Int. J. Highw. Eng. Vol. 17 No. 3 : 27-33 JUNE 2015
http://dx.doi.org/10.7855/IJHE.2015.17.3.027

롤러전압 콘크리트포장의 적정 다짐실험 방안 고찰

Optimum Compaction Test of Roller Compacted Concrete Pavement

정 건 우 Chung, Gun Woo | 정회원 · 강릉원주대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : wjdrjswkd@nate.com)
이 승 우 Lee, Seung Woo | 정회원 · 강릉원주대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : swl@gwnu.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : To ensure appropriate RCC properties with sufficient strength development and workability, it is necessary to secure a proper level of consistency. It is also necessary to secure maximum dry density, which is an important factor for increasing the interaction of aggregate interlocking, leading to an augmentation of RCC strength. On the other hand, the dry density of RCC can be changed owing to the compaction conditions, water content, and particle size distribution. A Proctor test and a modified Proctor test were used for determining the optimum water content needed to achieve maximum dry density with different amounts of compaction energy. A Vebe test, on the other hand, was used for checking the level of consistency, which is important for producing a workable mixture.

METHODS : To confirm the degree of compaction at various particle sizes, RCC mixtures with different sand/aggregate ratios were evaluated. The Proctor test and modified Proctor test were applied to these mixtures to check the effect of the aggregate gradation and compaction energy on the maximum dry density and optimum water content. During each test, three specimens were produced for all types of water content under each aggregate gradation. A compaction curve and the optimum water content and maximum dry density for each aggregate gradation were then obtained for both tests. The range of water content for the appropriate consistency of each aggregate gradation was determined through a Vebe test. The optimum water content was then evaluated based on this range.

RESULTS : The compaction test results show that the modified Proctor test provides a higher maximum dry density and lower optimum water content compared with the standard Proctor test. For the modified Proctor test, two cases of aggregate gradation (s/a = 30% and 70%) had the optimum water contents outside of the appropriate water content range. For the standard Proctor test, on the other hand, none of aggregate gradations provided the optimum water content within the desired range.

CONCLUSIONS : The modified Proctor test should be used for an RCC mixture design because it can provide adequacy between maximum dry density and consistency. Moreover, the compaction roller has become highly developed for higher compaction energy.

Keywords
RCCP, Standard proctor test, Modified proctor test, Vebe test, Vebe time, Optimum water content, Maximum dry density

Corresponding Author : Lee, Seung Woo, Professor
Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, 7, Jukheon-Gil, Gangneung City, Gangwon Province, Korea
Tel : +82.33.640.2419 Fax : +82.33.641.1391
E-mail : swl@gwnu.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Mar. 24. 2015 Revised Mar. 25. 2015 Accepted Mar. 26. 2015

1. 서론

1.1. 연구배경 및 목적

전 세계적으로 산업혁명 이후 석탄, 석유 등의 화석연료 사용이 늘어나면서 CO_2 배출량이 증가하고 있다. 이에 현대사회에 있어 CO_2 증가로 인한 지구온난화의 가속으로 국지성 집중호우, 폭염, 열대성 저기압의 대형화 등 극한기후현상이 빈번해지고 있다. 도로의 콘크리트 포장 건설분야에서 주재료로 사용되는 시멘트의 경우

대표적인 건설재료로 생산 시 소성과정에서 고에너지를 필요로 하는 공정을 거치게 되므로 발생하는 대량의 CO_2는 국내 CO_2 배출산업 중 두 번째로 높은 비중을 차지한다. 이를 감축시키기 위한 노력이 요구되는 가운데 토목분야에서 친환경적인 건설기술을 확보하는데 초점을 맞추고 있다. 고내구성 및 시멘트 사용량 절감을 통한 친환경성을 확보하여 친환경 건설 패더라임의 변화에 부응할 수 있는 공법이다. 이러한 시점에서 친환경 공법으로 국외에 시공사례가 있는 RCCP(Roller Compacted Concrete Pavement)공법에 대한 연구가 진행되고 있다.

국외의 시공사례로는 1975년 대부분 북미에서부터 RCCP 포장공사가 시공되었으며, 항만의 컨테이너 하역장, 군사기지 및 민간 터미널에 시공되었다(Pittman and Ragan, 1986). 북미지역에서는 1970년 대 후반부터 롤러전압 콘크리트 포장에 대한 연구가 진행되었으며, US Army Corps of Engineers, PCA(Portland Cement Association) 및 ACI(American Concrete Institute)에서는 사용목적에 따른 롤러전압 콘크리트포장 공법의 품질기준, 배합설계 및 시공방법에 대하여 제시고하고 있다. 일본의 경우 1952~1953년 사이에 삿뽀로~센사이 간의 도로에 보조기층으로 9km정도 시공되었으나 빈배합 콘크리트에 가까웠으며, 본격적인 사용은 1987년 오사카 시멘트공장 부지에 시험포장이 시공되었다.

국내의 경우 환경문제에 대한 의식이 고조되고 있는 가운데 환경보전과 경관향상을 전제로 도로, 자전거 도로 및 관거매설 등 친환경 롤러전압다짐 콘크리트에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이다. 시공사례로는 국외 적용사례를 통하여 1993년 한국도로공사에서 수행한 부체도로 적용에 대한 "RCCP에 대한 실험적 연구"와 1997년 서울대학교에서 "기계화 경작로 포장 시공을 위한 RCCP 개발연구"가 이루어져 실험적으로 현장 적용이 이루어졌으며, Lee Seung Woo (2011)는 자전거도로용 롤러전압 콘크리트포장 기술 개발 연구를 통하여 실내 실험 및 시험시공을 실시하여 RCCP 공법의 우수성을 입증하였다.

RCCP공법은 일반 콘크리트포장 공법과 유사한 구조적/기능적 성능을 발현한 수 있으며 Fig. 1과 같이 아스팔트 페이버와 진동롤러를 사용하여 기계화 시공을 실시하는 공법으로써, 적은 단위수량의 콘크리트 혼합물을 생산하여 아스팔트 페이버로 포설한 후 롤러전압, 줄눈 설치 및 양생을 실시한다.

따라서 일반 시멘트 콘크리트포장보다 간소한 시공절차, 신속한 시공속도, 조기교통개방 및 우수한 경제성을 지니고 있어 경제적인 공법이다(Wayne S. Adaska 2006). 특히 수화반응에 의한 강도발현과 함께 롤러전압을 통한 콘크리트 내부에서의 골재 맞물림 효과를 증진시켜 상대적으로 적은 시멘트 사용에도 불구하고 높은 강도를 발현하여 우수한 구조적 성능을 확보할 수 있다. RCCP배합설계에 있어서 강도발현을 위해 최적의 수분함량과 최대건조단위중량을 선정하는 것이 중요하다(Antonio Nanni 1993). 실제 현장에서 요구되는 RCC 물성치를 발현하기 위해서는 실내실험을 통하여 강도발현 뿐 아니라 시공성 확보에 의한 컨시스턴시 확보가 동시에 이루어져야 하므로 최적함수비에서 컨시스턴시가 동시에 확보될 수 있는 적정다짐방법을 고찰해야 한다.

Fig. 1 Roller Compacted Concrete Pavement Method

RCCP에서 적용 가능한 여러 골재입도를 통해 적정다짐 방법을 도출하고자 한다. 적정다짐방법을 도출하기 위해 RCCP에 컨시스턴시를 확보하여 시공성 평가를 할 수 있는 품질평가 시험으로 Vebe Test를 선정하였다. 다짐에너지에 따라 RCCP의 물성 변화를 확인하기 위해 다짐시험을 실시하였고, 다짐에너지에 따라 다짐조건을 분류하여 표준다짐시험과 수정다짐시험을 진행하였다. 표준다짐시험과 수정다짐시험 결과 최적함수비를 도출할 수 있고, Vebe test 결과 컨시스턴시 확보를 위한 최적함수비 범위를 선정할 수 있으며, 서로 비교하여 표준다짐시험과 수정다짐시험 중 RCCP의 시공성 확보를 위한 적정 다짐시험 방법을 도출해 내고자 한다.

2. RCCP의 적정다짐을 위한 평가전략

2.1. 적정다짐에 대한 기준수립

RCCP의 다짐방안을 일반화하기 위해 다음과 같이 기준을 정하였다. 적합한 RCCP의 물성확보를 위해서는 충분한 강도발현과 시공성을 위한 컨시스턴시 확보가 필요하다. 시공성 확보가 가능한 함수비 범위에서 최적함수비 조건 또한 만족해야 한다. 그러나 RCCP의 물성은 동일한 배합비에서도 다짐조건에 따라 달라진다. 다양한 범위에서의 RCCP의 최대건조단위중량과 최적함수비의 변화를 확인하기 위해서 s/a로 나누어 진행하였고, 다짐에너지에 따른 다짐조건을 분류하여 표준다짐시험과 수정다짐시험을 진행하였다. 일반적인 고속도로 콘크리트포장에 적용하는 시멘트량 보다는 20% 감소한 280kg/m^2 로 설정하였으며, s/a는 30%, 50%, 58%, 70%로 나누어 분류하였고, 다양한 입도에서의 다짐상태를 확인하기 위해 Table 1과 같이 배합비를 산정하였다.

Table 1. Mixture Design of RCCP for Each Case of Aggregate Gradation and Water Content

s/a (%)	Water content%	Water (kg)	Cement (kg)	Sand (kg)	19mm Gmax(kg)	13mm Gmax(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
	8.01	183	280	633	1372	0
	8.9	200	280	618	1339	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
	8.00	185	280	1052	587	387
	8.50	194	280	1037	579	382
58	4.86	122	280	1327	893	0
	5.10	120	280	1193	879	0
	5.62	131	280	1177	867	0
	6.07	140	280	1163	857	0
	6.29	152	280	1276	859	0
	6.58	150	280	1148	845	0
	7.18	161	280	1130	832	0
	7.23	171	280	1244	837	0
	7.77	181	280	1226	825	0
	8.88	202	280	1191	802	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
	8.18	190	280	1461	582	0
	9.16	208	280	1424	567	0

2.2. 다짐에너지 대비 건조단위중량 함수비 특성

다짐시험의 목적은 다짐 시 건조단위중량과 함수비의 관계를 이용하여 최대건조단위중량과 최적함수비를 구하기 위함이다. 다짐에너지가 증가함에 따라 최대건조단위중량은 증가하고, 최적함수비는 감소하며, 공극감소로 인해 입자간의 거리가 축소되어 단위중량이 증가하게 된다. Fig. 2는 다짐에너지의 변화에 따라 최대건조단위중량과 최적함수비의 상관관계를 비교할 수 있는 그래프이다.

다짐시험은 ASTM D1157을 이용하여 실험을 실시하였으며, 다짐시험의 종류를 다짐에너지에 따라 분류하면 표준다짐시험과 수정다짐시험이 있다. 각 시험의 제원은 Table 2에 제시되어 있다.

2.3. 시공성 확보를 위한 함수비 범위 산정

콘크리트의 품질시험으로는 일반적으로 슬럼프시험을 이용하고 있으나 RCCP와 같이 슬럼프가 2cm 이하이면 척도로서 역할이 불충분하므로 이와 같이 반죽된

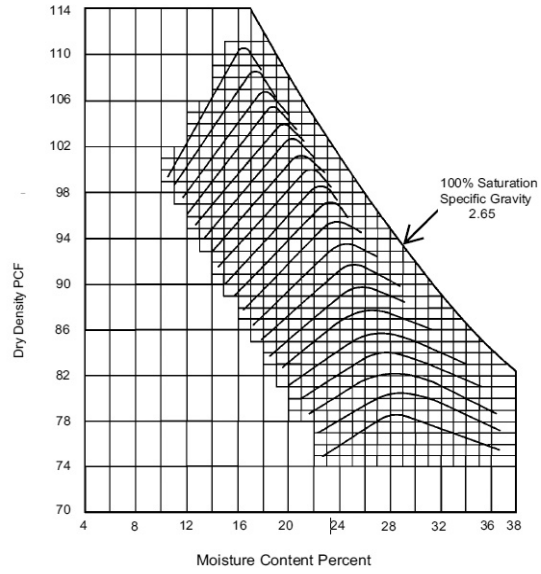


Fig. 2 According to the Compaction Energy Relationship Graph of Dry Density and Water Content (AASTO, ND T-99)

Table 2. According to the Compaction Energy of Compaction Test Types (ASTM D1157)

Compaction test	Specifications
Standard proctor test	3layer, 25 times each compaction, 2.5Kg Rammer, 30cm Drop height
Modified proctor test	5layer, 55 times each compaction, 4.5Kg Rammer, 45cm Drop height

콘크리트에는 Vebe Test, 다짐계수시험, Drop Table 시험 등이 이용된다. 위 시험들 중 다짐작업량의 목표라고 할 수 있는 점에서 Vebe Test시험이 가장 우수하고, 비교적 용이하게 적정한 굵은골재와 잔골재의 비율을 찾아 낼 수 있고, 또 단위 수량의 미세한 변화도 잘 표현할 수 있다(임영인, 2009). Vebe Test는 진동에 의해 콘크리트가 다져져 콘크리트 상면에 시멘트 페이스트가 떠올라 원판 전단면에 모르타르 링이 형성되어지는 상태가 되고, Table 시험기의 운전을 개시한 후 위 상태에 도달할 때까지 소요된 시간을 초로 측정 후 표시한다. 단, 품질과 밀도측정에서 소요시간은 2분 미만으로 규정하므로 주의한다. Fig. 3은 ASTM C1170/1170M을 이용한 Vebe test 실험과정이다. 이와 같은 방법으로 각 s/a별로 실험을 수행하였다.

RCCP의 품질실험으로 Vebe Test를 선정하여 진행하였다. 국외 사례로 Abdo et al., (1993)와 ACI 325.10R의 경우 적정 Vebe time의 범위를 30초~ 40초 선정하였고, Farshid et al., (2010)는 50초~70초를 적정 Vebe time범위로 설정하였다. 따라서 본 연구에서는 다짐종류와 s/a별 최대건조단위중량을 위한 최적함수비가 consistency를 만족하는지 검토하기 위하여 Vebe time 범위를 30초~75초로 선정하여 연구를 진행하였다.

(a) Vibration

(b) Appearance of Mortar

(c) Mortar Ring Formation

Fig. 3 Vebe Test according to ASTM C1170/1170M

3. 실험결과

3.1. Vebe Test 실험결과

RCCP공법은 적절한 작업성을 갖기 위해 컨시스턴시를 요구하며, 일반 콘크리트와 달리 슬럼프가 0인 된 배합의 콘크리트의 컨시스턴시를 측정하는 시험법을 사용한다. 이는 RCCP의 소정의 품질을 얻고 다짐기계의 시공능률에 맞는 컨시스턴시를 확보해야 하기 때문이다(Wayne S. Adaska, 2006). Table 3은 Vebe test결과 s/a별 Vebe time 범위에 대한 최적함수비 범위를 나타내는 표이다. Table에서 제시하고 있는 함수비 범위는 표준다짐시험과 수정다짐시험의 최적함수비와 비교하여 컨시스턴시를 확보하여 시공성을 확보할 수 있다고 판단할 수 있는 지표로 이용될 수 있다.

Table 3. RCCP Optimum Water Content Range of Each Aggregate Gradation for Desired Vebe Time Range

s/a (%)	Water content for Vebe time 30–75s (%)
30	5.35–6.2
50	5.2–6.1
58	5.71–6.65
70	5.95–7.1

3.2. 다짐시험결과

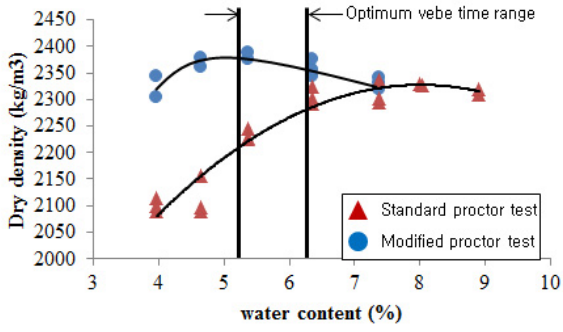
Table 4는 s/a에 따른 다짐시험결과이다. 각 s/a별로 표준다짐보다 수정다짐에서 최대건조단위중량이 증가한 것을 확인할 수 있었고, 최적함수비는 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이는 수정다짐이 표준다짐보다 골재 맞물림 효과로 인해 공극이 줄고 단위중량이 증가한 것으로 판단할 수 있다.

Table 4. Aggregate Gradation by Compaction Test Result

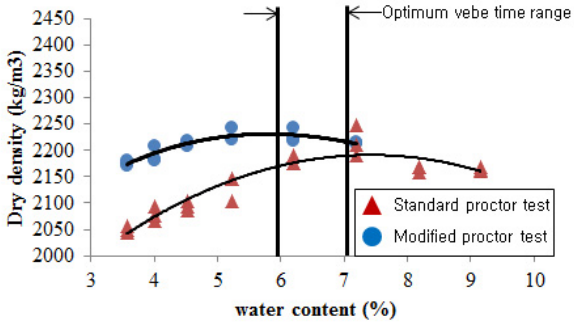
s/a	Properties	Modified proctor test	Standard proctor test	Growth(%) {(Modified/Standard) ×100}–100
30%	Max. dry density (kg/m³)	2385	2327	2.49
	Optimum water content(%)	5.00	8.01	–37.58
50%	Max. dry density (kg/m³)	2305	2287	0.79
	Optimum water content(%)	5.31	7.75	–31.48
58%	Max. dry density (kg/m³)	2316	2270	2.03
	Optimum water content(%)	6.06	6.70	–9.55
70%	Max. dry density (kg/m³)	2232	2191	1.87
	Optimum water content(%)	5.85	7.42	–21.16

4. 최적함수비에서의 consistency확보 검토

Fig. 4는 s/a 30% 및 s/a 70%의 다짐시험 결과를 그래프로 도시화한 것으로 본 연구에서 제시한 Vebe time 범위 (30s~75s)에 표준다짐시험과 수정다짐시험의 최적함수비 값이 부합하지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서 s/a 30% 및 s/a 70%에서는 표준다짐시험과 수정다짐시험 모두 RCCP에 적합한 컨시스턴시를 확보하지 못하여 시공성을 확보할 수 없었고, 따라서 s/a 30% 또는 70%일 때, 적합한 다짐방법에 대한 지표로 사용될 수 없는 것으로 판단된다.



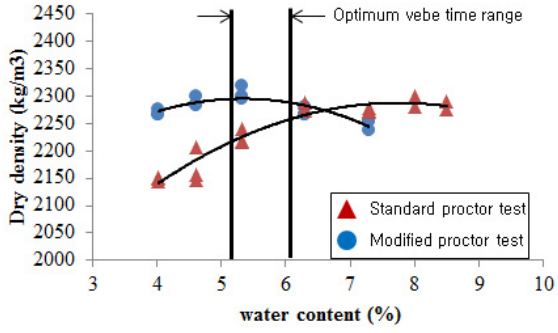
(a) s/a 30%



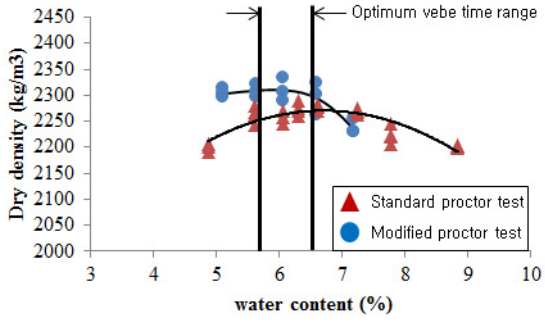
(b) s/a 70%

Fig. 4 Compaction Curve of RCCP for s/a 30% and s/a 70%, and Their Desired Water Content Range

Fig. 5는 s/a 50% 및 s/a 58%의 다짐시험 결과를 그래프로 도시화한 것으로 Vebe time 범위 (30s~ 75s)에서 수정다짐시험의 최적함수비 값이 부합하는 것을 확인할 수 있었고, 표준다짐시험의 최적함수비 값은 부합하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 s/a 50% 및 s/a 58%의 수정다짐시험은 RCCP에 적합한 컨시스턴시를 확보하여 시공성을 확보하였고, 수정다짐시험이 적합한 다짐방법임인 것으로 판단된다. 또한 s/a 50% 및 s/a 58%의 표준다짐시험은 Vebe time 범위 (30s~75s)에 최적함수비 값이 부합하지 않았으므로, RCC에 적합한 컨시스턴시를 확보하지 못하여 시공성을 확보할 수 없었으므로 적합한 다짐방법이 아닌 것으로 판단된다.



(a) s/a 50%



(b) s/a 58%

Fig. 5 Compaction Curve of RCCP for s/a 50% and s/a 58%, and Their Desired Water Content Range

5. 결론

본 연구에서는 RCCP를 일반화할 수 있는 최적다짐방법을 제시하기 위하여 다양한 입도에 따른 s/a로 분류하였고, 다짐조건에 따라 최적함수비 값을 구하였으며, Vebe test를 이용하여 컨시스턴시 확보를 위한 최적함수비 범위를 정한 후, 다짐시험별로 비교·분석하여 적합한 다짐시험방법을 찾기 위한 연구를 수행하였고 주요 결론은 다음과 같다.

1. Vebe test는 컨시스턴시확보를 위한 최적함수비 범위를 제시하기 위한 지표로써 국외 사례를 통한 Vebe time 범위를 30s~75s로 선정하였으며, Vebe test결과 값으로 s/a에 따른 최적함수비 범위를 선정할 수 있었다.

2. s/a별 표준다짐시험과 수정다짐시험의 다짐곡선 분석 결과, s/a 30% 및 70%에서는 표준다짐시험과 수정다짐시험 모두 Vebe time 범위(30s~75s)에 부합하지 못하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 RCCP에 적합한 컨시스턴시를 확보하지 못하여 시공성을 확보할 수 없었고, 따라서 s/a 30% 또는 70%일 때, 적합한 다짐방법에 대한 지표로 사용될 수 없는 것으로 판단된다. 그러나 s/a 50% 및 58%에서는 표준다짐시험에서는 Vebe time 범위 (30s~75s)에 부합하지 못하였지만, 수정다짐시험에서 Vebe time 범위 (30s~ 75s)에 부합하는 것을 확인할 수 있었고, 이는 RCCP에 적합한 컨시스턴시를 확보하였고 시공성을 확보할 수 있으며, RCCP의 적합한 다짐방법인 것으로 판단된다.

따라서 RCCP공법의 다짐조건의 선정은 Vebe test를 이용하여 컨시스턴시를 확보한 Vebe time 범위 (30s~75s)를 준수하고, s/a 50% 및 s/a 58%의 수정다짐시험을 수행한다면, 수정다짐시험이 RCCP의 적합한 다짐실험 방법인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 "온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 포장도로(Eco-Road)" 연구단을 통하여 지원된 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 건설기술혁신사업에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

BIBLIOGRAPHY

ACI 325.10R-25, Report on Roller Compacted Concrete pavements.

Antonio Nanni, Member, ASCE and Nasser Meamarian (J. Master. Civ Eng 1993) "LABORATORY CONSOLIDATION METHODS APPLIED TO COMPACTED CONCRETE FOR PAVEMENTS"

ASTM C1170 Standard Test Method for Determining Consistency

and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibeating Table

Farshid Vahedifard., Mahmoud Nili., Christopher L. Meehan., 2010, Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement, Construction and Building Materials, Vol. 24, No. 12, pp.2528~2535

J. Mater, (1993.5:137-143) Antomio Nanni, LABORATORY CONSOLDATION METHODS APPLIED TO COMPACTED CONCRETE FOR PAVEMENTS, ASCE, and Nasser Meamarian

Lee, C. H., Kim, Y. K., Kang, J. G., Park, C. W., and Lee, S. W., A Study on the Development 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

Oh Byung Hwan, Development of roller-compacted concrete pavement for construction of agricultural roads . Seoul National University. 1997

Pittman and Ragan 1986, The Effects of the construction process on selected fresh and hardened properties of Roller-Compacted Concrete(RCC) Pavement, US Army Engineer Division, Europe LABORATORY APO New York 9757-5301

Watne S. Adaska, Roller-compacted concrete (RCC), 2006, PCA R&D Serial NO.2975