

プレキャスト PC 床版による道路橋更新技術の開発

ーループ継手工法の施工性を改善した新たな継手工法の開発ー

Method for Renewing Precast Prestressed Concrete Slabs Applicable to Highways

- A New Joining Method for Improved Efficiency vs. the Loop Joint Method -

川口昇平* 守屋裕兄** 藤井伸介*** 三澤孝史****

要 旨

道路橋のプレキャスト PC 床版の施工性向上を目的として、PC 床版の継手部の鉄筋を矩形のスパイラル筋で拘束することにより在来工法のループ継手工法と同等の性能をもつ接合法を開発した。このループ継手工法では、ループ筋の内側に側方より橋軸直角方向の鉄筋を挿入する作業が必要であるが、矩形スパイラル筋は床版上面から挿入が可能のため、配筋作業の効率性が高い。今回、この新たな継手工法について、静的曲げ載荷試験ならびに輪荷重走行試験を実施し、耐荷性能と 100 年相当の交通荷重に対する疲労耐久性を確認した。加えて、実物大の試験体を用いた施工試験を行い、ループ継手工法に比べて、接合部の配筋にかかる作業時間を 75%低減できることを確認した。

キーワード：プレキャスト PC 床版、継手構造、輪荷重走行試験、疲労耐久性、半断面施工

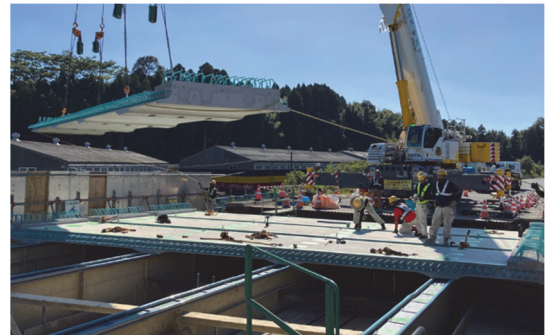
1. まえがき

近年、高速道路が果たす役割はますます重要となっており、高速自動車国道などの幹線道路網は、物流用に一定の通行量を確保することが求められる。そのため、道路網の更新工事においては、車線減少や片側通行など、完全通行止めとならないように施工されることが多い。複数車線の一部車線を開放する半断面施工の場合、PC 床版の継手箇所および延長が増えることから、継手の施工性の向上が課題となっている。このような背景から、道路橋のプレキャスト PC 床版の取替工事（写真－１）の施工性向上を目的として、PC 床版の継手部の鉄筋を矩形のスパイラル筋（以下、矩形スパイラル筋）で拘束することにより継手部の接合力を高める新たな接合法を開発した。この工法について、試験により耐荷性と耐久性、施工性について検証した結果を報告する。

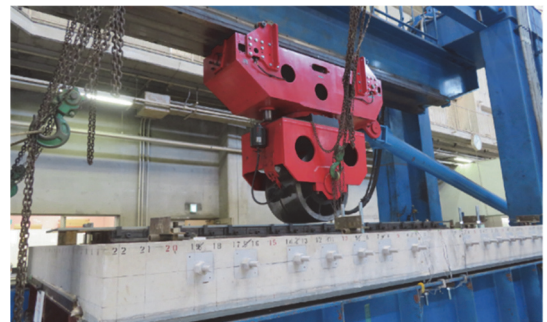
2. PC 床版の継手の要求性能

PC 床版の継手に要求される性能について、NEXCO 3 社は、接合構造の疲労耐久性について、耐用年数 100 年以上が確保できることを確認するため、2019 年より、動的載荷による輪荷重走行試験（写真－２）を行い、その性能証明書の提出を求めている。耐用年数 100 年間に相

当する疲労耐久性として、荷重（250kN）と繰り返し載荷回数（10 万回）の事例が設計要領^りの解説に示されており、その条件をクリアした接合構造が、実際の床版取替工事で適用されている。



写真－１ PC 床版の取替工事における新床版架設の状況



写真－２ 輪荷重走行試験の状況(土木研究所)

*技術本部技術研究所新領域研究グループ **土木本部土木技術部 ***土木本部土木設計部 ****技術本部技術研究所

3. Z スパイラル工法の特徴

橋軸方向（車両走行方向）の接合構造の標準工法として NEXCO 3 社が採用しているループ継手工法と、当社と昭和コンクリート工業株式会社が共同開発したループ筋と矩形スパイラル筋を組み合わせた継手工法（以下、Z スパイラル工法）の配筋の比較を図-1 に示す。標準工法であるループ継手工法では、ループ筋の中へ橋軸直角方向に 6 本の鉄筋（以下、通し筋）を後挿入し組み立てることで接合部のループ筋同士を一体化させる。しかし、図-2 のようにループ筋の一部の曲げ半径を変更したり、足場を設置したり、通し筋を挿入するための作業スペースを確保することが施工上の課題となっている。一方、Z スパイラル工法は、ループ筋の構造的なメリットを生かしつつ、矩形スパイラル筋を上から挿入するだけなので、通し筋の配筋および結束作業を大幅に省力化できる。ループ継手の場合、図-3 のようにループ筋の直線部が付着力で抵抗し、曲線部が内側のコンクリートからの支圧力により抵抗することで、直鉄筋の場合より短い継手長で、左右の PC 床版に応力を伝達することができる。しかし、ループ筋に囲われたコンクリート（以下、コアコンクリート）の応力状態については十分に明らかにはなっていない。一方、Z スパイラル工法についても、ループ筋を用いており、直線部には付着力と曲線部には支圧力が発生する。その上で、矩形スパイラル筋が果たす役割について、以下 3 つの機構があると考えられる。

- i. 矩形スパイラル筋の下側の鉄筋が橋軸方向に補強効果を発揮し（図-3 II、III の⇐）、接合部の橋軸方向の抵抗性が高まる
- ii. ループ筋が引張力により引き抜けようとする際に、コアコンクリートが水平方向の圧縮を受け、挟まれたコンクリートが鉛直方向に膨らもうとする（図-3 II の→）のに対し、矩形スパイラル筋が変形を拘束し（図-3 II の⇐）、ループ筋の引き抜け抵抗性が増す
- iii. ループ筋が引き抜けようとする際に、ループ筋の先端から斜め方向に発生するせん断力（図-3 III の破線→）に対し、矩形スパイラル筋が継手部に生じる曲げ応力に対して抵抗するブリッジ効果が生じる。

なお、ii でコアコンクリートが水平方向の圧縮を受け、挟まれたコンクリートは鉛直方向だけでなく、水平奥行き方向にも膨らもうとするが、実際の床版は十分に奥行き方向に長く、応力が分散するため、局所的に載荷する輪荷重が奥行き方向の膨張に及ぼす影響は小さいと予想される。そのため、矩形スパイラル筋はループ継手における通し筋が果たす機能のうち、ループ筋の支圧力に抵抗し、膨張を抑制する機能を代替する効果を有していると考えられる。

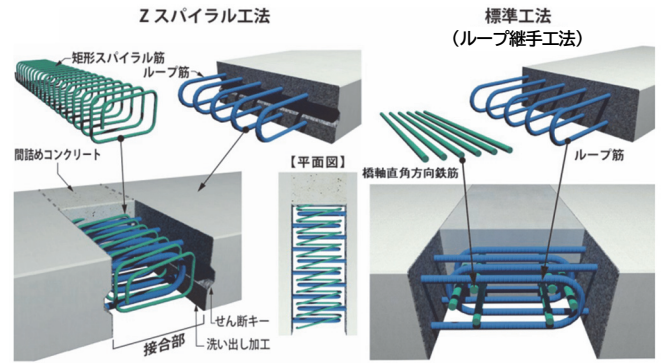


図-1 Z スパイラル工法とループ継手の接合部配筋の比較

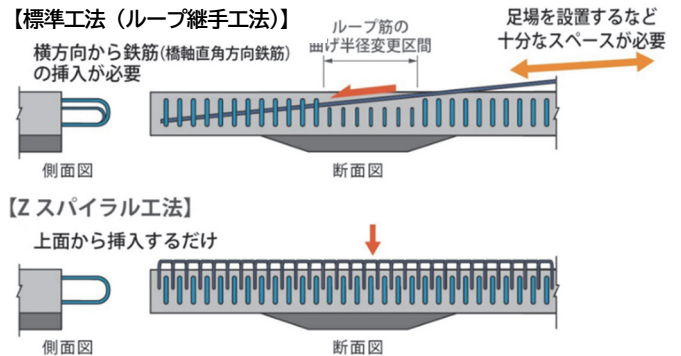


図-2 ループ継手の通し筋と矩形スパイラル筋の配筋の違い²⁾

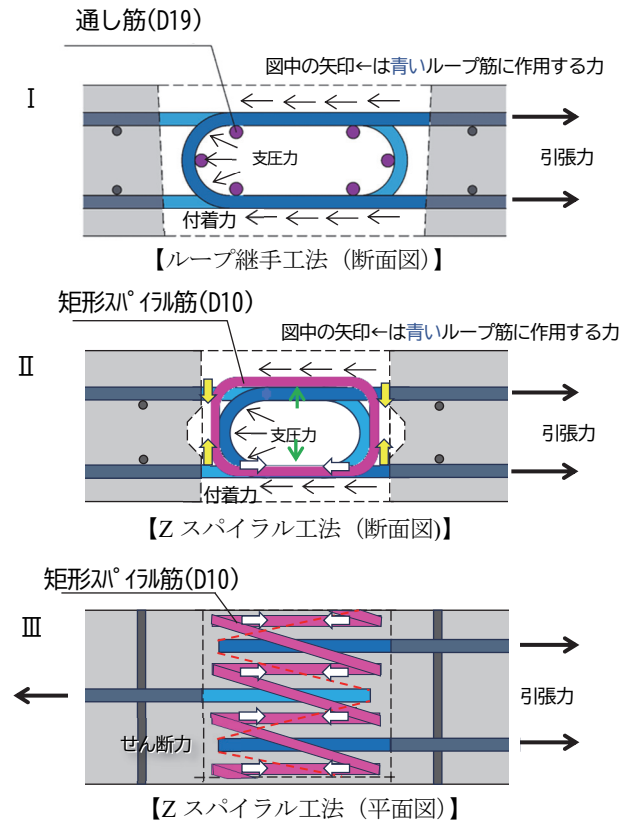


図-3 ループ継手と Z スパイラルの引き抜き抵抗のイメージ

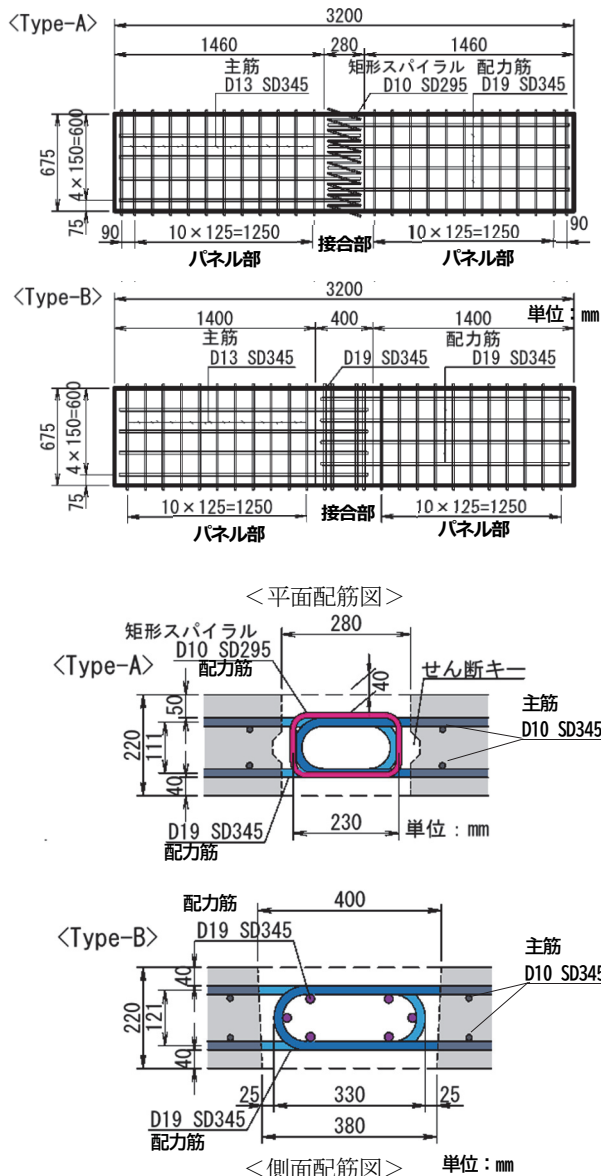
4. 継手構造の性能確認

4.1 静的曲げ載荷試験

載荷時の接合部の補強鉄筋ならびにループ筋に作用する応力の把握を目的に、静的曲げ載荷試験（写真－3）を実施した²⁾。試験体は、矩形スパイラル筋による継手構造（Type-A）と標準工法であるループ継手（Type-B）の2ケースを実施した。図－4に試験体の概要を示す。パネル部および接合部のコンクリートは、床版取替の標準工法の仕様（設計基準強度：50N/mm²）とし、パネル部には普通コンクリート、接合部には膨張材を添加した早強コンクリートを用いた。

a. 試験方法

図－5に載荷方法を示す。載荷試験は、油圧ジャッキ（容量 1MN）により、支間 2,800mm、載荷幅 800mm、二点支持の単調増加で載荷した。配力筋の降伏までは荷重制御により、配力筋降伏後は変位制御により載荷した。

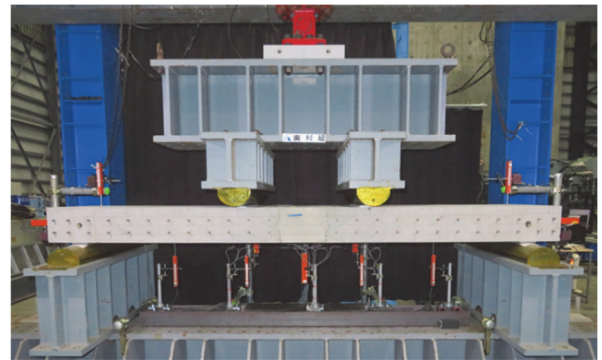


図－4 静的曲げ載荷試験体の配筋図²⁾

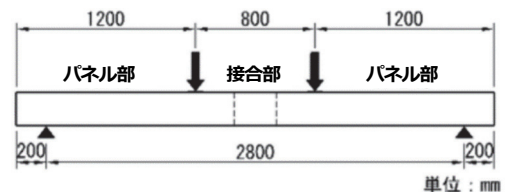
b. 試験結果

載荷荷重と変位の関係を図－6に示す。図中の降伏荷重及び設計荷重は、床版部の断面計算で引張鉄筋が降伏強度及び許容応力度（140N/mm²）に達する荷重である。なお、材料試験の結果から、引張鉄筋（D19（SD345））の降伏応力は 384N/mm²、その時のひずみは 2163 μ であった。また、最初に配力筋が降伏した時の載荷荷重を丸印で示した。荷重と変位の関係が比例関係にある荷重 40kN 以下の初期剛性については、Type-A と Type-B はほぼ同等であった。

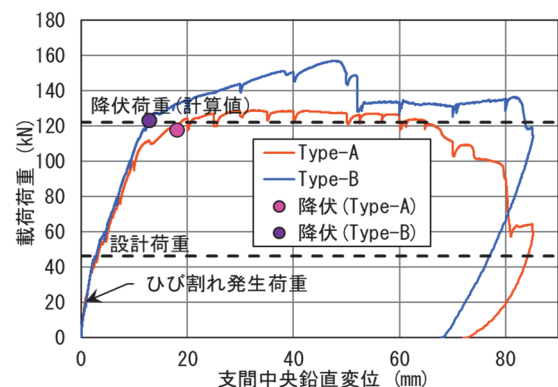
図－7に載荷荷重と矩形スパイラル筋のひずみの関係を示す。下側（引張側）の計測点 SP3 では、曲げモーメントによる引張ひずみが発生し、80kN を超えて急激に引張ひずみが増加した。側部の SP2、SP4 については、小さな荷重の段階から引張ひずみが発生し、変形に伴い引張ひずみが増加した。これは、接合部のループ筋が左右に引っ張られる際に、配力筋の曲線部の外側に配置した矩形スパイラル筋が、内部のコンクリートの変形（特に上下への膨張）を拘束するため、引張ひずみが生じたものと考えられる。



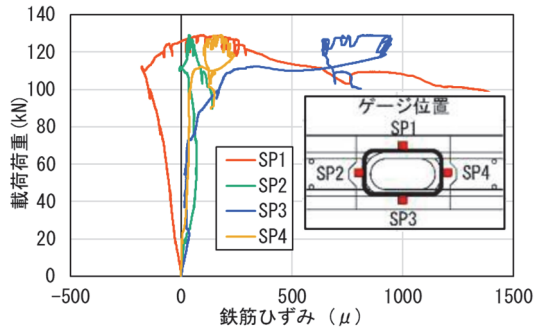
写真－3 静的曲げ載荷試験の様子（Type-A）



図－5 静的曲げ載荷試験の載荷条件²⁾



図－6 載荷荷重と変位の関係²⁾

図－7 載荷荷重と矩形スパイラル筋のひずみの関係²⁾

4.2 輪荷重走行試験

a. 試験体の概要

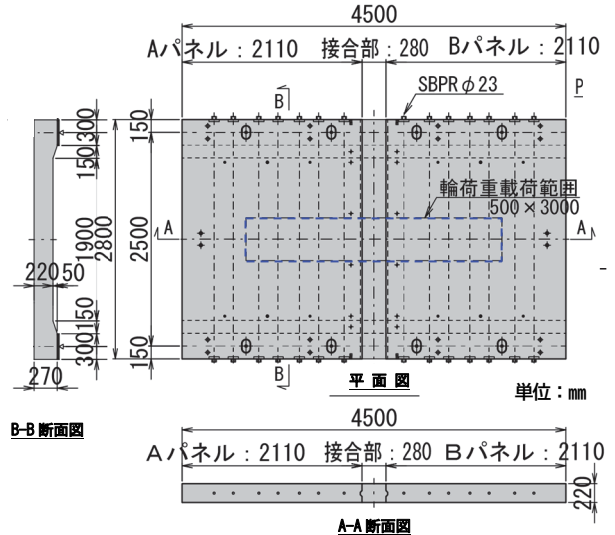
道路全幅に渡る一括取替を想定した横目地の場合（以下、横目地試験体）と、半断面施工を想定した横目地＋縦目地の場合（以下、縦横目地試験体）の2種類の試験体に対し輪荷重走行試験を行った。試験体の製作ならびに試験方法は NEXCO 試験方法¹⁾に準じて行った。試験体の形状を図－8、図－9に、試験体の主要諸元と使用材料を表－1に示す。横目地試験体と縦横目地試験体の寸法はともに、長さ 4,500mm、幅 2,800mm、厚さ 220mm である。横目地試験体は別々に製作したプレキャスト PC パネル 2 枚（A パネル、B パネル）の継手部に Z スパイラル工法を用いて接合して製作した。一方、縦横目地試験体は半断面施工を想定し、1 次施工分を模して A パネルと B パネルを Z スパイラル工法で接合した後、2 次施工分を模した C パネルと D パネルを Z スパイラル工法で接合した。その後接合した AB パネルと CD パネルが接する縦目地に無収縮モルタルを充填し、硬化後に PC 鋼棒 1 本あたり 570kN のポストテンション方式のプレストレスを導入して一体化した。なお、接合部の各鉄筋はエポキシ樹脂塗装を施した。試験体は床版支間長 2,500mm で単純支持し、橋軸方向は弾性支持した。輪荷重走行試験は載荷範囲 500mm×3,000mm（図－8、図－9 中の破線）に対し、直径 700mm、幅 500mm の鉄輪を走行させて行った。

b. 輪荷重試験の載荷方法

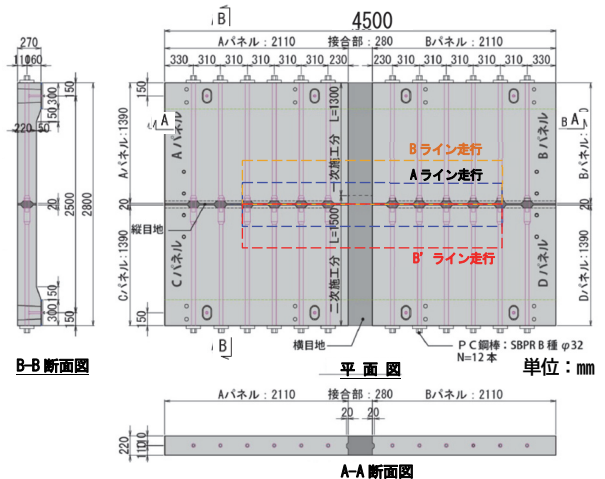
横目地試験体については、NEXCO 試験方法¹⁾に、耐用年数 100 年相当の評価試験として示されている 250kN×10 万回の載荷を実施し、除荷後に漏水確認試験を行った。一方、縦横目地試験体については、250kN×10 万回を前後に 5 万回ずつに分け、250kN の荷重をセンターライン（A ライン）から 250mm ずつオフセットした載荷範囲（B ライン、B'ライン）に各 3 万回、合計 16 万回の載荷を実施し、除荷後に漏水確認試験を行った。これは、センターラインに曲げとせん断の両方を組み合わせて載荷する目的で行っている。その後、いずれの試験体も破壊時までの性状を把握するため、荷重を漸増して 31 万回まで載荷を行った（表－2 参照）。

c. 輪荷重走行試験の結果

横目地試験体の 10 万回載荷後のひび割れの状況を図－10 に示す。パネル部の載荷範囲を中心に、300mm 程度の幅で梁状化し、一部で横方向に梯子状にひび割れが進展しているものの、接合部はひび割れの進展が限定的であることが分かる。次に縦横目地試験体の 16 万回載



図－8 輪荷重試験体平面図および断面図（横目地）



図－9 輪荷重試験体平面図および断面図（縦横目地）

表－1 輪荷重走行試験体の主要諸元と使用材料

		仕 様
寸 法		L:4,500mm×W:2,800mm×d:220mm
床版材		普通コンクリート（設計強度 50N/mm ² ）
横目地材		早強コンクリート（設計強度 50N/mm ² ） 膨張材 20kg/m ³
縦目地材		無収縮モルタル（設計強度 50N/mm ² ）
鉄 筋	床版部	主筋 D13、配力筋 D19（SD345）
	横目地	矩形スパイラル筋 D10（SD295）
PC 鋼線		SBPR B 種 φ23mm（横目地試験体）
		SBPR B 種 φ32mm（縦横目地試験体）

表－2 輪荷重走行試験の載荷荷重と載荷回数

試験体名	載荷位置	載荷荷重					延べ 走行回数
		250kN	300kN	350kN	400kN	490kN	
横目地 試験体	Aライン	10万回	4万回	4万回	4万回	9万回	31万回
	Bライン	5万回	5万回	4万回	4万回	1万回	
縦横目地 試験体	B'ライン	3万回			1万回		31万回
	B'ライン	3万回				1万回	

荷後のひび割れの状況を図-11 に示す。5 万回（A コース 1 回目終了）までは、支間中央付近から橋軸直角方向ひび割れが進展した。走行コースを B もしくは B' に変更すると主にそれぞれの走行コースの周囲までひび割れが進展する傾向が見られた。なお、除荷時のひび割れ幅は表-3 の通りである。いずれの試験体も輪荷重走行試験後に実施する漏水試験において漏水は発生しなかった。なお、縦横目地試験体については、途中で走行路をオフセットしているため、A ラインでの走行回数が 10 万回に達する 16 万回で漏水試験を行った。250kN×10 万回走行後の試験結果を整理すると以下になる。

- i. 横目地試験体および縦横目地試験体について、載荷終了後の漏水確認試験で下面からの漏水は確認されず、100 年相当の耐久性を有している
- ii. 250kN 載荷条件下での載荷開始時からのたわみ増加は、横目地試験体で 0.38mm、縦横目地試験体では 0.03mm であり、いずれもたわみ増加量は微小であった
- iii. 250kN 載荷条件下での最大ひび割れ幅は、横目地試験体のパネル部 0.10mm、接合部 0.08mm と差がなく、縦横目地試験体ではパネル部 0.10mm、接合部はひび割れがなかったことから、接合部は床版部と同等以上の疲労耐久性を有している

5. Z スパイラル工法の施工性確認試験

5.1 施工性確認試験の概要

a. 試験条件

Z スパイラル工法とループ継手工法の実物大模擬床版を製作し、施工性の比較を行った。床版幅を 1.0m、長さを 10.2m とし、この床版を橋軸方向に 4 枚架設することで接合部を 3 列構築した（図-12 参照）。作業員 4 名で鉄筋の地組み、挿入、結束線による緊結（以下、結束）までの配筋作業を行った。矩形スパイラル筋の延長は約 1m/本であり、挿入前に 1 巻き分ラップさせて地組みし、床版上面から挿入後、ループ筋の上筋と矩形スパイラル筋の交差部を結束した。ループ継手では、床版端部からクレーンを利用して 1 本 3.5m の通し筋を順に挿入し仮固定の後、床版上面からループ筋との交点で結束した。

b. 鉄筋挿入時間

模擬床版 3 列の配筋作業にかかる施工時間を計測し、Z スパイラル工法とループ継手の施工時間を比較した。ループ継手工法では、通し筋の挿入時にループ筋と干渉しないよう写真-4 のように 3～4 名の作業員が連携し、奥まで通し筋を挿入し、仮固定するまでに 15 分を要した。一方、Z スパイラル工法では、1 人の作業員約 30 秒で挿入し、補強筋の仮固定までの作業を 3 分で完了した。なお、矩形スパイラル筋の配置位置の調整には、写真-5 に示すセンタリングスペーサーを使用した。

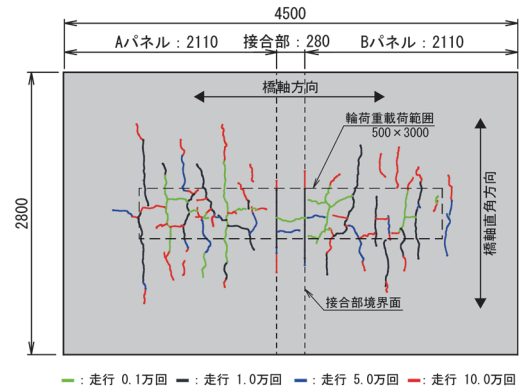


図-10 下面ひび割れ発生状況（横目地試験体）³⁾

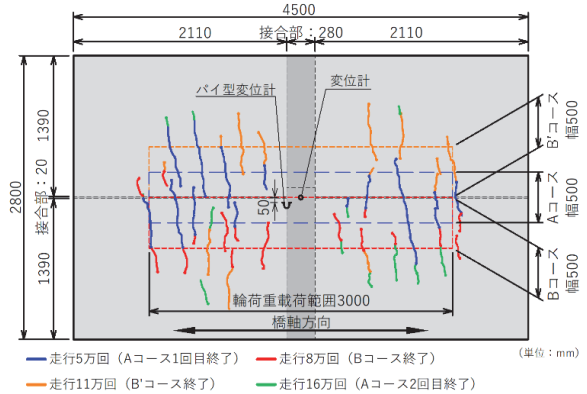


図-11 床版下面のひび割れ状況（縦横目地試験体）

表-3 輪荷重走行試験後のひび割れ幅

試験体名	パネル部	接合部(横目地部)
横目地試験体 (10 万回走行後)	0.10mm	0.08mm
縦横目地試験体 (16 万回走行後)	0.10mm	ひび割れなし

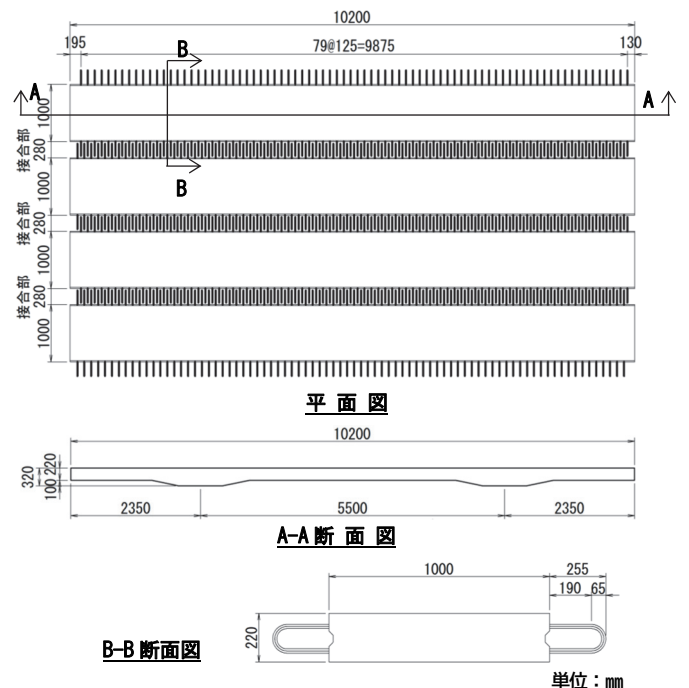


図-12 施工性確認試験体の概要図

c. 鉄筋結束時間

矩形スパイラル筋は、下筋は結束せず、上筋のみ 1 カ所と 2 カ所で交互に結束する（写真－6 の赤丸）だけで、らせん形状により鉄筋が一体化され、安定した状態で固定することが可能である。このため、労力のかかるループ継手の中段・下段鉄筋の結束が不要となり、結束時間はループ継手で 25 分を要したのに対し、Z スパイラル工法では 7 分に短縮できた。

d. タッチアップ作業時間

ループ継手工法については、写真－4 に示すように通し筋（ $\phi 19\text{mm}$ 、 $L=3.5\text{m}$ ）を床版側面から挿入する際に、鉄筋間の接触により鉄筋のエポキシ塗装に擦り傷がつく。通常、このような場合はタッチアップ材による補修を行うことになる。一方、Z スパイラル工法では、矩形スパイラル鉄筋を床版上面から挿入するだけのため、タッチアップが必要な塗膜の損傷は発生しなかった。

e. 配筋作業時間

1 列（10.2m）あたりの施工時間を図－13 に示す。鉄筋の地組みから結束までの作業時間は、ループ継手では 40 分であるのに対し、Z スパイラル工法では 10 分となり、接合部の配筋にかかる作業時間を 75%短縮できた。

6. まとめ

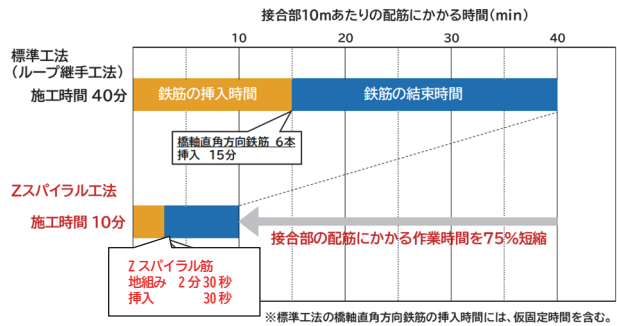
道路橋更新工事の省力化ならびに省人化に繋がる技術として新たな継手工法を開発した。各種試験の結果、Z スパイラル工法について、十分な構造性能に加え、非常に優れた施工性を確認することができた。

7. あとがき

本件は 2022 年度より開発プロジェクトとして取り組んできた成果である。PC 床版については、ほぼ施工実績がなく、知見もない状況から、約 3 年間で現場に適用可能なレベルにまで技術開発を進められたのは、社外連携の賜物と考えている。まずは、プロジェクト全般に渡りご指導頂いた大阪大学名誉教授の松井繁之先生に謝意を表します。また、プレキャストメーカーの昭和コンクリート工業株式会社と共同研究として開発を進められたこともスピードアップに繋がったことから、今後も、知見や技術を持つ大学・企業との連携を図り、効率的かつ効果的な研究開発を推進していきたい。

【参考文献】

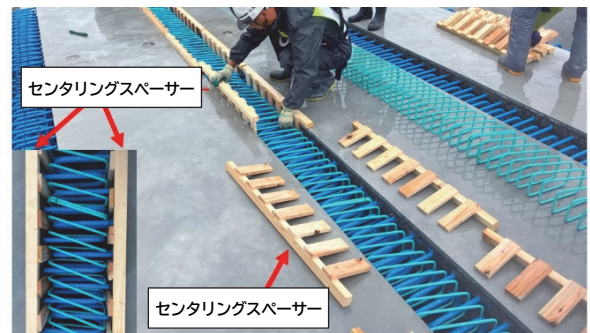
- 1) 東日本高速道路会社(株)、中日本高速道路会社(株)、西日本高速道路会社(株)、設計要領第二集 橋梁保全編 2024.7
- 2) 御器谷直子、守屋裕兄、三澤孝史、川口昇平、坂井 悟、吉田辰也、岩山健治、国井優嗣、松井繁之、PC



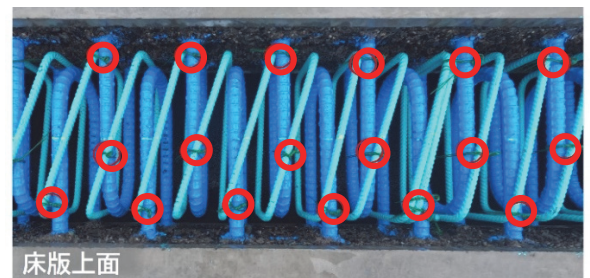
図－13 接合部の配筋にかかる作業時間の比較



写真－4 ループ継手工法の鉄筋挿入状況



写真－5 矩形スパイラル筋の位置調整方法



写真－6 矩形スパイラル筋の結束状況

床版の新しい接合工法（Z スパイラル工法）の開発
その1〈静的載荷試験〉、土木学会全国大会第79回年次学術講演会、VI-526、2024.9

- 3) 坂井 悟、吉田辰也、岩山健治、国井優嗣、守屋裕兄、三澤孝史、川口昇平、藤井伸介、松井繁之、PC 床版の新しい接合工法（Z スパイラル工法）の開発
その2〈輪荷重走行試験〉、土木学会第79回年次学術講演会 VI-527、2024.9