

工場製作プレキャストセグメント工法におけるセグメントの接合方法に関する研究

酒井 秀昭*

1. はじめに

わが国における PC 橋は、1952 年に長生橋（石川県七尾市）が架設されて以来半世紀を経て、急速な進歩を遂げている。長生橋は、支間 3.6 m の工場製作のプレテンション方式の桁を人力と馬車で架設したものである。現在では、支間 260 m の斜張橋（伊唐大橋）や支間 275 m の PC・鋼複合エクストラードズド橋（木曾川橋・揖斐川）などが完成しており、新たな構造形式の開発や橋梁規模の長大化がなされている。

その施工方法は、径間長が 25 m 程度以下の橋梁においてプレテンション方式の工場製作のプレキャスト桁による施工が行われているが、その他の形式や規模においては、一部を除き、ほとんどが現場で型枠、鉄筋、PC 鋼材およびコンクリートの施工を行う場所打ち工法が主流となっている。

これに対して、鋼桁橋や鋼箱桁橋などの鋼橋は、鋼部材を工場で作製し、現場で溶接またはボルトで接合する工法が行われており、現場工期の短縮や品質管理の向上が図られている。また、建築分野においても、鉄骨や PC パネル等を用いるプレキャスト化がなされており、現場工期の大幅な短縮等が図られている。

したがって、PC 橋においても、プレキャスト化による現場工期の短縮、品質管理の向上や工事費の削減が必要となっている。

場所打ち工法による PC 橋の課題を解決する方策として、ショートラインマッチキャスト方式によるプレキャストセグメント工法が開発され、欧米などでは積極的に採用が行われており、工事費の削減や現場工期の短縮などの大きな成果を上げている。

わが国におけるショートラインマッチキャスト方式のプレキャストセグメント工法による PC 橋は、1997 年に完成した松山自動車道の重信高架橋が最初であり、それ以来高速道路橋では 10 橋を超える橋梁が施工されている¹⁾が、一般的に普及した工法とはなっていない。わが国において、本工法を採用する場合の課題については、以下のとおりである。

- ①セグメントを製作および貯蔵する広いヤードが必要となる。
- ②欧米と比べて一般公道を運搬できる貨物の重量や大きさの制限が厳しく、一般公道を運搬する場合はセグメ

ントの重量が 30 t 以下に制限される。

③製作設備にかかる費用が多いため、施工規模がある程度大きくないと他の工法と比べて工事費が割高となる。筆者は、これらの課題を解決するため、主桁を一般公道を運搬することが可能な規模のセグメントに分割し、既存の PC プレキャスト工場や架橋地点から離れた箇所でセグメントを製作するプレキャストセグメント工法（以下、「工場製作プレキャストセグメント工法」という。）を開発し、第二東名高速道路の都市内高架橋に採用している。

本論文は、この工場製作プレキャストセグメント工法におけるセグメントの接合方法について論ずるものである。

2. プレキャストセグメント工法の現況

2.1 セグメントの製作

セグメントの製作は、先行して製作したセグメントの端面を型枠として新セグメントを製作し、接合面の一体化を図るマッチキャスト方式が近年広く用いられている。製作にあたっては、図-1 に示すショートライン方式と図-2 に示すロングライン方式とがある。ショートライン方式は、先行して製作したセグメントの端面を型枠として次のセグ

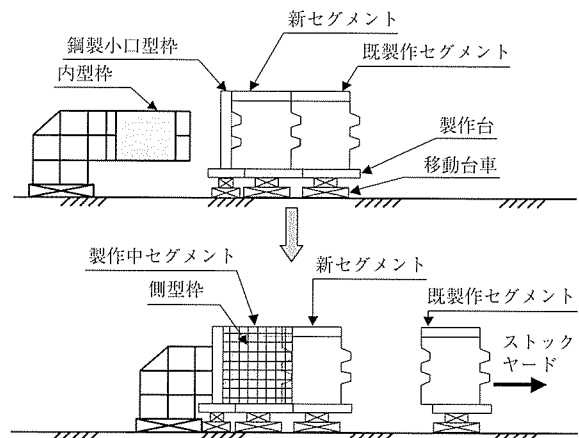


図-1 ショートラインマッチキャスト方式

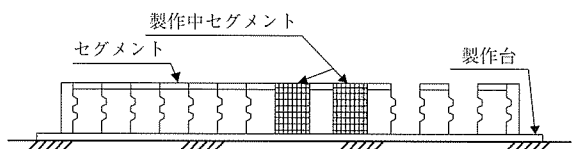


図-2 ロングラインマッチキャスト方式

* Hideaki SAKAI：日本道路公団

メントを順次製作する方式であるので、各セグメントの施工誤差が累積するため、高度な製作精度の確保が必要となるが、ロングライン方式と比較して、セグメントの個数が多い場合に工事費の削減および製作ヤードの縮小が可能となるため広く用いられている¹⁾。

2.2 セグメントの分割と接合

ショートラインマッチキャスト方式のプレキャストセグメント工法については、松山自動車道の重信高架橋（1997年完成）に初めて本格的に採用されてから、第二名神高速道路弥富高架橋（1999年完成）などの高速道路の橋梁に採用されてきた。

国内でプレキャストセグメント工法を採用している弥富高架橋などの橋梁は、架設箇所近傍に大きなセグメント製作ヤード（3～10万m²）を構築しセグメントを製作する現場ヤード製作方式が多く用いられている。現場ヤード製作方式においては、当該橋梁の規模に適合したセグメント（重量40～100t）の製作および運搬が可能となるため、一般に図-3に示すように1主箱桁断面とし、セグメントを橋軸直角方向のみに分割して、橋軸方向に2～3mの長さのセグメントを製作している。

分割して製作したセグメントは、架橋地点において橋軸方向に接合している。橋軸方向のセグメント相互の接合面は、鉄筋およびコンクリートが連続していないため、曲げモーメントやせん断力などに対して、図-4に示すように、せん断キーを設けて、橋軸方向にプレストレスを与え接合している。

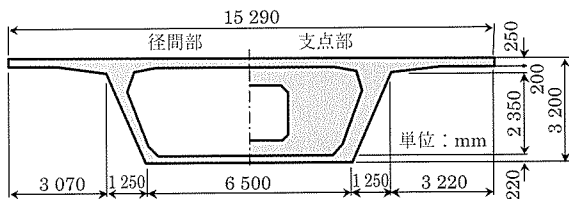


図-3 弥富高架橋のセグメント形状

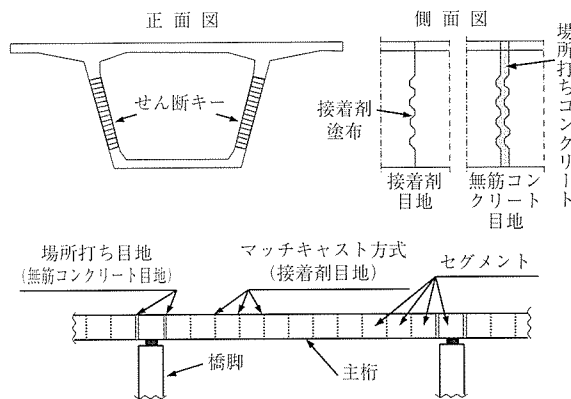


図-4 セグメントの接合方法

隣接するセグメント相互の接合面は、マッチキャスト方式の場合は、橋面からの雨水等の浸入を防ぐこと、内ケーブルやコンクリートの耐久性を向上させること、セグメント相互の密着性を向上させることなどを目的として、接合

面に、エポキシ樹脂系接着剤やアクリル樹脂系接着剤を塗布する接着剤目地を用いている。マッチキャスト方式で製作ができない箇所においては、セグメント間に10～20cm幅の場所打ちコンクリートによる無筋コンクリート目地を用いている。

2.3 セグメント製作上の課題

過去の事例では、わが国における一般公道を運搬するセグメントの重量の制限が、『特認車両』においても30t以下となっている。したがって、図-5に示すような片側3車線の都市内高架橋などでは、運搬可能重量を最大30tとすると、セグメント長が1.5m以下となる。

この場合は、扁平なセグメントとなるため、セグメント製作時に、新設セグメントの水和熱により、接触している既設セグメントの端面の温度が上昇し既設セグメントに橋軸方向のそりが生じ、新設セグメントがその形状に合わせて硬化するため、新設セグメントが橋軸方向に変形し、セグメント架設時に適切な架設形状管理が困難となる。過去の施工事例では、セグメントの幅を長さで除した値が6程度以上の場合に変形による問題が顕在化するとされており、本ケースでは10以上となるため、その施工がきわめて困難となる。

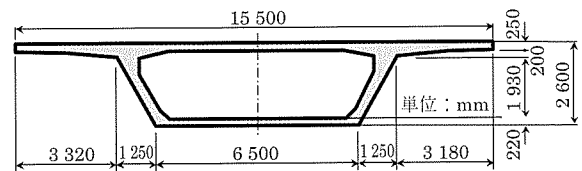


図-5 片側3車線のセグメント形状

3. 研究の目的

本研究では、架橋地点に隣接したセグメント製作ヤードの確保が困難な橋梁に工場製作プレキャストセグメント工法を採用し、工事費の削減や現場工期の大幅な短縮を図ることを目的に、セグメントの合理的な分割方法と接合方法について検討を行った。

その結果、図-5に示した形状を、図-6に示すように、箱桁を2個並列とした2主箱桁断面とし、橋軸方向にも分割し、接合部により接合することにより、本工法の採用を可能とする断面形状を開発した。図-6に示したケースにおいては、接合部を設けてセグメントを橋軸方向にも分割する必要があるが、セグメント長は最大約3mでセグメン

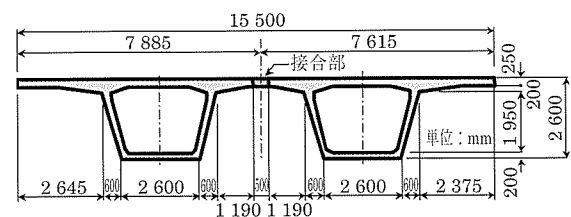


図-6 本研究における2主箱桁断面の開発案

トの幅を長さで除した値が2.5となり、変形が生じる可能性も少なくなることがわかったが、接合部の構造や設計方法が不明確であった。

本研究においては、図-6に示した断面形状の採用を可能とするため、接合部の構造を開発するとともに、その設計方法の確立を目的に、梁モデルによる静的載荷試験および実物大の部分試験体による輪荷重の移動疲労載荷試験を実施した。

4. 接合部の構造

4.1 施工方法

図-6に示した2主桁断面の施工は、図-7に示すように、橋軸方向に分割したセグメントを個別に製作することによって行う。セグメントの床版は、プレテンション方式により、橋軸直角方向にプレストレスを導入する。接合部の床版は、RC構造となり、現場で場所打ち工法により接合される。

セグメントの架設は、一方のセグメントを架設し主桁を一体化した後にもう一方のセグメントを架設し、セグメントを橋軸方向に引き寄せて、プレストレスによりもう一方の主桁を一体化し、その後接合部床版で左右の箱桁を一体化する手順で行なわれる。

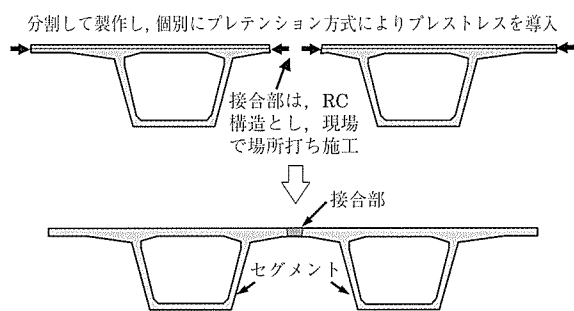


図-7 接合部の施工手順

4.2 設計施工における課題

前述の手順で施工される接合部は、その設計施工において、以下に述べる課題がある。

- ①鉄筋の継手を重ね継手とした場合は、セグメント引き寄せ時に、両セグメントから突出している鉄筋が干渉するため施工が不可能となる。
- ②施工誤差により、鉄筋の位置にずれが生じ、適切な重ね継手の施工ができない。
- ③ねじ加工継手、自動ガス圧接継手、エンクローズ溶接などの継手方法についても、その施工や品質確保が困難となる。
- ④接合部は、後打ちとなるので、セメントの水和や乾燥に伴うひび割れにより、耐久性が低下するおそれがある。

4.3 ダブルループ鉄筋継手の開発

ダブルループ鉄筋継手は、橋軸方向に分割して製作されたセグメントを橋軸直角方向に接合するために、著者が開発した鉄筋継手方法である。その構造は、図-8に示すよ

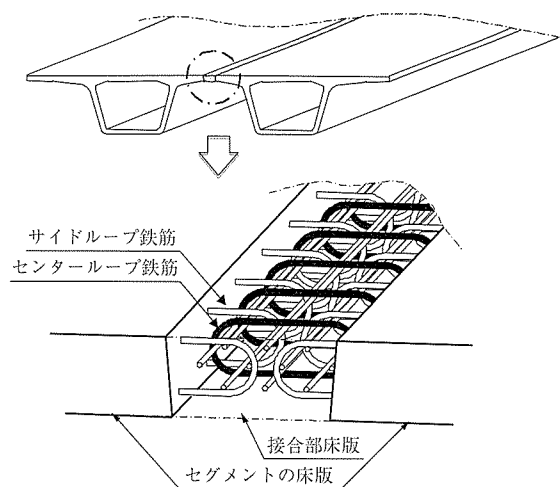


図-8 ダブルループ鉄筋継手の構造

うに、溶接にて閉合されループ状に加工された鉄筋（以下、「センターループ鉄筋」という。）を、セグメント製作時に配置された左右のループ鉄筋（以下、「サイドループ鉄筋」という。）の間に配置するものであり、左右に2箇所のループ継手ができることから、ダブルループ鉄筋継手と名づけたものである。

センターループ鉄筋は、両側の主桁セグメントの一体化が完了した後に配置するため、前項に示した①～③までの設計施工上の課題を解決することができる。また、接合部床版幅も床版下面で50 cmとすることができる。

1箇所のループを有するループ鉄筋継手については、DINの規定²⁾にループ鉄筋継手長が明記されており、わが国においては、この規定に従って、PCプレキャスト床版を有する鋼鉄桁橋のPCプレキャスト床版間の接合に用いられている。これに対し本ダブルループ鉄筋継手は、接合部床版幅を極力狭くするため、DINに規定するループ鉄筋継手長以下の継手長を採用しており、しかも床版の結合部に2箇所の併合ループを用いた新たな継手方法である。

ダブルループ鉄筋継手を有する接合部床版は、RC構造であり、輪荷重が直接作用する部位であること、セメントの水和に起因するひび割れや乾燥に伴うひび割れの発生を抑制する必要があることなどから、その幅を極力狭くすることが望ましい。このような観点から、架設時やコンクリートの打ち込みを考慮した施工性および鉄筋配置性能を考慮して、本研究においては、最小床版幅を500 mmとし、接合部床版上の輪荷重走行に伴う床版劣化による結合部床版の抜け落ちを考慮して、セグメントと接合部床版の界面には勾配を設けた。この結果、接合部床版中心の幅が520 mmとなることから、施工性を考慮してダブルループ鉄筋継手におけるループ継手長（センターループ鉄筋の幅）を図-9に示すように床版中心位置で420 mmとした。DINのループ継手長の規定に従えば、ダブルループ鉄筋継手長は700 mmとなり、本継手長はDINの規定より短いループ継手長となる。

この接合部床版の床版厚は250 mmであり、プレキャストセグメント部に配置されたサイドループ鉄筋およびセン

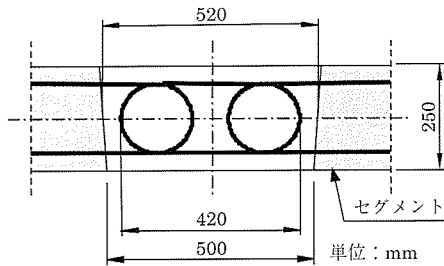


図-9 ダブルループ鉄筋継手

ターループ鉄筋径は、ともに D 19 mm で、鉄筋間隔は 125 mm とする。また、接合部床版の鉄筋のかぶり厚は、セグメントと同様に 35 mm としている。2 箇所閉合ループの中には、図-8 に示したように、各閉合ループの鉄筋の内側に沿わせて、橋軸方向鉄筋を、上下に 2 本、左右に 2 本の計 4 本づつ配置する。上下の 2 本については、床版の橋軸方向曲げ挙動に抵抗させるためのもので、左右の 2 本については、左右のループ鉄筋の拘束効果を期待するとともに組立て鉄筋として配置するものである。

5. ダブルループ鉄筋継手を有する接合部床版の設計方法

5.1 要求性能

ダブルループ鉄筋継手を有する接合部床版は、以下に示す性能を有する必要がある。

- ①セグメント部の床版は、PC 構造として自動車荷重作用時ひび割れを許容しない設計としており、接合部床版も、設計思想を統一するため、ひび割れを許容しない構造とする必要がある。
- ②道路橋として想定される最大の自動車荷重が載荷されても、部材の断面が破壊しない。
- ③高速道路橋の床版として、自動車荷重の繰り返し載荷により、部材の断面が破壊しない。

このため本研究においては、ダブルループ鉄筋継手を有する接合部床版の設計方法を確立することを目的に、道路橋示方書³⁾およびコンクリート標準示方書⁴⁾を参考として、その要求性能を以下のとおり設定した。

- ①道路橋示方書による自動車荷重作用時において、荷重に起因したひび割れが発生しない。
- ②道路橋示方書による終局荷重作用時において、部材断面が破壊しない。
- ③高速道路橋の床版として、50 年以内に疲労により、部材断面が破壊しない。

5.2 設計方法における課題と研究方法

前述の要求性能を満足する設計方法を確立するためには、以下に述べる課題がある。

- ①ダブルループ鉄筋継手を有する接合部床版のコンクリートのひび割れ発生荷重の算定方法を解明する必要がある。
- ②一般に鉄筋継手を有する部材の終局曲げ耐力は、鉄筋継手を有さない部材の終局曲げ耐力の算定方法と同様な方法で算定されるが、ダブルループ鉄筋継手を有す

る部材の終局曲げ耐力の算定方法については、その手法が解明されていないため、試験等によりその手法や力学的挙動を解明する必要がある。

- ③一般に道路橋示方書で設計される床版については、疲労に対する安全性を有していることから、疲労に対する構造物の性能照査を実施していないが、ダブルループ鉄筋継手を有する接合部床版については、その実施事例が無く、疲労に対する安全性を検証するための試験等も実施されていないことから、試験等により疲労に対する安全性について検証する必要がある。

本研究においては、前述の課題を解明し、ダブルループ鉄筋継手を有する接合部床版の設計方法を確立するため、以下に示す試験を実施した。

- ①前述の①および②の課題を解明するための梁モデルによる静的載荷試験
- ②前述の③の課題を解明するための実物大の部分試験体による輪荷重の移動疲労載荷試験

5.3 梁モデルによる静的載荷試験

本試験においては、ダブルループ鉄筋継手を有する接合部床版のコンクリートのひび割れ発生荷重の算定方法を解明すること、終局曲げ耐力の算定方法を解明することおよびその力学的挙動を解明することを目的に、実構造物を模した梁モデルの試験体による静的曲げ載荷試験を行った⁵⁾。

(1) 試験体の形状

試験体は、以下に述べる点を考慮して、図-10 に示す形状および寸法とした。

- ①実構造物での接合部床版の曲げ挙動を的確に把握するため、実寸を基本として形状を決定する。
- ②実構造物での床版形状である床版下側の直線ハンチやサークルハンチが、接合部床版の曲げ挙動に与える直接的影響は小さいと判断し、実構造物である上和会高架橋の接合部床版厚と同様な 25 cm で、版厚一定な床版形状とする。
- ③道路橋示方書においては、主鉄筋方向の曲げモーメントと配力鉄筋方向の曲げモーメントとに分けて、床版の単位幅 (1 m) あたりの設計曲げモーメントを算定し、個別に一方方向の曲げモーメントを受ける梁としてその安全性の照査を行っている。したがって本試験においても、主鉄筋方向 (橋軸直角方向) の曲げモー

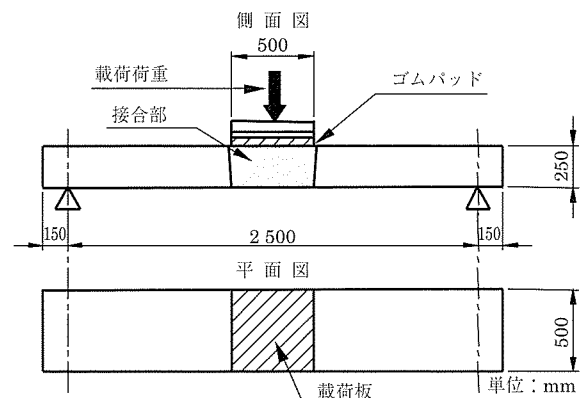


図-10 試験体の形状と載荷方法

ントを受ける梁と仮定し、一方向曲げモーメントが作用する単純梁としてモデル化する。

④試験体の支間長については、実構造物の支間方向の輪荷重による曲げモーメント分布から、おおむね正の曲げモーメント区間を支間として250 cmとする。

⑤試験体の梁幅については、主鉄筋の間隔が12.5 cmであるので、主鉄筋が4本配置できる幅を考慮して50 cmとする。

(2) 載荷方法

荷重の載荷は、図-10に示すように、輪荷重の載荷幅を考慮した一点集中載荷とし、破壊まで単調増加載荷を行った。

また、載荷荷重の載荷幅は50 cmとし、ダブルループ鉄筋継手の曲げ破壊が先行するように、接合部床版の中央に載荷した。

(3) 試験体の種類

試験体は、表-1に示すように、鉄筋継手に与えるそれぞれの相関的な影響を把握することを目的として、表-2に示す各試験体を製作した。試験体数は、試験のばらつきを是正するため、各試験体の種類ごとにそれぞれ3体製作した。各試験体の鉄筋配置図のうち、代表的な配筋図を図-11～13に示す。試験体に用いた鉄筋は、SD 345でエポキシ樹脂塗装鉄筋はJSCE-E 102に適合するものを用いた。また、コンクリートの設計基準強度は、実構造物と同様に、60 N/mm²とし、表-3に示す配合とした。試験体は、材齢28日経過後に試験を実施することとし、円柱供試体により、

試験時にコンクリートの圧縮強度試験を実施し、圧縮強度の確認を行った。

表-1に示した検討項目は、本研究での提案構造であるダブルループ鉄筋継手構造（試験体 No. 2-1-N）の曲げ性能について、鉄筋継手構造の相違などによる影響を比較するための基本データを得る目的で、各要因を設定したものである。各要因に対する試験体は、以下に述べる理由により決定した。

①鉄筋継手構造については、本研究のダブルループ鉄筋継手がDINの規定の継手長を満足するダブルループ鉄筋継手構造、鉄筋継手が無い構造、重ね継手構造に対して、どのような性能を有しているかについて検討を行った。本研究のダブルループ鉄筋継手構造は、図-12に示すように、セグメントの床版側のサイドループ鉄筋間に環状のループ鉄筋を配置した構造であり、接合部床版幅を床版中心位置で520 mmとしたものである。これに対して、DINの規定の継手長を満足するダブルループ鉄筋継手構造は、図-13に示すように、継手長がDINの規定に満足するように設定したもので、接合部床版幅を床版中心位置で800 mmとしている。

②エポキシ樹脂塗装鉄筋については、実構造物のセグメントに配置されるサイドループ鉄筋が、長期に渡って外気にさらされるため防錆処理をする必要があること、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いることにより更なる耐久性の向上が可能となることよりエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いていることから、普通鉄筋とエポキシ樹脂塗装

表-1 試験における検討項目

検討項目	各要因
鉄筋の継手構造の相違の影響	継手無し
	重ね継手
	ダブルループ継手
	ダブルループ継手 (DINの規定)
エポキシ樹脂塗装鉄筋の影響	普通鉄筋
	エポキシ樹脂塗装鉄筋
鉄筋径変化の影響	D 19
	D 22
ループ鉄筋同士の接触性の影響	接触有り
	接触無し
床版接合目地の有無の影響	接合目地有り
	接合目地無し

表-3 コンクリートの配合

項目	単位	数量
粗骨材の最大寸法	mm	20
スランプの範囲	cm	15.0 ± 2.5
空気量の範囲	%	4.5 ± 1.5
水セメント比	%	32.0
細骨材率	%	39.0
水	kg/m ³	160
セメント	kg/m ³	500
細骨材	kg/m ³	650
粗骨材	kg/m ³	1 032
減水剤	g/m ³	6 000
AE剤	g/m ³	15

表-2 試験体の種類

種類	試験体数	接合部床版打継目の有無	鉄筋継手および鉄筋の種類	鉄筋径
No.1-1-N	3	無 (一体構造)	重ね継手 (普通鉄筋)	D 19
No.1-1-E	3	無 (一体構造)	重ね継手 (エポキシ樹脂塗装鉄筋)	D 19
No.1-2-N	3	無 (一体構造)	ダブルループ鉄筋継手 (普通鉄筋)	D 19
No.1-2-E	3	無 (一体構造)	ダブルループ鉄筋継手 (エポキシ樹脂塗装鉄筋)	D 19
No.2-1-N	3	有	ダブルループ鉄筋継手 (普通鉄筋)	D 19
No.2-1-E	3	有	ダブルループ鉄筋継手 (エポキシ樹脂塗装鉄筋)	D 19
No.3-1-N	3	無 (一体構造)	継手無し (普通鉄筋)	D 19
No.4-1-N	3	無 (一体構造)	ダブルループ鉄筋継手 (普通鉄筋) 鉄筋接触	D 19
No.4-2-N	3	無 (一体構造)	ダブルループ鉄筋継手 (普通鉄筋)	D 22
No.4-3-N	3	無 (一体構造)	ダブルループ鉄筋継手 (普通鉄筋) DIN 規定継手長	D 19
計	30			

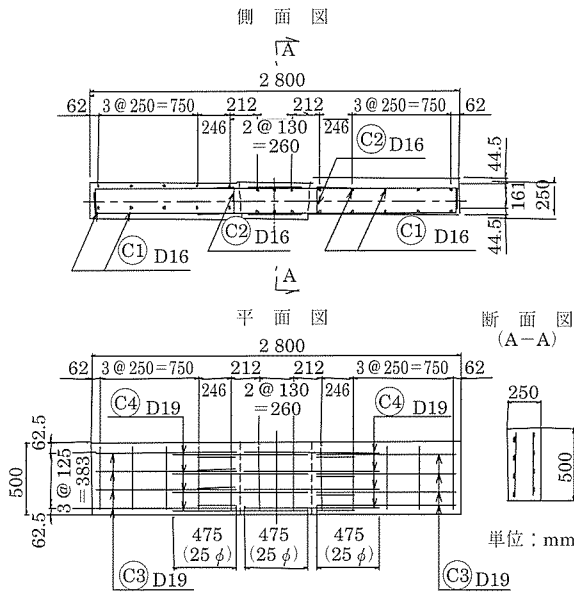


図 - 11 重ね継手の鉄筋配置図

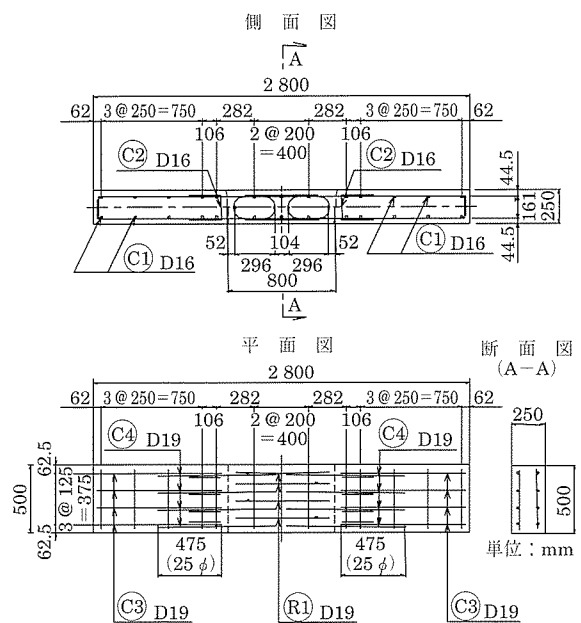


図 - 13 DIN 規定のダブルループ鉄筋継手の鉄筋配置図

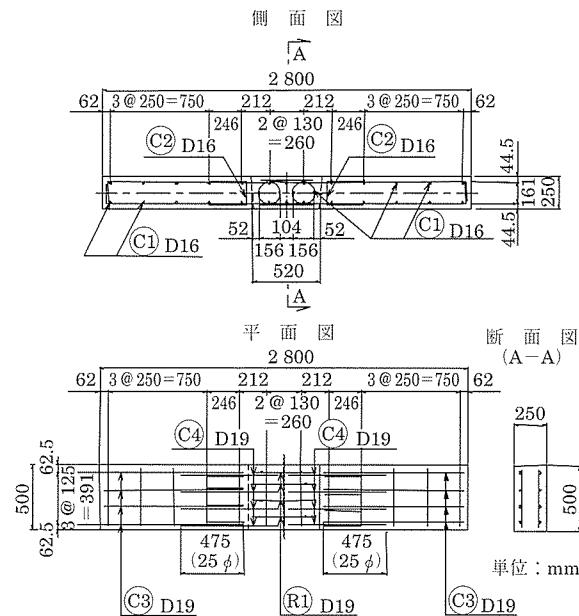


図 - 12 ダブルループ鉄筋継手の鉄筋配置図

鉄筋を選択したものである。

- ③鉄筋径については、実構造物で用いられる鉄筋径は D 19 であるが、鉄筋径の相違による影響を把握するため、D 22 の試験体を設定した。
- ④ループ鉄筋同士の接触性については、実構造物では、施工誤差等からサイドループ鉄筋とセンターループ鉄筋とは、接触して配置することが困難であることから、センターループ鉄筋をサイドループ鉄筋の橋軸方向の中間に配置することを基本としたが、比較検討のため、接触させた試験体も設定した。
- ⑤床版接合部の打継目については、梁試験体に打継目面を有しない試験体を基本としたが、実構造物においては、接合部床版のコンクリートが後打ちされるため、

打継目の有無による曲げ挙動の相違を検討するため選択したものである。床版接合部の打継目を有する試験体は、打継目面となるセグメント床版端面を、実構造物と同様に、型枠表面にグルコン酸ナトリウム等を主成分とする遅延剤を塗布し、脱型後に高圧水で粗骨材表面が露出するまでコンクリート面を粗にして、接合部床版のコンクリートとの一体化を図っている。

(4) 試験結果

本試験は、前項で述べた各要因が、鉄筋継手に与える影響を把握することを目的に、試験結果について、コンクリートのひび割れ発生荷重、荷重と鉄筋ひずみの関係および曲げ耐力に着目し、比較検討を行った。

1) コンクリートのひび割れ発生荷重

実構造物のセグメント床版部は、PC 構造であり、自動車荷重作用時においてひび割れを発生させないことを前提として、コンクリートの縁引張応力度の制限値 f_{td} (N/mm²) を、式(1)により⁶⁾算定し設計を行っている。

$$f_{td} = k_t \cdot 0.23 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (1)$$

ここに、 $k_t = 0.6 / (h^{1/3})$ 、 h : 部材高 (m)

f_{ck} : コンクリートの圧縮強度に関する関する特性値 (N/mm²)

これに対して、接合部床版は RC 構造であるが、セグメント床版部と一体構造となることから、ひび割れを発生させないことを前提としている。したがって、本試験における各試験体のコンクリートのひび割れ発生荷重を把握することは、接合部床版の設計において重要となる。

ひび割れ発生荷重を試験結果から評価するにあたっては、以下に述べる二つの方法で行った。

- ①目視により観察し、最初にひび割れが発生した時点の荷重をコンクリートのひび割れ発生荷重とする方法 (以下、「目視によるひび割れ発生荷重」という。)
- ②各試験体における荷重 (P) と支間中央の変位 (δ)

の関係が、初期弾性域から非弾性域へと変化する変化点の荷重をコンクリートのひび割れ荷重とする方法（以下、「P- δ 曲線によるひび割れ発生荷重」という。）
 本試験の結果のうち、各試験体のP- δ 曲線を図-14に、P- δ 曲線によるひび割れ発生荷重および目視によるひび割れ発生荷重を表-4に示す。なお、図-14は、各試験体の種類ごとに3体ずつ実施した試験のうち、代表的なものを図化したものである。

これらの結果を取りまとめると以下のとおりである。

表-4 ひび割れ荷重

試験体の種類	目視によるひび割れ発生荷重 (kN)	P- δ 曲線によるひび割れ発生荷重 (kN)
1-1-N	36.3	31.4
1-1-E	32.3	30.4
1-2-N	29.4	30.4
1-2-E	29.4	29.4
2-1-N	29.4	27.4
2-1-E	29.4	26.5
3-1-N	38.2	35.3
4-1-N	29.4	31.4
4-2-N	29.4	31.4
4-3-N	32.3	31.4

- ①床版接合目地を設けた試験体2-1-Nおよび2-1-Eにおいては、P- δ 曲線によるひび割れ発生荷重が、他の一体構造を有する試験体と比較して低下した。
- ②接合床版部に鉄筋継手が無い試験体3-1-Nにおいては、P- δ 曲線によるひび割れ発生荷重が、鉄筋継手を有する試験体と比較して、約10~20%程度増加した。
- ③鉄筋継手を有し施工目地が無い試験体は、鉄筋継手の構造やエポキシ樹脂塗装鉄筋の使用の有無にかかわらず、ひび割れ発生荷重に大きな差は見られない。

2) 荷重と鉄筋ひずみの関係

試験体の支間中央およびセグメントと接合部床版との界面近傍（以下、「接合目地近傍」という。）の下縁側鉄筋ひずみのうち、ループ鉄筋の径がD19でエポキシ樹脂鉄筋を用いていない試験体の結果を図-15および図-16に示す。なお、ここに示した鉄筋ひずみは、図-14に示したP- δ 曲線の試験体の結果である。

ひび割れ発生後の鉄筋ひずみについては、ひび割れと鉄筋ひずみゲージとの位置関係によって大きな影響を受けるので、データの比較を行う場合は、この位置関係を考慮することが望ましい。しかし、ひび割れの発生位置を予測して鉄筋ひずみゲージを貼付することは困難であるので、本試験においては、最大曲げモーメント発生位置の支間中央部と接合目地近傍の2箇所に着目して試験結果を整理した。

試験体の荷重と鉄筋ひずみとの関係を取りまとめると以下のとおりである。

- ①ひび割れ発生前の鉄筋ひずみは、鉄筋継手構造の種類にかかわらずほぼ同一の挙動を示している。これは、ひび割れ発生前は鉄筋とコンクリートのひずみが同一

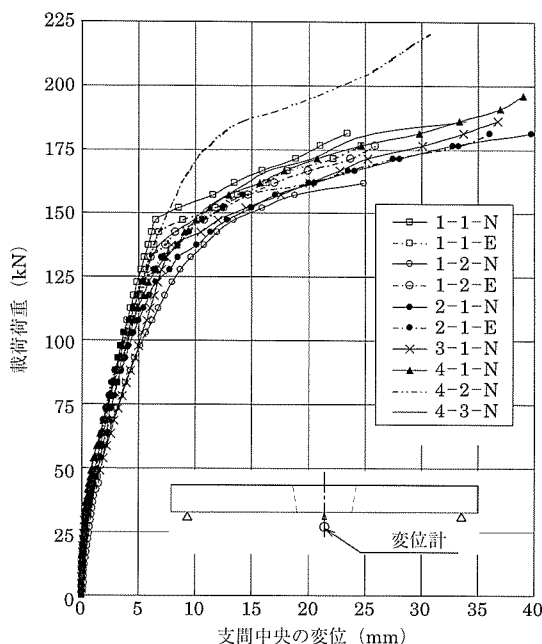


図-14 各試験体のP- δ 関係

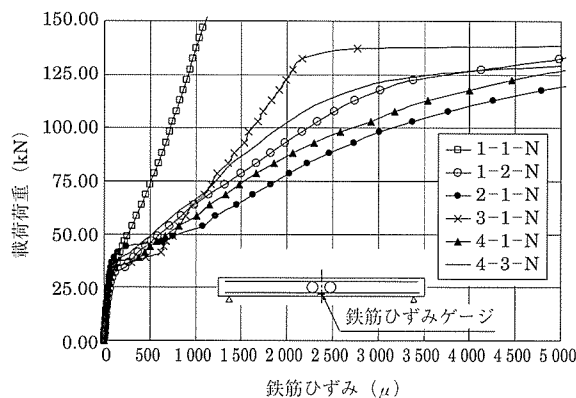


図-15 支間中央の下縁側鉄筋ひずみ

になっていることによると推察される。また、床版接合部の打継目を有する試験体2-1-Nにおいては、打継目部に他の試験体よりも早期にひび割れが発生したため、鉄筋ひずみが早期に増大している。

- ②ダブルループ鉄筋継手を有する試験体1-2-Nと重ね継手を用いた試験体1-1-Nとを比較すると、接合目地近傍の鉄筋ひずみについてはきわめて類似しているが、支間中央の鉄筋ひずみは大きく相違している。これは、重ね継手を用いた試験体では、支間中央の鉄筋ひずみゲージ近傍にはひび割れが発生しておらず、ひび割れの発生に伴う鉄筋ひずみの増大の影響が軽微だったものと推察される。また、接合目地近傍においては、鉄筋ひずみゲージ近傍にひび割れが発生しているため、きわめて類似した挙動を示したものと推察される。
- ③ダブルループ鉄筋継手を有する試験体1-2-NとDINの規定を満足する継手長を有する試験体4-3-N

と接合部に鉄筋継手を有しない試験体3-1-Nとを比較すると、支間中央の鉄筋ひずみは類似している。また、接合目地近傍の鉄筋ひずみについては、DINの規定を満足する継手長を有する試験体を除いて類似した挙動を示している。DINの規定を満足する継手長を有する試験体については、鉄筋ひずみケージ直近にひび割れが発生しなかったものと推察される。

④以上の結果から、荷重と鉄筋ひずみの関係は、ひび割れの発生状況に応じて影響を受けるが、本試験で比較した鉄筋継手構造間では、類似した挙動を示すものと推察される。

3) 曲げ耐力

本試験においては、単純桁での載荷試験であるので、載荷試験における載荷荷重の最大値を終局曲げ耐力として評価した。本試験による終局曲げ耐力を表-5に示す。なお、表-5の値は、試験体の種類ごとに3体行なった結果の平均値を示している。

試験体の曲げ耐力の試験結果を取りまとめると以下のとおりである。

表-5 終局曲げ耐力

試験体の種類	終局曲げ耐力 (kN)	円柱供試体による圧縮強度 (N/mm ²)
1-1-N	183	61.6
1-1-E	174	61.8
1-2-N	162	62.3
1-2-E	174	66.2
2-1-N	183	63.6
2-1-E	183	63.8
3-1-N	186	66.6
4-1-N	194	69.5
4-2-N	219	67.6
4-3-N	186	66.7

①すべての試験体において、載荷点近傍のコンクリート上縁の圧縮破壊によって終局曲げ耐力が決定している。

②ループ鉄筋にD22を用いた4-2-Nを除き、D19を用いた試験体間では、鉄筋継手構造の相違による影響、エポキシ樹脂塗装鉄筋の影響およびループ鉄筋同士との接触性による終局耐力の相違は、終局曲げ耐力の平均値の+8%~9%程度となっている。したがって、材料強度のばらつきや載荷試験結果のばらつきなどを考慮すると、これらの要因による終局曲げ耐力への影響は、ほとんど無いものと推察される。

③床版接合目地の有無についても、終局曲げ耐力への影響は無いものと推察される。

④ループ鉄筋にD22を用いた場合は、接合部床版の鉄筋にD19を用いた試験体に比べて、終局曲げ耐力は大きくなる。

(5) 考 察

実構造物のダブルループ鉄筋継手を有する接合部床版の設計においては、以下に述べる要求性能を照査する必要がある。

①道路橋示方書による自動車荷重作用時において、荷重に起因したひび割れが発生しない。

②道路橋示方書による終局荷重作用時において、部材断面が破壊しない。

このため、コンクリートのひび割れ発生荷重の算定方法および終局曲げ耐力の算定方法について、本試験の結果より考察する。

1) コンクリートのひび割れ発生荷重

コンクリートの曲げ引張強度は、式(1)に示したとおり、圧縮強度の影響を受ける。本試験においては、材齢や材料のばらつきなどにより、試験体の圧縮強度が試験体間で相違している。したがって、この影響を補正するため、試験体の圧縮強度をもとに、式(1)により引張強度を算定し、この値から試験体を弾性体と仮定して、ひび割れ発生荷重を算定した。(以下、「ひび割れ発生荷重の計算値」という。)

ひび割れ発生荷重の計算値とP-δ曲線によるひび割れ発生荷重との比較を表-6に示す。表-6から、コンクリートのひび割れ発生荷重については、以下に述べる事が推察される。

①本研究で提案したダブルループ鉄筋継手は、床版施工目地が無い場合は、従来の重ね継手と同様に、式(1)で算定され引張強度を用いてコンクリートのひび割れ発生荷重の算定を行ってよい。

②接合部床版は、その施工方法からセグメント床版との界面に床版接合目地を設けざるを得ない。本試験からは、接合目地を有する2-1-Nおよび2-1-Eの試

表-6 ひび割れ発生荷重

試験体の種類	P-δ曲線によるひび割れ発生荷重① (kN)	ひび割れ発生荷重の計算値② (kN)	①/②	コンクリートの圧縮強度 (N/mm ²)
1-1-N	31	31.0	1.00	61.6
1-1-E	30	31.0	0.97	61.8
1-2-N	30	31.2	0.96	62.3
1-2-E	29	32.4	0.90	66.2
2-1-N	27	31.6	0.85	63.6
2-1-E	26	31.7	0.82	63.8
3-1-N	35	32.6	1.07	66.6
4-1-N	31	33.5	0.93	69.5
4-2-N	31	32.9	0.94	67.6
4-3-N	31	32.6	0.95	66.7

表-7 終局曲げ耐力

試験体の種類	試験値① (kN)	試験値② (kN)	①/②	コンクリートの圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋径
1-1-N	183	143	1.28	61.6	D19
1-1-E	174	143	1.22	61.8	D19
1-2-N	162	143	1.13	62.3	D19
1-2-E	174	144	1.21	66.2	D19
2-1-N	183	143	1.28	63.6	D19
2-1-E	183	143	1.28	63.8	D19
3-1-N	186	144	1.29	66.6	D19
4-1-N	194	144	1.35	69.5	D19
4-2-N	219	189	1.15	67.6	D22
4-3-N	186	144	1.29	66.7	D19

験体が計算値と比較して15%程度低下する。このため、床版接合目地を有する場合は、床版接合目地が無い場合のコンクリートのひび割れ発生荷重を15%低減する。

2) 終局曲げ耐力

本試験においては、材齢や材料のばらつきなどにより、試験体のコンクリートの圧縮強度が試験体間で相違している。したがって、この影響を補正するため、試験体のコンクリートの圧縮強度をもとに、終局曲げ耐力の算定を行なった。終局曲げ耐力は、道路橋示方書の破壊抵抗曲げモーメントの算定方法⁷⁾により算定を行なった。

終局曲げ耐力の計算値と試験結果との比較を、表-7に示す。表-7から、終局曲げ耐力については、以下に述べる事が推察される。

- ①コンクリートの圧縮強度のばらつきを考慮しても、鉄筋継手構造の相違による影響、エポキシ樹脂塗装鉄筋の影響およびループ鉄筋同士の接触性による終局曲げ耐力の相違は、ほとんどない。したがって、本研究で提案したダブルループ鉄筋継手構造の終局曲げ耐力の算定にあたっては、従来の重ね継手を用いたものと同様な手法で行ってよい。
- ②床版接合目地を有する試験体は、ひび割れ発生荷重の低下は見られたが、終局曲げ耐力は低下していない。したがって、床版接合目地を有していても、床版接合目地が無いものと同様な手法で終局曲げ耐力の算定を行ってよい。

5.4 輪荷重の移動疲労載荷試験

ダブルループ鉄筋継手を有するセグメントの接合部床版は、RC構造となることや施工順序からセグメントと接合部床版間に接合目地を設けざるを得ないことから、輪荷重による疲労に対する安全性の検討が必要である。

このため、本研究においては、ダブルループ鉄筋継手の接合部床版を有する第二東名高速道路上和会高架橋を対象として、実物大の試験体を製作し輪荷重の移動疲労載荷試験を行い、疲労に対する安全性の検討を行った。上和会高架橋の標準断面図を図-17に示す。

(1) 試験体の形状

試験体は、実構造物での接合部床版の輪荷重による疲労特性を的確に把握するため実寸を基本とし、以下に述べる点を考慮して、図-18~19に示す形状寸法で、図-20~21に示す鉄筋配置とPC鋼材配置とした。

また、実構造物と試験体の輪荷重により発生する接合部床版下縁側の橋軸直角方向の応力については、実構造物で実施した橋梁全体モデルでのソリッド要素による3次元FEM解析結果と試験体全体モデルでの3次元FEM解析結果との整合性を図るとともに、試験体完成後に静的載荷試験を行いその妥当性の検証を行った。

- ①2主箱桁断面での荷重載荷が試験機の性能から不可能であるが、接合部床版の疲労特性に着目した試験であるので、接合部床版の輪荷重による応力が実構造物での3次元FEM解析結果と等価(100 kN 載荷時で約1.8 N/mm²)となるような部分模型とする。また、発生応

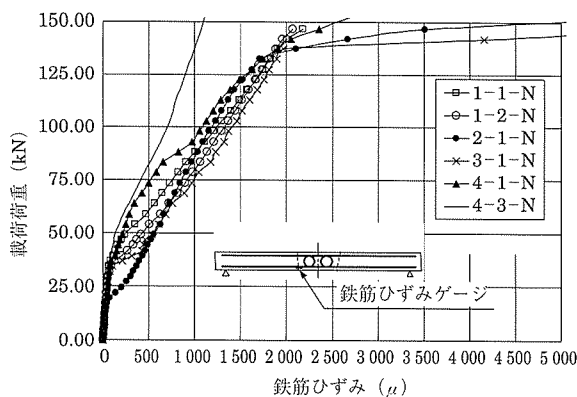


図-16 接合目地近傍の下縁側鉄筋ひずみ

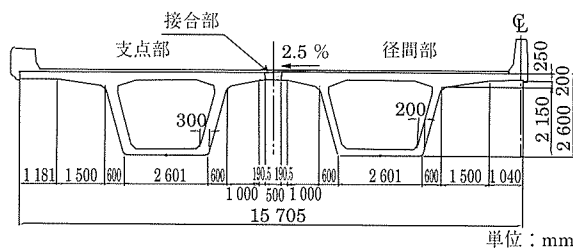


図-17 上和会高架橋の標準断面図

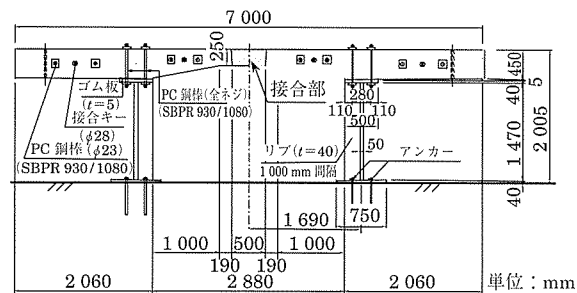


図-18 試験体断面図

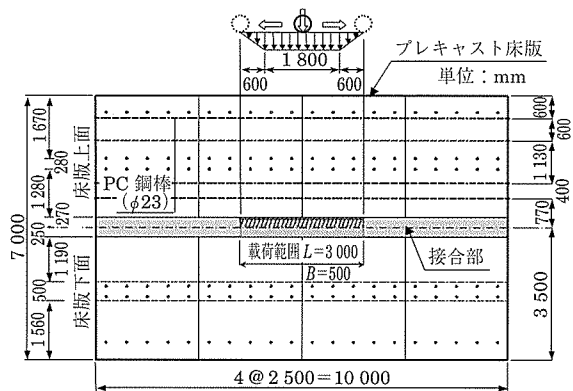


図-19 試験体平面図

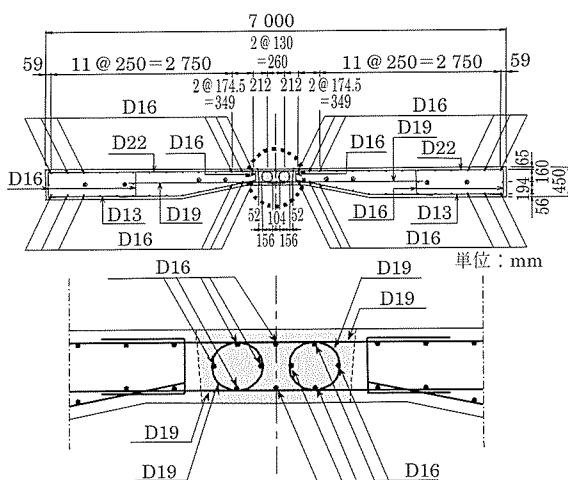


図 - 20 試験体の鋼材配置 (断面図)

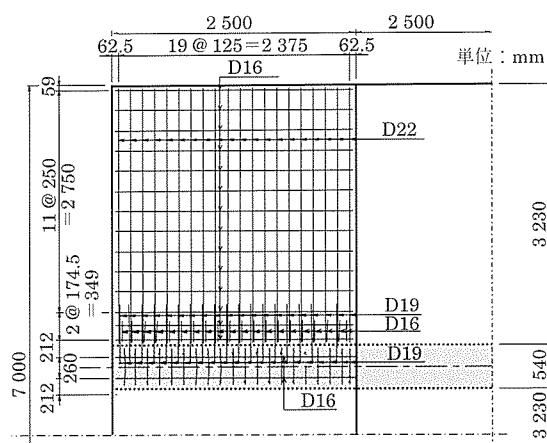


図 - 21 試験体の鋼材配置 (平面図)

力が最大となる支間中央部付近を対象とした部分模型とする。

②試験機の荷重可能な試験体幅の制約から、主桁を箱桁形状とすることが不可能であるので、輪荷重による応力が実構造物での3次元FEM解析結果と等価(100 kN 荷重時で約 1.8 N/mm²)となるように、床版を鋼 I 桁で支持し、鋼 I 桁の剛性や床版との結合方法を決定する。

③実構造物の橋軸方向のプレストレスは、外ケーブル構造により導入しているが、本試験においては、接合部床版の応力が等価となるように、床版内に配置した内ケーブルによりプレストレスを導入する。

(2) 試験体の製作方法および使用材料

試験体は、実構造物のセグメント床版部を模したプレキャスト PC 床版 (2.5 m × 3.25 m) を 10 枚製作し、片側 5 枚づつプレストレスにより一体化したのちに、実構造物と同様に接合部床版に相当する中間部にコンクリートを打ち込んで製作した。プレキャスト PC 床版および接合部床版に使用したコンクリートは、実構造物のセグメントと同様に設計基準強度 f_{ck} を 60 N/mm² とした。

接合部床版については、後打ち施工となることから、実

構造物と同様に収縮補償コンクリートとするために膨張材 (デンカ CSA # 20) を用いた。また、実構造物では、初期ひび割れの抑制やコンクリート片の剥落防止を目的として、ビニロン繊維 (クラレ クラテック、繊維長 30 mm、繊維径 0.66 mm、弾性係数 28 439 N/mm²) を用いた繊維補強コンクリートとしているので、試験体についても同様な配合とした。ビニロン繊維については、単位体積あたり 0.5 % を添加した。プレキャスト PC 床版部のコンクリートの配合を表 - 8 に、接合部床版のコンクリートの配合を表 - 9 に示す。また、荷重の荷重は、接合部床版のコンクリート打設後 28 日以上経過した後に実施した。

表 - 8 プレキャスト床版部のコンクリートの配合

項目	単位	数量
粗骨材の最大寸法	mm	20
スランプの範囲	cm	15.0 ± 2.5
空気量の範囲	%	4.5 ± 1.5
水セメント比	%	32
細骨材率	%	39
水	kg/m ³	160
セメント	kg/m ³	500
細骨材	kg/m ³	650
粗骨材	kg/m ³	1 032
減水剤	g/m ³	6 000
AE 剤	g/m ³	15

表 - 9 接合部床版のコンクリートの配合

項目	単位	数量
粗骨材の最大寸法	mm	20
スランプの範囲	cm	15.0 ± 2.5
空気量の範囲	%	4.5 ± 1.5
水セメント比	%	32
細骨材率	%	48
水	kg/m ³	165
セメント	kg/m ³	486
膨張材	kg/m ³	30
細骨材	kg/m ³	768
粗骨材	kg/m ³	871
減水剤	g/m ³	7 482
AE 剤	g/m ³	36.1
ビニロン繊維	g/m ³	6 500

(3) 荷重の荷重方法

本試験は、自動車荷重による疲労試験であるので、輪荷重の橋軸直角方向の荷重幅を道路橋示方書による T 荷重⁸⁾と同様に 50 cm として、荷重を接合部床版の中央を橋軸方向に移動させて荷重した。移動範囲は、図 - 22 に示すように、試験機の性能から 3.0 m となるが、中央の 1.8 m が輪荷重の荷重区間であり、前後の 0.6 m が輪荷重を往復させるために必要となる制動区間となる。

(4) 荷重の荷重回数

疲労に対する安全性の検討にあたっては、対象となる構造物に供用期間中に荷重されると予測される荷重の規模や頻度を設定する必要がある。本試験においては、検討の対

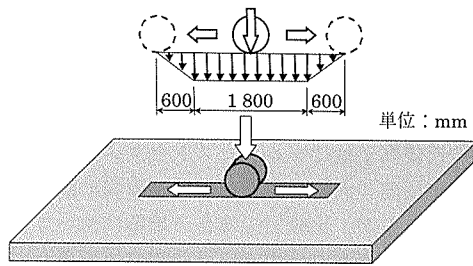


図 - 22 輪荷重の移動範囲

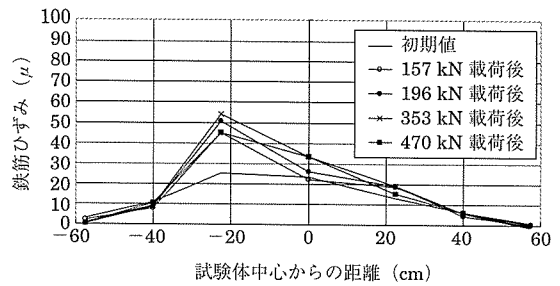


図 - 24 試験体中央の橋軸直角方向下側鉄筋ひずみ

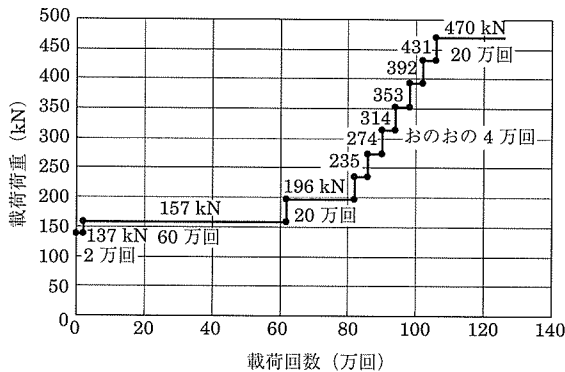


図 - 23 載荷荷重強度と載荷回数

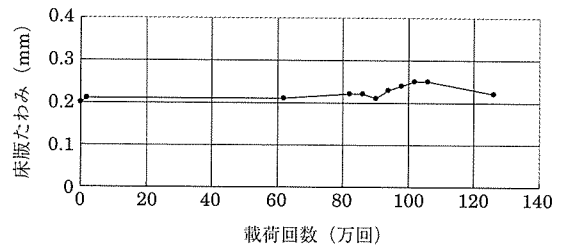


図 - 25 試験体中央(接合部床版中央)の床版たわみ

象が高速道路橋であるので、東名高速道路上り線日本平における軸重計の実測データをもとに載荷回数を決定した。

検討にあたっては、松井らの提案している RC 床版の疲労強度推定式⁹⁾をもとに、輪荷重の 50 年間分を接合部床版に載荷した場合の累積損傷度と等価な累積損傷度となる荷重の規模と頻度を算定した。

本試験では、試験機の能力と試験期間から、載荷荷重を過積載過重相当の 157 kN (16 tf) とすると、高速道路の 50 年間に相当する累積損傷度を生じさせるのに必要な載荷回数は 60 万回となる。したがって、載荷荷重 157 kN を 60 万回載荷したのちの接合部床版の安全性を確認すれば、高速道路における 50 年間以上の疲労寿命を検証したことになる。本試験においては、1 往復で 2 回載荷されるので、30 万往復すればよいこととなる。

このことより、本試験においては、157 kN を 60 万回載荷したが破壊にいたらなかったため、図 - 23 に示す載荷荷重強度と載荷回数で試験を行った。その結果、載荷荷重 470 kN (48 tf) で 10 万往復 (20 万回) 載荷を行っても床版の損傷にはいたらなかったため試験を終了している。

(5) 試験結果

輪荷重による疲労試験の結果、図 - 23 に示した載荷を行っても断面は破壊しなかった。また、図 - 23 に示した載荷荷重のステップごとに、おのおのの載荷荷重の最終回載荷後に 98 kN (10 tf) を試験体中央に静的載荷を行い、鉄筋ひずみ、床版たわみの測定を行ったが、図 - 24 に示すとおり、試験体中央の橋軸直角方向下側鉄筋のひずみは最大でも 60 μ 以下となっている。同様に、試験体中央の荷重載荷点直下の床版たわみについても、図 - 25 に示すとおり載荷回数の増加に伴うたわみ量の増加も微小となっている。これら

のことから、高速道路橋の床版として、十分な安全性を有していることが検証された。

試験終了後には、プレキャスト PC 床版と接合部床版との接合面に沿って、橋軸方向のひび割れが発生した。そのひび割れ幅は、最大でも 0.15 mm 以下となっていた。これは、コンクリート標準示方書⁴⁾による異形棒鋼の一般の環境の許容ひび割れ幅 0.175 mm 以下 (鉄筋のかぶり 35 mm) であり、耐久性についても十分に確保されていると推察される。

(6) 考察

本試験の結果、第二東名高速道路上り線高架橋と同様な条件にある PC 連続高架橋のダブルループ鉄筋継手を有する接合部床版については、以下の点から疲労に対して十分な安全性を有していると推察される。したがって、実施設計においては、疲労に対する構造物の性能照査を行わなくてもよい。

- ①東名高速道路上り線日本平における輪荷重の 50 年間分に相当する疲労荷重を載荷しても、接合部床版には疲労による損傷は発生しないと推察される。
- ②図 - 23 に示した載荷荷重強度と載荷回数で載荷しても、接合部床版は、十分に床版の機能を有している。

5.5 設計方法

本研究で提案したプレキャストセグメント工法による 2 主箱桁断面の PC 連続箱桁橋のダブルループ鉄筋継手を有する接合部床版については、5.1 に示した要求性能に対して、以下のとおりの設計方法により設計することが妥当である。

- ①道路橋示方書による自動車荷重作用時においては、接合部床版のコンクリート縁応力度の許容値を、コンクリート標準示方書によるコンクリートの曲げひび割れ強度として設計を行う。ただし、接合目地部においては、コンクリート標準示方書によるコンクリートの曲

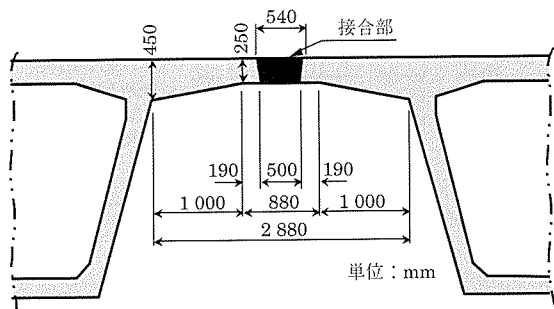


図 - 26 荷重荷重強度と荷重回数

げびひ割れ強度を 15% 低減した値を許容値とする。

②道路橋示方書による終局荷重作用時においては、一般の床版と同様な手法で断面破壊に対する安全性の照査を行う。

③疲労に対する安全性の照査は、図 - 26 と同様な断面および鉄筋配置の場合は行わなくてもよい。

本設計方法は、図 - 26 に示す断面形状の中間床版を対象として実施した荷重試験結果をもとに作成したものである。断面形状等が相違する構造物に適用する場合は、その適用の可否について検討を行う必要がある。ただし、中間床版は、一般的に厚さが 25 ~ 30 cm、鉄筋径が D 16 ~ D 19、その間隔が 12.5 ~ 25 cm の範囲で用いられているので、本試験の結果を同様な中間床版に用いることが可能と推察される。

6. おわりに

国内におけるプレキャストセグメント工法による PC 箱桁橋は、現場工事期間の大幅な削減、工事費の削減および高品質化が図れることから、最近の 10 年間で急速に発展した。今後の更なる発展を妨げる大きな課題は、製作ヤードの確保とセグメントの運搬であると考えられる。とくに国内においては、諸外国と違い運搬重量の制限が厳しく、一般公道を利用する場合は最大でも 30 t 程度以下しか運搬できない。このため、セグメント製作を現場ヤードで行っている事例が多いが、都市部近郊ではヤードの確保が困難であり、プレキャストセグメント工法の採用を妨げる大きな要因となっている。

前述の課題を解決する方策として、主桁を施工上合理的な規模のセグメントに分割し、セグメントを既存の PC プレキャスト工場等で製作し一般公道を運搬する「工場製作プレキャストセグメント工法」がある。これにより、都市部近郊の連続高架橋にプレキャストセグメント工法を適用し現場工事期間の大幅な短縮および工事費の削減を行うことが可能となるが、比較的広幅員の橋梁においては、橋軸方向にも分割せざるを得ず、その分割方法や接合方法については種々の課題があった。

本研究により開発した「ダブルループ鉄筋継手を有する接合部床版」は、セグメントを橋軸方向にも適切な規模に分割し、耐荷力・耐久性を確保し一体化することが可能となる構造であり、都市部近郊の比較的広幅員の高架橋への「プレキャストセグメント工法」の適用を可能とするものである。

本研究の成果である「ダブルループ鉄筋継手を有する接合部床版」の構造とその設計方法により、プレキャストセグメント工法が発展し、現場工事期間の大幅な短縮および工事費の削減が可能となることを期待する。

参考文献

- 1) 酒井ほか：工場製作プレキャストセグメント工法による PC 連続箱桁橋の計画と設計、橋梁と基礎、Vol.35, No.4, pp.15 ~ 21, 2001
- 2) Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, DIN 1045, pp.133 (Seite 47) ~ 148 (Seite 62), Juli 1988
- 3) 道路橋示方書・同解説 I 共通編・III コンクリート橋編, 日本道路協会, 平成 14 年 3 月
- 4) コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 土木学会, 2002 年 3 月
- 5) 酒井ほか：ダブルループ継手構造を有する RC 床版の力学的特性に関する研究, 土木学会論文集, No.760, V-63, pp.45 ~ 61, 2004.5
- 6) 平成 8 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会
- 7) 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, 日本道路協会, pp.137 ~ 139, 平成 14 年 3 月
- 8) 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 日本道路協会, pp.11 ~ 12, 平成 14 年 3 月
- 9) 松井繁之：橋梁の寿命予測 - 道路橋 RC 床版の疲労寿命予測 -, 安全工学, Vol.30, No.6, pp.432 ~ 440, 1991

【2004 年 8 月 19 日受付】