論文　負曲げモーメントに対する上面増厚床版の疲労耐久性照査

水越　睦視*[1]・東山　浩士*[2]・大西　弘志*[3]・松井　繁之*[4]

要旨：今回は床版上面増厚補強用コンクリートに SFRC を適用した場合の主桁直上の負曲げモーメント領域の設計用 S-N 曲線を得ることを目的に SFRC 増厚部材の負曲げ疲労試験を行った。筆者らが既に得ていた SFRC の基本的な曲げ疲労強度との比較を行い，部材の形状寸法および打継ぎ界面の影響を加味した上面増厚設計用 S-N 曲線を提案した。この S-N 曲線を用いて疲労設計を行うことにより，床版支間に応じた最適増厚量の決定が可能となった。

キーワード：疲労照査，負曲げモーメント，床版，上面増厚工法，SFRC

1.　はじめに

劣化した道路橋床版の代表的な補強工法の一つに，床版上面に鋼繊維補強コンクリート(SFRC)を打ち足し，疲労耐久性の向上を図る床版上面増厚工法がある。一般に道路橋示方書(以下，道示という)[1)]で提案されている新規製作床版の床版厚まで増厚する簡便な方法である。

正曲げモーメント領域では，輪荷重走行疲労試験の結果から十分な疲労耐久性を有しており，道示 [1)]に従い決定した床版厚を有している場合は，特に疲労照査を行わなくてもよいと考えられる [2)]。一方，増厚床版の主桁直上の負曲げモーメントに対する疲労耐久性は明らかにされておらず，曲げ疲労照査を行う必要がある。

このため，本研究で SFRC 増厚 RC はりの負曲げ疲労試験を行い，筆者らが既に得ている SFRC の基本的な曲げ疲労曲線 [3)]と比較し，部材の形状寸法および打継ぎ界面の影響を加味した設計用 S-N 曲線を導き，上面増厚床版の負曲げ領域の疲労照査方法を提案した。

2.　実験概要

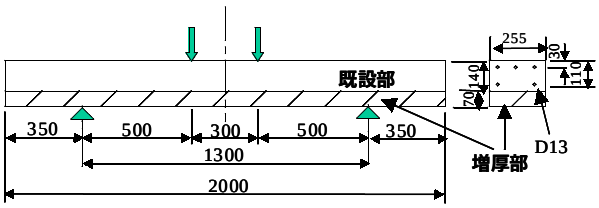
2.1　供試体

供試体の既設部には呼び強度 30N/mm^2 のレディーミクストコンクリートを，増厚部には早強セメントを用いた現場練り SFRC (W/C=45%,目標スランプ 5.0cm)を用いた。SF は，インデント形カットワイヤー品(寸法 0.6φ× 30mm）を SF 混入率（体積百分率 Vf）で 1.0 %使用した。まず,主鉄筋方向 2000mm，配力鉄筋方向 3000mm の RC 床版(既設部)を製作後，あらかじめ床版上面に目荒らしを行い 28 日間養生した。その後，床版上面のショットブラストによる研掃を実施し，表面が乾燥した状態で増厚コンクリートを専用の大型コンクリートフィニッシャーにより敷きならし，床版厚が 210mm となるよう締め固めた。増厚コンクリートの養生が終了後，増厚補強した床版から主鉄筋方向に SFRC 増厚 RC はりを切り出し，負曲げ疲労試験に供した。供試体の形状寸法を**図－1**に示す。なお，供試体は 3 体で載荷荷重と使用したコンクリートの物性は**表－1**中に示すとおりである。

* 1 住友大阪セメント㈱　セメント･コンクリート研究所　副主任研究員　博（工）（正会員）
* 2 近畿大学講師　理工学部　社会環境工学科　博（工）（正会員）
* 3 大阪大学大学院助手　工学研究科　土木工学専攻　工修（正会員）
* 4 大阪大学大学院教授　工学研究科　土木工学専攻　工博（正会員）

2.2　載荷方法

図－1に示すように増厚部が下面になるように載荷し，負曲げモーメント領域の増厚 RC 部材の疲労特性を調べた。**表－1**の載荷プログラムにおいて，SF-1.0-1 では，上限載荷荷重をはり下縁の引張応力が約 3.0N/mm^2 に相当する 24.5kN とし，200 万回の載荷を行い，200 万回の載荷で破壊しない場合は 5kN 毎に荷重を引上げ疲労破壊するまで載荷した。この 24.5kN の載荷荷重は床版載荷荷重に換算すると，ほぼ B 活荷重の 98kN に相当する。SF-1.0-2 および SF-1.0-3 では，段階載荷を行わず，前者は上限載荷荷重 34.3kN で疲労破壊に至った約 240 万回まで載荷し，後者は上限荷重 39.2kN で約 40 万回の載荷を行い破壊に至らしめた。なお，下限載荷荷重は 4.9kN で全ての載荷で一定とした。また，測定項目は，スパン中央たわみ，ひび割れ発生状況とした。



図－1　負曲げ疲労試験の概要

表－1　負曲げ疲労試験の載荷プログラム

供試体の種類	下限荷重 (kN)	上限荷重 (kN)	各ステップの繰返し回数	破壊状況 疲労破壊×，非破壊→	コンクリートの性質 圧縮強度 (N/mm^2)	コンクリートの性質 ヤング率 (kN/mm^2)
SF-1.0-1	4.9	24.5	2,000,000	→	77.8 (SFRC)	32.8 (SFRC)
	4.9	29.4	2,000,000	→		
	4.9	34.3	1,601,025	×		
SF-1.0-2	4.9	34.3	2,402,118	×		
SF-1.0-3	4.9	39.2	403,800	×		
				既設部コンクリート	43.9	29.0

表－2　負曲げ疲労試験結果の概要

供試体の種類	はりの上限載荷荷重 (kN)	床版に換算した輪荷重*1 (kN)	① SFRC増厚RCはり下縁の上限荷重載荷時の発生曲げ応力 (N/mm^2)	② SFRCの静的曲げ破壊強度 平均値 (N/mm^2)	最大値 (N/mm^2)	最小値 (N/mm^2)
SF-1.0-1	24.5	97	3.02	12.0	13.0	10.7
	29.4	117	3.66			
	34.3	136	4.28			
SF-1.0-2	34.3	136	4.28			
SF-1.0-3	39.2	155	4.82			

供試体の種類	上限応力比 ①/② 平均値	最大値	最小値	載荷繰返し回数 (万回)	破壊状況 (疲労破壊 ×) (非破壊 →)
SF-1.0-1	0.25	0.28	0.23	200	→
	0.31	0.34	0.28	200	→
	0.36	0.40	0.33	160	×
SF-1.0-2	0.36	0.40	0.33	240	×
SF-1.0-3	0.40	0.45	0.37	40	×

*1:床版支間2.0m

3.　SFRC増厚RCはりの負曲げ疲労試験結果

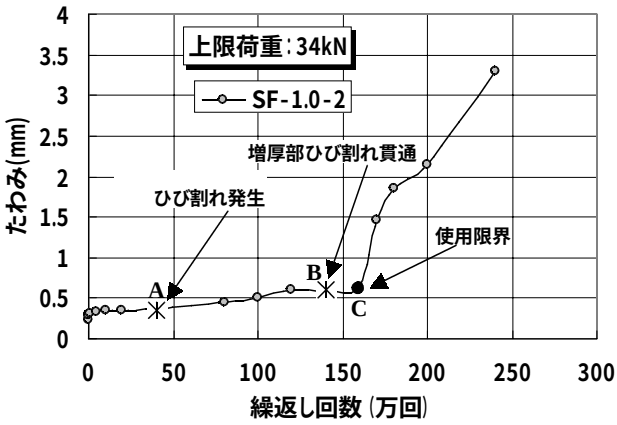
SFRC 増厚はりの負曲げ疲労試験の概要を**表－2**に示す。表中にははり供試体に載荷した上限荷重を床版として考えた場合の輪荷重に換算した荷重も併記した。この輪荷重は以下のように求めた。はり供試体の厚さが 210mm であることから，床版厚 210mm を選定できる床版支間を，大型車の交通量を 1 車線当たり 2,000 台／日以上の条件で道示 [1)]に従い算出すると，1800mm ～ 2040mm となり，床版支間を 2000mm とした。主鉄筋方向の負曲げモーメントを道示 [1)]に従って求め，そしてはり供試体と同等のモーメント値が幅 1000mm の床版で発生する支間 2000mm の床版の輪荷重が決定できる。また，増厚コンクリート自身の曲げ破壊強度②は，増厚施工時に採取した 4 本の SFRC 小型無筋供試体の曲げ試験から得たものである。疲労試験における上限荷重時の SF 部の引張応力度①をこの②で除し，上限応力比として整理した。200 万回疲労強度が上限応力比で約 65 %程度であった SFRC 小型はりの曲げ疲労試験結果 [3)]よりも低い応力比で破壊している。

疲労試験結果の典型的なものとしてスパン中央たわみと繰返し回数の関係を SF-1.0-2 について**図－2**に示す。図より，供試体下面にひび割れが発生してから増厚部を貫通するまで(図中 A ～ B)は，ひび割れ面での繊維の架橋効果のため，たわみは微増に留まっているが，その後 C 点からたわみが急増し疲労破壊したことがわかる。この傾向は全供試体で同様であった。よって，この C 点を超えると比較的短い寿命で疲労による終局破壊に至るものと判断し，C 点を増厚 RC はりの使用限界

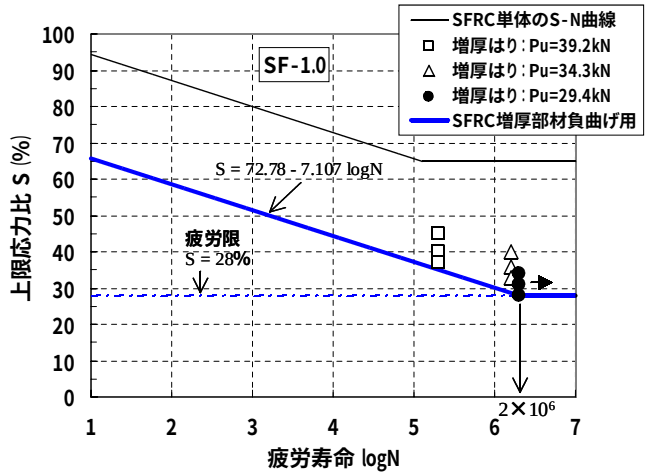
疲労寿命と考えた。**図－２**より，SF-1.0-2 では，上限荷重 34.3kN(平均上限応力比 0.36)の載荷で約 160 万回で使用限界に至ったと言える。同様に残りの供試体について使用限界寿命を求めると，上限荷重 39.2kN(平均上限応力比 0.40)の載荷を受けた SF-1.0-3 は約 20 万回で使用限界に達していた。また，SF-1.0-1 は第 1 ステップの 200 万回の載荷およびその後の上限荷重 29.4kN(平均上限応力比 0.31)の 200 万回の載荷終了まで破壊に至らず，34.3kN に上限荷重が引き上げられてから約 40 万回（計 440 万回）で使用限界に達した。

4．負曲げ設計用S-N曲線の作成

上記の SFRC 増厚 RC はりの結果に対して，既往の SFRC 小型無筋供試体(以下，SFRC 単体はり)の基本的な曲げ疲労曲線 [3]との相関を検討する。**図－３**は，SFRC 単体はりに対して求めた使用限界を考慮した設計用疲労曲線(破壊に対する生存確率 P=95 %の S-N 曲線)[3]と共に,SFRC 増厚はりの使用限界寿命をプロットしたものである。ここで，プロット点が同一寿命上に 3 点並んでいるのは，静的強度のバラツキを見るために，各供試体の上限応力比を平均値，最大値および最小値で表現したためである。図より，SFRC 単体に対する S-N 曲線に比べ，相当に低い上限応力比で使用限界に至ることがわかる。SFRC 単体の S-N 曲線は上限応力比が非常に高くなっているが，SFRC 増厚 RC はりは，既設コンクリートに引張部の増厚コンクリートを後打ちしたものであり疲労強度は大きく低下した。SFRC 単体の場合に比べ，増厚はりでは，着目対象の増厚コンクリート部は純引張状態に近く，かつ新旧コンクリートの打継ぎ面の付着劣化の影響を受けることが考えられる。すなわち，増厚はりの疲労ひび割れの進展速度は，無筋はりの場合よりも早くなり，低い応力比で使用限界に至ると考えられる。したがって，設計曲線として**図－３**の太実線（SFRC 増厚部材負曲げ用）のように，SFRC 単体はりの S-N 曲線を平行移動して低減したものとした。この設計用 S-N 曲線は，部材寸法が変化しても S-N 曲線の傾きは大きく変化しないものと考えたものである。図中の→は 200 万回の載荷で破壊しなかったことを意味する。図より，SF-1.0-1 のように上限荷重 29.4kN(平均上限応力比 0.31)の 200 万回疲労載荷で破壊しない供試体も認められた。SFRC 単体はりの疲労実験においても，上限応力比が 60 ～ 70 %の範囲で 200 万回の疲労載荷を受けても多数の供試体が破壊しなかったことからも [3]，疲労限を設けることとし，今回の非破壊データの上限応力比 0.28 を疲労限と考えた。データは少ないが基本となる SFRC 単体の S-N 曲線は多数のデータから得たものであり信頼性は高いと考えられる。この上限応力比を発生する上



図－２　スパン中央たわみと繰返し回数の関係



図－３　SFRC増厚はりの負曲げ疲労試験結果と設計曲線

限荷重から，床版での輪荷重に換算すると 117kN ～ 127kN となり，設計輪荷重より大きく安全側となっている。さらに，道示 [1]の床版上における負の設計曲げモーメントは支点が沈下しない連続版に対するものであり，実橋床版では有限な曲げ剛性を有する主桁で支持され，不等沈下によって上記設計曲げモーメント式通りの大きな曲げモーメントは発生せず安全側の曲げモーメント値となっている。したがって，Vf=1.0 %の SFRC を増厚部に使用した場合，静的曲げ破壊強度の 28 %以下に増厚部の引張応力度を制限することで，負曲げ疲労破壊を十分に防ぎ得ると考えられる。ただし，表面ひび割れへの水の侵入については防水工によって完全に止められるものと考えている。

5. 負曲げモーメント領域の疲労照査

前章で提案した S-N 曲線を用いた疲労照査を試みる。以下に，負曲げモーメント領域の上面増厚床版の疲労設計手法を述べることにする。**図－4** に設計フローを示す。なお，設計に用いる S-N 曲線には疲労限を設けているため，輪荷重による増厚部の発生応力より求めた上限応力比が疲労限以下となる場合は Ns は 無限大となり，N_{eq} を求めるまでもなく照査結果は十分安全となる。

基本荷重 P_0(ここでは，床版設計荷重)に対する等価繰返し回数 N_{eq} は次式より求められる [4),5)]。まず，設計の着目点を主桁直上とし，主桁を中心として左右に輪荷重のある一軸載荷を考えた。ただし，実橋では通行位置は固定されておらずある幅で分布するため，これに対する補正が必要であるが，今回は輪荷重の走行位置と分布に関数する補正係数は考慮しないものとする。

$$N_{eq} = C_1 \cdot N_t \qquad (1)$$

$$C_1 = \int_0^{Pmax} (P/P_0)^m f(P)dP \qquad (2)$$

ここに，

C_1：輪荷重の大きさの頻度分布に関する補正係数

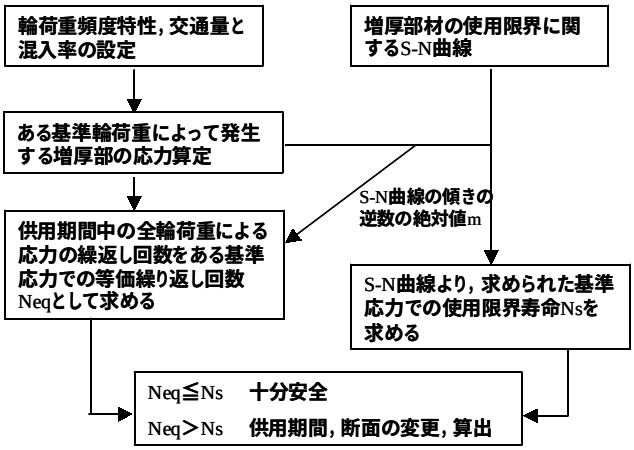
N_t：日総軸数

P：任意の荷重

P_0：基本荷重

f(P)：輪荷重の確率密度関数

m：logS － logN 表示の S-N 曲線の傾きの絶対値の逆数



図－4　上面増厚床版の負曲げ疲労設計フロー

次に，前章で提案した S-N 曲線は，S-logN 表示であり，N_{eq} を算出するためには logS-logN 表示の S-N 曲線に修正する必要がある。修正結果を式(3)に示す。

$$logS = -0.0858\ logN + 1.9872 \qquad (3)$$

負曲げ疲労照査結果の概要は**表－3** に示すようである。ここでは，昭和 39 年制定の道路橋示方書(以下，S39 道示)に準じて設計した床版(床版厚 190mm)を 10mm 切削した 180mm 厚の旧床版に，SFRC を用いて増厚した場合の照査を実施した。照査における変動要因は，床版支間と増厚量とし，既設コンクリートと SFRC の物性は**表－4** に示す値で一定とした。ここで，実圧縮強度と実曲げ強度は疲労照査に用いた照査実施時の強度である。

また，照査に用いた荷重特性は，**図－5**，**表－5**，**表－6** に示す大阪大学の収集結果を用いた [4)]。日交通量を 20000 台としたときの日総軸数 N_t は，1 レーンの値を用いて計算すると，N_t ＝ 26720 となる [4)]。C_1 は 0.02432 と

表－３　負曲げ疲労照査の概要

ケースNo.	床版支間 (m)	S39道示の既設床版厚 (cm)	有効高さ (cm)	引張側主鉄筋の配置間隔	増厚前床版厚 (旧床版1cm切削) (cm)	H8道示の設計床版厚 (cm)	増厚量 (cm)	増厚後床版厚 (cm)	主鉄筋断面の曲げモーメントMx (kN・m/m)	上限応力比 S (%)	使用限界寿命 Ns (疲労限なしと仮定) (万回)	判定
CASE1	2	19	16	D16@200	18	22	2.5	20.5	25.95	30.3	78	No
							3	21	25.99	28.5	159	No
							4	22	26.07	25.5	586	OK
							5	23	26.14	23.0	1,919	OK
CASE2	3	19	16	D16@150	18	25	5	23	36.97	32.5	34	No
							6	24	37.05	29.6	103	No
							7	25	37.13	27.1	286	OK
							8	26	37.21	25.0	745	OK
							9	27	37.28	21.8	3,669	OK
CASE3	4	19	16	D16@130	18	29	5	23	50.37	44.3	1	No
							7	25	50.53	36.9	8	No
							10	28	50.77	29.2	122	No
							11	29	50.58	27.2	278	OK
							12	30	50.93	24.2	1067	OK
CASE4	2+2	19	16	D16@200	18	24	2.5	20.5	34.32	40.1	3	No
							3	21	34.36	37.7	6	No
							4	22	34.44	33.7	23	No
							5	23	34.52	30.4	75	No
							6	24	34.60	27.7	226	OK
							7	25	34.69	25.3	628	OK

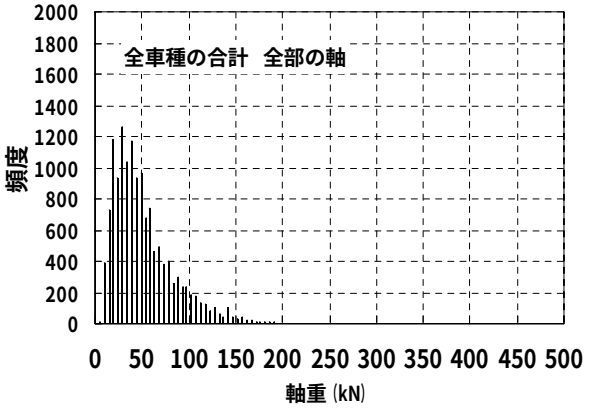
なり，供用年数を 50 年とした場合の基本荷重 P_0=98kN に対する等価繰返し回数は，

$$N_{eq} = C_1 \cdot N_t \times 365 \times 50$$
$$= 0.02432 \times 26720 \times 365 \times 50$$
$$= 1186 \times 10^4 \qquad (4)$$

となる [4]。

図－３の S-N 曲線の疲労限は S=28.0 %(N=200 万回)で，発生曲げ応力がこの値より小さければ，供用期間中は十分安全と考えられる。さて，**表－３**の中の各算定値について説明する。照査に用いた主鉄筋断面の曲げモーメント Mx は平成 8 年制定道路橋示方書 [1] に従って算出し，床版の死荷重モーメントも加え安全側の評価を行った。ただし，CASE4 は床版支間 4000mm の中間に縦桁が増設された場合を考慮した Mx とした。**表－３**中の黒塗り部分は，疲労限である S=28%を下回る必要最小増厚量である。ただし，疲労限よりも発生曲げ応力が小さい場合も，参考のために使用限界寿命 Ns を疲労限はないと仮定し，式(3) より求めた。

以下に，照査結果について考察する。床版支間 2000mm(CASE1)の場合，必要最小増厚量は 40mm となった。しかし，JH 増厚マニュアル [6]では，増厚量の最小値を，粗骨材の最大寸法，施工精度，乾燥収縮の影響などを考慮して 50mm と規定している。したがって，実際には増厚量を厚さ 50mm としなければならない。また，床版支間が大きくなるに伴い，必要最小増厚量も多くなる。床版支間 3000mm (CASE2)では，必要最小増厚量は厚さ 70mm となり，施工実績の平均的な値である。しかし，床版支間が 4000mm まで大きくなると(CASE3)，必要最小増厚量は厚さ 110mm とな



図－５　軸重頻度分布

表－５　自動車荷重に関するデータ

車種	車種	混入率(%)	分布	重量(kN) 平均値	重量(kN) 標準偏差
CARS	2軸車	48.3	LN	13.4	3.3
Type1	2軸車	30.7		74.6	41.8
Type2	後タンデム3軸車	12.4		196.8	78.4
Type3	前タンデム3軸車	2.2		158.1	69.8
Type4	セミトレーラー型4軸車	1.8		291.9	131.3
Type5	タンクローリー型4軸車	1.8		195.3	110.1
Type6	セミトレーラー型5軸車	2.8		393.4	139.3
Type7	セミトレーラー型6軸車	-		-	-

表－４　床版材料の物性

使用材料	設計値		既設部	増厚部
コンクリート	設計基準強度 f'ck	(N/mm^2)	17.7	24.0
	許容応力度 f'ca	(N/mm^2)	5.88	8.00
	実圧縮強度 f'c	(N/mm^2)	25.0	50.0
	ヤング係数 Ec	(kN/mm^2)	25.2	34.0
	実曲げ強度	(N/mm^2)	3.60	10.7
鉄筋	許容応力度 fsa	(N/mm^2)	137	-

り，死荷重の増加により下部構造へ及ぼす影響が大きくなると考えられる。JH 増厚マニュアル [6]では，比較的大きな曲げモーメントに対しては増厚量を多くし，さらに増厚部に鉄筋を配置した鉄筋補強増厚工法を適用している。この場合の増厚量の目安は厚さ 100mm であり，これ以上となる場合は，施工能力(締固め等)の再検討が必要であるとしている。したがって，床版支間が 4000mm の場合は，CASE4 のように中間部に縦桁を増設し，曲げモーメントを低減させることを考えた。その結果，必要最小増厚量は厚さ 60mm となり，死荷重の増加や増厚施工能力の問題も解消されるものと考えられる。

以上，疲労設計より算出した増厚量は，追跡調査により実橋で補強効果が確認されている [7]増厚量とほぼ一致するものであり，本研究で提案した S-N 曲線の妥当性が検証されたと考えられる。

6. まとめ

本研究の結果を以下にまとめる。

(1) 上面増厚床版の負曲げモーメント領域の疲労設計を行うための手法を述べた。この手法により，荷重特性の実測データを用いて，床版厚 190mm の昭和 39 年道路橋示方書に従い設計された床版を 10mm 切削し 180mm とした既設床版に，上面増厚工法を適用した場合の疲労設計を行った。その結果算出された増厚量は，実橋で補強効果が確認されている増厚量とほぼ一致するものであり，本研究で提案した S-N 曲線の妥当性が検証された.

(2) 現行の増厚量の設計は，疲労照査が行われることなく平成 8 年道路橋示方書に従い算出した床版厚まで増厚する簡便な方法である。本研究のように荷重特性や材料特性を考慮した負曲げモーメント領域の疲労設計を行うことにより，床版支間に応じた最適増厚量を決定できる。ただし，今後とも荷重データや増厚床版の S-N データを積み重ねることにより，設計精度を向上させる必要がある。

表－6　車種別軸重量特性

番号	軸	平均値 (kN)	標準偏差 (kN)	最大値 (kN)
Type1	1st	30.0	17.1	198.1
	2nd	43.0	29.5	237.3
Type2	1st	55.8	21.4	239.3
	2nd	81.2	37.7	311.9
	3rd	59.6	32.7	253.0
Type3	1st	41.3	21.0	243.2
	2nd	45.4	25.3	239.3
	3rd	71.5	36.1	223.6
Type4	1st	54.2	16.9	115.7
	2nd	95.2	41.1	239.3
	3rd	69.2	37.9	205.9
	4th	71.8	43.6	256.9
Type5	1st	44.0	17.5	121.6
	2nd	53.4	47.5	294.2
	3rd	46.7	30.3	235.4
	4th	51.2	34.3	215.7
Type6	1st	57.1	18.4	111.8
	2nd	79.9	33.4	157.9
	3rd	73.3	33.5	167.7
	4th	91.2	44.3	191.2
	5th	92.8	43.0	179.5
Type7	1st	35.9	0.0	35.3
	2nd	129.4	0.0	129.4
	3rd	139.1	0.0	139.3
	4th	131.4	0.0	131.4
	5th	119.6	0.0	119.6
	6th	149.1	0.0	149.1

参考文献

1)（社）日本道路協会：道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編）・同解説，1996

2)水越睦視,松井繁之,手塚光晴,東山浩士：各種コンクリートで上面増厚補強された RC 床版の疲労耐久性，土木学会第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.67-74, 2000

3)Mizukoshi, M., Higashiyam, H. and Matsui, S.：Flexural Fatigue Properties of Fiber Reinforced Concrete, Proc. the first Fib Congress, Disk B, pp.29-34, 2002

4)木村元哉：増厚工法による補修床版の疲労耐久性に関する研究，大阪大学修士論文,1992

5)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

6)高速道路調査協会：上面増厚工法設計施工マニュアル，1995

7)濱崎耕蔵，牧田　明，石川一美：鋼繊維コンクリートを用いた増厚床版補強の追跡調査，第 19 回日本道路会議論文集，pp.924-925，1986