

롤러 전압 콘크리트 포장을 위한 수정다짐시험의 반복재현성 고찰

황석희* · Rith Makara** · 홍성재*** · 이승우****

Hwang, Seok Hee*, Rith, Makara**, Hong, Seong Jae***, Lee, Seung Woo****

Investigation on the Repeatability of Modified Proctor Test for Roller Compacted Concrete Pavement

ABSTRACT

Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP), is a type of pavement using compaction roller and asphalt finisher on concrete mixture that contains low amount of water. RCCP strength and durability are greatly affected by compaction level. Quality control is performed by ensuring the degree of compaction at site based on dry density. In the field, Modified Proctor Test is used in order to obtain optimum dry density. However, there is no clear compaction curve analysis criteria of Modified Proctor Test for RCCP. In this study, compaction curve built by three samples of Modified Proctor Test was produced and it was used to compare with compaction curve contented lower number of samples (one and two samples) in order to analyze their reliability. Thus, a conclusion was drawn from the results; by comparing to the result from Modified Proctor Test of three samples, the use of two samples represented result with only 0.5% of error which means the reliability is 99.5%.

Key words : Roller compacted concrete pavement (RCCP), Modified proctor test, Compaction curve, Repeatability

초록

롤러전압콘크리트(Roller Compacted Concrete Pavement, RCCP) 공법은 적은 단위수량이 포함된 콘크리트 혼합물을 아스팔트 피니셔와 다짐 롤러를 이용하여 시공하는 공법이다. RCCP는 다짐 수준에 따라 강도 및 내구성에 많은 영향을 받게 된다. 또한 품질관리는 건조밀도를 기준으로 다짐도 관리를 시행하고 있다. 현장에서 최적의 건조단위중량을 모사하기 위해 수정다짐시험을 실시한다. 그러나 RCCP를 위한 수정다짐시험의 다짐곡선 분석에 명확한 기준이 제시되어 있지 않다. 본 연구에서는 함수비당 세 개의 샘플에 의한 수정다짐곡선의 기준을 설정하고 설정된 다짐곡선과 비교하여 더 적은 실험횟수와 신뢰성을 분석하기 위해 반복재현성을 고찰하였다. 이로 인해 세 번의 실험에 의한 수정다짐시험과 비교하여 두 번의 수정다짐시험은 0.5% 오차가 발생되며 신뢰도는 99.5% 이다.

검색어 : 롤러 전압 콘크리트 포장, 수정다짐시험, 다짐곡선, 반복재현성

1. 서론

최근 국내에서는 녹색성장의 정책에 따라 건설 분야에서도 시멘트의 사용을 최소화하고 친환경적인 재료의 사용을 권장하고 있다. 그러나 화석자원의 고갈 또는 오염물질의 저감에 대한 근본적인 환경문제는 해소되지 않고 있다. 이를 해소하기 위해 콘크리트 고유의 우수한 성능을 확보하고 일반 콘크리트 포장에 비해 적은 단위 시멘트량을 사용하여 CO_2 발생을 저감하고 친환경성 및 경제성을

* 정희원 · 강릉원주대학교 토목공학과 대학원생 (Gangneung-Wonju National University · hsh3238@nate.com)

** 강릉원주대학교 토목공학과 대학원생 (Gangneung-Wonju National University · makararith@yahoo.co.uk)

*** 강릉원주대학교 토목공학과 박사과정 (Gangneung-Wonju National University · zkdwl@nate.com)

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

Received March 2, 2015/ revised June 16, 2015/ accepted June 22, 2015

확보할 수 있는 롤러 전압다짐 콘크리트 롤러전압콘크리트포장 (Roller Compacted Concrete Pavement, RCCP) 공법의 도입이 요구된다.

롤러전압콘크리트포장공법은 적은 단위수량이 포함된 콘크리트 혼합물을 Fig. 1과 같이 아스팔트 피니셔와 다짐 롤러를 이용하여 시공하는 공법으로 적은 시공비용과 우수한 시공성, 높은 내구성을 가지고 있는 매우 경제적인 시멘트 콘크리트 포장공법이다(Lee et al., 1994). Fig. 2는 롤러 전압에 의해 혼합물을 전압하면 밀도의 증가와 골재 간 간격이 조밀해져 우수한 골재 맞물림 효과를 발생시킨다. 또한 적은 수량의 사용으로 낮은 공극의 시멘트 매트릭스가 생성된다. 위와 같은 특성에 대한 RCC단면과 일반 PCC(Portland Cement Concrete)단면을 보여주고 있다. 일반적으로 콘크리트 내부의 공극의 감소는 강도를 증진시키는 효과가 있기 때문이다. 이로써 적은 시멘트를 사용하여도 강도발현이 크고 일반 콘크리트 포장에 비해 적은 시멘트량을 사용하므로 CO_2 의 발생을 저감할 수 있는 친환경 공법이다.

이러한 특성으로 인해 롤러 전압 콘크리트 포장은 충분한 다짐에 의해 내부 공극이 감소하고 수밀성이 증대되면서 수분에 의한 공극의 포화를 방지하고 동결로부터 발생하는 팽창압을 완화시켜 우수한 환경하중 저항성을 확보 할 수 있다(Picere Gauthier, 2005). 롤러 전압 콘크리트는 적은 수량의 혼합물을 다짐으로써 내부공극의 모양이 불규칙하게 발생되며 이를 보다 많이 다짐하면 공극이 감소하고 조밀하게 분산되고 내구성과 환경저항성을 향상시킨다. 또한 상대적으로 적은 단위수량 및 시멘트량을 사용하므로 소성 및 건조수축, 수화열에 의한 균열을 저감시킨다.

롤러전압다짐에 의한 압력으로 강도의 발현이 상대적으로 빨라 공기단축 효과가 있으며, 거푸집의 조기회수도 가능하다. 하지만, 공사기간이 짧으므로 다짐시간의 제약이 높은 단점도 가지고 있다. 그러므로 RCC는 다짐의 수준에 따라 강도 및 내구성이 많은 영향을 받게 된다. 입상재료를 이용한 도로의 시공은 주로 다짐을 이용한다. 또한 현재 고속도로 건설현장에서는 노상, 노체 등의 품질은 다짐도를 기준으로 관리되고 있다.



(a) Resurfacing of RCCP



(b) Pressure of RCCP

Fig. 1. Construction Process of RCCP

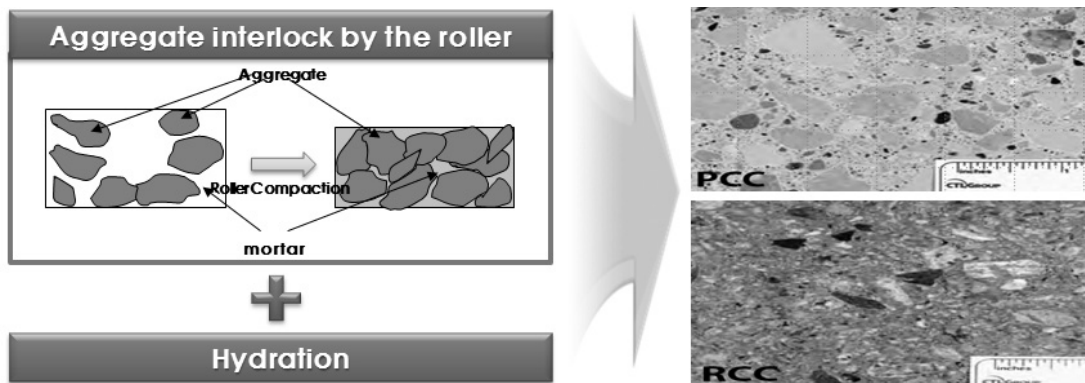


Fig. 2. Characteristics of Concrete Texture by Roller Compaction

기존의 다짐도 관리는 일률적으로 건조단위중량을 기준으로 다짐관리를 시행하고 있다. 다짐도는 실내시험에 의한 최대건조밀도와 현장에서 모래치환법에 의한 건조단위중량의 비를 백분율로 규정한 것이다. 단위중량은 RCCP의 강도발현에 상당한 영향을 미친다.

지나치게 된 배합일 경우 골재 간 조밀한 내부를 형성하기 위한 수분의 윤택 역할이 충분하지 않기 때문에 이에 따라 골재 입자를 퍼뜨리기 위한 시멘트 페이스트의 양을 증가 시켜야한다. 반면에 진 배합은 수분이 많은 단위체적을 차지하게 되어 골재 간 맞물림을 저해한다. 따라서 높은 강도를 발현시키기 위해서는 최대 건조단위중량과 최적 함수비가 중요한 요소이다(Hamed Jahi, 2014).

단위중량을 도출하기 위한 방법으로 표준다짐시험과 수정다짐시험이 있다. 표준다짐시험에 의한 최대 건조단위중량은 실제 현장에서 다짐장비로 도출한 최대 건조단위중량에 비해 상대적으로 낮은 다짐에너지로 평가된다. 그러므로 현장에서 최적의 건조단위중량을 모사하기 위해 수정다짐시험을 실시한다(Ying-Kit Choi, 2005). 또한 수정다짐시험은 최적함수비가 Vebe Time 적정 범위

시간에 부합되어 시공성 확보가 가능하다. 일반적으로 수정다짐시험 시 결과 값은 함수비당 실험 횟수가 많을수록 참 값에 가까워지는 결과 값을 얻을 수 있다. 그러나 RCCP를 위한 수정다짐시험의 실험 횟수에 대한 명확한 기준은 제시되어 있지 않다.

본 연구에서는 RCCP를 위한 수정다짐시험의 다짐곡선의 결과를 도출하는데 있어 실험횟수에 대한 명확한 기준이 없기 때문에 함수비당 세 번의 수정다짐시험을 실시하여 기준을 선정하고 선정된 수정다짐시험과 비교하여 실험횟수(함수비당 한 번 또는 두 번의 수정다짐시험)에 대한 신뢰도를 제시하기 위해 각각의 발생빈도를 도출하고 오차범위에 대한 발생확률을 이용하여 반복재현성을 확인하였다.

2. 연구방법

본 연구는 포틀랜드 시멘트 협회(Potland Cement Association)에서 제시한 골재입도 기준에 따라 배합비를 도출하여 수정다짐시험을 수행한다. 수정다짐시험은 임의의 함수비당 3개의 샘플(실측

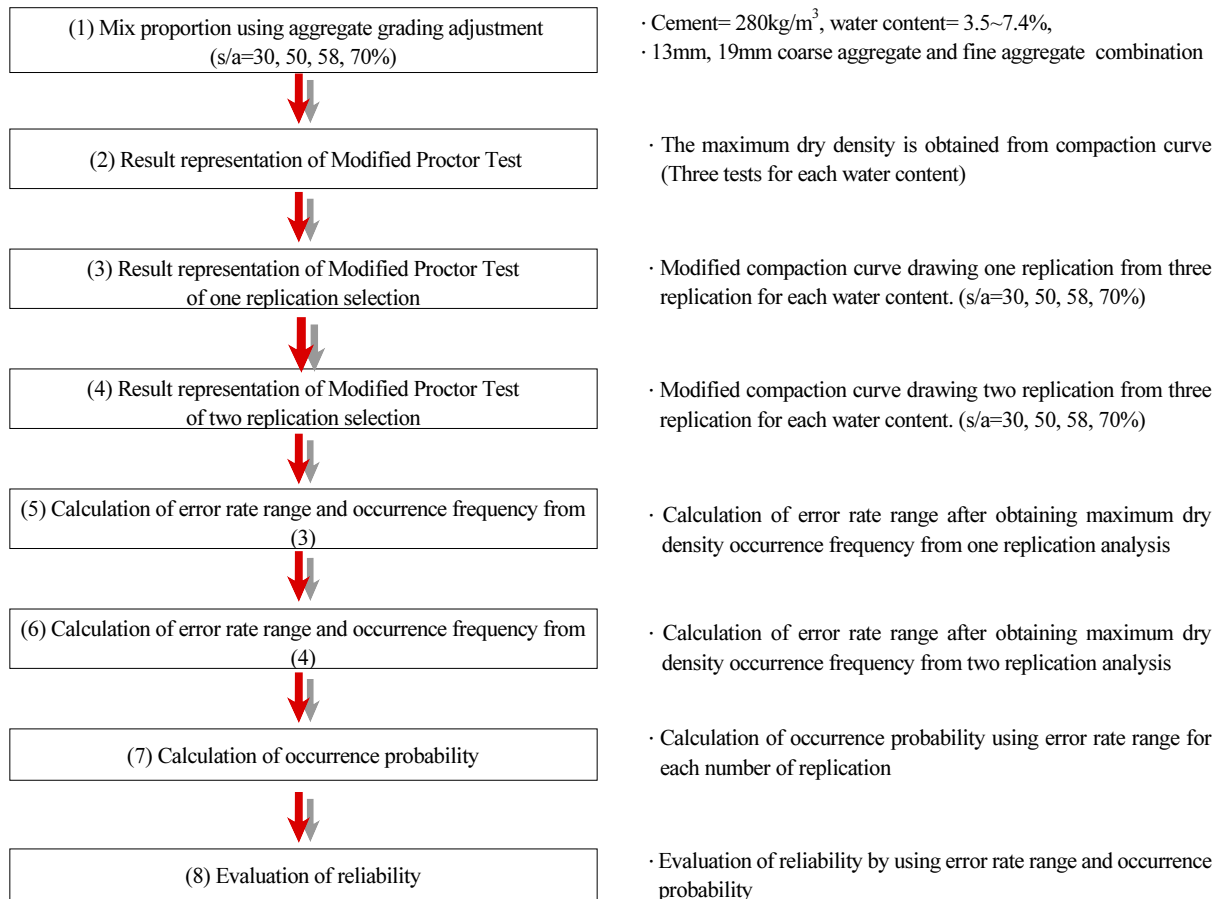


Fig. 3. Research Process

값)을 이용하여 다짐곡선을 도출하였고 다짐곡선에 의한 최대건조 단위중량을 반복재현성 평가에 사용하였다. 함수비당 3개의 샘플(실측값)이란 같은 조건의 수정다짐시험을 3회 실시한 경우를 뜻한다. 앞서 수행된 수정다짐시험의 함수비당 3개의 샘플(실측값) 중 1개 또는 2개의 샘플(실측값)을 선택하여 각각의 수정다짐시험을 수행한다. 실험횟수별 각각의 발생빈도를 도출하여 오차범위를 산정하고 오차범위에 따른 발생확률을 산정한다. 오차범위 및 발생확률을 이용하여 반복재현성을 평가한다.

3. 수정다짐시험

RCCP에서는 충분한 압축강도를 위해 충분한 다짐률이 확보되어야 한다. 따라서 다짐의 수준에 따라 강도 및 내구성이 많은 영향을 받게 된다. 다짐도가 매우 중요한 역할을 하므로 다짐시험을

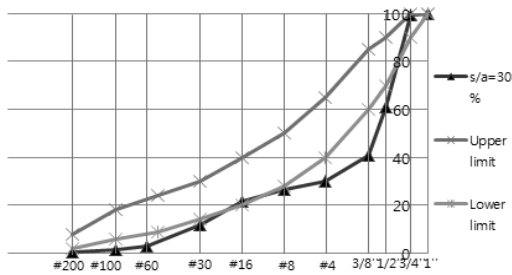


Fig. 4. Modified Proctor Test ASTM D1157

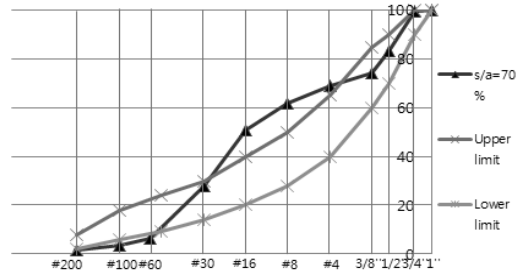
실시한 후 다짐곡선을 얻는다. 단위중량을 도출하기 위한 방법으로 표준다짐시험과 수정다짐시험이 있다. 표준다짐시험에 의한 최대 건조단위중량은 실제 현장에서 다짐장비로 도출한 최대 건조단위중량에 비해 상대적으로 낮은 다짐에너지로 평가된다. 그러므로 현장에서 최적의 건조단위중량을 모사하기 위해 수정다짐시험을 실시한다(Ying-Kit Choi, 2005). 또한 수정다짐시험은 최적함수비가 Vebe Time 적정 범위 시간에 부합되어 시공성 확보가 가능하다. 수정다짐시험은 Fig. 4와 같이 실시하였으며 ASTM D 1157 (Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristic of Soil Using Modified Effort)에 의거하여 램머의 무게는 4.5kg으로 총 5층 다짐의 55회의 타격회수를 가하며 이때의 다짐에너지는 $25.21\text{kgf}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$ 으로 공시체를 제작한다.

3.1 골재입도조정에 따른 배합비

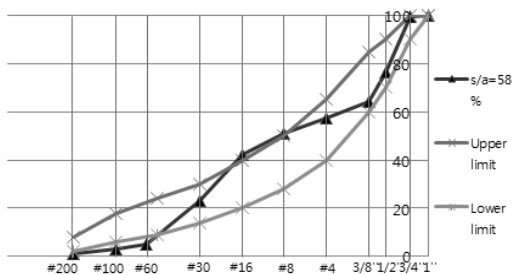
포틀랜드 시멘트 협회(PCA)에서는 RCCP 입도분포는 일반적으로 공칭최대 골재 크기가 19mm를 초과하지 않고 75 μm 의 체를 통과하는 허용 가능한 미립자 비율이 2~8%이다. 미립자의 규정량은 시멘트 페이스트의 분산을 돕기 위해 혼합 중에 윤활제 역할을 한다. RCC 포장의 고품질을 위해 굵은 골재와 잔골재 모두 ASTM-C33에서 나타내는 것과 같이 표준화되며 물리적 요소로 평가된 견고하고 내구성이 있는 입자로 구성되어야만 한다(Gregory E. Halsted, 2009). 또한 RCCP Gradation Band를 하한선(Lower Limit), 0.45 Power Curve, 상한선(Upper Limit)으로 구성 하였으며 우수한 품질의 RCCP를 위하여 골재 입도분포가 0.45 Power



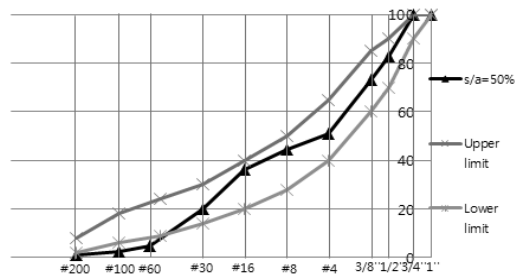
(a) Low Case of Sand and 19mm Gravel (s/a 30%)



(b) High Case of Sand and 19mm Gravel (s/a 70%)



(c) General Case of Sand and 19mm Gravel (s/a 58%)



(d) Best Case of Sand, 13mm and 19mm Gravel (s/a 50%)

Fig. 5. Gradation of s/a=30, 50, 58 and 70% with Recommended Gradation Band

Table 1. Mixture Proportions for RCCP

s/a (%)	W (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G19 (kg)	G13 (kg)
30	3.97	100	280	706	1530	0
	4.65	115	280	692	1502	0
	5.37	131	280	679	1472	0
	6.36	151	280	661	1433	0
	7.38	171	280	643	1395	0
58	5.10	120	280	1193	879	0
	5.62	131	280	1177	867	0
	6.07	140	280	1163	857	0
	6.58	150	280	1148	845	0
	7.18	161	280	1130	832	0
70	3.57	93	280	1661	662	0
	4.02	104	280	1639	653	0
	4.53	115	280	1616	644	0
	5.23	131	280	1584	631	0
	6.20	151	280	1542	614	0
	7.19	171	280	1501	598	0
50	4.02	102	280	1173	654	432
	4.60	115	280	1154	644	425
	5.31	131	280	1131	631	416
	6.29	151	280	1101	614	405
	7.30	171	280	1072	598	394

Curve에 근접하도록 권장하고 있다. 이는 0.45 Power Curve에 근접한 골재입도분포 일수록 골재 간 조밀한 내부를 형성하고 공극이 적으므로 골재 맞물림을 증대시켜 우수한 강도발현을 나타내기 때문이다. Gradation Band가 RCCP를 위한 반복재현성 평가에 미치는 영향을 알아보기 위해 Fig. 5와 같이 Lower, General, Best, Upper 네 가지 케이스의 인위적인 골재 입도 조정을 하여 입도 분포를 나타내었다. 또한 골재 입도를 설정하기 위해 19mm와 13mm 굵은 골재와 잔골재의 입도 분석 후 골재를 조합하여 s/a를 도출하였다. 여기서 s/a는 잔골재 및 굵은 골재의 절대 용적의 합에 대한 잔골재의 절대용적의 백분율을 잔골재율이라 한다.

골재와 모래가 잘 조합된 입도분포곡선은 적절한 컨시스턴시 범위에서 높은 건조단위중량을 얻을 수 있다. 즉, 골재의 조합을 조정함으로써 상한선과 하한선 사이에 0.45 Power Curve에 가장 근접한 최적의 배합비를 얻을 수 있다. s/a=50%는 상한선(Upper Limit)과 하한선(Lower Limit)범위 안에서 0.45 Power Curve에 가장 근접한 입도분포곡선을 얻기 위하여 13mm의 굵은 골재 20%와 19mm의 굵은 골재 30%를 조합하여 나타낸 밴드이다. 입도분포의 비교를 통해 영향을 분석하기 위해 시멘트량을 280kg/m³으로 고정하였으며, 함수비는 문헌조사 및 선행시험을 통해 3.5~7.4% 범위에서 설정하였고 Table 1은 배합비를 나타내었으며 W(%)는 함수비, W(Kg)는 함수량, S(Kg) 잔골재량, G(Kg) 19mm, 13mm 굵은골재량이다.

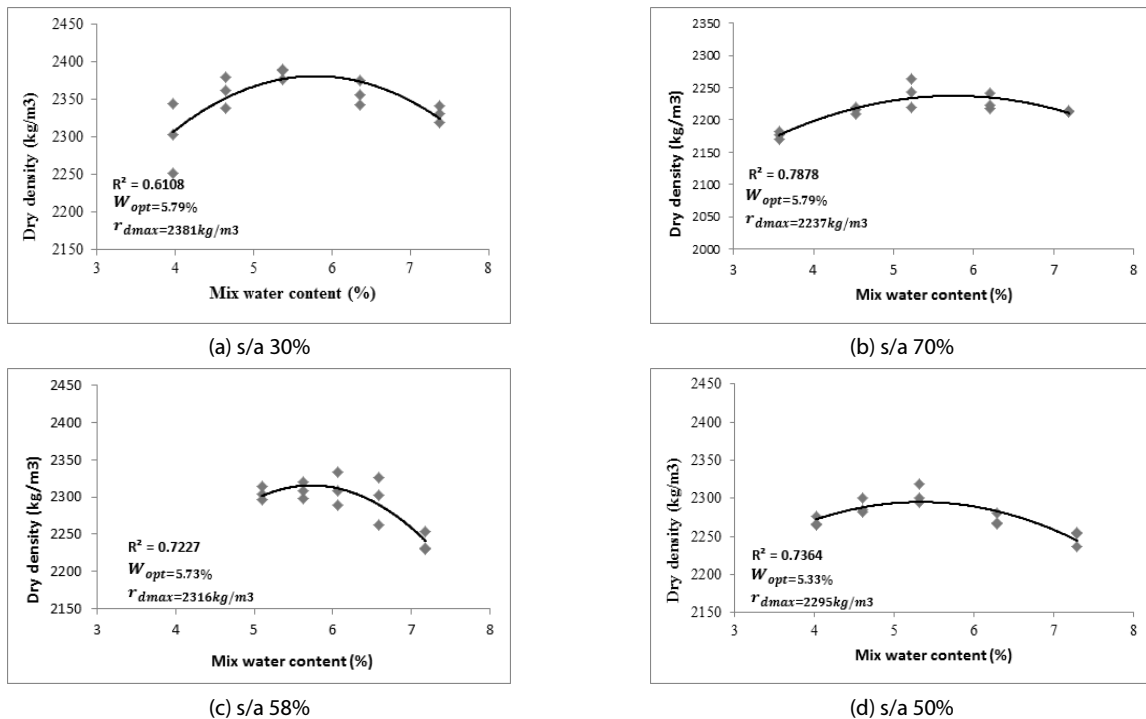


Fig. 6. Modified Compaction Curve of RCCP for s/a=30, 50, 58, 70

3.2 수정다짐시험 결과

수정다짐시험을 실시한 결과로써 다짐곡선을 도시할 수 있다. 다짐곡선의 결과 값은 흙을 동일한 에너지로 다졌을 때 건조단위중량이 최대가 되는 함수비가 있으며 현장 다짐 시 살포할 가장 적절한 수량의 단위중량을 결정하기 위한 것이다. 잔골재율(s/a)는 30%, 50%, 58%, 70% 네 가지 경우로 수정 다짐 시험을 실시하였다(Fig. 6). 반복재현성 평가에 기준이 되는 임의의 5개 함수비당 3개의 샘플의 정확도는 결정계수(R^2)로 평가하였으며 다짐곡선의 형태에서 곡률이 최대가 되는 지점의 값을 도출하기 위해 2차 곡선의 회귀식을 사용하였다. 결정계수는 총 변동 중에서 회귀선에 의해 설명이 되는 변동이 차지하는 비율이다. 즉, 수식이 얼마나 X와 Y의 관계를 잘 표현하고 있는지 나타내는 기준이다. X와 Y의 관계가 클수록 결정계수는 1에 가까워진다. 결정계수가 높을수록 회귀식의 설명력이 커지게 되므로 활용가치도 높아지고, 분석결과는 신뢰성을 얻게 된다. Nuunnally(1978)에 의하면 탐색적인 연구 분야에서는 0.6이상이면 충분하다고 하였고, 기초연구분야는 0.8, 응용연구 분야에서는 0.9이상이어야 신뢰도가 높다고 하였다. 본 연구는 수정다짐시험의 실측값에 대한 분산정도를 평가하기 위한 것 이므로 $R^2 > 0.65$ 이면 높은 신뢰도를 갖는 회귀식이라 할 수 있다. 단, s/a 30%의 결정계수(R^2)는 0.6108이다. 이는 수정다짐시험을 실시하는 과정에서 제작자의 숙련도 및 방법에 따라 공시체게 가해지는 다짐에너지 및 다짐도가 다르므로 몰드 제작 시 시험자의 오차가 발생하여 실측값의 분산이 증가했을 가능성이 있다.

Fig. 6은 네 가지 잔골재율의 수정다짐곡선의 최적함수비, 최대 건조단위중량, 결정계수를 나타냈다. 최적함수비와 최대건조단위중량 및 결정계수는 추세선을 이용하여 도출하였다. 네 가지 s/a는 비슷한 결과를 보였다. 단, s/a 30%를 제외하고 s/a 50, 58, 70%는 결정계수가 0.7 이상으로 높은 신뢰도를 갖는 값을 나타내었다. 본 연구에서는 반복재현성 평가 시 수정다짐시험의 결과는 참값에

근사한 수치로 판단하고 연구를 진행하였다. 또한 수정다짐곡선의 결과 값을 토대로 실험 횟수별 최대건조밀도의 발생빈도를 이용하여 반복재현성을 확인하였다.

4. 반복재현성 평가

반복재현성을 평가하기 위해 수행되었던 수정다짐시험의 최대 건조단위중량을 기준으로 한다. 또한 s/a=30, 50, 58, 70% 네 가지 경우의 반복재현성 평가를 실시하였다. 실험횟수에 따라서 발생하는 최대건조단위중량의 발생빈도를 이용하여 발생확률을 도출한다. 세 번의 수정다짐시험의 최대건조단위중량과 비교하여 한 번의 수정다짐시험과 두 번의 수정다짐시험을 실시하여 실험횟수별 다짐곡선의 발생확률로써 반복재현성을 평가할 수 있다.

4.1 실험 횟수별 발생빈도

반복재현성 평가에 앞서 실험 횟수별 발생빈도를 도출하여야 한다. 발생빈도 도출에 앞서 데이터는 최대건조단위중량을 기준으로 한다. 발생빈도 도출은 앞서 수행되었던 수정다짐시험의 함수비당 세 번의 실험값 데이터 중 한 개 또는 두 개의 실험값을 선택하여 다짐곡선을 도시한다. 이 다짐곡선의 개수는 243개 이며 최대건조단위중량 발생빈도를 얻다. Fig. 7(a)은 함수비당 세 번의 실험에 의한 수정다짐곡선의 샘플들을 각각 (a),(b),(c)...,(o)까지 표기하였다. 함수비당 세 개의 샘플이란 (a), (f), (k)를 말한다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)의 샘플 중 (a) - (b) - (c) - (d) - (e)를 선택하여 세 번의 실험 중 한 번의 실험을 선택하여 다짐곡선을 도시한 것이다. 이와 같은 방법으로 (a) - (b) - (c) - (d) - (j)와 (a) - (b) - (c) - (d) - (o)를 선택하여 다짐곡선을 도시하여 최대건조단위중량을 얻을 수 있다. 즉, 한 가지 함수비 당 세 가지 경우의 수가 존재하며 다른 함수비의 샘플을 고려하여 3^5 인 243 가지의 다짐곡선을 도시하여 최대건조단위중량의 발생빈도를 도출할 수 있다.

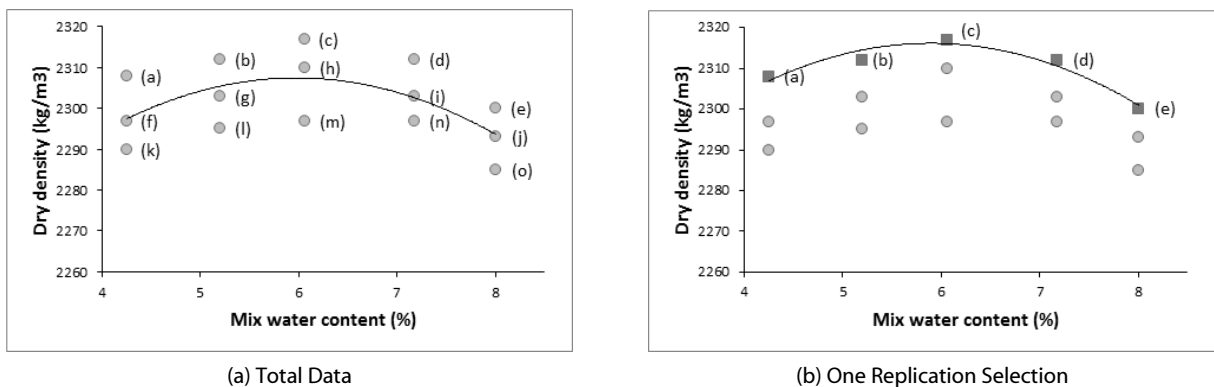
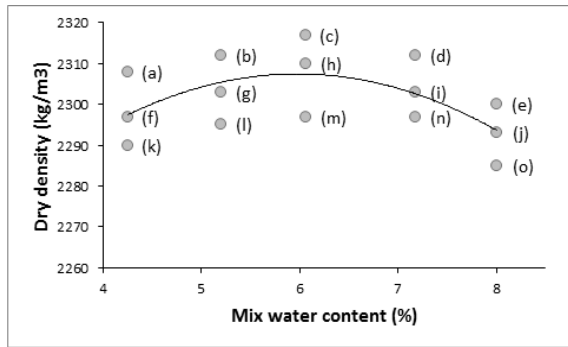
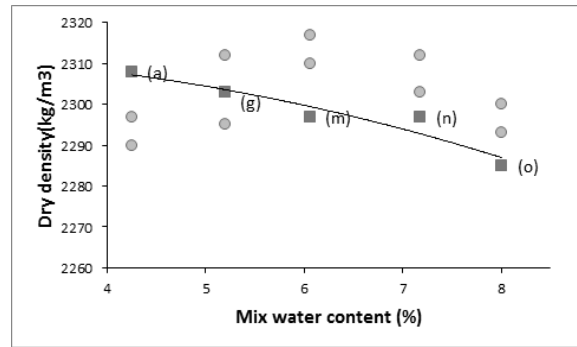


Fig. 7. One Replication Selection from Total Data of Modified Proctor Test

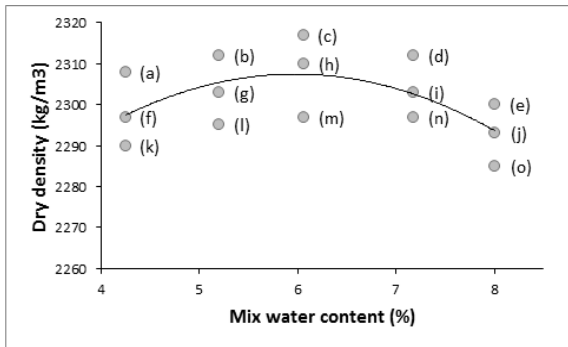


(a) Total Data

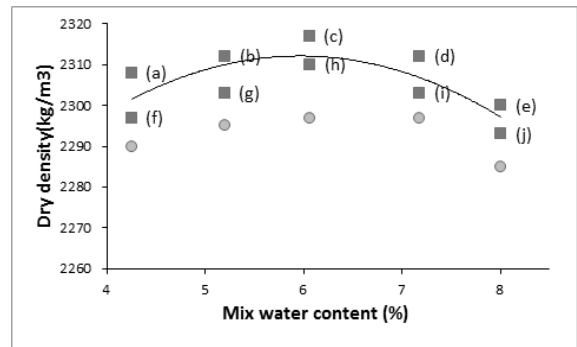


(b) One Replication Selection

Fig. 8. One Replication Selection with Optimal Water Content Outside of Typical Range



(a) Total Data



(b) Two Replication Selection

Fig. 9. Two Replication Selection from Total Data of Modified Proctor Test

Fig. 8(a)의 세 개의 샘플들 중에서 (a) - (g) - (m) - (n) - (o)의 샘플을 선택하여 다짐곡선을 도시한 것이다. 일반적으로 RCCP의 최적함수비는 5~8로 제시되어 있으며 Fig. 7(b)의 다짐곡선 샘플의 형태는 직선과 가까우므로 최적함수비는 5~8범위 밖의 값으로 결정되며 최대건조단위중량은 도시된 다짐곡선 좌측부분에 나타날 것이다. 이와 같은 샘플의 다짐곡선 형태가 나타나면 수정다짐시험의 제시된 결과 값에 벗어나므로 발생확률 분석에 있어 정확하지 않으므로 제외하였다. 제외 샘플은 전체 발생 243가지 수에서 제외하고 발생확률을 산정한다.

Fig. 9(a)의 세 번의 실험에 의한 수정다짐곡선의 각각의 (a),(b), (c)···(o) 샘플 들을 표기하였으며, Fig. 9(a)의 각각의 (a),(b)···(o) 샘플 중 (a,f) - (b,g) - (c,h) - (d,i) - (e,j)을 선택하여 두 번 실험에 의한 다짐곡선을 도시할 수 있다(Fig. 9(b)). 이 다짐곡선에 의한 결과 값으로 반복적인 243가지의 최대건조단위중량을 얻는다.

두 개의 샘플을 선택하여 다짐곡선을 반복적으로 도시 하였을 때 Fig. 8과 같은 직선형태의 다짐곡선 제외샘플은 발생하지 않았다. 두 개의 샘플 선택 시 두 실측값을 평균하여 하나의 실측값으로 표기하여 다짐곡선을 도시하기 때문에 직선 형태의 다짐곡선 제외 샘플은 발생하지 않았을 것으로 판단된다.

4.2 오차율범위 및 발생확률

반복재현성 평가를 위해 발생빈도를 이용하여 오차율범위에 대한 발생확률을 산정할 수 있다. 함수비 당 각각 한 가지 및 두 가지 샘플들을 선택하여 최대건조단위중량 발생빈도를 도출한 후 이 데이터를 이용하여 오차율범위를 산정할 수 있다. 오차율범위란 Fig. 10의 s/a 50%의 수정다짐의 결과(최대건조단위중량 = 2295kg/m³) 값에서 ±0.1%, ±0.5% 등등 오차를 가감하여 오차율범위로 표현할 수 있다. 오차율범위에 안에 포함되는 최대건조단위중량 개수를 셈하고 전체 발생빈도로 나누어 발생확률을 산정할 수 있다. Fig. 10은 함수비 당 세 개의 샘플 중 한 개의 샘플을 선택 하였을 때, 발생빈도 그래프에 화살표로 오차율 범위를 나타내었다. Fig. 10의 중간의 기준선은 s/a 50%의 앞선 3장에서 수행되었던 수정다짐시험의 세 개의 샘플에 의한 최대건조단위중량 값 (=2295kg/m³)이다.

발생확률은 기준선의 2295kg/m³에 ±0.1% 오차율범위는 2293~2297kg/m³이며 이에 포함되는 발생횟수는 69개이다. 전체 243개 중 69개의 발생확률은 28.4%이다. 마찬가지로 ±0.3%인 2288~2302kg/m³에 해당하는 발생횟수는 181개이고 발생확률은 74.5%이다. ±0.5%의 범위 안에 해당하는 발생횟수는 237개이고 발생확

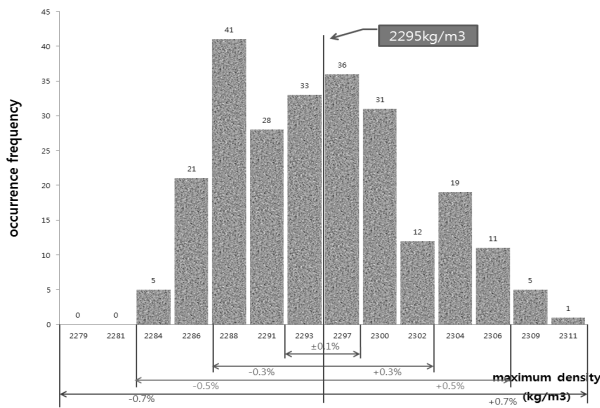


Fig. 10. Occurrence Frequency and Error Rate Range of One Replication Selection for s/a=50%

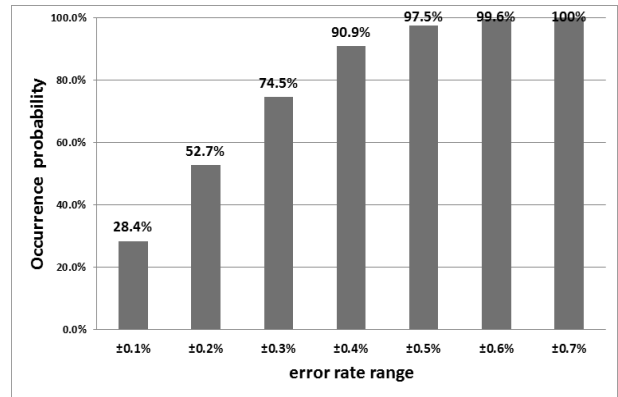


Fig. 11. Occurrence Probability According to Error Rate Range of One Replication Selection for s/a=50%

Table 2. Occurrence Probability According to Error Rate Range for s/a=30, 50, 58 and 70% with One Replication Selection

Error Rate Range (%)	Occurrence Probability of Two Replication Selection			
	s/a 30% $\gamma_{dmax}=2381\text{kg/m}^3$	s/a 50% $\gamma_{dmax}=2295\text{kg/m}^3$	s/a 58% $\gamma_{dmax}=2316\text{kg/m}^3$	s/a 70% $\gamma_{dmax}=2237\text{kg/m}^3$
±0.1	20.2%	28.4%	25.9%	21.8%
±0.2	48.1%	52.7%	46.0%	33.3%
±0.3	53.5%	74.5%	58.5%	51.0%
±0.4	65.4%	90.9%	69.2%	69.1%
±0.5	82.7%	97.5%	80.0%	79.0%
±0.6	87.2%	99.6%	85.3%	87.7%
±0.7	95.5%	100.0%	91.5%	97.1%
±0.8	97.5%	-	93.8%	100.0%
±0.9	98.4%	-	97.3%	-
±1.0	100.0%	-	100.0%	-
Number of Exception	-	-	19	-

률은 97.5%이고 ±0.7%의 오차율범위에 따른 발생확률은 100%이다. 즉, 오차율범위 ±0.7%에서 100% 반복재현성을 나타내고 세 번의 실험에 의한 다짐곡선과 비교하여 0.7%의 오차를 뜻한다. 오차율범위는 누적되어 나타낸 발생확률이며 Fig. 11은 s/a 50%의 한 번의 수정다짐시험을 하였을 때 발생확률을 각각의 오차율범위에 따라 나타내었다.

4.3 반복재현성 분석

발생확률 100%란 어떠한 오차를 가질 때 기준이 되는 값과 비교하여 반복재현성이 100%인 것을 의미한다. 즉, 앞선 3장에서 수행된 수정다짐시험 최대건조단위중량 기준 값에 대한 반복재현성이 100%인 오차율범위를 산정 할 수 있다. 오차율범위가 적을수록 세 번의 실험에 의한 수정다짐시험과의 비교시 반복재현성이

높다고 평가할 수 있다. 다음 Table 2는 수정다짐시험을 1회 실시한 경우 최대건조단위중량의 오차율범위별 발생확률을 나타내었다. 마찬가지로, Table 3은 수정다짐시험을 2회 실시한 경우 최대건조단위중량의 오차율범위별 발생확률을 나타내었다. 이는 기존의 수정다짐곡선과의 반복재현성을 확인할 수 있다.

Table 2는 한 개의 샘플에 의해 수정다짐시험을 실시하였다. s/a=30, 50, 58, 70%를 수행하였으며 세 번의 수정다짐시험의 값을 기준으로 하여 각각의 오차율범위에 따른 발생확률을 나타내었다. 함수비당 세 개의 샘플의 다짐곡선에서 함수비당 한 개의 샘플을 선택하면 243가지의 경우의 수가 발생되어 최대건조단위중량 발생빈도를 도출할 수 있고 발생빈도를 이용하여 오차율범위에 따른 발생확률을 나타내었다. s/a 50, 70%는 기준이 되는 최대건조단위중량의 오차율범위 ±0.7~±0.8%에서 100%발생확률이 나타

Table 3. All s/a, Occurrence Probability According to Error Rate Range for s/a=30, 50, 58 and 70% with Two Replication Selection

Error Rate Range (%)	Occurrence Probability of Two Replication Selection			
	s/a 30% $\gamma_{dmax}=2381\text{kg/m}^3$	s/a 50% $\gamma_{dmax}=2295\text{kg/m}^3$	s/a 58% $\gamma_{dmax}=2316\text{kg/m}^3$	s/a 70% $\gamma_{dmax}=2237\text{kg/m}^3$
±0.05	30.9%	29.6%	14.8%	16.9%
±0.1	38.3%	58.4%	37.4%	44.4%
±0.2	75.3%	91.0%	70.4%	71.6%
±0.3	86.4%	99.2%	84.4%	92.6%
±0.4	96.7%	99.6%	93.4%	100.0%
±0.5	99.2%	100.0%	100.0%	-
±0.6	100.0%	-	-	-
Number of Exception	-	-	-	-

난다. 그 중 s/a 50%는 최대건조단위중량의 표준편차가 가장 적은 비정규분포 곡선을 나타내므로 가장 적은 오차율범위 ±0.7%를 나타낸다. 반대로 오차율범위가 가장 큰 s/a 30, 58%는 최대건조단위중량의 표준편차가 가장 큰 비정규분포 곡선을 나타내며 오차율범위는 ±1.0%를 나타낸다. s/a 58%는 제외샘플의 개수를 포함하여 발생확률을 도출하였다면 더 큰 오차율범위에서 100% 반복재현성이 나타났을 것으로 사료된다. 한 개의 샘플의 발생확률은 네 가지 s/a의 차이가 크지 않다. 평균적으로 네 가지 s/a의 반복재현성이 100% 나타나는 오차율범위는 약 ±0.9%이다.

Table 3은 두 개의 샘플에 의한 네 가지 s/a=30, 50, 58, 70%의 오차율범위에 따른 발생확률이다. 세 개의 샘플의 다짐곡선에서 함수비당 두 개의 샘플을 선택하여 243가지 최대건조단위중량 발생빈도를 도출하여 오차율범위에 따른 발생확률을 나타내었다. s/a 50, 58, 70%는 기준이 되는 최대건조단위중량에서의 오차율범위가 ±0.4%~±0.5%에서 100% 반복재현성이 나타난다. s/a 30%는 최대건조단위중량의 표준편차가 가장 큰 비정규분포 곡선을 나타내므로 가장 큰 오차율범위 ±0.6%가 나타났을 것으로 판단된다. 두 개의 샘플의 발생확률은 네 가지 s/a의 차이가 크지 않다. 평균적으로 네 가지 s/a의 반복재현성이 100% 나타나는 오차율범위는 약 ±0.5%이다. 네 가지 입도분포곡선에서 실험 횟수에 따른 오차율 범위의 차이가 크지 않으므로 실험 횟수에 의한 반복재현성 평가는 입도분포곡선의 영향을 받지 않는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 RCCP를 위한 수정다짐시험의 실험횟수에 대한 명확한 기준이 없기 때문에 함수비당 세 개의 샘플에 의한 수정다짐시험의 기준을 설정하고 설정된 다짐곡선과 비교하여 실험횟수(1회 또는 2회)의 신뢰성을 분석하기 위해 반복재현성을 고찰하였다.

이를 위하여 함수비 당 세 번의 실험을 통한 수정다짐시험의 최대건조단위중량을 도출한 후 실험 횟수(1회 또는 2회) 별 최대건조단위중량의 발생빈도를 도출하여 각각의 오차율범위에 대한 발생확률을 도출하였다. 발생확률을 통해 실험횟수에 따라 나타나는 반복재현성을 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 일반적으로 수정다짐시험의 결과 값은 함수비당 실험 횟수가 많을수록 보다 정확한 결과의 도출이 가능하다. 본 연구에서의 수정다짐시험을 3회 실시한 경우의 최대건조단위중량을 기준으로 하였다. 수정다짐시험을 3회 실시한 결과와 비교하여 수정다짐시험을 1회 실시한 경우 약 ±0.9% 오차율범위에서 100% 반복재현성이 나타났으며 수정다짐시험을 2회 실시한 경우 약 ±0.5% 오차율범위에서 100% 반복재현성이 나타났다. 따라서 실내에서 수행되는 RCCP를 위한 수정다짐시험을 2회 실시한 경우 약 ±0.5% 오차를 갖으며 99.5%의 신뢰도를 확인하였다.
- (2) RCCP를 위한 최적의 배합비를 산정하기 위해 네 가지 입도 설정을 시행하였다. 반복재현성 평가에서 네 가지 s/a가 실험 횟수별 발생확률이 모두 유사하므로 반복재현성 평가는 입도분포곡선의 영향을 받지 않는다고 판단된다.

수정다짐시험의 경우 실험횟수에 대한 기준이 제시되어 있지 않기 때문에 실험횟수에 따라 도출되는 최대건조단위중량의 발생빈도를 통해 반복재현성을 분석하였다. 실험횟수가 많을수록 보다 정확한 결과의 도출이 가능하지만 실험횟수가 많아질 경우 경제적, 효율적인 측면에 부적절할 것으로 판단된다. 그러므로 수정다짐시험으로 도출된 최대건조단위중량의 값과 비교하여 수정다짐시험을 2회 수행한 경우 99.5%의 신뢰도가 확인되었으므로 실내에서 수행되는 수정다짐시험은 최소 2회의 시험횟수가 요구되는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단-지역혁신창의인력사업의 연구비지원(No.2014H1C1A1067086)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- ASTM D 1157. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristic of Soil Using Modified Effort.
- Choi, Y. K. and Kenneth D. Hansen (2005). "RCC/Soil-Cement: What's the Difference?." *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 371-378.
- Dale Harrington (2010). Guide for Roller Compacted Concrete Pavements, National CP Tech Center.
- Do, D. H. (1996). "Roller compacted concrete pavement." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 38, No. 1, pp. 56-65 (in Korean).
- Gregory, E. Halsted. (2009). "Roller-Compacted concrete pavements for highways and streets," *Conference of Transportation Association of Canada Vancouver*, British Columbia.
- Hamed, Jahi. (2014). "Roller compacted concrete pavements." *A Journal of Multidisciplinary Research*, Vol. 3, No. 8, pp. 121-134.
- Kim, S. Y. (2014). A Preliminary of Vebe Test and Proctor Test on Roller Compacted Concrete Pavement, University of Gangneung, Master Science of Engineering.
- Lee, B. C., Eum, J. Y. and Im, S. W. (1994). A Study on Development of Pavement Management System for Highway Portland Cement Concrete Pavement (in Korean).
- Lee, C. H., Kim, Y. K., Kang, J. G., Park, C. W. and Lee, S. W. (2011). "A study on construction methods of roller compacted concrete pavement for bike roads." *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 13, No. 2 pp. 103-114.
- Lim, Y. I. (2009). Consistency and Mechanical Properties of Roller Compacted Concrete, University of Ulsan, Master Science of Engineering.
- Pieere Gauthier and Jacques Marchand (2005). "Design and Construction of Roller Compacted Concrete Pavements in Quebec." The Centre de recherche interuniversitaire sur le béton at Université Laval.