

RC 床版片持部の押し抜きせん断耐荷力と最小床版厚に関する検討

Study on Punching Shear Capacity and Minimum Thickness of Overhanging RC Slab

野田恭平*, 杉原伸泰**, 大西弘志***, 松井繁之****

Kyohei NODA, Nobuyasu SUGIHARA, Hiroshi OHNISHI, Shigeyuki MATSUI

- * 工修 ㈱大林組 大阪本店土木工事部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟)
- ** 工修 Hitz 日立造船㈱ 技術本部 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町 2-2-11)
- *** 工修 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)
- **** 工博 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

Recently the various types of slabs have been developed and applied to rationalize the structure system of highway bridges. Generally the fatigue durability of these slabs has been evaluated through fatigue tests using wheel running machines which have been developed to simulate moving wheel loads of vehicles. As the results failure models and fatigue lives for these slabs have been clarified. But the most of these findings cover for only simply supported slabs subjected to positive bending moment. On the other hand fatigue damage due to cracking of concrete at the overhanging slabs has not been concerned so much. In the study, the authors carried out a series of fatigue tests of overhanging RC slabs using the wheel running machine to simulate failure state of this part and made clear the failure mode. Finally, the minimum thickness at the overhanging RC slab based on a punching shear failure was discussed.

Key Words: overhanging RC slab, punching shear failure, minimum thickness

1. はじめに

今日、道路橋のコンクリート系床版としては鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版)、プレストレストコンクリート床版(以下、PC床版)および鋼・コンクリート合成床版(以下、合成床版)が採用されている。RC床版は床版支間が比較的小さい橋梁に適用される一般的な床版形式であり、PC床版、合成床版は主に少数主桁橋を対象として、長支間床版に適用される傾向にある。これらの床版の疲労耐久性評価は、実橋での損傷過程をより忠実に再現できる輪荷重走行試験により行われるのが一般的となっており、各種床版とも性能評価のために活発に利用されている。ところで、基本のRC床版の疲労限界状態は、コンクリートの乾燥収縮を主桁が拘束する拘束ひずみに走行荷重の作用による曲げひずみが相乗して、橋軸直角方向のひび割れが先行発生し、継続して作用する輪荷重載荷によりそれらのひび割れ面の磨耗が進行して床版が幅50~60cmの梁状に分断され、作用荷重に対する主鉄筋断面の抵抗強度が減少してせん断破壊に至るといった機構で評価することができる。その他の床版形式に対する耐荷力機構や耐荷力算定式についても、数多く実施されてきた走行試験の結果をもとに検討^{1)~5)}が進められ

ており、床版の疲労寿命を予測するS-N関係⁶⁾も定式化されている。しかし、これらの耐荷力評価の多くは単純版および連続版を対象にしたものに留まっており、床版片持部に関する研究は非常に少ない⁷⁾。

本研究では、RC床版片持部の疲労限界状態について輪荷重走行試験機を用いて評価する。そして、その結果に対応する抵抗モデルを提案し、張出し部先端における最小床版厚を検討する。

2. 試験方法および供試体概要

(1) 供試体の設置方法

床版片持部を想定した輪荷重走行試験の供試体設置状況を図-1および図-2に示す。1つの片持床版に100kN程度の輪荷重を載荷すると、床版が大きな曲げ変形するため、輪荷重走行試験機にその変形に伴う水平力が働き、試験機本体が損傷することが危惧される。そこで、本実験では、2体の供試体を突き合わせた状態で設置し、2体に同時載荷する方法を採用した。図-1に示すように、外桁部におけるハンチ形状はハンチ幅を小さくし、フランジ中心軸に沿ってスタッドを1列配置とすることでピ

ン支持状態とした。これは、外桁上フランジによる固定の影響を除去することを目的としている。内桁部におけるハンチ形状はハンチ幅を大きくし、スタッドを3列配置とすることで、鋼桁による剛結支持とした。橋軸方向の端部では、床版の橋軸方向の連続性を考慮するため外桁間に横桁を配置し、その上にモルタルを充填して弾性支持とした。これにより、供試体の橋軸方向中央の横断面を着目断面とした場合に橋軸方向に十分長い床版と同様の断面力振幅を与えることができる。本実験では、供試体2体を同時に走行試験するため、供試体間のレベル差による荷重の不均衡や衝撃力の発生が懸念された。そこで、走行面にエポキシ樹脂を薄く流し込んで水平面を形成し、レベル差の解消を図った。

(2) 供試体概要

本実験では、供試体床版を張出し版とした。供試体寸法は3200×1850mmで、片持部床版の張出し長を800mmとした。実橋における床版片持部では主桁上ハンチ部から張出し部先端まで床版厚を急変させずに一定勾配で擦り付けを行っているが、本実験では床版片持部の基本的な破壊機構を明らかにするため、床版厚を一定とした。

走行試験を行った床版供試体はRC床版1種類(計2体分)である。なお、突き合わせる2体の供試体(W床版、E床版)は同一種とした。供試体の諸元を表-1、配筋図を図-3に示す。床版供試体は試験機の荷重能力の関係で縮小モデルとし、その断面決定は道路橋示方書⁷⁾による許容応力度法に準拠し、設計輪荷重100kNの75%であるP=75kNを設計T荷重として行った。ただし、床版断面に作用させる曲げモーメントは、異方性を考慮するため道路橋示方書式を用いずに、直交2方向断面とも引張側コンクリートを無視した板解析から求まる値を採用した。また、設計荷重(P=75kN)下における鉄筋応力度が約100~110MPaとなるように鉄筋量を定めた。

(3) 試験方法

走行試験の荷重プログラムを図-4に示す。荷重荷重としては、設計で用いたT荷重1輪に相当する75kNを供試体1体当たりの基本荷重とした。本実験は2体同時荷重であるため実荷重は合計の150kNとなる。以下の記述では、2体分の合計荷重を荷重値として名付け、1体当たりの荷重を分担荷重と呼ぶことにする。

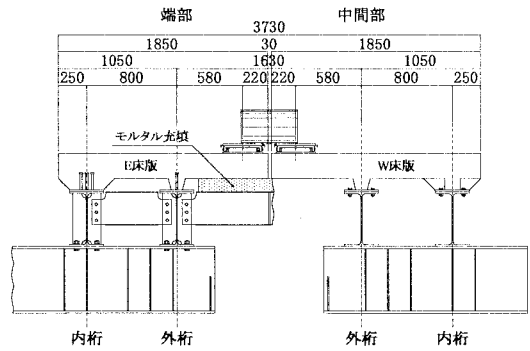


図-1 供試体の設置状況 (正面図)

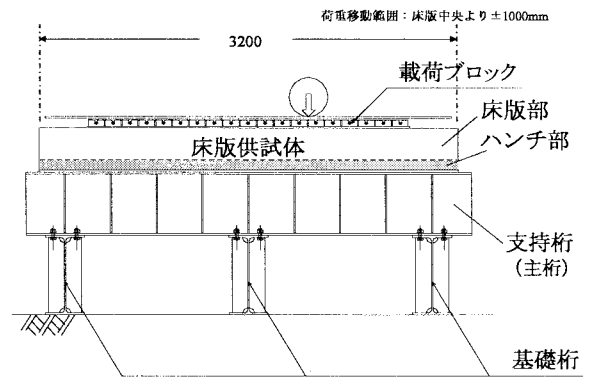


図-2 供試体の設置状況 (側面図)

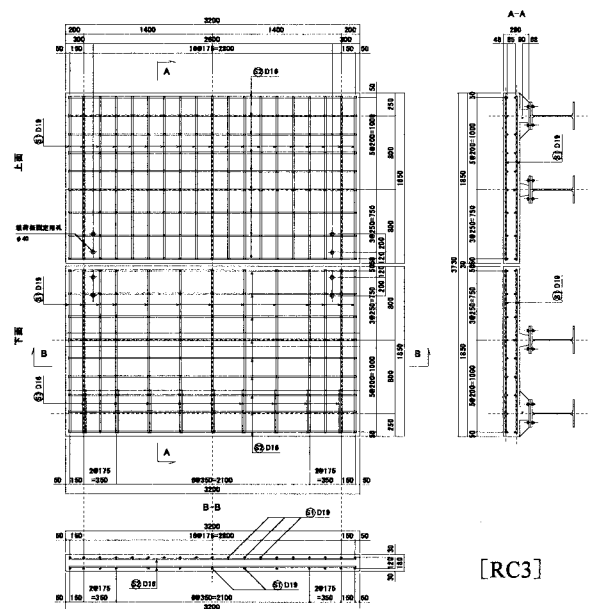


図-3 供試体の配筋図

表-1 供試体の諸元

床版厚 (mm)	主鉄筋				配力鉄筋		コンクリート	
	鉄筋間隔(mm)		かぶり(mm)		鉄筋間隔(mm)		圧縮強度 静弾性係数 (N/mm ²)	
	上側	下側	上側	下側	上側	下側		
180	D19@175	D19@350	30	30	D16@250		40.1	32690

*かぶりは、鉄筋中心からコンクリート表面までの距離

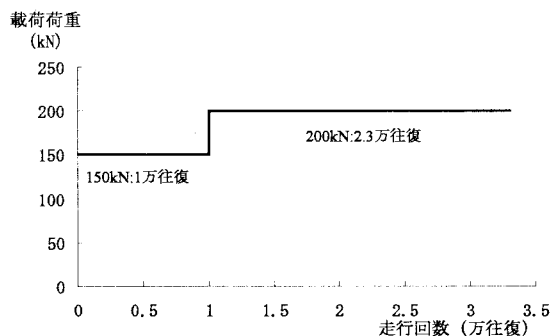


図-4 走行試験の荷重プログラム

3. コンクリートのひび割れ性状

図-5 に W 床版の走行試験終了時におけるひび割れ発生状況を示す。本実験では、2 体の供試体のうち W 床版で輪荷重走行荷重により押し抜きせん断破壊に至った。床版上面では、荷重 150kN による走行荷重開始直後の 0.1 万往復で外桁上付近において橋軸方向ひび割れの発生が確認された。その後、ひび割れの発生は荷重荷重を 200kN に上昇した後、せん断破壊に至る 3.3 万往復まで見られた。ひび割れは床版の橋軸方向中央部では外桁に平行に、端部では斜め方向に発生しており、全体としては円弧状となっている。これは、供試体の橋軸方向端部を横桁による弾性支持としたことによるものである。床版下面では、荷重 150kN による走行荷重開始直後にひび割れの発生が確認された。その後、ひび割れの発生は荷重荷重を 200kN に上昇した後、せん断破壊に至る 3.3 万往復まで見られた。ひび割れは約 350~400mm 間隔（下側主鉄筋

間隔にほぼ一致）で橋軸直角方向に発生しており、その大部分が走行荷重開始から 0.1 万往復で外桁部のハンチ付近まで達していた。

張出し部先端の側面のひび割れ状況より、下面で発生した橋軸直角方向ひび割れは床版全厚をほぼ貫通していると思われる。このことから、輪荷重走行荷重によって版の梁状化が進み、橋軸方向の有効幅が低下して作用せん断力が断面のせん断抵抗力を超えたため、押し抜きせん断破壊に至ったといえる。最終破壊の状況を具体的に観察するため、図-6 に示した位置で供試体を切断した。

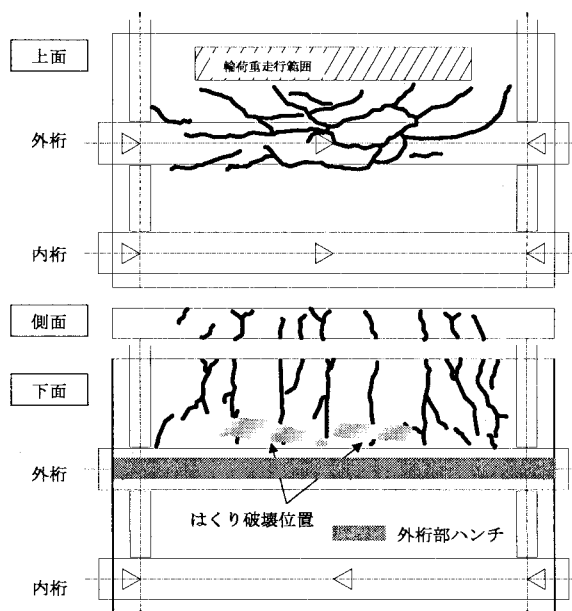


図-5 ひび割れ発生状況 (W 床版)

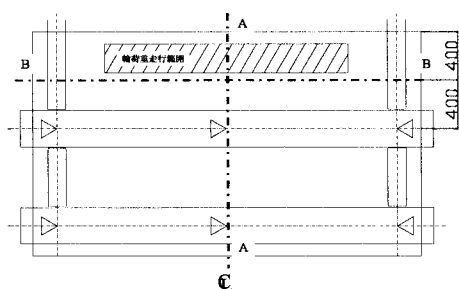


図-6 床版の切断位置

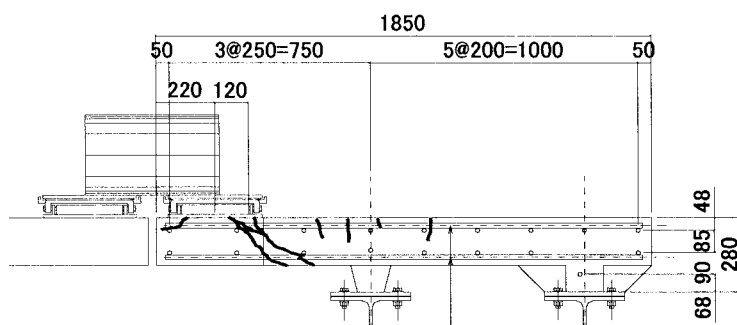


図-7 切断面のひび割れ状況 (W 床版, A-A 断面)

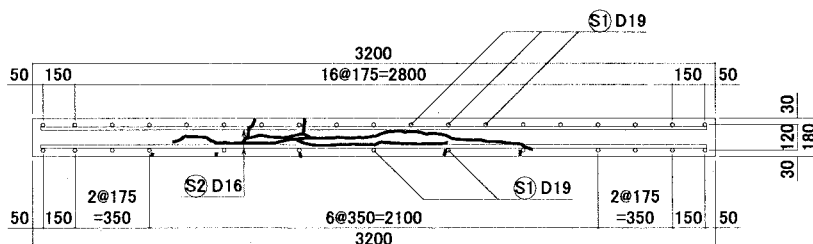


図-8 切断面のひび割れ状況 (W 床版, B-B 断面)

図-7 および図-8 に切断面におけるひび割れ状況を示す。主鉄筋方向に切断した A-A 断面では、荷重板端部から斜めひび割れが発生し、下側主鉄筋下のかぶりがかぶりしていることから押し抜きせん断破壊であることを証明している。一方、配力鉄筋方向に切断した B-B 断面では、斜めせん断破壊の形跡が見られないことから破壊モードは単純版のものと類似しており、版の梁状化による主鉄筋断面のせん断破壊であることがわかる。しかし、走行荷重による損傷過程において単純版と異なるのは床版下面では格子状のひび割れ網が形成されずに橋軸直角方向の一方のみに曲げひび割れが発生することである。

4. 床版たわみ

本実験では、支持桁構造の特性によって特に内桁部において反力による浮上りが生じるため、活荷重たわみの実測値には床版供試体の変位成分に加え支点の上下動による回転成分が含まれている。従って、本研究では活荷重たわみからこの回転成分を除去した相対たわみで評価することとした。相対たわみは、支点部における上下変位が 0 となるように活荷重たわみを補正したものである。床版たわみについては、床版中央荷重時の荷重載荷点下における残留たわみ、200kN 荷重時に着目した活荷重たわみおよび相対たわみの経時変化を示す。

図-9 に W 床版の床版たわみの経時変化を示す。図中には、引張側コンクリートを無視した剛性を直交 2 方向断面に与えた板解析によって得られるたわみの理論値も併記する。活荷重たわみは荷重 150kN による走行荷重では開始直後にばらつきが見られるものの変化は小さく安定しているが、荷重荷重を 200kN に上昇した直後の僅か 1 万往復の走行荷重によって 0.40mm もの増加が見られる。その後も活荷重たわみは同じ勾配で増加傾向を示している。相対たわみについてもこの間の走行荷重によって 0.35mm もの増加が見られ、荷重上昇後の 0.5 万往復

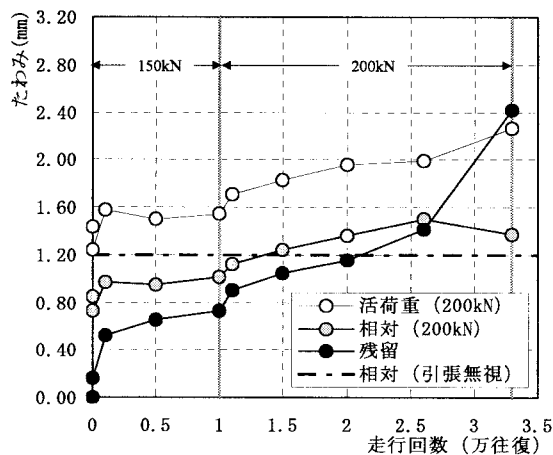


図-9 床版たわみの経時変化 (W 床版)

の走行荷重によって引張側コンクリートを無視した理論値に到達している。全く同様な傾向が残留たわみについてもいえる。以上のことから、荷重荷重を 200kN に上昇した後の走行荷重によって、床版の橋軸方向の有効幅が減少して作用せん断力が断面のせん断抵抗力を超えたため、押し抜きせん断破壊に至ったといえる。

5. 押し抜きせん断耐力

床版切断面の破壊状況の観察より、床版片持部の最終破壊モードは単純版のものと類似していると判断できる。そこで、以下に示す松井による S-N 曲線の関係式を用いて破壊回数の比較を行うこととした。この S-N 関係は、RC 床版の終局状態において、橋軸直角方向ひび割れが床版全厚を貫通し、配力鉄筋方向のコンクリートの連続性がなくなることによって主鉄筋方向のせん断力が床版の挙動に対して支配的となり、最終的に主鉄筋断面のせん断抵抗力が限界に至るという破壊過程を考慮して導出されたものであり、縦軸に作用荷重 P と主鉄筋方向における梁の押し抜きせん断耐力 P_{sx} の比、横軸に破壊回数 N をとった両対数型のものとなっている⁶⁾。

$$P_{sx} = 2(\tau_{s-max} x_m B + \sigma_{t-max} c_m B)$$

$$B = b + 2d_d$$

$$\tau_{s-max} = 0.252\sigma_{ck} - 0.000246\sigma_{ck}^2$$

$$\sigma_{t-max} = 0.583(\sigma_{ck})^{\frac{2}{3}}$$

$$S-N \text{ 関係: } \log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.51965$$

τ_{s-max} : コンクリートの最大せん断強度

σ_{t-max} : コンクリートの最大引張強度

σ_{ck} : コンクリートの最大圧縮強度

x_m : 主鉄筋断面の中立軸深さ

c_m : 主鉄筋のかぶり深さ

b : 荷重板の配力鉄筋方向の辺長

d_d : 配力鉄筋の有効高さ

B : 梁の有効幅

単純版に関する梁の押し抜きせん断耐力 P_{sx} は、式で示したようにコンクリートの中立軸深さまでのせん断抵抗力と主鉄筋のかぶり深さまでの引張抵抗力によって決まる。ところで、片持部供試体の破壊状態では、図-10 に示したように単純版の押し抜きせん断耐力モデルの半分の断面で、作用荷重に抵抗していると考えられる。W 床版の破壊回数の比較結果を表-2 に示す。本供試体は、設計輪荷重を 75kN としたため破壊回数についてもマイナー則を用いて 75kN に換算した等価繰返し回数を示すこととする。また、実験値の破壊回数は、W 床版と E 床

版の分担荷重値を考慮して計算されたものである。実験での破壊回数は上述したせん断耐力モデルの算定値に比べて、非常に大きくなって一致していないのがわかる。

そこで、床版下面において走行載荷終了まで橋軸方向の段差ひび割れが見られなかったことを考慮するとともに、張出し部下面側が圧縮領域であるためコンクリートのかぶり破壊は現れず、ある深さまでせん断破壊が進むと下面側でヒンジ状態となり折れ曲がるような破壊を呈すると判断した。その結果、下側主鉄筋のダウエル効果分は無視できるものと考えた。よって、片持部床版の疲労による最終破壊はせん断抵抗力のみに依存するというモデルに変更し、せん断破壊深さを中立軸深さの1.5, 2,

2.5 倍と仮定して、実験で得られた破壊回数に一致する深さを試行錯誤で計算し、工学的判断で安全側となる丸めた値を見出すこととした。ただし、ここでいう中立軸は床版の上面側を圧縮領域と考え、下面側を引張領域と考えた場合のものである。表-3に計算結果を示す。実験での破壊回数に近く、安全側の評価を与える値を示しているのは、せん断破壊深さを中立軸深さの2倍としたものである。よって、床版片持部では図-11に示したせん断耐力モデルを推奨することにした。ただし、この算定式は供試体1体のみを対象として導出したものであるため今後も実験等により照査していく必要がある。

表-2 破壊回数の比較

破壊回数		
実験値	N_{eq}	6459486
算定式	N	56657
比	N_{eq}/N	114.01

表-3 修正後の破壊回数の比較

せん断破壊深さ		$1.5x_m$	$2x_m$	$2.5x_m$
せん断耐力	P_{sx}	11.886	15.848	19.810
破壊回数	N	74460	2927820	50516153
実験値	N_{eq}	6459486		
比	N_{eq}/N	86.75	2.21	0.13

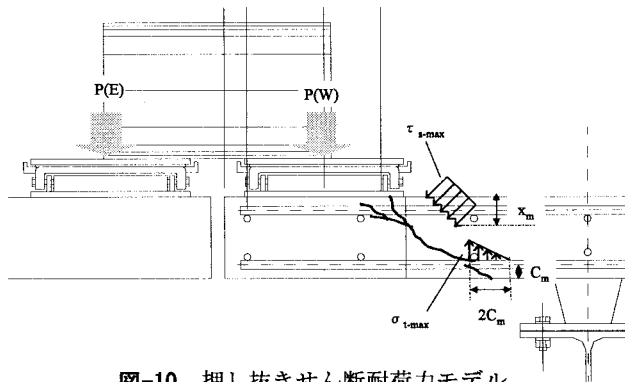


図-10 押し抜きせん断耐力モデル

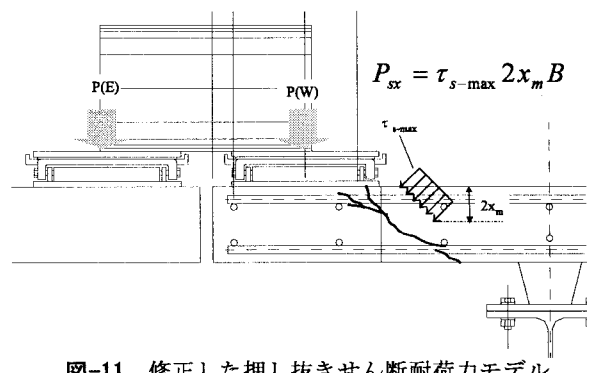


図-11 修正した押し抜きせん断耐力モデル

表-4 最小床版厚の検討

床版厚		t	15.2	15.7	16.3	16.7	cm
上側主鉄筋	鉄筋径	Φ	19	19	19	19	mm
	鉄筋間隔		100	125	150	175	mm
	有効高さ	d_m	11.200	11.700	12.300	12.700	cm
下側主鉄筋	鉄筋径	Φ	19	19	19	19	mm
	鉄筋間隔		200	250	300	350	mm
	かぶり	c_m	4.000	4.000	4.000	4.000	cm
中立軸深さ	x_m	4.692	4.555	4.456	4.342	cm	
せん断破壊深さ	$2x_m$	9.384	9.110	8.912	8.684	cm	
配力鉄筋有効高さ	d_d	9.450	9.950	10.550	10.950	cm	
載荷幅	b	20	20	20	20	cm	
せん断有効幅	B	38.9	39.9	41.1	41.9	cm	
最大圧縮強度	σ_{ck}	300	300	300	300	kgf/cm ²	
最大せん断強度	τ_{s-max}	53.460	53.460	53.460	53.460	kgf/cm ²	
せん断耐力	P_{sx}	19.516	19.432	19.583	19.453	tf	
	P	10.000	10.000	10.000	10.000	tf	
破壊回数	$\log N$	6.026	6.002	6.045	6.008		
	N	1.062E+06	1.005E+06	1.109E+06	1.019E+06	回	

*かぶりは、鉄筋中心からコンクリート表面までの距離

6. RC 床版片持部の最小床版厚に関する検討

以上のことから、床版片持部の張出し部先端においても、径間部床版と同様、床版厚をある程度まで小さくすると、疲労による押し抜きせん断破壊に至る可能性があることがわかり、上述した推奨モデルを用いて、張出し部先端における最小床版厚を求めることとした。表-4 に計算結果を示す。作用荷重を 100kN とし、安全を考慮して、設計寿命を径間部床版と同様の 100 万回とすると、最小床版厚として 15~17cm 程度必要であるとの結果となった。しかし、道路橋示方書の構造細目⁸⁾では、鋼材の周囲にコンクリートが十分行きわたるよう、鉄筋のあきを 40mm 以上とする制限値を設けているため、この構造細目を考慮すると図-12 に示すように最小床版厚として 17cm 程度必要であることがわかる。よって、本研究では両者を満足する最小床版厚として 17cm 程度を提案する。さらに、床版片持部では、図-13 に示すように車道端から張出し部先端にかけて、この最小床版厚を満足させるような擦り付けを行えばよいこととする。

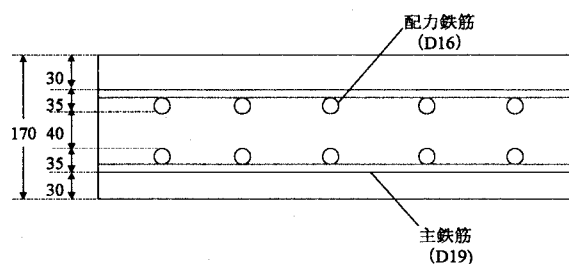


図-12 鉄筋のあき (構造細目)

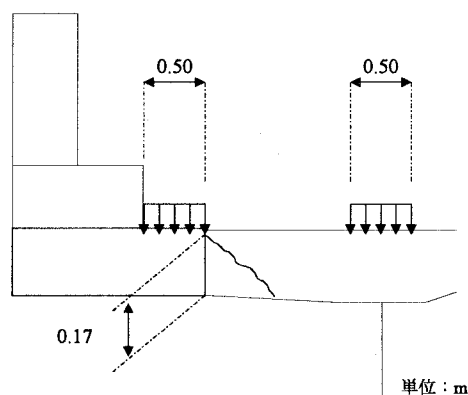


図-13 張出し部先端の擦り付け

7. まとめ

本研究では、これまで明らかにされていなかった RC 床版片持部の疲労による破壊機構を輪荷重走行試験機を用いて検証し、実験結果から押し抜きせん断耐荷力を算定することによって、張出し部先端における最小床版厚を検討した。以下に本研究の結論を示す。ただし、供試体 1 体のみを対象として導出したものであるため、単純版と同様、試験数を増やして検討する余地がある。

- (1) RC 床版片持部の疲労による最終破壊モードは、単純版のものと類似しており、版の梁状化による主鉄筋断面の押し抜きせん断破壊である。
- (2) 輪荷重走行載荷による損傷過程において単純版と異なるのは、床版下面では格子状のひび割れ網が形成されずに橋軸直角方向の一方のみに曲げひび割れが発生することである。下面では橋軸直角方向の曲げモーメントによって圧縮側になり、橋軸方向ひび割れが発生しない。
- (3) 片持部床版の押し抜きせん断耐荷力モデルとして、せん断破壊深さをコンクリートの中立軸深さの 2 倍としたモデルを推奨した。
- (4) 推奨モデルによる算定式を用いて、最小床版厚を検討した結果、車道端で 17cm 程度とすればよいと判断した。

謝辞： 本研究は平成 13 年度科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号：13450188, 代表：松井繁之) を得て行ったものである。ここに関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 前田幸雄, 松井繁之: 鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐荷力の評価式, 土木学会論文集 第 348 号 V-1, pp.133-136, 1984.8.
- 2) 松井繁之: 道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究, 大阪大学学位論文, 1984.11.
- 3) 園田恵一郎, 堀川都志雄: 輪荷重の反復作用下での道路橋 RC 床版の低サイクル疲労特性, 土木学会論文集, 第 390 号 V-8, pp.97-106, 1988.
- 4) 前田幸雄, 松井繁之: 輪荷重移動装置による道路橋 RC 床版の疲労に関する研究, 第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.221-224, 1984.
- 5) 文允景: 鋼板・コンクリート合成床版の疲労特性と疲労設計法に関する研究, 大阪大学学位論文, 1989.
- 6) 松井繁之: 橋梁の寿命予測—道路橋 RC 床版の疲労寿命—, 安全工学, Vol.30, No.6, pp.432-440, 1991.
- 7) 街道浩, 渡辺滉, 他: 床版張出し部の輪荷重走行試験および曲げモーメント性状について, 構造工学論文集 Vol.48A, pp.1429-1440, 2002-3.
- 8) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2002.3.