

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG SỐ HOÁ VÀ MÔ PHỎNG TRONG LỰA CHỌN XÂY DỰNG LOẠI MẶT ĐƯỜNG Ở CÁC ĐÔ THỊ MIỀN NÚI TỈNH CAO BẰNG THÍCH ỨNG VỚI ĐIỀU KIỆN NGẬP LỤT

Research on the Application of Digitalization and Simulation in Selecting Type of Pavement for Mountainous Urban Areas in Cao Bang Province Adapting to Flooding Conditions

GS. TS. Phạm Huy Khang¹, PGS.TS. Nguyễn Trọng Hiệp², ThS. Phạm Quang Thông³



Tóm tắt: Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng ngập lụt cực đoan do biến đổi khí hậu đến chất lượng khai thác và tuổi thọ kết cấu mặt đường tại đô thị Cao Bằng và các đô thị lân cận. Nghiên cứu ứng dụng công nghệ số hóa và mô phỏng số, bao gồm mô hình thông tin công trình (Building Information Modeling – BIM) và phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method – FEM), kết hợp với phương pháp thiết kế cơ học – thực nghiệm (Mechanistic–Empirical – M-E). Thông qua mô phỏng, nghiên cứu đánh giá sự biến thiên cường độ nền mặt đường trong điều kiện bão hòa nước và xác định cơ chế suy giảm khả năng chịu tải của các loại kết cấu mặt đường phổ biến. Trên cơ sở phân tích ứng xử cơ học của vật liệu, nghiên cứu đề xuất chuyển đổi từ kết cấu mặt đường bê tông nhựa truyền thống sang kết cấu mặt đường bê tông xi măng kết hợp với lớp móng cấp phối đá dăm gia cố xi măng (Cement Treated Base – CTB). Kết quả cho thấy kết cấu mặt đường BTXM–CTB có khả năng kháng nước và duy trì cường độ cao hơn đáng kể trong điều kiện ngập lụt kéo dài, phù hợp với điều kiện địa hình Karst và chế độ thủy văn đặc thù của khu vực Cao Bằng. Nghiên cứu góp phần đề xuất định hướng lựa chọn kết cấu mặt đường bền vững cho hạ tầng giao thông đô thị miền núi trong bối cảnh biến đổi khí hậu.

Từ khóa: Số hóa & mô phỏng, mặt đường bê tông xi măng, móng gia cố xi măng (CTB), mô hình Cơ học - Thực nghiệm (M-E), thích ứng ngập lụt, Cao Bằng.

Abstract: This study investigates the impact of extreme flooding caused by climate change on the operational performance and service life of pavement structures in Cao Bang City and surrounding mountainous urban areas. The research integrates digitalization technologies and numerical simulation methods, including Building Information Modeling (BIM) and Finite Element Method (FEM), combined with the Mechanistic–Empirical (M-E) pavement design approach. The simulation framework evaluates the variation of pavement subgrade strength under water-saturated conditions and identifies the failure mechanisms of commonly used pavement structures. Based on the analysis of the mechanical behavior of pavement materials, the study proposes a structural transition from conventional asphalt concrete pavements to cement concrete pavements combined with a cement-treated base (CTB). The results indicate that the cement concrete pavements combined with a cement-treated base structure exhibits significantly higher resistance to water damage and maintains structural capacity under prolonged flooding conditions. This solution is particularly suitable for the

¹ Trường Đại học Giao thông, Chủ tịch Hội đồng Giáo sư ngành Giao thông

^{2,3} Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: phkhangdr@utc.edu.vn

Karst basin topography and hydrological characteristics of Cao Bang Province. The findings provide a scientific basis for selecting sustainable pavement structures for mountainous urban transport infrastructure under climate change conditions.

Keywords: Digitalization and simulation, cement concrete pavement, cement-treated base (CTB), mechanistic-empirical (M-E) model, flood adaptation, Cao Bang.

Nhận bài ngày 28/01/2026, chỉnh sửa ngày 25/02/2026, chấp nhận đăng ngày 30/3/2026.

I. GIỚI THIỆU

1.1. Giới thiệu về đô thị Cao Bằng, hệ thống giao thông và tình hình mưa lũ

Các đô thị trực thuộc tỉnh Cao Bằng nằm trong vùng địa lý có cấu trúc đặc thù, chủ yếu là địa hình đồi núi dốc xen kẽ các thung lũng và hệ thống núi đá vôi (Karst). Các phường trung tâm của Thành phố Cao Bằng (cũ) đóng vai trò là lõi trung tâm, nằm tại vùng lòng chảo nơi hợp lưu của sông Bằng Giang và sông Hiến. Vị trí địa mạo này vô hình trung tạo ra một "phễu hứng nước" khổng lồ.

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu diễn biến khốc liệt, tần suất và cường độ của các trận mưa lớn tại khu vực phía Bắc Việt Nam đã vượt qua mọi kịch bản dự báo truyền thống [1]. Dữ liệu thủy văn giai đoạn 2024 - 2025 ghi nhận những trận lũ "kỷ lục của kỷ lục". Điển hình, đỉnh lũ trên sông Bằng Giang năm 2025 đạt mức 185,79m, vượt mức Báo động III tới 3,29m, cao hơn cả đỉnh lũ lịch sử năm [2].

Đặc trưng ngập lụt tại Cao Bằng không chỉ nằm ở biên độ nước dâng cực nhanh (từ 3 đến 6 tiếng do độ dốc lưu vực lớn) mà còn ở thời gian nước rút rất chậm. Tại các vùng có địa hình Karst đặc thù như Quảng Hòa, Trùng Khánh, Hạ Lang, hiện tượng "ngập úng thung lũng kín" xảy ra khi nước đổ dồn vào các lòng chảo nhưng lối thoát duy nhất qua các hang ngầm bị tắc nghẽn bởi sa bồi, rác thải và bùn đất. Kỷ lục ghi nhận có những khu dân cư bị ngâm trong nước lũ bão hòa suốt 3 tháng liên tục. Sự ngâm nước kéo dài này đặt ra một thách thức phi truyền thống đối với các kỹ sư cầu đường: Hạ tầng giao thông không chỉ phải chịu tải trọng động của phương tiện mà còn phải chống chịu áp lực thủy tĩnh, thủy động và sự suy giảm cơ lý vật liệu ở trạng thái bão hòa toàn phần.

1.2. Các kết cấu mặt đường và những vấn đề đặt ra do tình trạng ngập lụt

Hiện nay, mạng lưới giao thông tại các đô thị của tỉnh Cao Bằng chủ yếu sử dụng hai loại kết cấu mặt đường truyền thống, trong đó Bê tông nhựa (Asphalt Concrete - AC) chiếm đa số tại các trục chính đô thị như đường phía Nam (đường 58m), phố Kim Đồng, Vườn Cam. Bê tông nhựa vốn được ưa chuộng nhờ tính êm thuận, giảm tiếng ồn và thi công nhanh. Tuy nhiên, dưới lăng kính địa kỹ thuật và vật liệu học, đây là loại kết cấu "nhạy cảm cực độ" với độ ẩm và nước [3].

Khi xảy ra ngập lụt, toàn bộ cấu trúc nền mặt đường rơi vào trạng thái bão hòa. Nước len lỏi vào các lỗ rỗng của lớp bê tông

nhựa và các lớp móng (cấp phối đá dăm). Dưới tác dụng của tải trọng trục xe (đặc biệt là xe tải nặng di chuyển qua các cửa khẩu như Trà Lĩnh, Tà Lùng), một loạt các cơ chế phá hoại cơ học - thủy lực được kích hoạt:

- **Hiện tượng bong bật (Stripping):** Nước phá vỡ liên kết hóa lý giữa màng nhựa đường và bề mặt cốt liệu đá. Nhựa đường bị bóc tách, làm bề mặt đường mất đi lớp keo liên kết, dẫn đến sự rời rạc của cốt liệu.

- **Áp lực nước lỗ rỗng và hiện tượng phun bùn (Pumping):** Khi bánh xe tác dụng lên mặt đường ướt, nước trong các khe nứt và lỗ rỗng bị nén lại sinh ra áp lực thủy động học rất lớn. Khi bánh xe đi qua, áp lực này được giải phóng đột ngột, tạo ra lực hút kéo các hạt mịn (bùn, sét) từ lớp móng và nền đường phụt lên bề mặt. Hệ quả là lớp móng bị rỗng hàm ếch, làm mất khả năng chống đỡ, gây sụt lún và vỡ nát lớp mặt nhựa phía trên.

- **Sự suy giảm mô-đun đàn hồi:** Độ ẩm nền đường tăng 1-2% so với độ ẩm tối ưu có thể làm suy giảm 20-30% sức chịu tải (CBR). Ở trạng thái bão hòa do ngập lụt, cường độ nền đường gần như triệt tiêu, mô-đun đàn hồi giảm mạnh, đưa kết cấu vào "vùng phá hủy" [4].

Từ những vấn đề cấp bách trên, việc bảo lưu quan điểm thiết kế mặt đường truyền thống tại các vùng "rốn lũ" ở Cao Bằng không còn khả thi về mặt kinh tế lẫn kỹ thuật. Cần thiết lập một hệ phương pháp luận mới dựa trên số hóa và mô phỏng để đánh giá, lựa chọn cấu trúc mặt đường thích ứng thiên tai.

II. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khái niệm về số hóa và mô phỏng số

Trong kỹ thuật hạ tầng giao thông, mô phỏng số (Numerical Simulation) là việc sử dụng các thuật toán toán học phức tạp và năng lực điện toán để tái hiện, dự báo trạng thái ứng suất, biến dạng, suy giảm cường độ và cơ chế phá hủy của kết cấu mặt đường dưới tác động đồng thời của tải trọng xe (động lực học) và các yếu tố môi trường (nhiệt độ, biên độ ngập lụt, độ ẩm bão hòa). Số hóa (Digitalization) là quá trình chuyển đổi các thông số vật lý thực địa (địa hình, thủy văn, địa chất, lưu lượng) thành cơ sở dữ liệu số trên không gian mạng để nạp vào các phần mềm tính toán.

2.2. Các công cụ thiết kế và mô phỏng số

Hệ sinh thái công cụ số trong thiết kế hạ tầng hiện nay được chia thành ba phân hệ cốt lõi:

(1) **Mô phỏng thiết kế và hạ tầng (BIM & Infrastructure):** Mô hình Thông tin Công trình (BIM) kết hợp Hệ thống Thông tin Địa lý (GIS) đóng vai trò số hóa hình học và không gian. Các phần mềm tiêu biểu bao gồm Autodesk Civil 3D, Bentley OpenRoads Designer và Autodesk InfraWorks. Các công cụ này cho phép kỹ sư xây dựng mô hình 3D của tuyến đường, phân tích lưu vực thủy văn, lập bản đồ các vùng trũng ngập (thông qua dữ liệu Point Cloud từ UAV), và mô phỏng các kịch bản cao độ nước lũ. Sự tích hợp BIM-GIS giúp tối ưu hóa cao độ thiết kế nền đường, đảm bảo các tuyến giao thông huyết mạch được đặt trên đỉnh lũ thiết kế [5].

(2) **Mô phỏng phân tích kết cấu & địa kỹ thuật (FEA - Finite Element Analysis):** Đây là công cụ thiết yếu để đánh giá độ bền, tối ưu hóa thiết kế và kiểm tra an toàn công trình, đặc biệt là trong

điều kiện tải trọng phức tạp. Các phần mềm sử dụng Phương pháp Phần tử Hữu hạn (FEM) như Plaxis 2D/3D, Abaqus, và ANSYS cho phép chia nhỏ kết cấu mặt đường thành hàng vạn phần tử lưới để giải hệ phương trình vi phân. FEM cực kỳ mạnh mẽ trong việc phân tích:

- Sự thay đổi tính chất vật liệu theo quy luật phi tuyến khi độ ẩm gia tăng.
- Áp lực nước lỗ rỗng thặng dư sinh ra trong các lớp móng khi chịu tải trọng động của phương tiện lúc mặt đường ngập nước.
- Tính toán hệ số ổn định (Factor of Safety - FoS) của mái dốc nền đường khi đất bị bão hòa.

(3) Mô phỏng giao thông (Traffic simulation): Được thực hiện qua các công cụ như PTV Vissim, tích hợp với mô hình 3D để đánh giá năng lực thông hành. Công cụ này cho phép mô phỏng dòng xe chạy trong điều kiện ngập cục bộ, đánh giá mức độ ùn tắc, và suy giảm tốc độ di chuyển an toàn khi mặt đường xảy ra hiện tượng trượt thủy lực do màng nước bão hòa.

2.3. Các mô hình phổ biến trong thiết kế kết cấu mặt đường

Quá trình tính toán kết cấu mặt đường đã trải qua nhiều thế hệ mô hình:

- Mô hình Lý thuyết đàn hồi đa lớp (Layered Elastic Theory - LET): Giả thiết các lớp vật liệu là đàn hồi vô hạn theo phương ngang. Mô hình này đơn giản nhưng bộc lộ hạn chế khi không mô phỏng được hành vi phi tuyến của đất nền dưới trạng thái bão hòa nước.

- **Phương pháp Phần tử hữu hạn (FEM):** Ưu việt trong việc xử lý các bài toán đa vật lý (nhiệt - ẩm - lực). FEM cho phép kỹ sư quan sát trực quan sự tập trung ứng suất tại đáy lớp bê tông nhựa khi nền đường bị ngập.

- Mô hình Cơ học - Thực nghiệm (Mechanistic-Empirical - M-E): Đây là mô hình tiên tiến nhất, kết hợp hoàn hảo giữa phương trình cơ học thuần túy và dữ liệu hiệu chỉnh thực tế, đặc biệt phù hợp cho vùng chịu biến đổi khí hậu khắc nghiệt như Cao Bằng [6].

2.4. Mô hình cơ học - thực nghiệm (m-e) và ứng dụng

Mô hình M-E giải quyết các bài toán thiết kế và đánh giá tuổi thọ mặt đường thông qua hai giai đoạn liên kết chặt chẽ: (1) Giai đoạn Cơ học (Mechanistic): Phần mềm tính toán các ứng xử cơ lý (ứng suất, biến dạng, độ võng) của mặt đường dựa trên yếu tố đầu vào là tải trọng thực tế, mô-đun đàn hồi của vật liệu và điều kiện môi trường. Khi nước lũ xâm nhập, mô-đun đàn hồi (E) của lớp móng và nền đất suy giảm mạnh. Mô hình cơ học sẽ lập tức tính toán sự gia tăng biến dạng kéo tại đáy lớp mặt và biến dạng nén tại đỉnh nền đường; (2) Giai đoạn Thực nghiệm (Empirical): Biến dạng cơ học chưa phản ánh trực tiếp "đường sẽ hỏng khi nào". Do đó, M-E sử dụng các Hàm liên kết (Transfer Functions) để chuyển đổi giá trị biến dạng thành các chỉ số hư hỏng hữu hình (diện tích nứt mỗi chiều sâu vết hằn lún). Hàm thực nghiệm có khả năng dự báo tuổi thọ thiết kế suy giảm theo hàm mũ đối với độ ẩm.

$$L = L_{\max} \cdot e^{-k(w-w_{\text{opt}})}$$

Trong đó:

L: Tuổi thọ còn lại dự báo của kết cấu mặt đường (Năm).

$L_{\max}$: Tuổi thọ thiết kế tối đa trong điều kiện độ ẩm lý tưởng (Năm).

k: Hệ số nhạy cảm suy giảm cơ lý của vật liệu (phụ thuộc vào loại đá, nhựa, xi măng).

w: Độ ẩm thực tế của nền đường do nước ngập (%).

w_{opt} : Độ ẩm đầm nén tối ưu thiết kế (%).

Thông qua các mô hình M-E và FEA, kỹ sư có thể thiết lập các kịch bản mô phỏng:

- **Xác định bề dày tối ưu:** Tính toán chiều dày lớp Bê tông nhựa hoặc Bê tông xi măng đủ sức kháng lại lực đẩy nổi và ứng suất uốn khi nền mất đi 80% khả năng chịu tải.

- **Dự báo hư hỏng:** Mô hình chỉ ra rằng, đối với kết cấu nhựa thông thường, khi độ ẩm nền tăng vượt mức tối ưu chỉ 2%, tuổi thọ kết cấu giảm từ 15 năm xuống còn 7-8 năm. Trong trạng thái bão hòa 100% (ngập từ 3-7 ngày), tuổi thọ còn lại rơi thẳng đứng xuống dưới 1 năm, dẫn đến phá hủy toàn diện.

2.5. Sự kết hợp các công cụ và dữ liệu yêu cầu

Để đối phó với địa hình Karst ngập kéo dài, mô hình M-E kết hợp với BIM-GIS là sự lựa chọn bắt buộc. M-E cho phép tùy biến đặc tính vật liệu theo từng đợt lũ, đánh giá sự tích lũy tổn thương kết cấu sau mỗi chu kỳ ngập - khô, trong khi mô hình BIM-GIS cho phép khoanh vùng khu vực có nguy cơ ngập lụt, đồng thời kiểm soát thông tin công trình đường trong suốt vòng đời khai thác.

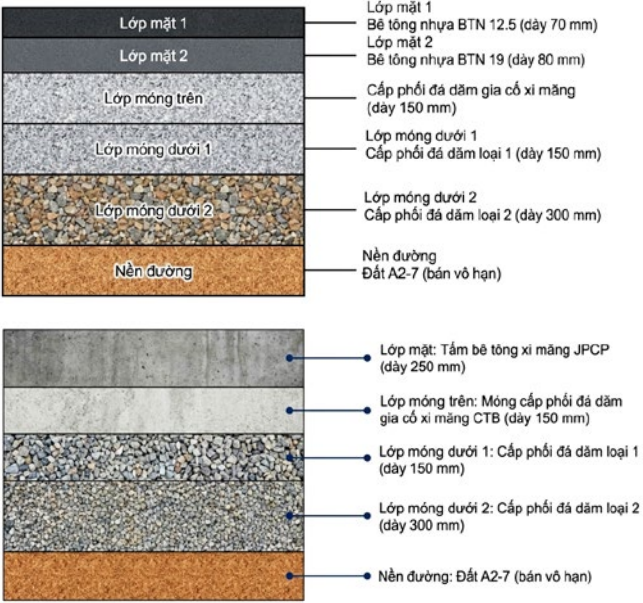
Sự chính xác của mô hình phụ thuộc vào cơ sở dữ liệu của công trình từ giai đoạn thiết kế, xây dựng đến vận hành - khai thác, cụ thể:

1. Dữ liệu địa hình, thủy văn: Cao độ đỉnh lũ lịch sử, thời gian ngập nước của từng phân khu, bản đồ ngập lụt theo TCVN 14288:2024 [7].
2. Dữ liệu kết cấu & vật liệu: Số hóa chiều dày các lớp, mô-đun đàn hồi, độ ẩm tối ưu và hệ số thấm của các loại mặt đường hiện hữu.
3. Dữ liệu giao thông: Lưu lượng xe tải trọng lớn, xe container khai thác khoáng sản và thương mại biên mậu qua các hệ thống cân tải trọng WIM (Weigh-In-Motion).
4. Dữ liệu theo dõi quan trắc thực nghiệm: Lắp đặt cảm biến đo độ ẩm, áp lực lỗ rỗng tại các vùng "rốn lũ" để liên tục hiệu chỉnh hệ số k trong các phương trình dự báo của mô hình M-E.

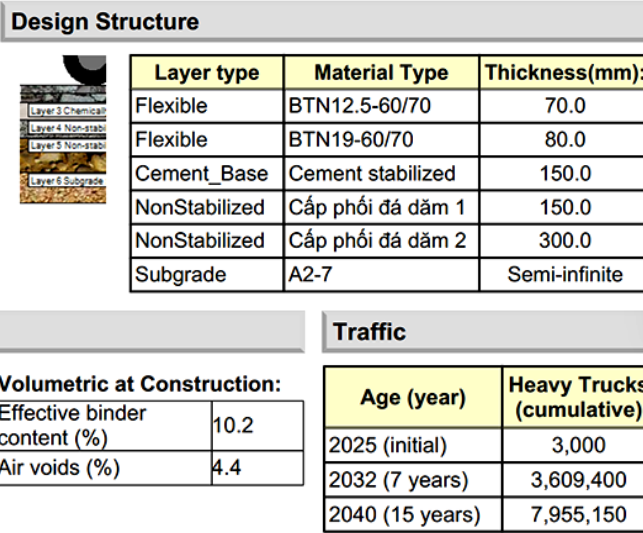
III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ví dụ thiết kế và đánh giá tuổi thọ các loại kết cấu mặt đường trên địa bàn tỉnh Cao Bằng

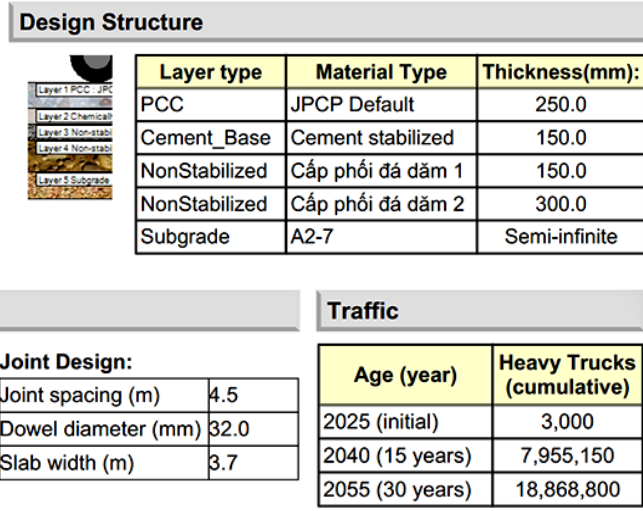
Để kiểm chứng khả năng dự báo hư hỏng và đánh giá tuổi thọ kết cấu mặt đường của mô hình cơ học thực nghiệm (M-E), phần mềm MEPDG của AASHTO được sử dụng để thiết kế và đánh giá tuổi thọ của 2 loại kết cấu mặt đường được áp dụng phổ biến là bê tông nhựa (mặt đường mềm) và bê tông xi măng (mặt đường cứng) với dữ liệu thời tiết thuộc khu vực tỉnh Cao Bằng. Các thông số kết cấu:



Hình 1. Kết cấu mặt đường BTN và BTXM đánh giá



Hình 2. Thông số thiết kế kết cấu mặt đường BTN trong MEPDG



Hình 3. Thông số thiết kế kết cấu mặt đường BTXM trong MEPDG

Cả hai loại kết cấu được kiểm tra đánh giá được giả định cùng chịu điều kiện môi trường và giao thông như nhau. Kết cấu mặt đường BTN được thiết kế với tuổi thọ phục vụ là 15 năm, tổng lưu lượng xe tải nặng tích lũy là 7.955.150 lượt. Mặt đường BTXM được thiết kế với tuổi thọ phục vụ lên tới 30 năm, với tổng lưu lượng xe tải nặng tích lũy là 18.868.800 lượt. Kết quả mô phỏng trên phần mềm cơ học thực nghiệm M-E đối với kết cấu mặt đường mềm BTN và mặt đường cứng BTXM được thể hiện trong các Hình 3, Hình 4 tương ứng.

Distress Prediction Summary

Distress Type	Distress @ Specified Reliability		Reliability (%)		Criterion Satisfied?
	Target	Predicted	Target	Achieved	
Terminal IRI (m/km)	2.70	2.51	90.00	95.06	Pass
Permanent deformation - total pavement (mm)	25.00	28.62	90.00	64.85	Fail
AC bottom-up fatigue cracking (percent)	25.00	1.45	90.00	100.00	Pass
Total Cracking (Reflective + Alligator) (percent)	15	4.48	-	-	Pass
AC thermal cracking (m/km)	189.40	5.15	90.00	100.00	Pass
AC top-down fatigue cracking (m/km)	378.80	53.62	90.00	100.00	Pass
Permanent deformation - AC only (mm)	12.50	17.03	90.00	49.27	Fail
Chemically stabilized layer - fatigue fracture (percent)	25.00	0.31	-	-	-

Hình 4. Kết quả mô phỏng các chỉ tiêu đánh giá chính của kết cấu mặt đường BTN

Distress Prediction Summary

Distress Type	Distress @ Specified Reliability		Reliability (%)		Criterion Satisfied?
	Target	Predicted	Target	Achieved	
Terminal IRI (m/km)	2.70	2.01	90.00	99.60	Pass
Mean joint faulting (mm)	3.00	2.13	90.00	99.09	Pass
JPCP transverse cracking (percent slabs)	15.00	5.41	90.00	99.99	Pass

Hình 5. Kết quả mô phỏng các chỉ tiêu chính của kết cấu mặt đường BTXM

- Đối với kết cấu mặt đường BTN: Mặc dù được thiết kế cho tuổi thọ 15 năm, nhưng kết cấu này đã không đạt yêu cầu (Fail) ở các tiêu chí về biến dạng vĩnh viễn (hằn lún vệt bánh xe). Cụ thể, mô phỏng dự báo tổng độ lún mặt đường sẽ đạt tới 31,03 mm (vượt ngưỡng cho phép 25,00mm) và lún trên riêng lớp BTN đạt 16,10mm (vượt ngưỡng 12,50mm) ở độ tin cậy 90%. Điều này đồng nghĩa với việc kết cấu BTN sẽ bị hỏng và cần sửa chữa lớn trước khi đạt mốc 15 năm.

- Đối với kết cấu mặt đường BTXM: Kết quả mô phỏng cho thấy kết cấu hoàn toàn đáp ứng yêu cầu khai thác. Cụ thể, dù thời hạn khai thác tới 30 năm, với lượng tải trọng tích lũy lớn hơn gấp đôi, mặt đường BTXM vẫn đạt (Pass) toàn bộ các tiêu chí thiết kế. Các dự báo ở năm thứ 30 đều nằm trong giới hạn an toàn: Chỉ số độ êm thuận (IRI) là 2,09m/km (ngưỡng 2,70m/km), độ võng/lệch khe nối (faulting) chỉ ở mức 2,32mm (ngưỡng 3,00mm) và tỷ lệ nứt ngang tấm chỉ là 6,80% (ngưỡng 15%).

3.2. Cơ chế hư hỏng của mặt đường nhựa trong điều kiện ngập lụt

Các kết quả mô phỏng M-E đã chứng minh, kết cấu mặt đường Bê tông nhựa (mặt đường mềm) tồn tại một điểm yếu khi đối diện với nước. Khi xảy ra ngập lụt, nước thẩm thấu cắt đứt liên kết nhựa - đá. Sự phá hủy này không diễn ra tuyến tính mà mang tính dây chuyền: Nước xâm nhập ⇒ mất dính kết ⇒ xe tải chạy qua tạo áp lực lỗ rỗng ⇒ phụt bùn ⇒ ổ gà ⇒ sập lún toàn bộ kết cấu. Do đó, dù mang lại cảm giác chạy xe êm thuận cao, mặt đường bê tông nhựa không phải là giải pháp bền vững cho các khu vực thung lũng Karst ngập từ vài tuần đến hàng tháng tại Cao Bằng.

3.3. Ưu và nhược điểm của mặt đường bê tông xi măng (BTXM)

Đứng trước bài toán này, việc chuyển đổi sang kết cấu mặt đường cứng (BTXM) kết hợp với lớp móng Cấp phối đá dăm gia cố xi măng (CTB - Cement Treated Base) là một giải pháp phù hợp:

(1) Ưu điểm:

- Mặt đường BTXM: Đặc trưng bởi mô-đun đàn hồi rất cao, tấm BTXM hoạt động như một "tấm bản cứng" phân tán tải trọng bánh xe trên một diện tích nền đường rất rộng. Do đó, ngay cả khi nền đường bên dưới bị yếu đi do bão hòa nước, ứng suất truyền xuống nền vẫn rất nhỏ, ngăn chặn hiện tượng sụt lún. BTXM hoàn toàn trơn với nước, không bị hiện tượng bong bật (Stripping) như nhựa đường, duy trì cường độ ổn định ngay cả khi ngấm lũ hàng tháng.

- Móng cấp phối đá dăm gia cố xi măng (CTB): Đây là "tấm khiên" thủy lực hoàn hảo. CTB bao gồm cốt liệu đá dăm trộn với một tỷ lệ xi măng (khoảng 4-6%) và nước, đầm nén đạt độ chặt cao [4]. Lớp móng này có tính bán cứng, triệt tiêu gần như hoàn toàn tính thấm nước. Nó đóng vai trò "cắt" dòng mao dẫn từ dưới lên và ngăn dòng nước mặt từ trên xuống, chấm dứt triệt để hiện tượng "phun bùn" (pumping) bảo vệ nền đất yếu bên dưới khỏi sự mềm hóa.

(2) Nhược điểm:

- Chi phí đầu tư ban đầu của BTXM và CTB thường cao hơn so với Bê tông nhựa thông thường.

- Mặt đường cứng có độ êm thuận kém hơn bề mặt nhựa, gây tiếng ồn lớn hơn khi xe chạy tốc độ cao.

- Thời gian thi công và bảo dưỡng kéo dài (thường cần 14 - 28 ngày để xi măng đạt cường độ thiết kế, trừ khi sử dụng phụ gia hóa dẻo đóng rắn nhanh).

- Khi có nứt vỡ, công tác sửa chữa, bóc dỡ BTXM phức tạp và tốn kém hơn so với việc cào bóc và thảm lại bê tông nhựa.

3.3. Một số khuyến nghị trong sử dụng các dạng kết cấu mặt đường

Dựa trên phân tích đa chiều về tuổi thọ kết cấu trong điều kiện bất lợi về chế độ thủy nhiệt và kinh tế dài hạn (chi phí vòng đời), nghiên cứu đề xuất một số kiến nghị đối với kết cấu mặt đường áp dụng trên địa bàn tỉnh Cao Bằng như sau:

(1) Phân vùng vật liệu theo rủi ro: Ưu tiên tuyệt đối việc sử dụng mặt đường BTXM trên lớp móng gia cố xi măng (CTB) tại các khu vực "rốn lũ" như phường Thục Phán, các tuyến đường ven sông Bằng Giang, sông Hiến, và các khu vực thung lũng Karst kín (Quảng Hòa, Trùng Khánh) thường xuyên chịu cảnh ngập lụt kéo dài.

(1) **Phân vùng vật liệu theo rủi ro:** Ưu tiên tuyệt đối việc sử dụng mặt đường BTXM trên lớp móng gia cố xi măng (CTB) tại các khu vực "rốn lũ" như phường Thục Phán, các tuyến đường ven sông Bằng Giang, sông Hiến, và các khu vực thung lũng Karst kín (Quảng Hòa, Trùng Khánh) thường xuyên chịu cảnh ngập lụt kéo dài.

(2) **Khu vực cao ráo, tiêu thoát nhanh:** Đối với các trục đại lộ, vành đai không bị ngập hoặc có khả năng thoát nước trong

24h, tiếp tục duy trì áp dụng kết cấu mặt đường BTN nhằm tối ưu hóa sự êm thuận và giảm tiếng ồn, tuy nhiên bắt buộc phải cải thiện hệ thống rãnh, cống ngầm theo chuẩn thiết kế quốc gia.

(3) **Ứng phó kết hợp:** Nâng cao trình cốt nền thiết kế của đường đô thị phải vượt qua đỉnh lũ lịch sử năm 2025 cộng thêm hệ số an toàn. Đồng thời, tận dụng tối đa nguồn lực vật liệu địa phương (xi măng, đá, cát) để tối ưu hóa giá thành thi công các lớp móng CTB và lớp mặt BTXM.

IV. KẾT LUẬN

Hiện tượng ngập lụt bất thường, khốc liệt và kéo dài tại các đô thị Cao Bằng do tác động của biến đổi khí hậu đã làm bộc lộ những điểm yếu chí mạng của kết cấu mặt đường bê tông nhựa truyền thống. Việc tiếp tục áp dụng rập khuôn các thiết kế cũ sẽ dẫn đến sự lãng phí nghiêm trọng về ngân sách bảo trì do tuổi thọ công trình bị sụt giảm theo hàm mũ khi ngấm nước.

Nghiên cứu khẳng định việc ứng dụng số hóa (BIM, GIS) và mô phỏng số (FEM, mô hình M-E) là bước đi tất yếu để giải mã chính xác các cơ chế phá hoại cơ học - thủy lực ngầm bên dưới kết cấu. Các kết quả tính toán định lượng đã cung cấp nền tảng khoa học vững chắc để đi đến quyết định kỹ thuật cốt lõi: Chuyển đổi sang kết cấu mặt đường bê tông xi măng kết hợp với móng cấp phối đá dăm gia cố xi măng (CTB) tại các vùng rủi ro ngập lụt. Giải pháp này, dù tồn tại một số hạn chế về độ êm thuận và thời gian thi công, nhưng mang lại khả năng sinh tồn vượt trội, cắt đứt cơ chế phun bùn và duy trì năng lực thông hành huyết mạch cho đô thị miền núi trong kỷ nguyên biến đổi khí hậu.

Lê Hào (BT)

Tài liệu tham khảo:

- [1] AASHTO (2012). *LRFD Bridge Design Specifications*. Washington DC.
- [2] Bộ Tài nguyên và Môi trường (2024). *Kịch bản biến đổi khí hậu và nước biển dâng cho Việt Nam*. Hà Nội.
- [3] Chinhphu.vn (2025). *Cao Bằng: Lũ lụt gây ngập sâu trên toàn tỉnh*. <https://xaydungchinhphu.vn>
- [4] Đại học Bách khoa Đà Nẵng (2015). *Nghiên cứu sử dụng vật liệu cấp phối thiên nhiên gia cố xi măng trong xây dựng đường*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, số 11(96).
- [5] Sở Khoa học và Công nghệ TP.HCM (2024). *Ứng dụng BIM và GIS trong quản lý hạ tầng giao thông đô thị*.
- [6] Tạp chí Khoa học và Công nghệ (2020). *Phân tích ổn định mái dốc nền đường bằng phương pháp phần tử hữu hạn*.
- [7] TCVN 14288:2024. *Bản đồ ngập lụt – Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ.