

Investigasi Retak Dinding pada Jembatan Tipe Post Tensioned Prestressed Concrete Box Girder di Indonesia

Andi Candra Irawan¹, Muhammad Sigit Darmawan^{2*}, Nur Achmad Husin³, Kohar Yudoprasetyo⁴

^{1,2,3,4}Terapan Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

Email: ¹3035221001@student.its.ac.id, ²m_sigit_d@its.ac.id, ³na_husin@its.ac.id, ⁴kohar.yudo@its.ac.id

Email Penulis Korespondensi: ²m_sigit_d@its.ac.id

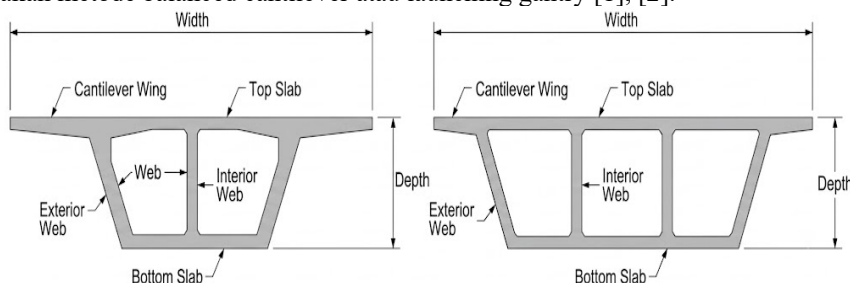
Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: Segmental Box Girder Retak Web Metode Elemen Hingga (Fem) Kapasitas Geser Creep Dan Susut	<i>Post-tensioned prestressed concrete segmental box girder</i> banyak digunakan pada jembatan bentang panjang karena efisiensi struktural dan kemudahan konstruksinya. Namun, keretakan pada <i>web</i> dapat menurunkan kinerja, durabilitas, dan keandalan struktur. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi karakteristik retak, mengevaluasi mutu material eksisting, menganalisis respons serta kapasitas geser struktur, dan menentukan faktor dominan penyebab keretakan. Metode penelitian mencakup inspeksi visual dan pemetaan retak, pengujian non-destruktif melalui <i>rebound hammer</i>, <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i>, dan <i>bar locator</i>, pengujian destruktif melalui <i>core drill</i> dan uji tarik baja, serta pemodelan elemen hingga menggunakan CSI Bridge dengan elemen <i>shell</i>. Model dievaluasi pada kondisi layan dan ultimit, serta mempertimbangkan mutu material aktual, gaya prategang, <i>creep</i>, susut, dan tegangan tambahan pada zona pengangkatan. Hasil menunjukkan retak didominasi pola diagonal dan lentur-geser dengan orientasi 30°–45°, terutama di sekitar blok angkur deviasi tendon. Kuat tekan karakteristik beton aktual sebesar 31,97 MPa lebih rendah daripada mutu rencana 41,50 MPa. Tegangan tarik utama kritis mencapai 2,45 MPa, melampaui batas tarik izin beton sebesar 1,86 MPa. Evaluasi geser menunjukkan beberapa <i>node</i> tidak memenuhi kriteria RSNI T-12:2004, SNI 2847:2019, dan AASHTO. Pengaruh <i>creep</i> dan susut menurunkan angka keamanan sekitar 10–15%. Korelasi spasial menunjukkan bahwa zona tegangan tinggi berimpit dengan sebaran retak yang teridentifikasi selama inspeksi lapangan secara langsung. Keretakan disimpulkan terjadi akibat kombinasi defisit kapasitas geser, konsentrasi tegangan pada blok angkur, kehilangan prategang, dan variasi mutu beton eksisting.
	Abstract
Keywords: Segmental Box Girder Web Cracking Finite Element Method (FEM) Shear Capacity Creep and Shrinkage	Post-tensioned prestressed concrete segmental box girders are widely used for long-span bridges because of structural efficiency. However, web cracking may reduce performance, durability, and reliability. This study aims to identify crack characteristics, evaluate material properties, analyze structural response and shear capacity, and determine dominant causes. The investigation comprised visual inspection and crack mapping, non-destructive testing using rebound hammer, Ultrasonic Pulse Velocity, and bar locator, destructive testing through core drilling and reinforcing-steel tensile tests, and finite element modeling in CSI Bridge using shell elements. The model was evaluated under service and ultimate conditions while considering actual material properties, prestressing force, creep, shrinkage, and additional stresses within anchorage zones. The results show that cracking was dominated by diagonal and flexure-shear patterns inclined 30°–45°, mainly near tendon-deviation anchorage blocks. The characteristic compressive strength of concrete was 31.97 MPa, lower than the design value of 41.50 MPa. The critical principal tensile stress reached 2.45 MPa, exceeding the allowable concrete tensile strength of 1.86 MPa. Shear evaluation indicated that several nodes did not satisfy RSNI T-12:2004, SNI 2847:2019, and AASHTO criteria. Creep and shrinkage reduced the safety factor by approximately 10–15%. Spatial correlation showed that high-stress zones coincided with observed crack concentrations. Web cracking was therefore attributed to combined effects of insufficient shear capacity, anchorage stress concentration, prestress losses, and variability in existing concrete strength.

JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License



1. PENDAHULUAN

Post-tensioned prestressed concrete segmental box girder menjadi sistem struktur utama pada pembangunan jembatan bentang panjang karena efisiensi material, kapasitas torsi dan lentur yang tinggi, serta kemudahan pelaksanaan konstruksi menggunakan metode balanced cantilever atau launching gantry [1], [2].



Gambar 1. Penampang *Single Cell* dan *Multi Cell Box Girder* [3]

Di Indonesia, penerapan sistem ini meningkat pesat pada infrastruktur jalan tol strategis nasional. Namun, beberapa tahun terakhir ditemukan kasus keretakan pada bagian badan (web) box girder pasca-konstruksi yang memicu kekhawatiran terkait keandalan struktur dan umur layan jembatan, fenomena serupa juga telah dilaporkan pada beberapa jembatan segmental di luar negeri [4]. Salah satu kasus signifikan terjadi pada sebuah jembatan tol kontinu yang selesai dibangun tahun 2016 menggunakan metode balanced cantilever. Meskipun telah dinyatakan layak beroperasi, retakan pada web mulai terdeteksi pada tahun 2018. Upaya perbaikan melalui monitoring berkala dan grouting (2019–2022) telah dilakukan, namun retakan baru tetap muncul secara progresif di sekitar area retak lama.

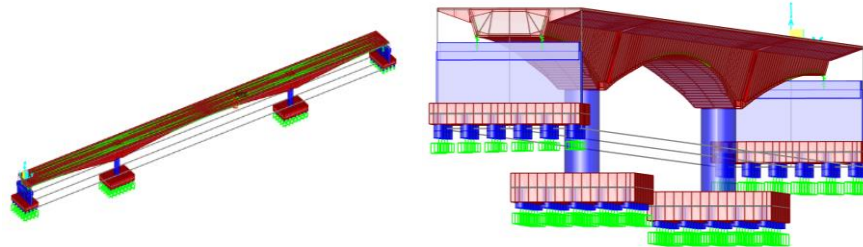


Gambar 2. Kondisi Kerusakan Dinding *Box Girder*

Secara global, fenomena web cracking dipengaruhi oleh distribusi prategang tidak optimal, konsentrasi tegangan di blok angkur, gaya geser, efek creep dan shrinkage, variasi temperatur, beban lalu lintas, hingga metode konstruksi [5], [6], [7], [8]. Kendati demikian, sebagian besar studi internasional tersebut didasarkan pada karakteristik lingkungan, standar desain, dan material non-tropis yang berbeda dengan Indonesia. Di lingkup domestik, penelitian sejenis masih terbatas dan cenderung berfokus pada evaluasi kasus tunggal bersifat korektif tanpa pemodelan penyebab yang dapat digeneralisasi. Belum ada studi komprehensif yang mengintegrasikan aspek desain, deviasi mutu material aktual, perilaku prategang, dan pengaruh lingkungan tropis secara simultan. Dalam konteks Indonesia, pendekatan asesmen berbasis kondisi aktual juga telah diterapkan pada struktur eksisting dengan mengintegrasikan inspeksi visual, pengujian NDT–DT, dan analisis elemen hingga untuk mengidentifikasi defisit kapasitas dan dasar penanganan struktur [9], [10]. Studi numerik terkini pada jembatan juga memperlihatkan pentingnya representasi sistem struktur dan kondisi batas dalam mengevaluasi respons serta kinerja elemen jembatan [10].

Kesenjangan penelitian ini berimplikasi pada kurang optimalnya efektivitas perbaikan dan tingginya risiko retak berulang pada infrastruktur jembatan bentang panjang. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini merumuskan empat fokus utama, yaitu mengidentifikasi karakteristik keretakan pada web, mengevaluasi mutu material aktual di lapangan, menganalisis kapasitas struktur eksisting secara numerik, serta memetakan faktor-faktor dominan yang memicu kegagalan tersebut. Melalui pendekatan terpadu yang mengombinasikan studi kasus lapangan, pengujian laboratorium (destructive dan non-destructive), serta simulasi numerik berbasis Finite Element Method (FEM) menggunakan CSI Bridge, penelitian ini bertujuan menyelidiki penyebab mendasar keretakan web pada post-tensioned prestressed concrete segmental box girder di Indonesia. Pendekatan integratif ini dipilih karena investigasi keretakan pada

jembatan segmental memerlukan kombinasi inspeksi lapangan, evaluasi mutu material, dan analisis numerik untuk memperoleh distribusi tegangan yang tidak dapat diamati secara langsung [4], [5].



Gambar 3. Permodelan Finite Element Method (FEM)

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan investigasi terpadu yang menggabungkan pemeriksaan eksperimental lapangan pada objek jembatan eksisting (Jalur A dan Jalur B) dan analisis numerik berbasis Metode Elemen Hingga (FEM). Kerangka analisis penelitian disusun berdasarkan perilaku geser dan tegangan tarik utama pada web, kehilangan gaya prategang jangka panjang, serta tegangan geser tambahan pada daerah pengangkatan tendon sebagai dasar evaluasi mekanisme keretakan. Pendekatan terpadu tersebut sejalan dengan penelitian asesmen struktur eksisting yang menggunakan hasil pengujian material sebagai parameter aktual dalam model numerik, sehingga evaluasi kapasitas tidak hanya bergantung pada spesifikasi desain awal [9], [11].

2.1. Perilaku Geser dan Tegangan Utama (Principal Stress) pada Web Box Girder

Bagian *web* pada penampang *box girder* berfungsi sebagai jalur utama penyaluran gaya geser vertikal dari pelat lantai menuju tumpuan. Selain gaya geser akibat beban gravitasi, *web* menerima pengaruh tegangan normal longitudinal akibat lentur dan gaya prategang, tegangan vertikal, torsi, distribusi beban yang tidak merata, serta konsentrasi tegangan lokal pada daerah pengangkatan tendon. Interaksi berbagai komponen tersebut menghasilkan kondisi tegangan multiaxial yang tidak selalu dapat direpresentasikan secara memadai menggunakan idealisasi elemen garis. Penelitian He et al. menunjukkan bahwa pengangkatan tendon kantilever dapat menimbulkan tambahan tegangan geser lokal yang cukup besar pada *web* [12], sedangkan Jin et al. menegaskan bahwa model spasial yang memisahkan pelat atas, pelat bawah, dan *web* mampu menjelaskan distribusi tegangan serta pola keretakan secara lebih representatif dibandingkan model balok tunggal [13].

Kondisi kritis pada *web* dievaluasi berdasarkan tegangan tarik utama yang terbentuk dari kombinasi tegangan normal dan tegangan geser. Dengan menggunakan konvensi tegangan tarik bernilai positif, tegangan tarik utama maksimum ditentukan berdasarkan transformasi tegangan elastis sebagai berikut:

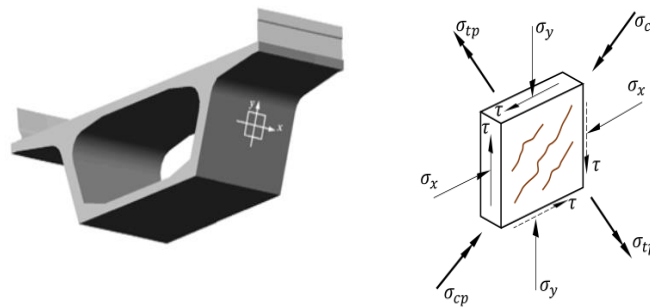
$$\sigma_{tp} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (1)$$

Dimana σ_x adalah tegangan normal longitudinal akibat kombinasi lentur dan gaya prategang aksial, σ_y adalah tegangan normal arah vertikal (jika ada), dan τ adalah tegangan geser akibat kombinasi gaya geser mekanis dan torsi. Konvensi tanda yang digunakan adalah nilai positif (+) untuk tegangan tekan dan nilai negatif (-) untuk tegangan tarik.

Dalam penelitian ini, potensi keretakan ditentukan dengan membandingkan σ_{tp} terhadap kuat tarik izin beton yang dihitung dari mutu tekan beton aktual sebagai berikut:

$$f_t' = 0.33\sqrt{f_c'} \quad (2)$$

dengan f_t sebagai kuat tarik izin beton dalam MPa dan f_c' sebagai kuat tekan karakteristik beton dalam MPa. Apabila $\sigma_{tp} \leq f_t$, kondisi *web* dikategorikan masih memenuhi batas layan terhadap tegangan tarik. Sebaliknya, apabila $\sigma_{tp} > f_t$, beton telah mengalami kondisi *overstress* karena tegangan tarik yang bekerja melampaui kapasitas tarik material, sehingga inisiasi atau perkembangan retak menjadi mungkin terjadi.



Gambar 4. Tegangan Utama Akibat Kombinasi Tegangan Normal dan Tegangan Geser

Retak geser pada *web* umumnya berkembang secara diagonal dengan orientasi sekitar 30° – 45° terhadap sumbu memanjang girder. Lokasi yang rentan meliputi daerah dengan gaya geser tinggi, perubahan ketebalan atau tinggi *web*, daerah dekat tumpuan, sambungan segmen, serta daerah deviasi dan pengangkatan tendon. Efek pengangkatan harus diperhitungkan karena penyebaran gaya prategang yang terpusat dapat meningkatkan tegangan geser dan tegangan tarik utama pada area yang relatif sempit. Efek lokal tersebut dapat terlewat dalam analisis global berbasis elemen balok, sehingga penggunaan elemen *shell* pada penelitian ini diperlukan untuk mengevaluasi distribusi tegangan pada pelat dan *web*.

Keretakan yang telah terbentuk juga dapat memengaruhi respons struktur berikutnya. Retak diagonal menyebabkan penurunan kekakuan geser, perubahan jalur aliran gaya, dan redistribusi tegangan menuju bagian beton serta tulangan yang belum mengalami kerusakan. Chen et al. [14] menunjukkan bahwa perkembangan retak eksisting pada *box girder* dipengaruhi oleh interaksi tegangan campuran dan karakteristik geometri retak, sedangkan penelitian Cao et al. [15] memperlihatkan bahwa pertumbuhan retak, kehilangan prategang, perubahan regangan, dan deformasi jangka panjang saling berkaitan pada jembatan beton prategang yang telah mengalami keretakan. Oleh karena itu, evaluasi pada penelitian ini tidak hanya menggunakan nilai tegangan pada satu titik, tetapi mengorelasikan distribusi tegangan tarik utama hasil FEM dengan lokasi, orientasi, lebar, dan kedalaman retak hasil inspeksi lapangan.

2.2. Kehilangan Gaya Prategang Jangka Panjang (Time-Dependent Losses)

Gaya tekan awal yang diberikan oleh tendon prategang tidak bersifat permanen dan mengalami penurunan secara bertahap selama umur layan struktur akibat mekanisme kehilangan prategang (*prestress losses*). Penurunan ini dibagi menjadi kehilangan langsung (*immediate losses*) akibat gesekan saluran (*friction*), slip ankur (*anchorage slip*), pemendekan elastis beton, serta kehilangan jangka panjang (*time-dependent losses*).

Kehilangan prategang jangka panjang dipengaruhi secara signifikan oleh karakteristik material dan kondisi lingkungan, yang meliputi:

1. **Rangkak Beton (Concrete Creep):** Pertambahan regangan beton seiring waktu akibat adanya tegangan tekan yang bekerja secara terus-menerus dari gaya prategang dan beban mati permanen. Deformasi rangkai dipengaruhi oleh umur beton saat diberi prategang, mutu beton, dan kelembaban lingkungan tropis [14].
2. **Susut Beton (Concrete Shrinkage):** Pengurangan volume beton akibat hilangnya air dari pasta semen selama proses hidrasi dan pengeringan tanpa dipengaruhi beban luar. Pemendekan akibat susut menyebabkan tendon kehilangan sebagian regangan efektifnya.
3. **Relaksasi Baja Prategang:** Penurunan tegangan pada tendon prategang dari waktu ke waktu meskipun regangan tendon dipertahankan konstan [3].

Penurunan gaya prategang efektif menyebabkan berkurangnya tegangan tekan yang bekerja pada penampang beton sehingga kemampuan struktur dalam menahan tegangan tarik menjadi semakin rendah. Akibatnya, tegangan tarik utama (*principal tensile stress*) (σ_{tp}) pada daerah *web* meningkat, yang pada kondisi tertentu dapat melampaui kapasitas tarik beton dan memicu terbentuknya retak diagonal. Pengaruh kehilangan prategang terhadap peningkatan risiko retak telah dilaporkan pada analisis perilaku jangka panjang jembatan *box girder* prategang segmental [5].

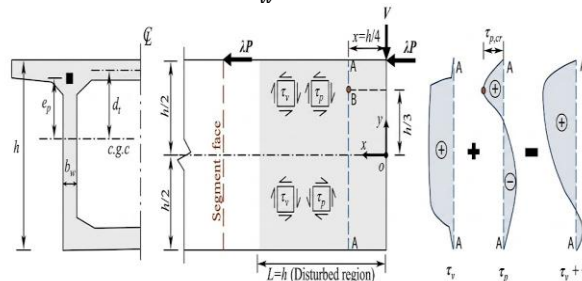
2.3. Tegangan Geser Tambahan Akibat Pengangkatan Tendon (D-Region)

Daerah pengangkatan (*anchorage zone*) pada jembatan segmental merupakan wilayah gangguan aliran tegangan lokal atau *Disturbed Region* (D-Region) akibat transfer gaya prategang terpusat yang sangat besar. Berdasarkan studi mekanika oleh He et al. [12], proses pengangkatan *cantilever tendons* pada penampang *box girder* menghasilkan gaya

geser tambahan (τ_p) yang merupakan salah satu lokasi kritis berkembangnya retak awal pada web yang selama ini sering kali diabaikan dalam perencanaan konvensional.

Tegangan geser tambahan akibat efek angkur terpusat ini dirumuskan sebagai berikut:

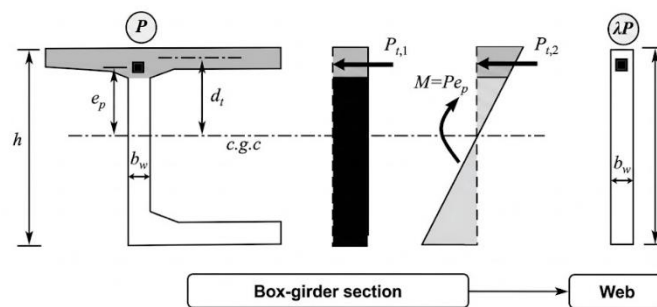
$$\tau_p = 1.3 \frac{\lambda P}{b_w h} \quad (3)$$



Gambar 5. Lengan geser akibat gaya geser vertical V (τ_v) dan gaya pengangkatan P (τ_p)

Dengan faktor distribusi penampang (λ) bernilai:

$$\lambda = 1 - \frac{A_t}{A} - \frac{e_p d_t A_t}{I} \quad (4)$$



Gambar 6. Perhitungan Tegangan geser akibat gaya pengangkatan tendon P

Dimana P adalah gaya pengangkatan tendon, b_w adalah lebar web, h adalah tinggi total girder, A_t adalah luas penampang di atas web, e_p adalah eksentrisitas tendon, dan d_t adalah jarak vertikal titik berat penampang atas terhadap titik berat total penampang. Keberadaan τ_p yang bekerja searah dengan gaya geser akibat beban vertikal luar τ_v akan melambungkan nilai tegangan tarik utama lokal, sehingga memicu konsentrasi keretakan miring di sekitar blok angkur deviasi tendon.

2.4. Pengumpulan Data Lapangan

Pengumpulan data lapangan dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai kondisi fisik, mutu material, dan karakteristik kerusakan aktual pada struktur post-tensioned prestressed concrete segmental box girder. Data primer diperoleh melalui inspeksi visual, pemetaan retak, pengujian non-destruktif, serta pengujian destruktif pada elemen-elemen yang dianggap mewakili kondisi Jalur A dan Jalur B. Penggunaan beberapa metode pemeriksaan diperlukan karena satu jenis pengujian tidak dapat menggambarkan keseluruhan kondisi struktur secara memadai. Pendekatan yang mengintegrasikan inspeksi visual, *rebound hammer*, dan *Ultrasonic Pulse Velocity* telah banyak digunakan dalam asesmen jembatan beton untuk mengevaluasi tingkat kerusakan, keseragaman material, dan kondisi komponen secara lebih komprehensif [16].

Inspeksi visual dilakukan pada permukaan *web*, pelat atas, pelat bawah, sambungan antarsegmen, dan daerah di sekitar blok angkur tendon. Pemeriksaan ini mencakup identifikasi lokasi, jumlah, pola, arah, panjang, lebar, dan kedalaman retak, serta indikasi kerusakan lain seperti rembesan, pengelupasan beton, segregasi, dan bekas perbaikan. Setiap retak didokumentasikan dan dipetakan berdasarkan nomor segmen agar dapat dikorelasikan dengan posisi tendon, perubahan geometri penampang, serta titik tinjau pada model numerik. Pemetaan tersebut digunakan untuk membedakan retak longitudinal, vertikal, diagonal, dan lentur-geser serta menentukan zona dengan konsentrasi kerusakan paling tinggi. Dokumentasi fotografis dengan skala ukur juga dilakukan untuk meningkatkan keterlacakan data. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa karakteristik geometris dan posisi retak merupakan informasi penting dalam diagnosis kondisi

struktur, sedangkan pengolahan citra dapat digunakan sebagai pendukung untuk meningkatkan konsistensi pendeteksian retak pada permukaan beton yang tidak seragam [17].



Gambar 7. Dokumentasi pengujian non-destruktif (NDT) di lapangan: (a)–(b) rebound hammer; (c)–(d) Ultrasonic Pulse Velocity (UPV); (e)–(f) bar locator; dan (g)–(h) pengukuran lebar dan kedalaman retak.

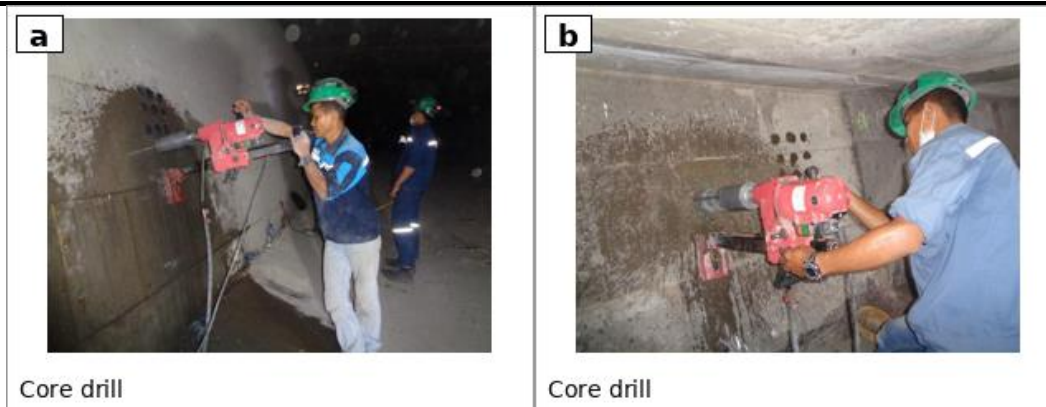
Pengujian non-destruktif dilakukan untuk mengevaluasi kondisi beton dan susunan tulangan tanpa menimbulkan kerusakan berarti pada struktur. *Rebound Hammer Test* yang mengacu pada ASTM C805/C805M digunakan untuk mengevaluasi keseragaman kekerasan permukaan dan memperkirakan kuat tekan beton. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* berdasarkan ASTM C597 digunakan untuk menilai homogenitas internal beton, mendeteksi indikasi rongga atau diskontinuitas, serta membantu memperkirakan kedalaman retak. Sementara itu, *bar locator* digunakan untuk memverifikasi posisi tulangan, jarak antartulangan, dan ketebalan selimut beton pada dinding *web* serta pelat box girder. Hasil pengujian tidak ditafsirkan secara terpisah, tetapi dibandingkan antarlokasi dan dikorelasikan dengan pola kerusakan visual. Kombinasi nilai pantul dan kecepatan rambat gelombang dapat meningkatkan keandalan estimasi kuat tekan dibandingkan penggunaan satu metode NDT saja, meskipun korelasi tetap perlu dikalibrasi terhadap karakteristik beton yang diperiksa [9], [11], [18]. Pendekatan korelatif antara inspeksi visual dan beberapa parameter NDT juga dinilai lebih representatif dalam menentukan kondisi aktual jembatan yang sedang beroperasi [16].

Pengukuran retak dilakukan menggunakan alat ukur lebar retak dan perangkat ultrasonik pada titik-titik yang mewakili variasi pola kerusakan. Lebar retak diukur tegak lurus terhadap arah retak, sedangkan kedalaman retak diperkirakan melalui konfigurasi pengukuran ultrasonik yang sesuai dengan aksesibilitas permukaan. Hasil pengukuran kemudian dikelompokkan berdasarkan jalur, sisi *web*, nomor segmen, orientasi, dan kedekatannya terhadap blok angkur. Data tersebut menjadi dasar untuk membandingkan tingkat kerusakan antara Jalur A dan Jalur B serta mengevaluasi kesesuaian antara arah retak aktual dan arah tegangan tarik utama hasil analisis elemen hingga.

Pengujian destruktif dilakukan melalui pengambilan sampel beton inti menggunakan metode *core drill* yang mengacu pada ASTM C42/C42M. Sampel diambil dari lokasi representatif dengan mempertimbangkan sebaran kerusakan, keamanan struktur, posisi tendon, dan tulangan eksisting. Benda uji inti selanjutnya diperiksa dimensinya dan diuji tekan di laboratorium untuk memperoleh kuat tekan beton aktual. Nilai hasil pengujian digunakan dalam penentuan kuat tekan karakteristik eksisting dan sebagai parameter material pada model numerik. Penggunaan data *core drill* penting karena nilai kuat tekan beton eksisting dapat memiliki variasi spasial yang cukup besar, sehingga penentuan kekuatan karakteristik perlu memperhatikan jumlah sampel, sebaran lokasi, dan variasi statistik hasil pengujian. Studi terhadap sampel beton dari sejumlah jembatan menunjukkan bahwa prosedur statistik yang tepat diperlukan untuk menghindari estimasi kapasitas material yang terlalu tinggi atau terlalu rendah [9], [11], [19], [20].

Dokumentasi pengambilan sampel beton inti untuk pengujian destruktif ditampilkan pada gambar berikut sebagai bagian dari proses evaluasi mutu beton eksisting.

Selain beton, sampel baja tulangan eksisting diuji tarik dengan mengacu pada ASTM A370 untuk mendapatkan tegangan leleh, kuat tarik maksimum, dan karakteristik mekanis material. Seluruh hasil inspeksi visual, NDT, dan DT selanjutnya diintegrasikan untuk menyusun basis data kondisi aktual struktur. Data mutu beton dan baja hasil pengujian digunakan untuk menggantikan atau membandingkan parameter material rencana dalam evaluasi kapasitas struktur. Dengan pendekatan ini, pemodelan numerik tidak hanya merepresentasikan kondisi desain awal, tetapi juga



Gambar 8. Dokumentasi pengambilan sampel core drill pada elemen box girder untuk evaluasi mutu beton aktual

2.5. Pengumpulan Data Perencanaan (Data Sekunder)

Pengumpulan data sekunder dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai konfigurasi awal, asumsi desain, tahapan konstruksi, pembebanan, serta riwayat pelayanan jembatan sebagai dasar penyusunan model numerik dan pembandingan terhadap kondisi aktual. Data yang dikumpulkan meliputi gambar *as-built*, laporan perhitungan struktur, spesifikasi material, dimensi penampang, konfigurasi tulangan dan tendon, gaya prategang awal, urutan penegangan, tahapan konstruksi, kondisi perletakan, beban mati, beban hidup, temperatur, hasil uji beban, serta catatan inspeksi, pemeliharaan, dan perbaikan sebelumnya. Dalam asesmen struktur eksisting, dokumen desain perlu diverifikasi terhadap hasil inspeksi dan pengujian material karena perubahan sifat material, kehilangan gaya prategang, kerusakan, serta perubahan kondisi layanan dapat menyebabkan respons aktual berbeda dari kondisi rencana [21]. Data desain digunakan untuk merepresentasikan kondisi awal, sedangkan data hasil pengujian dan riwayat operasional digunakan untuk memperbarui parameter model agar analisis lebih mencerminkan perilaku struktur saat ini [22], [23], [24], [25].

2.6. Pemodelan Numerik Elemen Hingga (FEM)

Model numerik tiga dimensi dikembangkan menggunakan program bantu CSiBridge berdasarkan gambar *as-built* untuk merepresentasikan konfigurasi bentang, perubahan tinggi penampang, ketebalan pelat dan *web*, diafragma, pilar, perletakan, *closure segment*, serta profil tendon prategang. Pelat atas, pelat bawah, dan *web* dimodelkan sebagai elemen *shell* agar distribusi gaya dalam, tegangan geser, dan tegangan utama pada daerah kritis dapat dianalisis secara lebih representatif dibandingkan idealisasi elemen balok [26]. Analisis menggunakan dua kondisi material, yaitu kondisi desain dengan $f'_c = 41,50\text{MPa}$ dan $f_y = 400\text{MPa}$, serta kondisi aktual berdasarkan hasil pengujian dengan $f'_c = 31,97\text{MPa}$ dan $f_y = 406\text{MPa}$. Tendon dimodelkan menggunakan *seven-wire low-relaxation strand* ASTM A416 Grade 1860 dengan tegangan penarikan awal sebesar 1367 MPa.

Pembebanan meliputi berat sendiri, gaya prategang, beban mati tambahan, serta dua konfigurasi uji beban statik. Kondisi layan dianalisis menggunakan kombinasi $DL + Uji$, sedangkan kondisi ultimit menggunakan $1,3DL + 1,8Uji$. Tahapan konstruksi dan pengaruh jangka panjang berupa *creep*, susut, serta kehilangan prategang turut diperhitungkan karena dapat memengaruhi distribusi tegangan dan kapasitas struktur eksisting [27]. Penelitian terbaru oleh Andrade Borges et al. [28] juga menunjukkan bahwa pemilihan model *creep* dan susut dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap prediksi lendutan jangka panjang dan besarnya kehilangan prategang pada jembatan *balanced cantilever box girder*. Keluaran model berupa gaya geser V_2 , momen M_3 , tegangan normal, tegangan geser, dan tegangan utama pada setiap titik tinjau, kemudian digunakan untuk mengevaluasi kapasitas geser berdasarkan RSNI T-12:2004, SNI 2847:2019, dan AASHTO serta dikorelasikan dengan lokasi keretakan hasil inspeksi lapangan [29], [30], [31].

2.7. Evaluasi Kriteria Keamanan Struktur

Output tegangan internal hasil ekstraksi pemodelan elemen hingga pada node-node kritis dianalisis berdasarkan dua parameter batas utama:

1. **Batas Tegangan Tarik Utama:** Nilai tegangan tarik utama aktual (σ_{tp}) dievaluasi terhadap batas retak izin beton standar AASHTO LRFD ($0.33\sqrt{f'_c}$).
2. **Kapasitas Geser Nominal Penampang (V_n):** Mengevaluasi kecukupan kapasitas penampang dalam memikul beban geser bersih berfaktor (V_u). Nilai kekuatan nominal (V_n) dihitung berdasarkan kontribusi geser beton retak lentur-geser (V_{ci}) dan retak geser badan web (V_{cw}) merujuk pada regulasi spesifikasi desain AASHTO Guide

Specifications for Segmental Concrete Bridges, RSNI T-12:2004, dan SNI 2847-2019 [29], [30], [31]. Aturan ini digunakan karena mengacu pada waktu pelaksanaan jembatan.

Korelasi spasial dan kuantitatif antara area konsentrasi tegangan tinggi pada model FEM dengan peta keretakan visual lapangan digunakan sebagai dasar untuk mengidentifikasi mekanisme retak dan menentukan faktor dominan penyebab kerusakan. Pendekatan ini telah banyak digunakan dalam investigasi keretakan jembatan beton prategang segmental untuk memverifikasi hasil analisis numerik terhadap kondisi aktual di lapangan [11], [32].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Keretakan Lapangan dan Crack Mapping

Investigasi visual dan pemetaan retak (crack mapping) aktual pada objek studi menunjukkan bahwa keretakan didominasi oleh retak diagonal dan retak lentur-geser dengan sudut orientasi berkisar antara 30° – 45° terhadap sumbu longitudinal balok. Secara spasial, fenomena keretakan ini terkonsentrasi secara masif pada daerah deviasi tendon di sekitar blok angkur internal jembatan segmental. Pengukuran fisik menggunakan alat ukur optik menunjukkan tingkat keparahan geometris retak eksisting yang dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Geometris Keretakan Web Eksisting

Parameter Layan	Jalur A	Jalur B	Batas Toleransi / Kondisi Rencana
Orientasi Sudut Retak	30° – 45°	30° – 45°	-
Lebar Retak Rata-Rata	0,16 mm	0,21 mm	Batas Layan Normal (Izin)
Kedalaman Retak Rata-Rata	82,6 mm	90,8 mm	Penetrasi Parsial ke Dalam Web
Pola Dominan	Diagonal & Lentur-Geser	Diagonal & Lentur-Geser	Terkonsentrasi di Blok Angkur

Data ini mengindikasikan bahwa retakan pada jalur B memiliki penetrasi kedalaman dan lebar celah yang lebih kritis dibandingkan Jalur A, sehingga berpotensi lebih tinggi dalam menurunkan keandalan struktural serta mempercepat proses korosi pada tulangan internal maupun tendon prategang akibat paparan lingkungan.

3.2. Evaluasi Mutu Material Eksisting (NDT dan DT)

Evaluasi mutu material beton jembatan dilakukan dengan mengombinasikan metode tanpa merusak (*Non-Destructive Test* / NDT) dan uji merusak (*Destructive Test* / DT) untuk menguji konsistensi kualitas beton struktural secara menyeluruh. Hasil pengujian material lapangan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Hasil Uji Mutu Beton Aktual Lapangan

Metode Pengujian	Jenis Uji / Parameter	Hasil Pengukuran Eksisting	Status Teknis
NDT (Non-Destructive)	<i>Rebound Hammer</i>	Nilai pantulan seragam	Kualitas beton permukaan dikategorikan Baik
	UPV (Ultrasonic Pulse)	Cepat rambat gelombang stabil	Homogenitas lapisan selimut luar berkategori Baik
DT (Destructive)	<i>Core Drill Test</i> (f'_c aktual)	31,97 MPa	Lebih rendah 22,96% dari desain rencana
	Spesifikasi Rencana (f'_c rencana)	41,50 MPa	Standar ideal perencanaan awal tahun 2012

Kontras antara hasil NDT dan DT ini menunjukkan fenomena di mana beton luar jembatan mengalami pengerasan selimut yang baik, namun bagian inti beton struktural (concrete core) mengalami penurunan kekuatan (substandard strength) yang cukup drastis menjadi hanya 31,97 MPa dari rencana awal 41,5 MPa. Reduksi kuat tekan karakteristik aktual ini secara otomatis memangkas kapasitas kuat tarik izin beton (f'_t). Berdasarkan regulasi AASHTO LRFD [31], nilai kuat tarik izin beton berkurang secara signifikan dari kondisi rencana awal:

$$f'_t = 0.33\sqrt{41,5} = 2,13 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$f'_t = 0.33\sqrt{31,97} = 1,86 \text{ MPa} \quad (6)$$

Penurunan kapasitas tarik izin beton sebesar 12,68% ini menjadikannya sangat rentan terhadap inisiasi keretakan miring saat memikul superposisi beban layan.

3.3. Pemodelan dan Respons Struktur

Model elemen shell menunjukkan kontinuitas distribusi gaya sepanjang tiga bentang dan menangkap perubahan respons pada daerah tumpuan, bentang tengah, dan closure segment. Pada kombinasi layan DL + Uji 1, gaya geser terbesar terjadi di sekitar pilar P1 pada node 19 sebesar 62.538,3 kN. Momen negatif terbesar terdapat di node 20 sebesar -825.238,0 kN.m, sedangkan momen positif maksimum pada closure segment node 35 mencapai 135.600,3 kN.m.

Tabel 3. Ringkasan gaya dalam kritis hasil pemodelan.

Kondisi	Kombinasi	Lokasi	Respons	Nilai
Layan	DL + Uji 1	P1, node 19	Gaya geser V2	62.538,3 kN
Layan	DL + Uji 1	Node 20	Momen negatif M3	-825.238,0 kN.m
Layan	DL + Uji 1	Closure, node 35	Momen positif M3	135.600,3 kN.m
Ultimit	1,3DL + 1,8Uji 1	P1, node 19	Gaya geser V2	88.196,4 kN
Ultimit	1,3DL + 1,8Uji 1	Node 20	Momen negatif M3	-1.128.237,3 kN.m
Ultimit	1,3DL + 1,8Uji 1	Closure, node 35	Momen positif M3	187.173,7 kN.m

Pada kondisi ultimit, pola lokasi kritis tidak berubah, tetapi magnitudo respons meningkat menjadi 88.196,4 kN untuk gaya geser di node 19 dan -1.128.237,3 kN.m untuk momen negatif di node 20. Konsentrasi gaya di sekitar pilar dan daerah perubahan tinggi web menjadi dasar pemilihan node untuk evaluasi kapasitas geser dan tegangan utama.

3.4. Analisis Tegangan Tarik Utama (Principal Stress)

Untuk mengidentifikasi mekanisme inisiasi retak diagonal pada web, dilakukan evaluasi tegangan utama menggunakan prinsip transformasi tegangan elastis berdasarkan output elemen hingga (FEM). Tegangan tarik utama (σ_{tp}) merupakan hasil superposisi dari tegangan normal longitudinal (σ_x), tegangan normal vertikal ($\sigma_y = 0$), tegangan geser mekanis akibat beban luar (τ_v), serta komponen tegangan geser tambahan akibat pengangkatan tendon terpusat (τ_p) pada daerah D-Region merujuk pendekatan He et al. [5]:

$$\tau = \tau_v + \tau_p \quad (7)$$

Tegangan geser tambahan akibat gaya angkur terpusat (P) pada blok angkur dihitung secara matematis melalui persamaan:

$$\tau_p = 1.3 \frac{\lambda P}{b_w h} \quad (8)$$

$$\lambda = 1 - \frac{A_t}{A} - \frac{e_p d_t A_t}{I} \quad (9)$$

Berdasarkan parameter penampang jembatan eksisting, didapatkan nilai faktor distribusi penampang λ , sehingga menghasilkan akumulasi tegangan geser total τ yang tinggi pada wilayah grid sekitar deviasi blok angkur. Perhitungan transformasi nilai tegangan tarik utama (σ_{tp}) pada node paling kritis disimulasikan sebagai berikut:

$$\sigma_{tp} = \frac{\sigma_x + 0}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - 0}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (10)$$

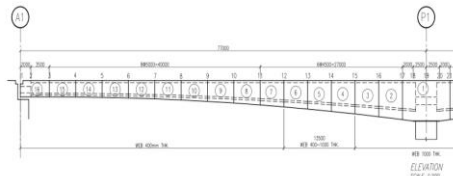
Hasil evaluasi menunjukkan bahwa tegangan tarik utama aktual pada node kritis di sekitar blok angkur mencapai 2,45 MPa, sedangkan batas kuat tarik izin beton aktual hanya sebesar 1,86 MPa. Dengan demikian, nilai tegangan yang terjadi telah melampaui kapasitas tarik beton, sehingga kondisi tersebut dikategorikan sebagai *overstress* dan berpotensi menginisiasi keretakan. Kelebihan tegangan tarik ini menunjukkan bahwa beton pada daerah blok angkur tidak lagi mampu menahan kombinasi tegangan normal dan tegangan geser yang bekerja.

Kondisi *overstress* tersebut sejalan dengan hasil inspeksi lapangan yang menunjukkan adanya retak diagonal dengan orientasi sekitar 30°–45° pada daerah deviasi tendon dan blok angkur. Konsentrasi tegangan pada lokasi tersebut dipengaruhi oleh transfer gaya prategang yang terpusat, tambahan tegangan geser akibat pengangkatan tendon, serta rendahnya kapasitas tarik beton eksisting. Oleh karena itu, hasil analisis ini memberikan dasar mekanis yang kuat bahwa konsentrasi retak pada web box girder terutama dipicu oleh tegangan tarik utama yang telah melampaui batas izin material.

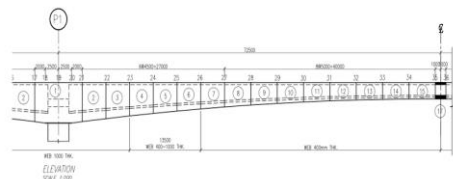
3.5. Evaluasi Kapasitas Geser Nominal

Evaluasi kapasitas geser dilakukan pada node bentang tepi dan bentang tengah yang ditunjukkan pada Gambar 9. Perubahan tinggi dan tebal web menyebabkan variasi V_{ci} , V_{cw} , serta batas kapasitas nominal di sepanjang bentang.

(a) Bentang tepi: node 2-17



(b) Bentang tengah: node 21-35



Gambar 9. Penomoran titik evaluasi: (a) bentang tepi node 2–17 dan (b) bentang tengah node 21–35.

Evaluasi kekuatan batas ultimit struktur dilakukan dengan menghitung kapasitas geser nominal penampang (V_n) yang terdiri atas kontribusi kuat geser beton (V_c), kuat geser tulangan sengkang (V_s), dan komponen vertikal gaya prategang (V_p):

$$V_n = V_c + V_s + V_p \quad (11)$$

Kuat geser beton (V_c) ditentukan dari nilai terkecil antara kapasitas retak lentur-geser (V_{ci}) dan kapasitas retak geser badan web (V_{cw}). Berdasarkan analisis regresi penampang, nilai kapasitas retak geser badan web (V_{cw}) menjadi parameter yang paling mengontrol akibat rendahnya mutu beton inti lapangan:

$$V_{cw} = (0.29\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc}) b_w d_p + V_p \quad (12)$$

Dengan memasukkan variabel kuat tekan beton aktual ($f'_c = 31,97 \text{ MPa}$), didapatkan penurunan kapasitas nominal ϕV_n pada beberapa segmen utama jembatan. Banyaknya node kritis jembatan layang yang mengalami defisit kekuatan geser struktural terhadap beban berfaktor ($\phi V_n \geq V_u$) dipetakan secara terstruktur pada Tabel 4.

Defisit kekuatan geser yang tersebar hingga pada 18 node utama ini menegaskan bahwa penampang lintang eksisting tidak lagi memiliki safety margin yang cukup untuk mentransfer gaya geser dengan aman.

Tabel 4. Tabulasi Node Defisit Kapasitas Geser Lintas Regulasi

Regulasi Perencanaan Acuan	Jumlah Node Defisit ($\phi V_n < V_u$)	Kapasitas Geser Nominal vs Beban Kerja	Status Evaluasi Teknis
AASHTO LRFD [31]	11 node	ϕV_n tidak mencukupi untuk beban berfaktor	Kritis
RSNI T-12:2004 [29]	18 node	ϕV_n di bawah standar kombinasi beban jembatan	Sangat Kritis
SNI 2847-2019 [30]	18 node	ϕV_n di bawah standar kombinasi beban jembatan	Sangat Kritis

3.6. Pengaruh Mutu Beton, Creep, dan Susut terhadap Angka Keamanan

Untuk menilai kondisi layan, angka keamanan geser dihitung menggunakan $SF = V_n/V$ dengan $\phi = 1,0$. Perbandingan dilakukan untuk kondisi desain awal, kondisi material aktual, dan kondisi aktual setelah memperhitungkan creep serta susut. Ringkasan hasilnya diberikan pada Tabel 5

Tabel 5. Perubahan angka keamanan geser pada berbagai kondisi.

Kondisi evaluasi	f'_c (MPa)	Creep dan susut	SF minimum DL+LL	Node kritis	Jumlah SF < 1
------------------	--------------	-----------------	------------------	-------------	---------------



Desain awal	41,50	Belum diperhitungkan	0,82	27	3
Material aktual	31,97	Belum diperhitungkan	0,79	27	4
Aktual jangka panjang	31,97	Diperhitungkan	0,68	27	6

Penurunan mutu beton dari 41,50 MPa menjadi 31,97 MPa menurunkan SF minimum dari 0,82 menjadi 0,79 dan menambah jumlah node dengan SF < 1 dari tiga menjadi empat. Pada bentang tepi, SF minimum tanpa pengaruh waktu masih sekitar 1,00, sedangkan node kritis tetap terkonsentrasi di bentang tengah.

Setelah creep dan susut diperhitungkan, SF minimum turun menjadi 0,68 pada node 27 an jumlah node dengan SF < 1 meningkat menjadi enam. Penurunan dari 0,79 menjadi 0,68 setara sekitar 13,9%, sehingga konsisten dengan kisaran reduksi 10–15%. Efek waktu mengurangi gaya prategang efektif dan komponen tekan yang sebelumnya membantu menahan tegangan tarik serta gaya geser.

Perbandingan ketiga kondisi menunjukkan bahwa rendahnya angka keamanan bukan hanya dipengaruhi oleh mutu beton, tetapi juga oleh konfigurasi web, tulangan geser, dan kehilangan prategang jangka panjang. Oleh sebab itu, evaluasi kondisi eksisting perlu menggunakan parameter material aktual dan tidak cukup hanya mengandalkan data desain awal. Temuan ini konsisten dengan kajian analitis jembatan beton prategang yang menunjukkan bahwa kehilangan prategang dan efek waktu dapat mengubah distribusi tegangan, kekakuan efektif, dan respons layan secara bertahap; oleh karena itu, hasil FEM perlu diperiksa menggunakan parameter material serta kehilangan prategang yang realistis [33].

Secara keseluruhan, lokasi retak lapangan berimpit dengan zona yang menunjukkan kapasitas geser rendah dan tegangan tarik utama tinggi. Kesesuaian tersebut mendukung mekanisme kerusakan berupa interaksi antara gaya geser global, konsentrasi tegangan lokal akibat pengangkatan tendon, penurunan mutu beton, serta kehilangan prategang akibat creep dan susut. Pola integrasi antara observasi kerusakan, karakterisasi material, dan pemeriksaan kapasitas numerik juga telah digunakan pada asesmen struktur eksisting lain untuk membedakan kerusakan permukaan dari defisit kapasitas mekanis yang sesungguhnya [9], [11].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan investigasi visual, pengujian material, dan analisis numerik berbasis metode elemen hingga, keretakan pada web post-tensioned prestressed concrete segmental box girder didominasi oleh retak diagonal dan lentur-geser dengan orientasi sekitar 30°–45°, terutama di sekitar blok angkur deviasi tendon. Jalur B menunjukkan kondisi yang lebih kritis dengan lebar dan kedalaman retak rata-rata sebesar 0,21 mm dan 90,8 mm, dibandingkan Jalur A sebesar 0,16 mm dan 82,6 mm. Kuat tekan beton karakteristik aktual sebesar 31,97 MPa lebih rendah daripada mutu rencana sebesar 41,50 MPa, meskipun hasil pengujian NDT menunjukkan bahwa kualitas beton pada lapisan permukaan relatif baik.

Hasil analisis menunjukkan bahwa tegangan tarik utama kritis di sekitar blok angkur mencapai 2,45 MPa dan melampaui kuat tarik izin beton aktual sebesar 1,86 MPa. Evaluasi kapasitas geser menunjukkan bahwa 11 node tidak memenuhi kriteria AASHTO, sedangkan masing-masing 18 node tidak memenuhi RSNI T-12:2004 dan SNI 2847:2019. Setelah pengaruh creep dan susut diperhitungkan, angka keamanan geser minimum menurun sekitar 13,9%, dari 0,79 menjadi 0,68. Lokasi retak hasil inspeksi juga berimpit dengan zona yang memiliki tegangan tarik utama tinggi dan kapasitas geser rendah pada model FEM.

Dengan demikian, keretakan web tidak disebabkan oleh satu faktor tunggal, tetapi oleh interaksi antara defisit kapasitas geser, konsentrasi tegangan pada blok angkur, tambahan tegangan geser akibat pengangkatan tendon, kehilangan gaya prategang jangka panjang, dan rendahnya mutu beton inti eksisting. Untuk meningkatkan keamanan, keandalan, dan umur layan struktur, diperlukan evaluasi dan perencanaan perkuatan pada zona kritis serta pemantauan berkala melalui inspeksi retak dan Structural Health Monitoring System. Alternatif perkuatan seperti external post-tensioning atau CFRP pada dinding web, serta optimasi konfigurasi penampang termasuk sistem multi-cell box girder, perlu dikaji lebih lanjut melalui pemodelan, desain, dan verifikasi khusus sebelum diterapkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Xu, L. Dehua, M. Chunyu, W. Peihe, and W. Puxu, "Construction monitoring of a long-span prestressed concrete continuous box girder bridge with variable sections," *Acad. J. Archit. Geotech. Eng.*, vol. 5, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.25236/ajage.2023.050101.
- [2] M. A. Haider, M. Batikha, and T. Elhag, "Precast versus cast in-situ concrete in the construction of post-tensioned box-girder bridges: Span effect," *Struct. Concr.*, vol. 21, no. 1, pp. 56–64, Jul. 2019, doi: 10.1002/suco.201800263.
- [3] J. Corven, "Post-tensioned Box Girder Design Manual," Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, 2016.
- [4] D. Huang and B. Hu, "Evaluation of Cracks of Hathaway Precast Concrete Segmental Box Girder Bridge," presented at the International Association for Bridge and Structural Engineering, 2012, pp. 1–8.

- [5] Z. Q. He, Z. J. Ma, and Z. Liu, "Crack-based Serviceability Assessment of Post-tensioned Segmental Concrete Box-girder Bridges," pp. 693–714, 2021.
- [6] J. Baran, V. Borzovič, and Ž. Šenšelová, "Shear Assessment of Existing Prestressed Box Girder Bridge," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1203, 2021.
- [7] A. Okeil, "Allowable Tensile Stress for Webs of Prestressed Segmental Concrete Bridges," *ACI Struct. J.*, pp. 488–495, 2006.
- [8] A. K. El-Sayed, A. I. Al-Negheimish, A. M. Alhozaimy, and M. A. Al-Saawani, "Evaluation of Web Shear Design Procedures for Precast Prestressed Hollow Core Slabs," *Buildings*, vol. 13, no. 1, p. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/buildings13010023.
- [9] K. Yudoprasetyo, Y. Tajunnisa, R. Affandhie, and S. Suwandi, "Evaluasi Kondisi Struktur Terkini dan Rekomendasi Perkuatan pada Gedung Perkantoran di Surabaya," *Sewagati*, vol. 8, pp. 2336–2346, Nov. 2024, doi: 10.12962/j26139960.v8i6.2179.
- [10] M. A. Alrasyidi, M. F. Rosyidi, K. Yudoprasetyo, P. Al Munawaroh, and A. D. N. Anggraini, "Analisis pengaruh lead rubber bearing terhadap kinerja pilar konvensional pada struktur jembatan highway ortotropik dengan non linear time history analysis," *J. Bangunan Teori Prakt. Penelit. Dan Pengajaran Tek. Bangunan*, vol. 31, no. 1, pp. 1–12, 2026, doi: 10.17977/um071v31i12026p1-12.
- [11] Moh Fadhlan Rosyidi, A. Susanto, K. Yudoprasetyo, and M. A. Alrasyidi, "EVALUASI DAN PERKUATAN BETON BERTULANG STRUKTUR SILO KERUCUT," *Bangunan Teori Prakt. Penelit. Dan Pengajaran Tek. Bangunan*, vol. 30, no. 2, pp. 169–180, Oct. 2025, doi: 10.17977/um071v30i22025p169-180.
- [12] Z.-Q. He, M. Tang, T. Xu, Z. Liu, and Z. Ma, "Additional Shear Stresses in Webs of Segmental Concrete Bridges Due to Anchorage of Cantilever Tendons," *J. Bridge Eng.*, vol. 26, Apr. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001750.
- [13] Y. Jin, C. Sun, H. Liu, and D. Xu, "Analysis on the causes of cracking and excessive deflection of long span box girder bridges based on space frame lattice models," *Structures*, vol. 50, pp. 464–481, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2022.11.014.
- [14] Y.-J. Chen, X.-C. Huang, S.-Z. Chen, L.-Y. Wang, J.-W. Zhong, and H. Cheng, "Propagation Effect Analysis of Existing Cracks in Box Girder Bridges Based on the Criterion of Compound Crack Propagation," *Buildings*, vol. 14, p. 2958, Sep. 2024, doi: 10.3390/buildings14092958.
- [15] G. Cao, J. Shen, L. Yang, K. Li, and Z. Li, "Experimental and Modeling Study on Long-Term Deformation of Three-Span Prestressed Concrete Continuous Box-Girder Bridge Model after Cracking," *J. Bridge Eng.*, vol. 29, Oct. 2024, doi: 10.1061/JBENF2.BEENG-6725.
- [16] U. Pant and J. Shrestha, "Framework for assessing bridge quality index based on the correlation of non-destructive test results," *Heliyon*, vol. 10, p. e26392, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e26392.
- [17] Y. M. Shalaby, M. Badawy, G. A. Ebrahim, and A. M. Abdelalim, "Condition assessment of concrete structures using automated crack detection method for different concrete surface types based on image processing," *Discov. Civ. Eng.*, vol. 1, no. 1, p. 81, Sep. 2024, doi: 10.1007/s44290-024-00089-5.
- [18] Y. J. U. Mangasi, N. K. Kirana, J. Sjah, N. Handika, and E. Vincens, "Correlation of rebound hammer and ultrasonic pulse velocity methods for instant and additive-enhanced concrete," *Struct. Monit. Maint.*, vol. 11, no. 1, pp. 41–55, 2024, doi: 10.12989/smm.2024.11.1.041.
- [19] S.-H. Kwon, J.-S. Lee, and H.-K. Kim, "On determination protocols of characteristic in-situ compressive strength of concrete for existing structure: Case study with core samples from actual bridges," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 20, p. e03031, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03031.
- [20] M. Sigit Darmawan, R. Bayuaji, R. B. Anugraha, D. A. Saputra, and M. A. Victoriawan, "Case study of performance of a jetty structure after 25 years of exposure in a marine environment considering earthquake load," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 156, p. 107831, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107831.
- [21] "Index - LTBP Bridge Performance Primer , December 2013 - FHWA-HRT-13-051." Accessed: Jul. 22, 2026. [Online]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/ltpb/13051/>
- [22] N. Bertola, Y. Reuland, and E. Brühwiler, "Sensing the structural behavior: A perspective on the usefulness of monitoring information for bridge examination," *Front. Built Environ.*, vol. 8, p. 1045134, Jan. 2023, doi: 10.3389/fbuil.2022.1045134.
- [23] M. Debees, F. Lülecı, C. Dong, and N. Catbas, "Investigating the Increase in Load Rating and Reliability of a Prestressed Concrete Bridge When Utilizing Field-Derived Distribution and Impact Factors," *J. Bridge Eng.*, vol. 29, Dec. 2023, doi: 10.1061/JBENF2.BEENG-6485.
- [24] M. D'Amato et al., "The Development and Statistical Analysis of a Material Strength Database of Existing Italian Prestressed Concrete Bridges," *Infrastructures*, vol. 10, no. 8, p. 203, Aug. 2025, doi: 10.3390/infrastructures10080203.

- [25] Badan Standardisasi Nasional, “Perancangan jembatan terhadap beban gempa,” Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, National Standard SNI 2833:2016, 2016. [Online]. Available: <https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/10990-sni28332016>
- [26] S. Ojha, P. Pal, and P. K. Mehta, “Computational analysis of curved prestressed concrete box-girder bridges using finite element method,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 7050, Feb. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-91172-z.
- [27] “Insights into structural assessment and long-term effects of a post-tensioned multispans concrete box girder bridge with vertically prestressed internal joints,” *Structures*, vol. 63, p. 106396, May 2024, doi: 10.1016/j.istruc.2024.106396.
- [28] E. Andrade Borges, A. T. Slobbe, G. Eumelen, B. Broek, J. Doorgeest, and Y. Yang, “Impact of creep and shrinkage models in predicting deflection and prestress losses of balanced cantilever box girder bridges: A case study with multi-decade deflection measurements,” *Struct. Concr.*, p. n/a-n/a, May 2026, doi: 10.1002/suco.70646.
- [29] Badan Standardisasi Nasional, “Perencanaan struktur beton untuk jembatan,” Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, National Draft Standard RSNI T-12-2004, 2004.
- [30] Badan Standardisasi Nasional, “Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan,” Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, SNI 2847:2019, 2019.
- [31] American Association of State Highway and Transportation Officials, “AASHTO LRFD bridge design specifications,” American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.
- [32] M. A. Uddin, “WEIGHTED EFFECT OF CONCENTRATED CRACKING ON THE STRUCTURAL INTEGRITY OF CONCRETE BRIDGE DECKS,” west virginia university libraries, 2024.
- [33] K. Yudoprasetyo, I. R. Hariyanto, Moh. F. Rosyidi, and P. Al Manwaroh, “Aplikasi Teorema Castigliano untuk Analisis Defleksi pada Desain Jembatan Beton Prategang: Pendekatan Metode Energi untuk Evaluasi Kinerja Struktural,” *RIGGS J. Artif. Intell. Digit. Bus.*, vol. 4, no. 4, pp. 10558–10572, Jan. 2026, doi: 10.31004/riggs.v4i4.5245.