論文

格子鋼板筋を用いた床版部材の耐疲労性の評価

水口和彦*，阿部　忠**，徐　銘謙***，塩田啓介****

*博士(工)，日本大学准教授，生産工学部土木工学科（〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1）
**博士(工)，日本大学教授，生産工学部土木工学科（〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1）
***博士(工)，国立台北科技大学助教，建築工学科（10608 台北市忠孝東路三段一號）
****JFE シビル株式会社，技術部（〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4）

本研究は，施工の合理化・省力化を目的として開発された格子鋼板筋を床版部材に配置した場合の耐疲労性について輪荷重走行疲労試験より検証を行い，実橋床版への実用性を評価したものである．実験では輪荷重走行による疲労実験を実施し，従来の鉄筋を配置した RC 床版と格子鋼板筋を配置した MG 床版とを比較することで実用性を評価した．その結果，格子鋼板筋を用いた床版部材は従来の鉄筋を用いた床版と同様の等価走行回数が得られたことから，十分に耐疲労性を有しており，実用性が評価できることを明らかにした．

キーワード：格子鋼板筋，等価走行回数，耐疲労性

1. はじめに

近年，建設建設事業費の縮減により，施工の合理化・省力化が要求されている一方で，現場における技能労働者の不足が深刻な問題となっている．とくに，RC 構造物の建設において，鉄筋を加工し，組み立てなどを行う鉄筋工に関わる技能労働者が不足している.このような問題に対処するための 1 つ対策として，従来の鉄筋に替わる引張材として鋼板格子筋が開発された．

鋼板格子筋は，縞鋼板や鋼板にレーザーでスリットを挿入し，ジャッキで展張して格子状に形成した格子筋（以下，展張格子鋼板筋とする）とレーザーで直接格子状に切断し，軸直角方向および軸方向が一面加工した格子筋（以下，格子鋼板筋とする）の 2 タイプが提案されている．また，その特長としては，格子状に面加工することから，一般的な鉄筋を格子状に組み立てる工程が省略されるため施工の合理化・省力化が図られる．また，鉄筋を配置した場合に比して，格子断面が鉄筋の 1 方向分の厚さとなり，死荷重の軽減が図れることなどが挙げられる．筆者らは 2 タイプの格子鋼板筋を RC はり，RC 床版の増厚補強における引張補強材として鉄筋の代わりに使用した供試体に対し静的載荷試験や輪荷重走行疲労実験を行い，従来の鉄筋を用いた場合と同等の補強効果および耐疲労性を有することを明らかにし，引張補強材としては実用性があることを確認した [1), 2)]．しかしながら，格子鋼板筋を従来の鉄筋に変えた新構造物としての有効性に関する検証はほとんど行われていないのが現状である．

そこで本研究では，床版部材において従来の鉄筋に替わる新たな材料としてレーザーで直接切断加工した格子鋼板筋を床版に配置した場合の耐荷力性能および耐疲労性の検証を行い，実橋床版部材への適用性を検証することを目的とする.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）の 2 種類の供試体を製作し，輪荷重走行による疲労実験を実施し，耐疲労性および破壊状況などを比較検討することで，MG 床版の実用性を評価する．

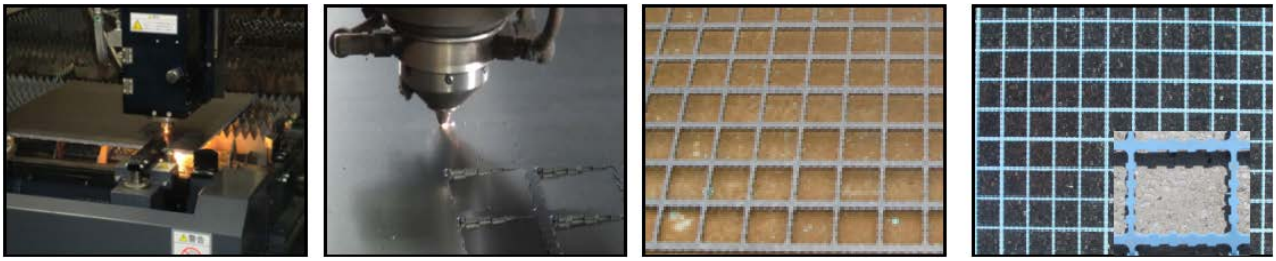
2. 格子鋼板筋の概略および製作方法

2.1　格子鋼板筋の概略

格子鋼板筋には，縞鋼板および鋼板（鋼種：SS400，SM400，SM490）を用いる．鋼材厚は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の断面積を有する矩形に切断することを想定し板厚は 25mm までの使用が可能である．

2.2　格子筋の製作方法

格子鋼板筋の製作方法を写真－1 に示す．格子鋼板筋の製作方法は，縞鋼板あるいは鋼板を設置し，



(1)レーザー切断　(2)格子状に切断　(3)格子鋼板筋　(4)防腐剤の塗布

写真－１　格子鋼板筋の製作方法

直接レーザで格子状に切断加工する（写真－1(1), (2)）.切断加工された格子鋼板筋は（写真－1(3)）に示すような形状となり，軸直角方向（主鉄筋）および軸方向（配力筋），それぞれの断面積を自由に切断加工することが可能である.切断加工された格子鋼板筋を補強部材に合わせて加工し，必要に応じて防錆材を塗布する（写真－2(4)）．その後，床版部材に配置する．

以上のように，格子鋼板筋は，鋼板を直接レーザー加工することから一面状に製作されることから，軸直角方向および軸方向の有効高さが同一となる．よって，施工においては型枠に直接設置することから，施工の合理化・省力化が可能となる．

3.　使用材料および供試体概要

3.1　使用材料

（1）RC 床版

RC 床版供試体のコンクリートには，普通ポルトランドセメントと 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道示の規定に基づいて 24N/mm^2 以上となるように配合した．ここで，RC 床版の配合条件を表－1 に示す．次に，鉄筋は SD295A，D10 を用いた．ここで，コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表－2 に示す．

（2）格子鋼板筋

1）材料特性値

格子鋼板筋には，材質 SS400，厚さ 4.5mm の縞鋼板を用いる．ここで，格子鋼板筋の材料特性値は，降伏強度が 339N/mm^2，引張強度は 441N/mm^2 である．なお，縞鋼板から採取した試験片を用いて引張試験（試験規格：JIS Z 2241）を行った結果，降伏強度は 327N/mm^2，引張強度は 430N/mm^2 であった．

2）付着強度の検証

格子鋼板筋には縞鋼板や鋼板が用いられることから，異形鉄筋と異なりコンクリートとの付着面が平滑となる．したがって，異形鉄筋と同等の付着性能を確保することが重要となる．

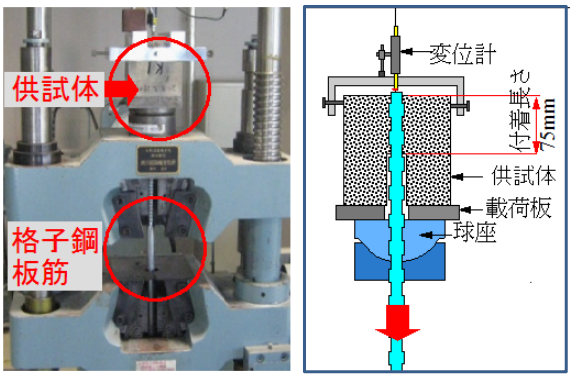
そこで，格子鋼板筋の引き抜き試験を行い，付着強度試験を評価した．なお，引抜き試験は JSCE-E 516- 2003 に準拠して実施した．

表－1　コンクリートの示方配合

スランプ (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量（kg/m³）				
				C	W	S	G	Ad
18	4.5	52.5	48.1	324	170	847	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/mm²)	鉄筋（SD295A）		
		降伏強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)	弾性係数 (N/mm²)
RC床版	35	368	516	200



(1) 引き抜き試験　(2) 試験概要

図－１　引き抜き試験の概要

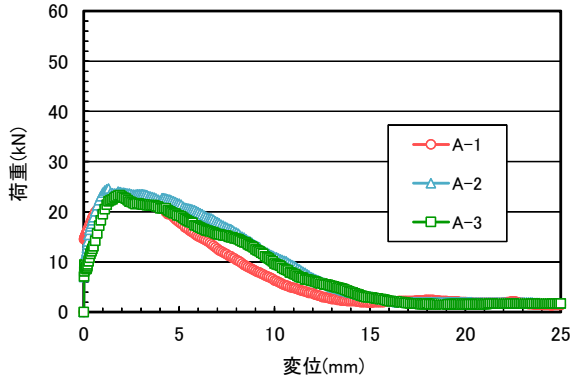
3）引き抜き試験供試体

引き抜き試験用の供試体の材料には，普通ポルトランドセメントと最大寸法 20～25mm の粗骨材を使用し，圧縮強度 30N/mm^2，スランプ値 10±2.5cm を目標値として示方配合を行った．なお，供試体の製作は，JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠して行った．

格子鋼板筋には，板厚 9.0mm，縦筋幅 15mm の鋼板（JFE-HCP400-1）および縞鋼板（SS400）を用いた．付着面は 9mm ごとに 2mm の突起を設ける構造とした．また，比較として SD295A D13 の異形鉄筋に対しても同様の実験を行った．

4）引き抜き試験（引張試験）

格子鋼板筋の引き抜き試験は，エポキシ系樹脂塗装を用いる鉄筋コンクリートの設計指針（土木学会）の付着試験方法（JSCE-E516-2003）に準拠した．



図－2　荷重と変位の関係

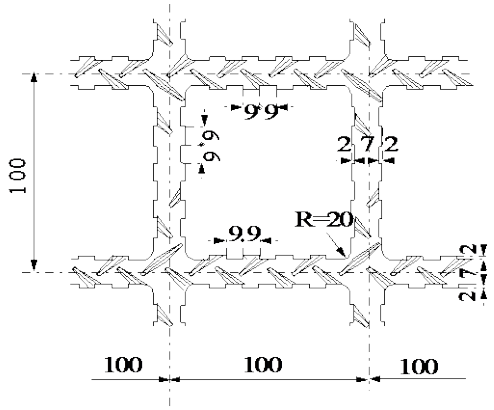
表－3　格子鋼板筋および鉄筋の付着強度

鋼材	鋼種	付着面の状態	表面積 (mm²)	降伏強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)	変位0.04mm時の平均荷重 (kN)	付着強度 (N/mm²)
格子鋼板筋	一般鋼板 (9×15mm)	突起付き	3600	245	400	11.47	3.19
		突起付き＋亜鉛メッキ	3600			11.60	3.11
	縞鋼板 (9×15mm)	突起付き	3600			16.30	4.53
		突起付き＋エポキシ樹脂塗装	3600			10.75	2.99
異形鉄筋	SD295A D13	—	3000	295	400	8.97	2.99

ここで，実験状況を図－1 に示す．

5）付着強度

引き抜き試験より得られた荷重と変位の関係を図－2，付着強度の結果をまとめたものを表－3 に示す．一般鋼板を用いた格子鋼板筋の付着強度の平均は 3.19N/mm^2，亜鉛メッキした鋼板の付着強度の平均は 3.11N/mm^2 である．また，縞鋼板を用いた格子鋼板筋の付着強度の平均は 4.53N/mm^2，エポキシ系樹脂塗装した鋼板の付着強度の平均は 2.99N/mm^2 である．一方，異形鉄筋（SD295A）D13 の付着強度の平均は 2.99N/mm^2 でり，全ての供試体において異形鉄筋と同等以上の付着強度を有することが確認された．よって，本実験では防錆材としてエポキシ系樹脂塗装した格子鋼板筋を用いる．



図－3　格子鋼板筋の寸法

6）鋼板格子筋の形状および格子間寸法

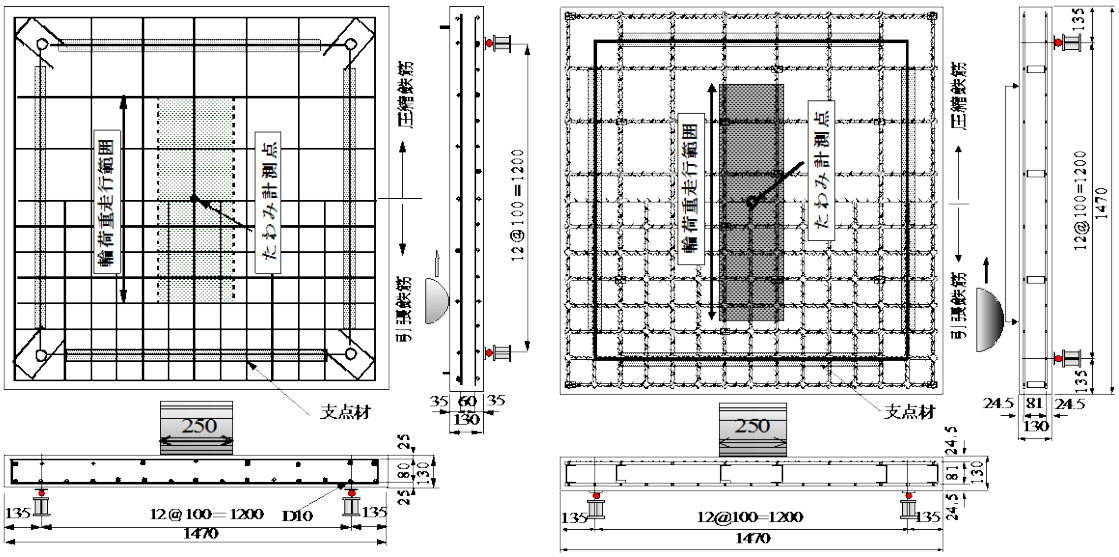
RC 床版の引張鉄筋には D10（断面積 71.3mm^2）を軸直角方向を軸方向ともに 100mm 間隔，圧縮側はその 1/2 の鉄筋量，すなわち 200mm 間隔である．よって，格子鋼板筋は同様に引張側の軸直角法および軸方向の格子間寸法は 100mm×100mm，断面寸法は，厚さ 9.0mm，幅 7.0mm，断面積は 63mm^2 とする．また，付着力を高めるために 9mm 間隔ごとに 2mm の突起を設けた．ここで，格子鋼板筋の寸法および形状を図－3 に示す．

3.2　供試体概要

(1) RC 床版供試体

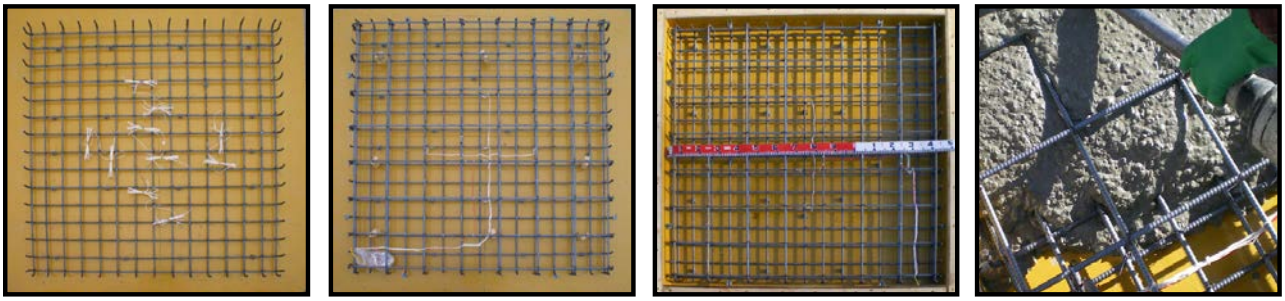
本実験に用いる供試体の寸法は，2014 年改定の道路橋示方書・同解説[3)]の規定に基づいて設計し，その 1/2 モデルとする．ここで，RC 床版供試体の寸法および鉄筋配置を図－4(1)に示す．

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



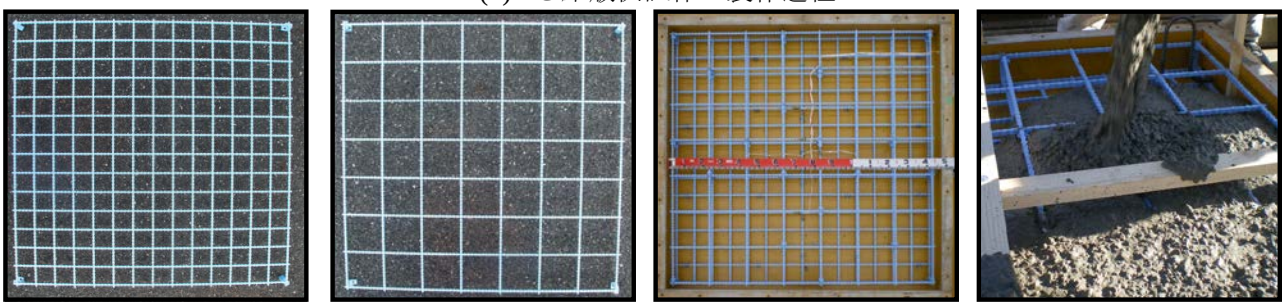
(1) RC床版　　(2) MG床版

図－4　RC・MG 床版寸法



1)引張鉄筋組立　2)圧縮鉄筋組立　3)鉄筋組上げ　4)コンクリート打設

(1) RC 床版供試体の製作過程



1)引張側格子筋　2)圧縮側格子筋　3)格子筋組上げ　4)コンクリート打設

(2) MG 床版供試体の製作過程

図－5　RC・MG 床版の製作状況

筋に D10 を 100m 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．供試体名称を RC-1 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 床版と同様である．ここで，MG 床版供試体の寸法を図－4(2)に示す．鉄筋は複鉄筋配置とし，主鉄筋および配力筋の格子間は 100m とし，軸直角方向および軸方向の有効高は 105mm である．また，圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置し，有効高は 25mm である.供試体名称は MG-1，2 とする．

3.3　供試体の製作手順

供試体の製作手順を図－5 に示す．RC 床版は型枠上に引張側の鉄筋を図－5(1)，1)に示すように，軸直角方向，すなわち主筋を 100mm 間隔で配置する．次に軸方向，すなわち配力筋方向に主鉄筋と同様に 100mm 間隔で配置し，格子状に組立て，結束線で一体化する作業を行う．次に，圧縮側鉄筋を図－5(1)，2)に示すように組立筋を配置し，軸方向および軸直角方向に 200mm 間隔で配置し，結束線で一体化する．次に，側面の型枠を製作する．一体化した状態を図－5(1)，3）に示す．鉄筋の組立に要する時間は 120 分程度である．次に，MG 床版は図－5(2)，1)に示すように，引張側の格子間隔を軸直角方向および軸方向ともに，鉄筋と同様に 100mm 間隔で製作する．また，圧縮側についても RC 床版と同様に 200mm 間隔で製作する．製作した格子鋼板筋に防錆材を塗布して，工場から出荷する．製作した格子鋼板筋を引張側と圧縮側にそれぞれ図－5(2)，1)，2)に示す．現場における作業としては，製作した格子鋼板筋を型枠に設置し，かぶりを考慮して引張側に設置し，組立筋を配置して圧縮側の格子筋を設置する（図－3(2)，3)）．この間に要する時間は 30 分程度であり，大幅に施工時間が短縮されることから施工の合理化が図られる材料である．その後，コンクリートを打設して，養生を行う．

以上のように，格子鋼板筋を用いた MG 床版は，実施工における鉄筋の組立時間が大幅に短縮できることから，施工の合理化および施工に伴うコストの縮減効果に大きく寄与するもの考えられる．

4. 実験方法および等価走行回数

4.1　実験装置の概要

RC 床版および MG 床版の耐疲労性を評価する実験には，輪荷重走行疲労実験を用いる．輪荷重走行試験装置は，鋼製の反力フレームのはりに，鋼製の車輪（幅 25cm，直径 45cm）と油圧式の振動疲労試験機（500kN）を固定し，供試体を設置した台車をモーターとクランクアームにより水平方向へ往復運動させて荷重の走行状態を実現するものである．本実験に用いた輪荷重走行試験装置を写真－2 に示す．

写真－2 輪荷重走行試験装置

4.2　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±450mm の範囲（900mm）に輪荷重を連続走行させる実験である(写真－2)．これは，本供試体の支間は 1,200mm であるが，床版厚が 130mm であり，荷重が 45 度に分布することを考慮すと軸方向支点間内全域に荷重が分布するものとなる．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 ずつ増加し，供試体が破壊するまで 20,000 回走行ごとに荷重を増加する．たわみ，ひずみの計測は床版中央および中央に配置された鉄筋ひずみより計測する．たわみひとずみ計測は 1, 10, 100, 1,000, 5,000 回および 5,000 回以降は 5,000 回走行ごとに行う．計測点は床版中央のたわみとする．なお，RC 床版および MG 床版の耐疲労性評価は等価走行回数より評価する．

4.3　等価走行回数

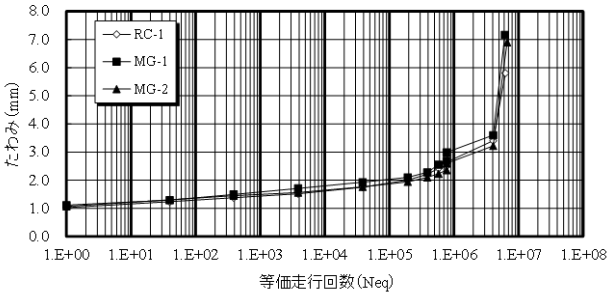
輪荷重走行疲労実験では，20,000 回走行ごとに荷重を増加させることから，基準荷重と載荷荷重および実験走行回数の関係から等価走行回数 Neq を算出して耐疲労性を評価する．輪荷重走行疲労実験による等価走行回数 Neq は，マイナー則に従うと仮定すると，式(1)として与えられる．なお，式(1)に適用する S-N 曲線の傾きの逆数 m は，松井らが提案する S-N 曲線式の傾きの逆数の絶対値m＝12.7 を適用[4]する．また，本供試体の基準荷重は，道示 I に規定される床版の 1/2 モデルとしたことから，活荷重 100kN の 1/2 に安全率 1.2 を考慮して 60kN として式(1)に適用する．

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

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)

表－4　実験走行回数および等価走行回数

供試体		荷　重 80 kN	荷　重 100 kN	等価走行回数合計	走行回数比
RC-1	実験走行回数	20,000	8,100	6,092,884	—
	等価走行回数	772,240	5,320,643		
MG-1	実験走行回数	20,000	6,214	6,027,197	0.99
	等価走行回数	772,240	5,254,956		
MG-2	実験走行回数	20,000	12,614	6,684,066	1.10
	等価走行回数	772,240	5,911,826		



図－6　たわみと等価走行回数の関係

5. 実験結果および考察

5.1　等価走行回数

本実験における 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表－4 に示す．

（1）RC 床版

RC 床版供試体 RC-1 の等価走行回数は 6.09×10^6 回である．この RC 床版供試体の等価走行回数 N_{eq} を基準として，格子鋼板筋を配置した MG 床版の耐疲労性の検証を行う．

（2）MG 床版

MG 床版供試体 MG-1，MG-2 の等価走行回数は，それぞれ 6.02×10^6 回，6.68×10^6 回で，平均等価走行回数は 6.35×10^6 回である．RC 床版供試体と比較すると 1.04 倍の等価走行回数となっており，ほぼ同等の結果が得られている．

以上の結果から，RC 床版に鉄筋に変わる格子鋼板筋を配置した供試体は，通常の鉄筋を配置した供試体とほぼ同等の耐疲労性を有する．よって，床版部材に鉄筋に替わり格子鋼板筋を配置した床版でも十分に実用性があるものと判断できる．

5.2　たわみと等価走行回数

輪荷重走行疲労実験におけるたわみと等価走行回数の関係を図－6 に示す．

（1）RC 床版

RC 床版供試体 RC-1 の初期荷重 80kN 載荷時のたわみは 1.04mm である．その後荷重 80kN で 20000 回走行付近まではたわみは緩やかに増加してる．荷重 100kN に増加した時点のたわみは 2.8mm で，その後の走行でたわみの増加傾向が大きくなっている．たわみが 3.0mm を超えた付近から急激に増加し，破壊

に至った．破壊時のたわみは，等価走行回数 6.09×10^6回で 5.81mm である．

（2）格子鋼板筋を用いた供試体

MG 床版供試体 MG-1，MG-2 の初期荷重 80kN 載荷時のたわみはそれぞれ 1.11mm、1.07mm である．たわみの増加傾向はRC床版供試体とほぼ同様の傾向を示しており，たわみが 3.0mm を超えた付近から急激な増加がみられ破壊に至っている．終局時のたわみはそれぞれ 7.17mm、6.90mm である．

5.3　破壊状況

本実験における RC 床版供試体およびMG床版の下面のひび割れ状況を図－7 に示す．

（1）RC 床版

RC 床版供試体 RC-1 の破壊状況は図－7(1)に示すように，床版下面には走行疲労による 2 方向ひび割れが引張鉄筋に沿って発生し，格子状を形成している．また，押抜きせん断破壊に伴い，引張鉄筋のダウエル効果が及ぼす範囲でかぶりコンクリートのはく離が見られる．

（2）MG 床版

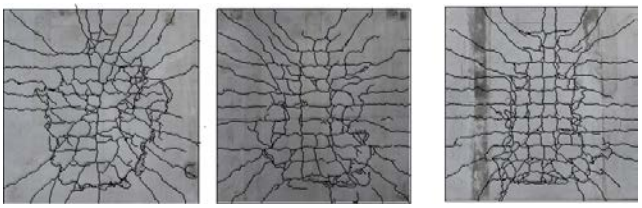
格子鋼板筋を配置した供試体のひび割れ状況は，図－7(2)，(3）に示すように格子筋の格子間に沿った 2 方向のひび割れが発生している．破壊時においては，RC 床版同様にダウエル効果の影響により，はく離が見られる．破壊は押抜きせん断破壊である．

８．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輪荷重走行疲労実験を行い，施工性および耐疲労性を検証した．その結果，以下の知見が得られた．

(1)鉄筋に替わる格子鋼板筋は，鋼板および縞鋼板を用いてレーザーで直接切断加工することから，格子間，必要断面積，付着性を高める突起の製作，折り曲げ加工が任意で施工可能で有り，施工現場においては組立のみの施工となる．さらには，組立後は，錆の発生を抑制するためのエポキシ系塗装あるいは亜鉛メッキ加工が出来ることから塩害地域にいおいても有効的な材料である．

(2)工場で製作された格子鋼板筋を型枠に設置することから施工性が良く，供試体の製作においては，施工人数 2 名で行った場合，鉄筋を用いた組立に要する時間は 120 分，格子鋼板筋を配置した場合は30分程度であり，大幅な施工時間の短縮となる．よって，施工現場においては施工の合理化・省力化に大きく寄与する．



(1)RC-1　(2)MG-1　(3)MG-3

図－7　RC・MG 床版の破壊状況

(3)等価走行回数より，従来の引張材に用いられている鉄筋を配置した RC 床版供試体に比して格子鋼板筋を用いた MG 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と判断できる．

(4)たわみと等価走行回数の関係より，RC・MG 床版供試体ともにたわみ 3mm 付近までは輪荷重走行により緩やかにたわみが増加し，それ以降は急激にたわみが増加し，全ての供試体で押抜きせん断破壊に至った．

参考文献：

1)水口和彦，阿部忠，塩田啓介，今野雄介：2 タイプの鋼板格子筋を用いたRC床版の下面増厚補強法における補強効果および耐疲労性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol37，No.2，pp.379-384, 2015.

2)阿部忠，師橋憲貴，塩田啓介，今野雄介：補強材として新たに開発された 2 タイプの鋼板格子筋を用いた RC はりの増厚補強効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.1387-1392，2015.

3)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，2012.

4)松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007.

（2016 年 7 月 18 日受付）