

Phân tích phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa theo Superpave và một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm

Lưu Ngọc Lâm^{1*}, Nguyễn Quang Phúc²

¹*Viện Khoa học và Công nghệ Giao thông Vận tải*

²*Trường Đại học Giao thông Vận tải*

Ngày nhận bài 3/9/2019; ngày chuyển phản biện 6/9/2019; ngày nhận phản biện 7/10/2019; ngày chấp nhận đăng 18/10/2019

Tóm tắt:

Superpave là một trong những sản phẩm nổi bật của chương trình nghiên cứu chiến lược đường ô tô (SHRP) trên thế giới được nhiều quốc gia áp dụng. Phương pháp thiết kế bê tông nhựa theo Superpave đã giải quyết vấn đề liên quan đến lựa chọn vật liệu (nhựa đường PG, cát, đá, bột khoáng) phục vụ cho thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa phù hợp với đặc tính dòng xe (lưu lượng xe, tốc độ xe lưu thông), nhằm giảm thiểu các hư hỏng mặt đường như nứt môi, nứt do nhiệt độ thấp, biến dạng vĩnh cửu (hằn lún vệt bánh xe - HLVBX) trong quá trình khai thác. Bài báo phân tích phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa theo Superpave và một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm trong phòng tại Việt Nam.

Từ khóa: bê tông nhựa, Marshall, nhựa đường PG, Superpave, thiết kế hỗn hợp.

Chỉ số phân loại: 2.1

Analysis of Superpave mix design for asphalt mixture and some experimental research results

Ngoc Lam Luu^{1*}, Quang Phuc Nguyen²

¹*Institute of Transport Science and Technology*

²*University of Transport Science and Communications*

Received 3 September 2019; accepted 18 October 2019

Abstract:

Superpave is one of the outstanding products of the Strategic Highway Research Program (SHRP) in the world. The Superpave mix design procedure involves selecting PG bitumen and aggregating materials to design the asphalt mixture, meeting the requirements on the basis of traffic speed and traffic level, to prevent pavement damage such as fatigue cracking, thermal cracking, permanent deformation (rutting) during operation. This paper analyses the Superpave mix design for asphalt mixture and presents some experimental research results in laboratory in Vietnam.

Keywords: asphalt concrete, Marshall, mix design, PG asphalt binder, Superpave.

Classification number: 2.1

Đặt vấn đề

Mặt đường mềm (điển hình là mặt đường bê tông nhựa) được áp dụng rộng rãi trên thế giới hiện nay. Chất lượng bê tông nhựa (BTN) phụ thuộc vào nhiều yếu tố, trong đó phải kể đến thiết kế hỗn hợp BTN. Trên thế giới hiện có nhiều phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN, trong đó có 2 phương pháp đang được áp dụng phổ biến là: phương pháp thiết kế Marshall [1] và phương pháp thiết kế Superpave [2].

Trước khi phương pháp Superpave ra đời, phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Marshall được áp dụng rộng rãi ở Hoa Kỳ và nhiều nước trên thế giới. Hiện nay ở Việt Nam, Marshall vẫn là phương pháp chính được sử dụng để thiết kế hỗn hợp BTN. Mặc dù đã làm đúng theo quy trình thiết kế nhưng kết quả thiết kế ở nhiều dự án vẫn tỏ ra không thích hợp. Mặt đường BTN vẫn bị hư hỏng trong thời hạn tính toán mà nguyên nhân là do khi thí nghiệm xác định thành phần hỗn hợp, cấp phối cốt liệu chưa thể hiện hết các tác động của xe cộ và thời tiết, khí hậu. Điều này chứng tỏ phương pháp Marshall còn nhiều điều chưa hợp lý. Tồn tại chủ yếu của phương pháp Marshall là: việc đầm nén mẫu được đánh giá là chưa mô phỏng hết được quá trình lu lèn thực tế ngoài hiện trường; chưa xem xét để khắc phục các hư hỏng chủ yếu của BTN như: biến dạng vĩnh cửu (hằn lún), nứt do môi và nứt ở nhiệt độ thấp.

Superpave là một trong những sản phẩm nổi bật của chương trình nghiên cứu chiến lược đường ô tô (SHRP). Phương pháp thiết kế BTN theo Superpave đã giải quyết

*Tác giả liên hệ: luungoclam.itst@gmail.com

vấn đề liên quan đến lựa chọn vật liệu (nhựa đường PG, cát, đá, bột khoáng) phục vụ cho thiết kế hỗn hợp BTN phù hợp với đặc tính dòng xe (lưu lượng xe, tốc độ xe lưu thông), nhằm giảm thiểu các hư hỏng mặt đường như nứt môi, nứt do nhiệt độ thấp, biến dạng vĩnh cửu (HLVBX) trong quá trình khai thác. Phương pháp thiết kế Superpave hiện đang được áp dụng phổ biến tại Hoa Kỳ, Canada và nhiều quốc gia phát triển khác.

Bài báo này phân tích phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave và một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm trong phòng tại Việt Nam.

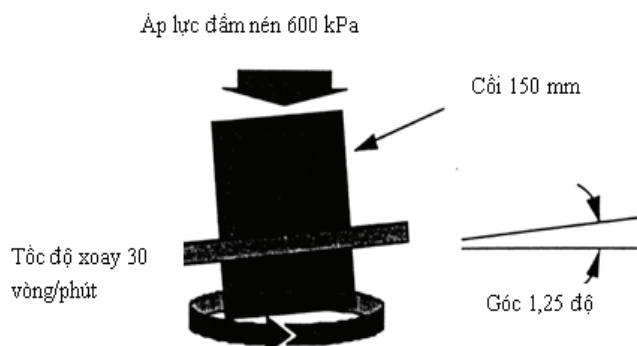
Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu lý thuyết về phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave

Nghiên cứu được thực hiện qua việc nghiên cứu các tài liệu liên quan đến phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave của Hoa Kỳ [2, 3] và theo Marshall của Hoa Kỳ, Việt Nam [1], từ đó phân tích, đánh giá những đặc trưng cơ bản của phương pháp thiết kế BTN theo Superpave.

Thông qua việc nghiên cứu các tài liệu [1-3], nhóm nghiên cứu nhận thấy phương pháp Superpave kế thừa và phát triển một số nội dung của phương pháp thiết kế Marshall (gồm: các chỉ tiêu kỹ thuật với cốt liệu; cấp phối hỗn hợp cốt liệu; các chỉ tiêu về đặc tính thể tích như độ rỗng dư, độ rỗng cốt liệu, độ rỗng lấp đầy nhựa), tuy nhiên so với phương pháp Marshall, phương pháp Superpave có đặc thù (ưu điểm) nổi bật sau:

Quy định về đầm mẫu BTN bằng đầm xoay: thiết bị đầm xoay (SGC) là sản phẩm của SHRP nhằm mô phỏng được quá trình đầm nén BTN như ngoài hiện trường và các điều kiện ảnh hưởng của tải trọng xe chạy. Do bộ phận gia tải tiếp xúc với mẫu, mẫu vừa bị tác dụng của lực thẳng đứng, vừa bị tác động của mô men xoắn nên bị nén chặt lại. Cách đầm này mô phỏng như cách lu lèn BTN tại hiện trường. Minh họa cách đầm xoay mẫu BTN theo Superpave thể hiện ở hình 1.



Hình 1. Minh họa cách đầm mẫu BTN bằng đầm xoay.

Quy định về độ chặt lớn nhất cho phép (tỷ trọng khối yêu cầu) ứng với các số vòng đầm mẫu (công đầm nén) quy định: khác với phương pháp Marshall chỉ quy định đầm nén mẫu với chày đầm lớn nhất (ví dụ 75 chày x 2) và xác định độ chặt (tỷ trọng khối) của mẫu, Superpave quy định phải đầm nén mẫu với 3 mức vòng đầm xoay gọi là: số vòng xoay ban đầu (N_{ini}); thiết kế (N_{des}); lớn nhất (N_{max}) và độ chặt tương ứng của các mức đầm đó phải thỏa mãn yêu cầu quy định. Việc quy định này có ưu điểm là đã xem xét đến đặc tính góc cạnh của cốt liệu cũng như của cấp phối cốt liệu trong hỗn hợp BTN.

Quy định về lựa chọn nhựa đường PG phù hợp với nhiệt độ môi trường và đặc tính dòng xe: đây là điểm khác biệt giữa thiết kế Superpave so với thiết kế Marshall. Với các vùng có nhiệt độ môi trường (thể hiện qua nhiệt độ mặt đường trung bình cao nhất của 7 ngày và nhiệt độ mặt đường thấp nhất của 1 ngày trong chuỗi số liệu quan trắc nhiệt độ ít nhất trong 20 năm) khác nhau thì mức nhựa đường PG lựa chọn sẽ khác nhau.

Sử dụng nhựa đường PG theo quy định tại AASHTO M 320 [4]. Tiêu chuẩn phân cấp nhựa đường PG không phân loại riêng cho nhựa đường thường, nhựa đường cải thiện polime mà quy định chung là việc sử dụng nhựa đường thường hay nhựa đường polime tùy thuộc vào mức nhựa đường PG. Ví dụ, công bố của Hoa Kỳ về các loại nhựa đường phù hợp với mức nhựa PG được thể hiện ở hình 2.

Nhiệt độ thấp, °C	Nhiệt độ cao, °C				
	52	58	64	70	76
-16	52-16	58-16	64-16	70-16	76-16
-22	52-22	58-22	64-22	70-22	76-22
-28	52-28	58-28	64-28	70-28	76-28
-34	52-34	58-34	64-34	70-34	76-34
-40	52-40	58-40	64-40	70-40	76-40

= Dầu thô thông thường
 = Dầu thô chất lượng cao
 = Nhựa đường polime

Hình 2. Các loại nhựa đường phù hợp với phân cấp nhựa đường PG.

Thông qua các phép thử quy định tại [4], Superpave đã xem xét tính chất của nhựa đường ảnh hưởng tới khả năng làm việc của lớp kết cấu mặt đường BTN dưới sự tác động của nhiệt và tải trọng (nứt môi, nứt do nhiệt độ thấp, HLVBX). Ngoài ra Superpave còn quy định việc điều chỉnh

mác nhựa đường PG theo đặc tính dòng xe (theo cấp lưu lượng xe ESAL và tốc độ dòng xe lưu thông) [2].

Quy định về tỷ lệ D/B: Superpave khuyến nghị tỷ số giữa lượng lọt sàng 0,075 mm và hàm lượng nhựa (D/B) cho hỗn hợp cốt liệu mịn là từ 0,6-1,2 và cho hỗn hợp cốt liệu thô là từ 0,8-1,6 khi thiết kế hỗn hợp BTN [2, 3]. Tỷ lệ D/B hợp lý là cơ sở để tạo nên hỗn hợp vữa nhựa phù hợp, tạo điều kiện để hỗn hợp BTN vừa có khả năng kháng môi, kháng HLBVX. Nếu ít hạt mịn sẽ dẫn tới thừa nhựa và BTN có xu thế bị HLBVX, còn ngược lại dẫn đến dễ bị môi.

Quy định về cường độ chịu kéo gián tiếp TSR: dưới tác động của nước, mẫu BTN bão hòa nước sẽ suy giảm cường độ, nếu hệ số cường độ chịu kéo gián tiếp - TSR (tỷ số cường độ giữa mẫu ướt và mẫu khô) nhỏ hơn quy định (thường là 0.8) thì mẫu BTN thiết kế có khả năng nhạy ẩm lớn, cần phải xem xét cải thiện, hoặc bổ sung phụ gia tăng dính bám, hoặc phải thay nguồn cốt liệu [2, 3].

Quy định về thiết kế hỗn hợp BTN theo đặc tính cơ học (cường độ): việc phân tích các chỉ tiêu cơ học liên quan đến hiệu suất khai thác của hỗn hợp BTN (khả năng chống nứt môi, nứt do nhiệt độ thấp, biến dạng vĩnh cửu HLBVX) luôn được quan tâm khi thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave. Các chỉ tiêu cơ học phải đảm bảo để thí nghiệm, phản ánh được đặc trưng khai thác của BTN. Báo cáo của NCHRP 492 [5] đã tổng kết những chỉ tiêu cơ học cần đánh giá liên quan đến chất lượng khai thác của mặt đường BTN. Hiện nay đa số các bang ở Mỹ và Canada đều thiết kế hỗn hợp BTN theo đặc tính thể tích, sau đó đánh giá độ nhạy ẩm và đánh giá khả năng chống HLBVX, chống nứt [5].

Nhóm chống HLBVX ở nhiệt độ cao chủ yếu có 2 loại thí nghiệm là Hamburg Wheel Tracking và APA. Thí nghiệm Hamburg Wheel Tracking được sử dụng rộng rãi hơn ở Mỹ, Canada và nhiều nước trên thế giới, Việt Nam cũng đã quy định trong tiêu chuẩn thiết kế hỗn hợp BTN. Nhóm thí nghiệm chống nứt phổ biến sử dụng là: thí nghiệm uốn dầm 4 điểm; thí nghiệm Overlay test (OT); thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt (SCB); thí nghiệm IDEAL Cracking Test và thí nghiệm kéo nén (DCT).

Nghiên cứu thực nghiệm thiết kế BTN theo Superpave

Mục đích của việc triển khai nghiên cứu thực nghiệm này nhằm đánh giá tính phù hợp của vật liệu (đá dăm, cát, bột khoáng, nhựa đường); của hỗn hợp BTN khi áp dụng phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave, có so

với phương pháp Marshall để đưa ra các khuyến nghị liên quan.

Kế hoạch thực nghiệm: nhóm nghiên cứu đã tiến hành phân tích, lựa chọn các thông số đầu vào: cấp phối, loại nhựa đường, loại vật liệu thử nghiệm và thiết kế quy hoạch thực nghiệm để xác định số mẫu/thí nghiệm phù hợp, đảm bảo kết quả có độ chụm, độ tin cậy cao. Về cấp phối: lựa chọn 2 kích cỡ danh định lớn nhất (19 và 12,5 mm). Về nhựa đường PG phù hợp với lưu lượng xe lựa chọn: lựa chọn các mức nhựa PG64, PG76, PG82 theo tiêu chuẩn phân loại nhựa đường PG. Về loại vật liệu thử nghiệm: lựa chọn 3 nguồn gốc cốt liệu khác nhau (cốt liệu đá vôi, đá bazan khu vực phía Bắc và đá andesit dính bám kém khu vực Nam Trung Bộ). Về mức lưu lượng xe thiết kế: lựa chọn 2 mức lưu lượng xe thiết kế là mức lưu lượng nhẹ (0,3-3) triệu ESAL và mức lưu lượng nặng >30 triệu ESAL.

Phương pháp thực nghiệm: việc triển khai thực nghiệm thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave được tiến hành theo các bước quy định tại [2, 3]. Việc thiết kế hỗn hợp BTN theo Marshall được tiến hành theo các bước quy định tại [1].

Kết quả và bàn luận

Kết quả thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave

Kết quả nghiên cứu thực nghiệm trong phòng thiết kế hỗn hợp BTN12,5 và BTN19 theo Superpave được đưa ra trong bảng 1, 2, 3.

Bảng 1. Thành phần hạt của cấp phối thí nghiệm.

Cỡ sàng (mm)	Phần trăm lọt sàng BTN12,5 (%)					Phần trăm lọt sàng BTN19 (%)				
	Cấp phối vừa	Cấp phối thô	Cấp phối mịn	Yêu cầu kỹ thuật		Cấp phối vừa	Cấp phối thô	Cấp phối mịn	Yêu cầu kỹ thuật	
25,0						100	100	100	100	100
19,0	100	100	100	100	100	95	92	97	90	100
12,5	95	92	97	90	100	84	78	89		90
9,5	85	80	89		90	72	63	80		
4,75	60	50	68			47	40	55		
2,36	39	30	48	28	58	30	25	35	23	49
1,18	24	21	28			20	17	24		
0,6	17	15	19			14	12	17		
0,3	12	10	14			10	8	12		
0,15	8	7	10			7	6	9		
0,075	6	5	7	2	10	6	5	7	2	8

Bảng 2. Tổng hợp kết quả thiết kế hỗn hợp BTN12,5 theo Superpave.

TT	Các chỉ tiêu thiết kế hỗn hợp BTN Superpave	Loại BTN12,5									Yêu cầu kỹ thuật
		PG64 (cấp phối vừa)			PG76 (cấp phối thô)			PG82 (cấp phối thô)			
		Đá vôi	Bazan	Andesite	Đá vôi	Bazan	Andesite	Đá vôi	Bazan	Andesite	
1	Hàm lượng nhựa, %	5,10	5,15	5,20	5,10	5,15	5,10	5,10	5,15	5,20	
2	Độ rỗng dư, %	3,98	3,95	4,04	4,06	4,03	4	3,99	4,05	4,04	4
3	Độ rỗng cốt liệu, %	15,1	14,65	15,72	15	14,22	15,4	14,86	14,25	15,44	≥14
4	Độ rỗng lấp đầy nhựa, %	73,9	73,15	74,33	72,91	71,3	74,02	73,18	71,18	73,84	65-75
5	Tỷ số D/B	1,07	1,13	1,01	1,09	1,19	1,04	1,10	1,19	1,04	0,6-1,2
6	Độ chặt ứng với số vòng xoay ban đầu, %	85,21	85,3	85,79	85,09	84,9	85,89	84,85	84,9	86	≤89
7	Độ chặt ứng với số vòng xoay lớn nhất, %	97,41	97,5	96,93	97,28	97,19	97,33	97,12	96,98	97,08	≤98
8	Cường độ ép chèn khô, kPa	866	920	780	1120	1240	1070	1228	1280	1114	690-1380
9	Hệ số cường độ ép chèn	0,90	0,88	0,84	0,94	0,93	0,88	0,96	0,97	0,90	≥0,8
10	Độ sâu HLBX sau 15000 lần với PG64, 40000 lần với PG76, PG82, mm	2,25	2,45	2,72	3,59	3,16	1,83	1,76	1,46	1,71	≤12,5
11	Số chu kỳ phá hoại môi, tần số 10Hz, 300μe	550460	600520	247350	650760	812530	450230	1010250	1396520	511980	

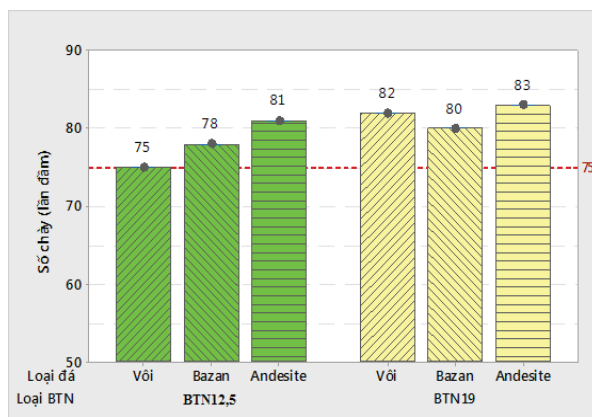
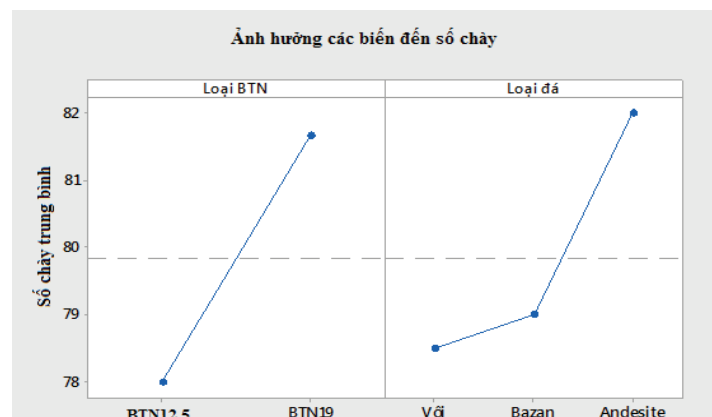
Bảng 3. Tổng hợp kết quả thiết kế hỗn hợp BTN19 theo Superpave

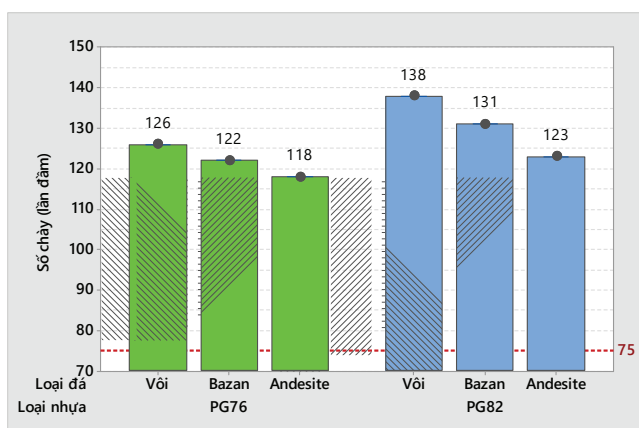
TT	Các chỉ tiêu thiết kế hỗn hợp BTN Superpave	BTN19-PG64 (cấp phối vừa)			Yêu cầu kỹ thuật
		Đá vôi	Bazan	Andesite	
1	Hàm lượng nhựa, %	4,90	4,95	4,80	
2	Độ rỗng dư, %	4,02	4,04	3,98	4
3	Độ rỗng cốt liệu, %	14,31	14,2	14,77	≥14
4	Độ rỗng lấp đầy nhựa, %	71,88	71,18	73,08	65-75
5	Tỷ số D/B	1,17	1,20	1,10	0,6-1,2
6	Độ chặt ứng với số vòng xoay ban đầu, %	85,53	85,52	86,02	≤89
7	Độ chặt ứng với số vòng xoay lớn nhất, %	96,81	97,38	97,14	≤98
8	Cường độ ép chèn khô, kPa	952	1010	770	690-1380
9	Hệ số cường độ ép chèn	0,87	0,85	0,83	≥0,8
10	Độ sâu HLBX sau 15000 lần, mm	3,24	3,97	3,15	≤12,5
11	Số chu kỳ phá hoại môi, tần số 10Hz, 300μc	451027	474830	157990	

Nhóm nghiên cứu nhận thấy: hỗn hợp BTN19 và BTN12,5 (với 3 mức nhựa đường PG là PG64, PG76, PG82 và 3 nguồn cốt liệu khác nhau là đá vôi, đá bazan khu vực phía Bắc, đá andesit đỉnh tám kém khu vực Nam Trung Bộ của Việt Nam) có các chỉ tiêu cơ lý thỏa mãn theo quy định của Superpave [2].

Kết quả phân tích BTN theo Superpave so với BTN theo Marshall

Trên cơ sở kết quả nghiên cứu thực nghiệm thiết kế BTN theo Superpave và theo Marshall đối chứng, nhóm nghiên cứu tiến hành phân tích thống kê với phần mềm Minitab 18, sử dụng phân tích phương sai ANOVA để phân tích, đánh giá các kết quả thí nghiệm. Kết quả phân tích thống kê công đầm nén với mức lưu lượng nhẹ (0,3-3 triệu ESAL) được đưa ra ở hình 3A và hình 3B. Kết quả phân tích thống kê

**Hình 3A. Công đầm nén các loại BTN (mức lưu lượng nhẹ).****Hình 3B. Ảnh hưởng các biến đến công đầm nén (mức lưu lượng nhẹ).**



Hình 4A. Công đầm nén BTN12,5 (mức lưu lượng nặng).

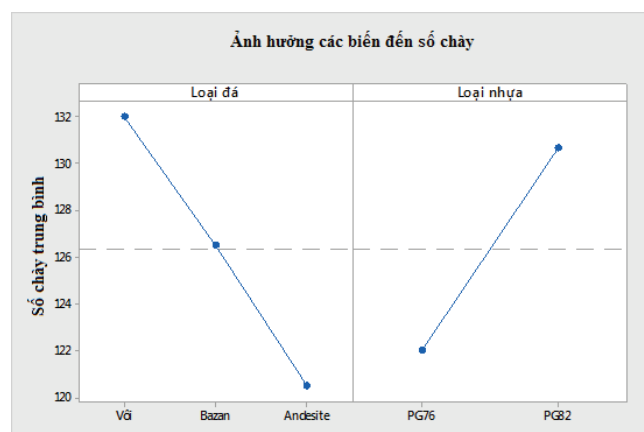
công đầm nén với mức lưu lượng nặng (>30 triệu ESAL) được đưa ra ở hình 4A và hình 4B.

Trên cơ sở phân tích thống kê công đầm nén, nhóm nghiên cứu đưa ra một số đánh giá như sau: công đầm nén Marshall (số chày đầm) để hỗn hợp BTN đạt độ rỗng dư thiết kế 4% như thiết kế Superpave của tất cả các loại đá với các loại nhựa đều lớn hơn so với công đầm nén 75 chày quy định theo Marshall. Loại BTN ảnh hưởng đến công đầm nén, BTN19 thô hơn nên đòi hỏi số chày đầm phải nhiều hơn BTN12,5. Loại nhựa có ảnh hưởng đến công đầm nén, nhựa PG82 có độ quán tính cao hơn nhựa PG76 nên công đầm nén cũng đòi hỏi cao hơn. Loại đá cũng có ảnh hưởng đến công đầm nén theo thứ tự giảm dần công đầm nén đối với các loại đá: vôi, Bazan, Andesite.

Kết luận và kiến nghị

Thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave có nhiều nội dung được kế thừa từ thiết kế Marshall (các chỉ tiêu kỹ thuật với cốt liệu; cấp phối hỗn hợp cốt liệu; các chỉ tiêu về đặc tính thể tích như độ rỗng dư, độ rỗng cốt liệu, độ rỗng lấp đầy nhựa). Tuy nhiên có những điểm đặc trưng tỏ ra có ưu điểm hơn so với thiết kế Marshall, thể hiện ở các nội dung: sử dụng nhựa đường PG phù hợp với nhiệt độ môi trường của vùng dự án và hiệu chỉnh mức nhựa PG theo đặc tính dòng xe; sử dụng đầm xoay tạo mẫu BTN; quy định độ chặt yêu cầu ứng với các vòng xoay Nini, Ndes, Nmax; tỷ số D/B; hệ số cường độ ép chày TSR; các chỉ tiêu cơ học liên quan đến hiệu suất khai thác của hỗn hợp BTN (như khả năng chống nứt môi, nứt do nhiệt độ thấp, HLBX).

Thông qua kết quả nghiên cứu thực nghiệm trong phòng,



Hình 4B. Ảnh hưởng các biến đến công đầm nén (mức lưu lượng nặng).

nhóm nghiên cứu đã nắm vững được công nghệ thiết kế BTN theo phương pháp Superpave (yêu cầu vật liệu, cấp phối, phương pháp thiết kế hỗn hợp, các chỉ tiêu đánh giá chất lượng BTN...) và nhận thấy: công đầm nén của phương pháp Marshall cố định 75 chày/mặt là không đủ để BTN đảm bảo độ chặt, chịu tác dụng của lưu lượng xe. Công đầm nén của phương pháp Superpave cao hơn phương pháp Marshall. Phương pháp Superpave đã xét đến ảnh hưởng của lưu lượng xe chạy đến công đầm nén, nhằm đảm bảo cho hỗn hợp BTN có đủ khả năng chịu lực, chống lại biến dạng không hồi phục.

Với những kết quả đã đạt được, chúng tôi kiến nghị Việt Nam cần sớm chuyển đổi việc áp dụng phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN từ thiết kế theo Marshall sang thiết kế theo Superpave và cần tuân theo nguyên tắc thiết kế cân bằng BMD (Balanced Mix Design) giữa các đặc trưng thể tích - độ nhạy âm, khả năng chống HLBX và khả năng chống nứt... góp phần phát triển cơ sở hạ tầng, đáp ứng yêu cầu hội nhập.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] TCVN 8820:2011, *Hỗn hợp bê tông nhựa nóng - Thiết kế theo phương pháp Marshall*.
- [2] AASHTO M 323-2015, *Superpave Volumetric Mix Design*.
- [3] AASHTO R 35-2015, *Practice for Superpave Volumetric Mix Design for Asphalt Mixture*.
- [4] AASHTO M 320-2015, *Performance Grade Asphalt Binder*.
- [5] NCHRP Report 492 (2016), *Performance Specifications for Asphalt Mixtures*, Transportation Research Board, Washington, D.C.