성을 발휘하는 덧씌우기 재료의 경우 URHC, URH-LMC 및 URH-APMC로 구분할 수 있으며, 이중 URHC를 제외한 나머지 재료의 경우 라텍스 및 아크릴계 폴리머를 첨가한 개질 콘크리트로서 품질관리 기준 이상의 부착강도를 확보하였다. 추가적으로 기존 콘크리트포장층(OPC) 위에 덧씌우기한 OPC 재료의 경우 완전부착을 통한 우수한 부착강도를 확보하였다. IDT 실험을 통한 기존 콘크리트층의 압축 및 휨강도 증가에 따른 부착강도 특성은 앞서 제시된 Pull-out test와 유사한 경향을 나타내었으며, 부착강도 결과는 도로공사에서 제시한 부착강도 품질관리 기준을 모두 만족하였다.

Fig. 7 및 Fig. 8은 기존 콘크리트층의 압축 및 휨강도 증가에 따른 부착강도 특성을 나타낸 것이다. URHC의 경우 pull-out test 시 도로공사에서 제시한 부착강도 품질관리 기준을 만족하지 못하였으며, 초속경성 덧씌우기 재료 중 부착강도 특성은 좋지 않은 것으로 판단된다. 기존 콘크리트 포장층의 압축 및 휨강도가 증가할수록 부착강도가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는

Fig. 7. Bond strength with strength changes of existing PCC (pull-out test)

Fig. 8. Bond strength with strength changes of existing PCC (IDT)

기존 콘크리트포장층이 적정 강도 이상을 유지하는 공용기간 중 두 층을 단일체에 가깝게 접착식 콘크리트 덧씌우기기를 시행할 경우 구조적 성능 확보 관점에서 매우 효과적임을 의미한다. 또한, 초속경성 바인더를 사용하는 접착식 콘크리트 덧씌우기 재료의 경우 라텍스 및 아크릴계 폴리머를 첨가한 개질 콘크리트의 부착 특성이 우수한 것을 확인하였다. 실험에 사용된 기존 콘크리트 포장층 위에 OPC를 덧씌우기 한 경우 조기 교통개방을 요구하는 국내의 접착식 콘크리트 덧씌우기 건설 시 적용은 불가능하나 부착 특성을 분석한 결과 초속경성 바인더를 사용하는 덧씌우기 콘크리트에 비하여 매우 높은 부착강도를 확보하였다. 그러나 8~10시간 내외의 야간작업과 함께 시공 3~4시간 후 조기교통개방을 실시해야 하는 국내의 덧씌우기 시공 여건 상 적용은 불가능할 것으로 판단된다.

추가적으로 덧씌우기 콘크리트의 압축강도 증가에 따른 부착강

Fig. 9. Bond strength changes due to deterioration of existing PCC layer

도의 영향은 없는 것으로 나타났다. 동일 조건으로 실험이 진행된 덧씌우기 OPC의 경우 초속경성 재료를 사용하는 덧씌우기 재료에 비하여 상대적으로 높은 부착강도 특성을 나타내었으나 압축강도의 변화가 부착강도에 미치는 영향이 미미한 것으로 판단된다.

4.3 기존 콘크리트포장의 열화에 따른 부착강도 특성

접착식 콘크리트 덧씌우기 시 기존 콘크리트포장의 열화에 따른 부착강도 특성을 확인하기 위하여 압축강도 30.5MPa의 OPC에 대한 표면박리저항성 실험을 실시한 후 URH-LMC 및 URH-APMC 콘크리트를 덧씌우기 하여 이에 대한 부착강도를 측정하였다.

기존 콘크리트포장층의 열화 유무에 따른 부착강도 측정 결과 Pull-out test 및 IDT 모두 열화 후 부착강도가 크게 감소함을 알 수 있다. 이를 통하여 접착식 콘크리트 덧씌우기 건설 시 하부층의 열화에 의한 강도저하가 발생하였을 경우 부착강도가 크게 감소함을 알 수 있으며 내구성 저하로 인하여 조기 부착면 파손이 발생할 수 있다고 판단된다. 그러나 현재 경험적 방법에 의한 접착식 콘크리트 덧씌우기 시공 시 기존 포장층의 열화 특성 파악이 용이하지 않으므로 이에 대한 신뢰성 있는 평가 방안을 마련하여 조기 부착면 파손을 미연에 방지해야 한다.

4.4 Pull-out 및 IDT에 의한 부착강도 상관관계

접착식 콘크리트 덧씌우기에 대한 부착 특성을 분석하고 부착강도를 정량적으로 측정할 수 있는 방안에 대하여 검토하고자 수직인장에 의한 부착강도를 측정할 수 있는 Pull-out test 및 IDT를 진행하였다. 현재 도로공사에서 제시하고 있는 부착강도 기준의 경우 단조하중(monotonic load)에 대한 만족여부를 판단하는 것으로, 본 연구에서는 기존 포장의 열화 유무를 포함하는 다양한 부착특성에 따른 실제 현장거동을 모사할 수 있는 반복하중(cyclic load)에

Fig. 10. Correlation between Pull-out Test and IDT

의한 부착 피로파괴 특성을 검토하는 기초연구를 진행하였다. Fig. 10은 접착식 콘크리트 덧씌우기의 부착강도/부착피로 특성 검토를 위한 Pull-out test와 IDT의 상관관계를 나타낸 것이다. 전체 데이터에 대한 신뢰성 있는 분석을 진행하기 위하여 5%내외의 이상치 (outlier)제거가 가능한 1개의 데이터 및 URHC의 코어링 시 부착면이 파손된 1개의 데이터는 제거하였다. 분석 결과 IDT에 의한 부착강도가 Pull-out test에 의한 부착강도 보다 상대적으로 높게 분포하고 있으나 매우 높은 상관관계를 나타내고 있으며 이에 대한 상관관계 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Bond Strength by IDT} = 0.64 + 0.8662 \times \text{Bond Strength by Pull-out Test} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, $R^2=0.75$, 및 $P\text{-value}=0.002$

5. 결론

본 연구에서는 기존 콘크리트 포장에 적용되는 접착식 콘크리트 덧씌우기의 부착 특성이 부착강도에 미치는 영향을 검토하였으며, 단조하중 및 반복하중에 따른 합리적이고 정량적인 부착강도 측정 방법을 도출하기 위한 기초연구단계로 직접인장시험(pull-out test)과 간접인장시험(IDT; Indirect Tensile Test)을 비교분석 하였다. 이에 대한 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) Pull-out test에 의한 직접인장 부착강도 및 IDT에 의한 간접인장 부착강도 측정 결과, URHC(초속경 시멘트) 콘크리트를 제외하고 현행 도로공사 부착강도 기준인 1.4 MPa를 만족하였다. 또한 초속경성을 지닌 덧씌우기 재료 중 라텍스 및 이크랄계 폴리머를 첨가한 개질 콘크리트의 경우 URHC와 비교하여

우수한 부착강도를 확보하였다. 기존 콘크리트 포장층의 압축 및 휨강도가 증가할수록 부착강도가 증가하는 경향을 나타냈으나 덧씌우기 재료의 압축 및 휨강도 증가가 부착강도에 미치는 영향은 미미하였다.

- (2) 기존 콘크리트 포장층 위에 OPC를 덧씌우기 할 경우 초속경성 바인더를 사용하는 덧씌우기 재료에 비하여 높은 부착강도를 확보하였으나 조기 교통개방을 필요로 하는 국내의 접착식 콘크리트 덧씌우기 적용은 용이하지 못할 것으로 판단된다.
- (3) 기존 콘크리트포장의 열화 후 덧씌우기를 실시한 경우, Pull-out test 및 IDT 모두 부착강도가 크게 감소하는 것을 확인하였다. 이를 통하여 접착식 콘크리트 덧씌우기 시 하부층의 열화에 의한 강도저하가 발생할 경우 부착강도가 크게 감소하여 내구성 저하로 인한 조기 부착 파손이 발생할 수 있다고 판단된다.
- (4) 기존 콘크리트 포장의 강도 변화, 열화 유무 및 덧씌우기 재료특성 등의 다양한 부착 조건에 대한 Pull-out test와 IDT의 부착강도 상관관계를 분석한 결과, IDT에 의한 부착강도가 Pull-out test에 의한 부착강도 보다 상대적으로 높게 분포하고 있으나 결정계수 0.75의 높은 상관관계를 나타내었다. 따라서 실제 현장거동을 모사할 수 있는 반복하중의 적용을 통한 부착강도 및 부착피로의 특성 분석 시 IDT의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 접착식 콘크리트 덧씌우기의 반복하중 적용에 따른 부착 피로파괴 특성을 검토하는 기초단계로써, 기존 pull-out test의 경우 반복하중의 적용이 용이하지 못할 것으로 판단하여 IDT의 적용성을 고찰하였다. 단조하중에 의한 pull-out test 및 IDT의 부착강도는 다양한 부착 조건에 대하여 높은 상관관계를 확보하였다. 따라서 본 연구결과를 활용하여 향후 반복하중에 의한 부착 피로파괴 특성을 분석한 후 부착강도/부착피로에 대한 품질관리의 기초자료로 활용하고자 한다.

감사의글

본 연구는 한국도로공사에서 지원하는 ‘콘크리트 접착식 덧씌우기의 해석 시스템 구축 및 설계 방안 고찰 연구용역’을 통하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

- American Concrete Pavement Association (2008). “Guide to concrete overlays: Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements.” *Second Edition*, ACPA Pub-

- lication TB021.02P.
- American Society for Testing and Materials (1996). *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*, ASTM C 496.
- David A. Lange., and Hak-Chul Shin. (2001). *Early age stresses and debonding in bonded concrete overlays*, Transportation Research Record (1778). Paper No. 01-0410, pp.174-181.
- Expressway and Transportation Research Institute (1997). *Pavement rehabilitation by concrete overlay (III)*, Korean Expressway Corporation (in Korean).
- Granju J. L. (2001). "Debonding of thin cement-based overlays." *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 114-120.
- Huang, Y. H. (2003). *Pavement analysis and design*, Second Edition. Prentice Hall, NJ.
- Jung, J. D., Ryu, S. W., Han, S. H., Cho, Y. H. (2006). "The performance analysis of diamond grinding for existing concrete pavement." *Journal of Korean Society of Road Engineers*, KSRE, Seoul, Korea, Vol. 8, No. 3, pp.77-88 (in Korean).
- Smith, K. D., Yu, H. T., and Peshkin, D. G. (2002). *Portland cement concrete overlays: State of the Technology Synthesis*, Publication No. FHWA-IF-02-045, Federal Highway Administration.
- Korean Expressway Corporation (2009). "Highway construction guide specification" (in Korean).
- Lee, S. W., and Son, H. J. (2011). "A study on the factors affecting on the life of bonded concrete overlay pavement using the LTPP data of U.S.A." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Seoul, Korea, Vol. 31, No. 4, pp. 555-564 (in Korean).
- Lee, S. W., Kim, Y. K., and Lee, P. H. (2011). "A Study on the application of very rapid hardening acrylic polymer modified concrete for bonded concrete overlay method." *Journal of Korean Society of Road Engineers*, KSRE, Seoul, Korea, Vol. 13, No. 1, pp. 139-148 (in Korean).
- Lee, S. W., Kim, Y. K., and Han, S. H. (2012). "A Study on the bond-behavior of bonded concrete overlays." *International Journal of Highway Engineering*, KSRE, Seoul, Korea, Vol. 14, No. 5, pp. 31-45 (in Korean).
- Lee, S. W., Kim, Y. K., Yoo, T. S., and Han, S. H. (2012). "Analysis of service life and possible causes of early distress for bonded concrete overlays." *International Pavement Engineering Conference 2012*, Busan, Korea, pp. 105-119.
- M. A. Issa, R. Z. Al-Rousan. (2008). "High performance bonded concrete overlays." *International Conference on Construction and Building Technology*, ICCBT2008-(01), pp. 1-20.
- Medina-Chavez, C. I., Choi, S. C., and Won, M. (2007). *Concrete pavement overlays and failure mechanisms*, Report No. 0-4893-2, Certer for Transportation Research.
- Peter M. Semen, Raymond S. Rollings (2005). "A Review and discussion of current developments involving bonded concrete overlays of airfield pavements." *International Conference on Concrete Pavements*, Colorado, USA, pp. 900-910.
- Sprinkel, M. M. and Ozyildirim, C. (2000). "Evaluation of hydraulic cement concrete overlays placed on three pavements in Virginia," VTRC 01-R2, Virginia Department of Transportation.