

グリットメタルを用いた床版部材の押抜きせん断耐荷力および耐疲労性

日大生産工(院) ○新田 裕之, 日大生産工 阿部 忠
日大生産工 水口 和彦, JFE シビル(株) 塩田 啓介

1. はじめに

近年, 建設現場における建設技能労働者の不足が深刻な問題となっている。とくに, コンクリート構造物の建設では, 鉄筋の加工・組立てを行う鉄筋工に関わる技能労働者が不足している。このような背景を受けて, 施工の合理化・省力化を図ることを目的に鉄筋に変わる引張材として2タイプのグリットメタル(以下, 格子鋼板筋とする)が開発され, コンクリート部材の補強材等に採用されている^{1), 2)}。本研究では, 格子鋼板筋を床版部材に適用した新床版の開発を目的として, 耐荷力性能および耐疲労性の評価を行い, 実橋 RC 床版への適用性について検証した。実験では, 従来の鉄筋を配置した RC 床版および格子鋼板筋を配置したコンクリート床版(以下, MG 床版とする)を製作し, 走行荷重実験より耐荷力性能を評価するとともに輪荷重走行疲労実験から耐疲労性を検証する。また, RC 床版の理論押抜きせん断耐荷力および S-N 曲線式との整合性の検討も行った。

2. 使用材料および供試体概要

2.1 使用材料

(1) RC 床版および MG 床版

RC 床版供試体のコンクリートには, 普通ポルドランドセメントと 5mm 以下の砕砂および 5mm~20mm の砕石を使用した。コンクリートの設計基準強度は 2012 年改訂の道路橋示方書・同解説(以下, 道示とする)³⁾の規定に基づいて 24N/mm^2 以上となるように配合した。RC 床版の配合条件を表-1 に示す。鉄筋には, SD295A, D10 を用いた。

MG 床版供試体のコンクリートは, RC 床版と同様の配合とした。ここで, コンクリートの圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表-2 に示す。

(2) 格子鋼板筋

格子鋼板筋には, 材質 SS400, 厚さ 9.0mm の縞鋼板を用いる。ここで, 格子鋼板筋の材料特性値を表-2 に併記する。なお, 縞鋼板については規定厚の 16mm まで, 鋼板については一般的に使用されている異形棒鋼と同等の断面積を有する矩形に切断することを想定して板厚 25mm までの加工が可能である。

2.2 供試体概要

(1) RC 床版供試体

本実験に用いた供試体の寸法は, 道示の規定に基

表-1 コンクリートの示方配合

スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				C	W	S	G	Ad
18	4.5	49.5	47.6	344	170	832	956	3.4

表-2 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋および格子鋼板筋		
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
RC床版	35	384	526	200
MG床版		337	442	200

づいて設計し, その 1/2 モデルとした。供試体寸法は, 全長 1,470mm, 支間 1,200mm, 床版厚 130mm とした。鉄筋は複鉄筋配置とし, 主鉄筋に D10 を 100mm 間隔で配置し, 主筋の有効高を 105mm, 配力筋の有効高を 95mm とした。また, 圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置した。有効高は軸直角方向は 25mm, 軸方向は 35mm である。ここで, RC 床版供試体の寸法および鉄筋配置を図-1(1)に示す。供試体名称は, 走行荷重実験に用いた供試体を RC-R1, R2, 輪荷重走行疲労実験に用いた供試体を RC-F1 とする。

(2) MG 床版供試体

MG 床版供試体の寸法は, 全長, 支間, 厚さは RC 床版と同様とした。格子鋼板筋の形状および格子間寸法は, RC 床版と同様に引張側の軸直角方向および軸方向の格子間寸法は 100mm×100mm とし, 軸直角方向および軸方向の有効高は 105.5mm とした。また, 圧縮側には引張鋼材量の 1/2 を配置し, 有効高は 24.5mm とした。断面寸法は, 厚さ 9.0mm, 幅 7.0mm, 断面積は 63mm^2 とし, 付着力を高めるために 9mm 間隔ごとに 2mm の突起を設ける構造とした。ここで, 格子鋼板筋の寸法および形状を図-1(2), 格子鋼板筋の形状寸法を図-2 に示す。供試体名称は, 走行荷重実験に用いた供試体を MG-R1, R2, 輪荷重走行疲労実験に用いた供試体を MG-F1, F2, F3 とする。

3. 実験方法および等価走行回数

3.1 走行荷重実験

RC 床版に走行荷重が作用した場合の最大耐荷力の検証について阿部ら⁴⁾は, 輪荷重による走行荷重実験から評価し, 併せて押抜きせん断力学モデルおよび耐荷力式を提案している。よって, MG 床版における最大耐荷力の検証も同様の実験方法を用いることとする。

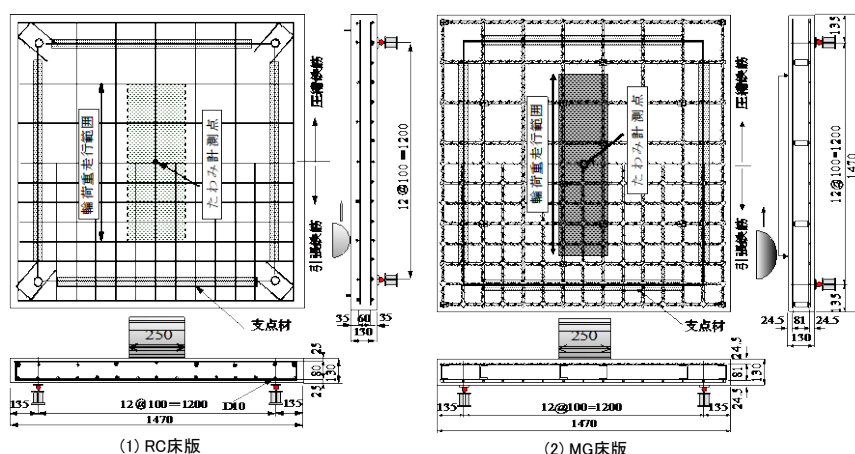
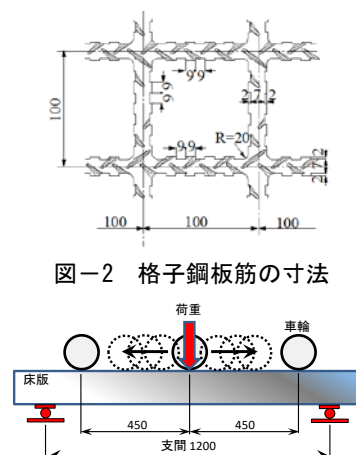


図-1 RC・MG床版の形状寸法



図一3 走行振動実験方法

走行荷重実験は、RC 床版および MG 床版の軸方向中央を起点に図-3 に示すように橋軸方向を一往復走行させ、一往復ごとに荷重を増加する段階荷重載荷とする。実験方法は、まず床版中央に所定の輪荷重を載荷し、橋軸方向に 450mm 走行させて折り返し、900mm 走行後に再度折り返して 450mm 走行させて元の床版中央に戻るまでの 1 往復を走行させる。荷重は 1 走行ごとに 10kN ずつ増加させ、供試体が破壊に至るまで荷重の増加と走行を行った。なお、本実験における最大耐力は、一走行を維持した最大荷重とした。

表-3 走行荷重実験による最大耐荷力

供試体	最大耐荷力 (P _{max}) (kN)	最大耐荷力 の平均 (kN)	耐荷力比 (MG-R/RC-R)
RC-R1	172.5	172.0	—
RC-R2	171.5		
MG-R1	165.0	167.5	0.97
MG-R2	170.0		

表-4 等価走行回数と走行回数比

供試体		荷 重		等価 走行回数	走行回数比 (MG-F/RC-F)
		80kN	100kN		
RC-F1	実験走行回数	20,000	8,400	6,289,944	—
	等価走行回数	772,240	5,517,704		
MG-F1	実験走行回数	20,000	8,500	6,355,631	1.01
	等価走行回数	772,240	5,583,391		
MG-F2	実験走行回数	20,000	8,200	6,158,571	0.98
	等価走行回数	772,240	5,386,330		
MG-F3	実験走行回数	20,000	9,000	6,684,066	1.06
	等価走行回数	772,240	9,911,826		

ここで、 N_{eq} : 等価走行回数 (回), P_i : 載荷荷重 (kN), P : 基準荷重 60kN, N_i : 実験走行回数 (回), m : S-N 曲線の傾きの逆数 (=12.7)

5. 実験結果および考察

5.1 耐荷力性能

走行荷重実験より得られた RC 床版および MG 床版の最大耐荷力を表-3 に示す。

表-3 より、RC 床版の最大耐荷力は供試体 RC-R1 で 172.5kN、RC-R2 で 171.5kN で、平均最大耐荷力は 172.0kN であった。この RC 床版の耐荷力を基準として MG 床版の耐荷力を評価する。

MG 床版の走行荷重実験における最大耐荷力は、供試体 MG-R1, R2 で、それぞれ 165.0kN, 170.0kN となり、最大耐荷力の平均は 167.5kN であった。また、RC 床版の最大耐荷力の平均と比較すると 97% となっており若干下回る結果となっているが、使用した鉄筋と鋼板格子筋の材料特性値の違いなどを考慮すると、ほぼ同等の耐荷力性能を有するものと評価できる。

4.2 輪荷重走行疲労実験および等価走行回数の算定

(1) 輪荷重走行疲労実験

輪荷重走行疲労実験は、床版中央から $\pm 450\text{mm}$ の範囲(900mm)に輪荷重を連続走行させる実験である。なお、走行範囲に関しては、輪荷重が45度に分布すると仮定した場合、軸方向支点間1,200mm内全域に荷重が分布することとなる。荷重載荷方法は、RC床版およびMG床版供試体ともに初期走行荷重を80kNとし、20,000回走行ごとに20kNずつ増加させ、供試体が破壊するまで20,000回走行ごとに荷重を増加させる。

(2) 等価走行回数

輪荷重走行疲労実験では、20,000 回走行ごとに荷重を増加させる段階荷重載荷としたことから、等価走行回数 N_{eq} を算出して耐疲労性を評価する。輪荷重走行疲労実験による等価走行回数 N_{eq} は、マイナー則に従うと仮定すると、式(1)として与えられる。なお、式(1)に適用する S-N 曲線の傾きの逆数 m は、松井らが提案する $m=12.7$ を適用する⁵⁾。また、本供試体の基準荷重 P は、供試体を 1/2 モデルとしたことから道示に規定される活荷重 100kN の 1/2 に安全率 1.2 を考慮した 60kN として適用する。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^m \times N_i \quad (1)$$

5.2 等価走行回数

RC 床版供試体および MG 床版供試体の実験走行回数および式(1)より算出した等価走行回数をまとめたものを表-4 に示す。

表-4 より、RC 床版供試体 RC-F1 の等価走行回数は、 6.29×10^6 回となっており、この等価走行回数を基準として、MG 床版の耐疲労性を検証する。

MG 床版供試体 MG-F1, F2, F3 の等価走行回数は、それぞれ 6.36×10^6 回、 6.16×10^6 回、 6.68×10^6 回となっており、平均等価走行回数は 6.40×10^6 回である。RC 床版供試体と比較すると 1.02 倍となっており、ほぼ同等の等価走行回数が得られる結果となった。したがって、新材料である格子鋼板筋を配置した MG 床版は、RC 床版と同等な耐疲労性を有することが明らかとなった。

以上の結果から、本提案の格子鋼板筋は RC 床版の鉄筋に替わる引張材として十分に実用性があるものと判断できる。

6. 理論押抜きせん断耐力および S-N 曲線式

6.1 RC 床版の S-N 曲線式および押抜きせん断耐力式

RC 床版の S-N 曲線式および押抜きせん断力学モデル・耐力式に関しては、松井^{5),6)}らや阿部ら^{4),7)}が提案を行っている。松井らは 1964 年の設計基準に準拠し、鉄筋には丸鋼、一部に異形鉄筋を配置した RC 床版の S-N 曲線式およびはり幅 B を考慮した押抜きせん断耐力式を提案している。

一方、阿部らは 1994 年改訂の道示に準拠して製作した RC 床版、すなわち異形鉄筋を配置した RC 床版の S-N 曲線式および走行荷重実験による押抜きせん断耐力式を提案している。本供試体は、鉄筋に替わる新材料として格子鋼板筋を用いた床版であり、2012 年改訂の道示に準拠して製作したことから、阿部らが提案する押抜きせん断耐力式から最大耐力を評価し、S-N 曲線式との整合性を検証する。ここで、阿部らが提案する S-N 曲線式は式(2)として与えられる。

$$\log (P/P_{sx}) = -0.06417 \log N + \log 0.996 \quad (2)$$

ここで、P：基準荷重 (kN)、 P_{sx} ：破壊荷重付近の押抜きせん断耐力、N：走行回数

次に、阿部らが提案する RC 床版の押抜きせん断力学モデルを図-4 に示す。押抜きせん断耐力 P_{sx} は、図-4 に示すように、RC 床版の輪荷重位置から曲げ圧縮応力を受ける等価応力ブロック a の範囲には、コンクリートのせん断強度 f_{cv0} を考慮した押抜きせん断耐力、また、輪荷重設置から 45 度底面のダウエル作用の影響を受ける範囲にはコンクリートの引張強度 f_t を考慮した押抜きせん断耐力として評価

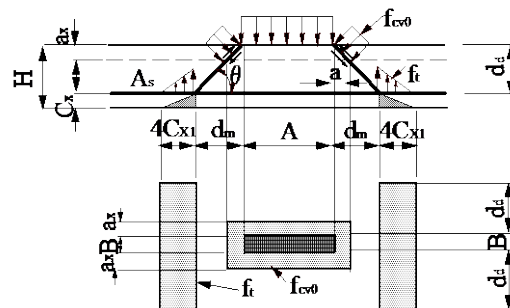


図-4 押抜きせん断力学モデル

表-5 実験耐力および理論押抜きせん断耐力

供試体	最大耐力 P_{max} (kN)	理論押抜き せん断耐力 P_{sx} (kN)	耐力比 (P_{sx}/P_{max})	理論 耐力比 $P_{sx}(MG/RC)$
RC-R1	172.5	165.2	0.96	—
RC-R2	171.5		0.96	
MG-R1	165.0	163.0	0.99	0.99
MG-R2	170.0		0.96	

しており、これを合計したものを RC 床版の押抜きせん断耐力 P_{sx} として式(3)で与えている。

$$P_{sx} = f_{cv0} \{ 2(B+2a)a + 2(A \times a) \} + f_t \{ 4(2d_d + B)C_X \} \quad (3)$$

$$f_{cv0} = 0.688 f_c^{0.610} \leq f_c = 80 \text{ N/mm}^2$$

$$f_t = 0.269 f_c^{2/3}$$

ここで、A、B：載荷版の主鉄筋、配筋方向の辺長(mm)、a：主鉄筋方向 a_x 、配筋鉄筋方向 a_y の等価応力ブロックの平均値(mm) ($= (a_x + a_y)/2$)、 C_X ：ダウエル効果が影響を示す寸法効果(=主鉄筋のかぶり(C'_x)と配筋方向のかぶり(C'_y)の平均値(mm))、 C'_d ：主鉄筋のかぶり(C'_x)と配筋方向のかぶり(C'_y)の平均値(mm) ($= (C'_x + C'_y)/2$)、 d_d ：主鉄筋の有効高さ(d_x)と配筋方向の有効高さ(d_y)の平均値(mm) ($= (H - C'_d)$)、H：床版全厚(mm)、 f_{cv0} ：コンクリートのせん断強度(N/mm^2)⁷⁾、 f_t ：コンクリートの引張強度(N/mm^2)

なお、式(3)における破壊荷重付近の等価応力ブロック a は簡易的に式(4)として与えられている。

$$a/d = m/2 \left\{ P - P' (e'_{cu} \cdot E_s / f_y) + \sqrt{ \left[P - P' (e'_{cu} \cdot E_s / f_y) \right]^2 + P' \cdot 4\beta / m \cdot d' / d \cdot e'_{cu} \cdot E_s / f_y } \right\} \quad (4)$$

ただし、 $m = f_y / 0.85 f_c$ 、 $p = A_s / (b \cdot d)$ 、 $p' = A'_s / (b \cdot d)$

ここで、 f_{cd} ：コンクリートの設計圧縮強度(N/mm^2)、 f_y ：鉄筋および格子鋼板筋の引張強度(表-2)、 A_s ：引張側の鋼材量、 A'_s ：圧縮側の鋼材量、d：有効高さ、 d' ：圧縮縁から圧縮鋼材の図心までの距離、b：部材幅(=100cm)、 E_s 、 E'_s ：鉄筋のヤング係数(=200kN/mm²)、 e'_{cu} ：コンクリートの終局ひずみ(=0.0035)、 β ：0.8

6.2 RC 床版および MG 床版の押抜きせん断耐力

式(3)より算出した RC 床版および MG 床版の理論押抜きせん断耐力および実験より得られた結果を表-5 に示す。

RC 床版の走行荷重実験における最大耐力は、供試体 RC-R-1, R2 で、それぞれ 172.5kN, 171.5kN である。これに対して式(3)より算出した理論押抜きせん断耐力 P_{sx} は 165.2kN となり、実験より得られた最大耐力に比して 96%となっている。

MG 床版は、一面加工した格子鋼板筋を用いたことから、式(3)におけるダウエル作用の影響が及ぼす寸法効果 C_x は、かぶり 20mm に格子筋の厚さ 9mm を加えた値、すなわち $C_x=29\text{mm}$ として適用した。走行荷重実験による最大耐力は、供試体 MG-R1, R2 でそれぞれ 165.0kN, 170kN である。また、式(3)より算出した理論押抜きせん断耐力は 163.0kN であり、実験による最大荷重の 96%~99%と近似した結果が得られている。

よって、格子鋼板筋を用いた床版の押抜きせん断耐力は、阿部らが提案する押抜きせん断耐力式を適用することで評価できる。

6.3 RC 床版および MG 床版の S-N 曲線との整合性

RC 床版および MG 床版の基準荷重 P を押抜きせん断耐力 P_{sx} で除した S 値 ($=P/P_{sx}$) と輪荷重走行疲労実験による等価走行回数 N_{eq} の関係を図-5 に示す。なお、図-5 には松井ら⁵⁾が提案する S-N 曲線式も併記した。

RC 床版の S-N 曲線式との整合性は、 S 値 ($=P/P_{sx}=60/165.2=0.363$) と本実験より得られた等価走行回数 N_{eq} との関係より、阿部らが提案する S-N 曲線上にプロットされる結果となっており、整合性が評価できる。

MG 床版の S-N 曲線式との整合性は、 S 値 0.368 ($=P/P_{sx}=60/163.0=0.368$) と等価走行回数 N_{eq} との関係から、供試体 MG-F1, F2, F3 とともに S-N 曲線式上にプロットされる結果が得られた。

以上の結果より、本実験の範囲内では格子鋼板筋を用いた MG 床版は、阿部らが提案する押抜きせん断耐力式および S-N 曲線式を適用することで理論推定を行うことが可能である。しかし、本提案の MG 床版に関しては、格子鋼板筋の配置法も含め、今後更なる実験検証を行い、押抜きせん断耐力および S-N 曲線式との整合性について検討する必要がある。

7. まとめ

本研究は、新たに開発された格子鋼板筋を用いた道路橋床版の実用性を検証するために走行荷重実験および輪荷重走行疲労実験を行い、耐力力性能および耐疲労性について検証した。その結果、以下の知見が得られた。

(1)走行荷重実験より、MG 床版供試体の最大耐力力

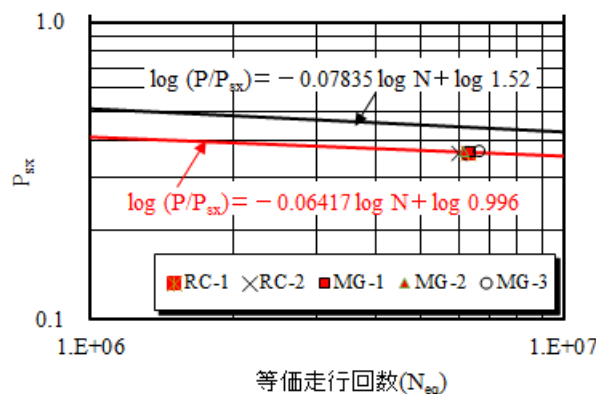


図-5 S-N 曲線

は、RC 床版供試体の最大耐力力とほぼ同等の耐力力を有することを示した。また、理論押抜きせん断耐力力との比較においても理論値と実験値は近似する結果が得られた。

- (2)等価走行回数より、従来の鉄筋を配置した RC 床版供試体と比較して格子鋼板筋を用いた MG 床版供試体の等価走行回数は、ほぼ同程度の結果が得られたことから、格子鋼板筋を用いた床版は十分な耐疲労性を有しており、実用性が評価できる。
- (3)鉄筋に替わり鋼板格子筋を配置した床版部材の押抜きせん断耐力力、阿部らが提案する式を適用することで評価することが可能である。また、S-N 曲線式との整合性について検証した結果、本実験の範囲内においては S-N 曲線上にプロットされる結果が得られた。

参考文献：

- 1)及川裕介，水口和彦，阿部忠，塩田啓介：展張格子筋を用いた RC 床版の下面増厚補強における補強効果および耐疲労性の評価，セメント・コンクリート論文集，Vol.69，No.1，PP.618-625，2016.2
- 2)水口和彦，阿部忠，野口博之，塩田啓介：鋼板格子筋を用いた下面増厚補強 RC 床版における耐疲労性の評価，構造工学論文集，Vol.62A，PP.1250~1260，2016.3
- 3)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II，III，2012.
- 4)阿部忠，木田哲量，高野真希子，川井豊：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐力力および耐疲労性の評価，土木学会論文集 A1，pp.39-57，2011.1
- 5)松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理，森北出版，2007.10
- 6)前田幸雄，松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力力の評価式，土木学会論文集，第 348 号，pp.133-141，1984.1
- 7)阿部忠，木田哲量，徐銘謙，澤野利章：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐力力評価式に関する研究，構造工学論文集，Vol.53A，pp.199-207，2007.3