

人工軽量骨材コンクリートの道路橋床版への適用性に関する基礎的研究

Fatigue Study on Steel Fiber Reinforced Slabs with Artificial Lightweight Aggregate Concrete

松井繁之*、藤井伸介**、安松敏雄***、藤木英一****

Shigeyuki MATSUI Shinsuke FUJII Toshio YASUMATSU and Eiichi FUJIKI

*フェロー 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**工学 大阪大学大学院生 工学研究科博士前期課程 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

***工修 日本道路公団 東京建設局建設第一部 構造技術課長 (〒105-0014 東京都港区芝 3-39-9)

**** 人工軽量骨材協会 (〒110-0005 東京都台東区上野 1-12-2)

Considering precedent of damaged slabs, bridge slabs are required to have high fatigue durability. From the point of view, various models of slabs have been developed instead of reinforced concrete (RC) slabs. But because the thickness of slabs is designed in the specifications, concrete slabs become thick and heavy and a disadvantage against aseismic. Thereupon, a solution to make slabs light is to use artificial lightweight aggregate (ALA). But, the modulus of elasticity, shear strength and flexural strength of the concrete using Steel fiber is seems to be good material to supplement the disadvantage.

In this paper, fundamental material characteristics of ALA concrete mixed with steel fiber and the result of fatigue tests by wheel load running machine of the slabs using those materials are reported. Finally, an economical evaluation is discussed.

Key words: artificial lightweight aggregate, steel fiber, fatigue durability

1. はじめに

近年、合理化橋梁と呼ばれるものについては、耐久性の高い床版を採用することが必須となっている。一方、1995年の阪神・淡路大震災を契機に、橋梁上部工は軽量化が望まれる場合がある。これらの要求を満たすためには、構造的には床版厚をできるだけ薄くすることを考える必要がある。しかし、設計法が現在定着しているRC床版型式を採用しつつ、材料面から床版の単位重量を小さくする方法も考えられる。本研究では粗骨材に人工軽量骨材を用い、それに伴う静弾性係数やせん断強度、曲げ強度の低下を補うため鋼繊維を混入した鋼繊維補強軽量コンクリート(単位容積質量 $1.95t/m^3$)の床版の可能性および経済性について検討を加えたものである。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

配筋図を図-1、供試体の種類を表-1に示す。配筋は基本的に従来のRC床版と同じとした。

供試体のパラメータをコンクリートの種類(粗骨材の種類)、鋼繊維の種類に定めた。人工軽量骨材を使用

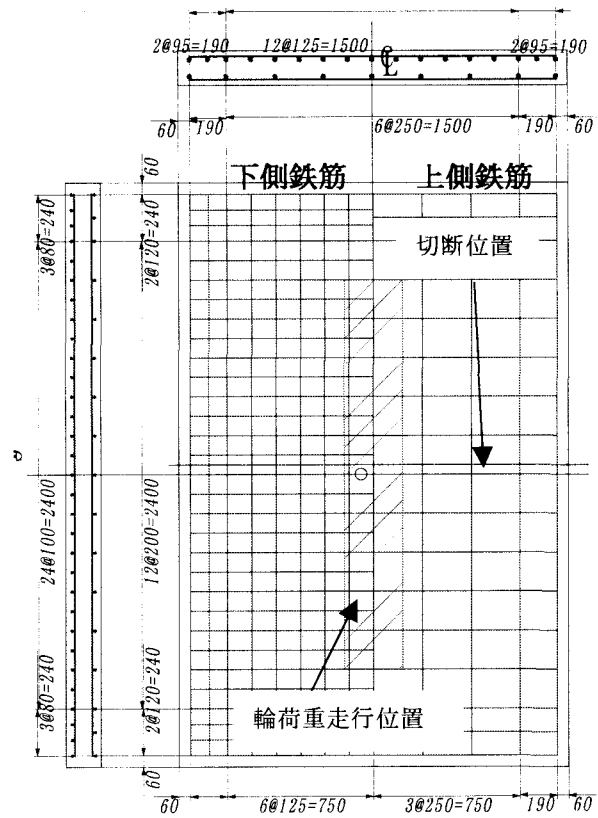


図-1 配筋図

した床版は、鋼繊維を混入していない供試体 PF、人工軽量骨材使用による強度低下を補うため、コンクリート中に形状の異なる鋼繊維インデントタイプ (I) またはフックタイプ (F) を混入した供試体 IF および FF の各 1 体ずつである。

2. 2 使用材料

(1) 粗骨材および配合

軽量骨材の一般的な性質^{[1][3]}を表-2に示す。また疲労試験と同時期に行ったテストピースの強度試験結果および配合を表-3に示す。今回、各コンクリートの配合は $f_{ck}=35\text{N/mm}^2$ (実強度 42N/mm^2 程度)となるように W/C と s/a を検討練りにより決定した。一般に、圧縮強度が同じであれば軽量コンクリート (以下軽量) の引張強度は普通コンクリートのそれよりも小さく、軽量の脆度係数 (圧縮強度/引張強度) は、10~15 程度であることが報告されている^[3]。今回の軽量骨材のテストピースの試験結果は上記の範囲となっている。また普通コンクリートの引張による破壊は、モルタルもしくはモルタルと粗骨材の境界で発生するのに対し、軽量はモルタルだけではなく粗骨材自体が破壊を起こすという特性を有している^[3]。また、鋼繊維の混入効果は曲げ強度において顕著で、鋼繊維を混入していないコンクリートの 1.6~2.0 倍程度の曲げ強度を示した。

(2) 鋼繊維

鋼繊維の種類を表-4に示す。今回使用した鋼繊維は長尺タイプのものであり、静的曲げ試験の結果から鋼繊維の破断よりも引抜けることによりその効果を無くすと考えられる。一般に、鋼繊維の補強効果は部材寸法が同一の場合、アスペクト比に対応するとされている^[1]。

表-1 供試体の種類

供試体名	粗骨材	混入鋼繊維
RC	普通	無し
PF	軽量	
IF		インデント(I)
FF		フック(F)

表-2 軽量骨材の性質

粗骨材	主原料	内部構成	比重	圧壊荷重
軽量	膨張頁岩	連結気泡	1.28	500N

表-3 各コンクリートの強度試験結果と配合

供試体名	SF (kg/m^3)	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位容積質量 (t/m^3)	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	ポアソン比	割裂引張強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)
PF	—	48	48	1.89	39.4	18.0	0.196	3.35	3.58
IF	60		56	1.95	46.1	20.8	0.193	3.56	7.33
FF	60				50.7	22.1	0.203	4.10	7.45

表-4 鋼繊維の諸元

タイプ	寸法 (mm)	形状	混入量 (kg/m^3)	体積比 (1本当たり)
F	$\phi 0.8 \times 60$	両端フック付 結束型	60	1.567
I	$\phi 0.7 \times 50$	インデント型	60	1

表-5 載荷プログラム

供試体名	147kN(15tf)	176.4kN(18tf)
RC	5万回	実験終了(破壊)まで
PF	実験終了(破壊)まで	
IF	10万回	実験終了まで
FF		

2. 3 実験方法

(1) 輪荷重走行試験機による疲労試験

輪荷重走行試験機は、道路橋床版上を走行する輪荷重を再現させることで床版の耐久性を確認するものである。輪荷重は図-1中の斜線部を走行する。

供試体の支持条件は長辺方向 (配力鉄筋方向かつ橋軸方向) の 2 辺を単純支持、短辺方向 (主鉄筋方向かつ橋軸直角方向) の 2 辺を弾性支持とした。これは、2 辺単純支持、2 辺自由支持とした場合、自由端より破壊が進行し実橋で報告されるような押し抜き破壊型の床版の疲労破壊現象を再現できないためである。また、一般的に矩形床版において床版中央に荷重をかけると四隅に浮き上がりが発生する。これを防止するために四隅に浮き上がり防止装置を設置した。

載荷荷重は表-5に示すように、鋼繊維を混入している供試体 IF および FF は走行回数 10 万回までを 147kN (15tf)、10 万回から 100 万回までを 176.4kN (18tf) とした。ただし、FF は試験機の都合上、100 万回未到達で実験を終了している。鋼繊維を混入していない供試体 PF は 176.4kN に荷重を上げる以前に破壊に至った。比較用の 18cm 普通コンクリート (RC) 床版は 5 万回までは 147kN、それ以降は 176.4kN であった。ここで 147kN という荷重は、設計輪荷重 98kN に衝撃係数をかけたものに近く、また実測最大輪荷重という経験から決定した。176.4kN はさらに安全側を考えた荷重である。また走行回数についてはこの 147kN を基本荷重とし、一般国道を対象に 1 日 1 レーン 3 万台の交通量を仮定すると、実交通 50 年分の等価繰返し回数は走行回数 82~86 万回と計算されることから決定した。

(2) 疲労試験後の床版の切断

輪荷重走行試験機による疲労試験が終了した後の内部のひび割れ状況を調べるため、軽量床版について図-1の切断位置で切り、ひび割れの観察を行った。

3. 実験結果と考察

3. 1 たわみ結果とたわみによる劣化度の進行に関する考察

今回、疲労試験を行った6体と以前試験が行われた比較用の標準的なRC床版のたわみ-走行回数曲線を図-2に示す。ここで各供試体は静弾性係数が異なり、載荷プログラムも同じではない。そこで各供試体を比較しやすくするため、縦軸に活荷重たわみによる劣化度を、横軸にマイナー則により176.4kN換算した走行回数をとった、劣化度-換算走行回数曲線を図-3に示す。ここで劣化度 α は(1)式によって与えられる。

$$\alpha = (d - d_1) / (d_2 - d_1) \times 100 \quad (1)$$

d : 実験値のたわみ

d₁ : 全断面有効時のたわみ

d₂ : 使用限界時のたわみ

PFは初期の段階からたわみは大きく、走行回数2,000回で使用限界を超え、7.36万回で押し抜きせん断破壊した。RCは174.6kNに荷重を上げた後、15万回で使用限界を超え28万回で破壊した。また図-3より鋼繊維補強していない軽量床版は、普通コンクリート床版よりも明らかに疲労耐久性が低く、実橋での適用は難しいといえる。鋼繊維補強した2体については、FFは82.2万回で使用限界を超え、IFは実験終了まで使用限界には至らなかった。また2体とも実験終了まで破壊には至らず、鋼繊維補強していない床版および普通コンクリート床版に比べ、劣化の進行は緩やかである。このことから鋼繊維混入による疲労耐久性の向上が顕著に見られ、たわみからは鋼繊維補強軽量はRC床版の7倍以上の疲労耐久性を有しているといえる。鋼繊維の違いで比較すると、鋼繊維Iは鋼繊維Fに比べコンクリートの強度は低い、たわみ、劣化度ともに小さい。この原因として鋼繊維の単位重量当たりの本数の違いが考えられる。今回、鋼繊維の1本当たりの重量比はF:I=1.567:1で、本数比は重量比の逆数でありIは1.567倍の本数であったため、均質性が上がりひび割れに対する拘束度が向上したためと推定できる。^[2]

3. 2 ひび割れとひび割れ密度の比較考察

(i) 下面ひび割れ

初期段階と実験終了時の床版下面のひび割れ図を図-4に示す。0回のひび割れは、実験開始から走行回数1,000回(実際には300~500回程度)までに発生したものである。軽量床版の3体は、初期段階では荷重直下に集中してひび割れが発生し、破壊もしくは実験終了までに全体にひび割れが進展してくという特徴が見られた。

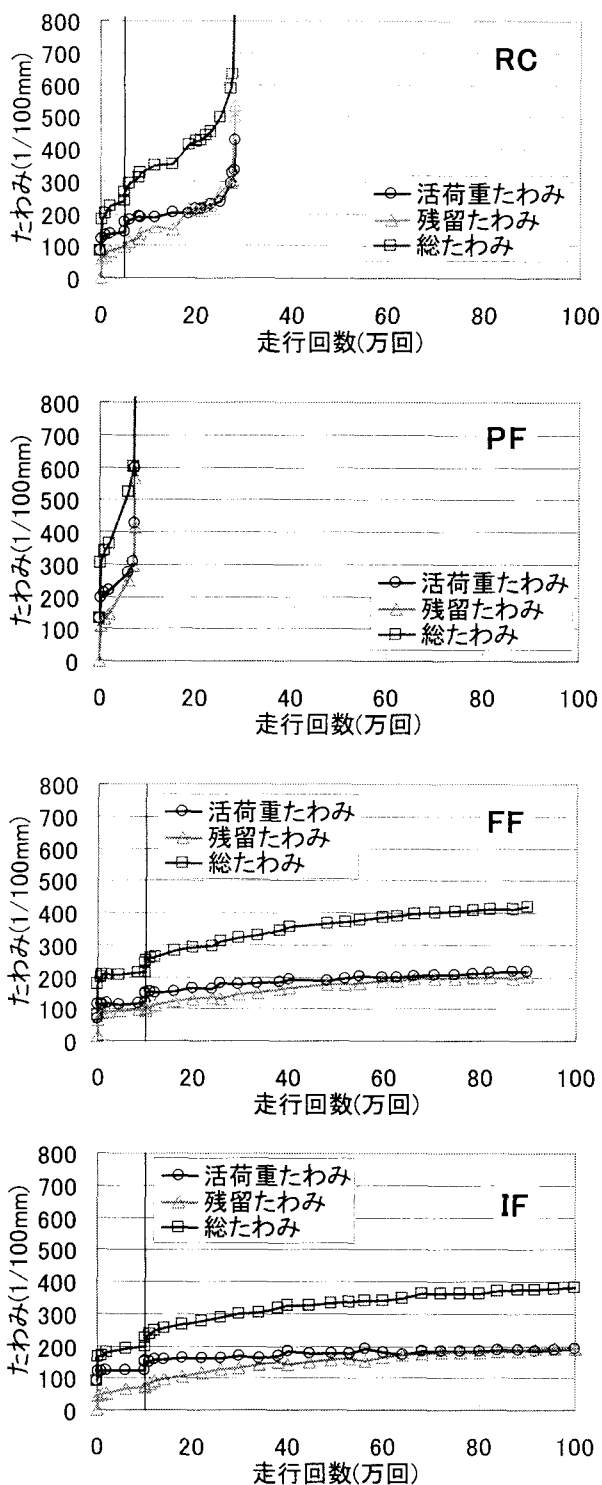


図-2 たわみ-走行回数曲線

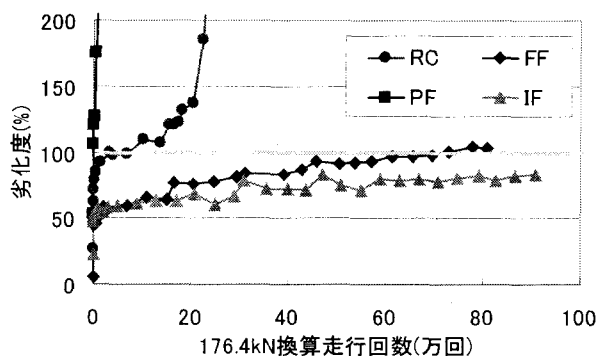


図-3 劣化度-換算走行回数曲線

(ii) ひび割れ密度

床版下面のひび割れ密度－走行回数曲線を図-5に示す。ひび割れ密度 D_c は、ひび割れの観察から簡易的に劣化の度合いを知るためのもので(2)式により求められる。

本試験機によるRC床版の使用限界時のひび割れ密度は12~13 m^2/m^2 である。軽量床版の2体IF、FFについて、図-3と図-5を見比べると、FFにおいてはたわみによる使用限界が82.2万回であり、80万回前後でひび割れ密度が13 m^2/m^2 程度である。IFにおいては実験終了時までたわみによる使用限界には至らず、またひび割れ密度も10.5 m^2/m^2 程度である。このことから鋼繊維補強軽量コンクリート床版のひび割れ密度と使用限界の関係は、RC床版に近いものと考えられる。

$$D_c = \frac{\sum N_x}{\sum L_y + \sum N_y} / \sum L_x \quad (2)$$

$\sum N_x$, $\sum N_y$: 一定間隔の格子線とのx, y方向それぞれの交点数の総和
 $\sum L_x$, $\sum L_y$: x, y方向それぞれの格子線の総延長

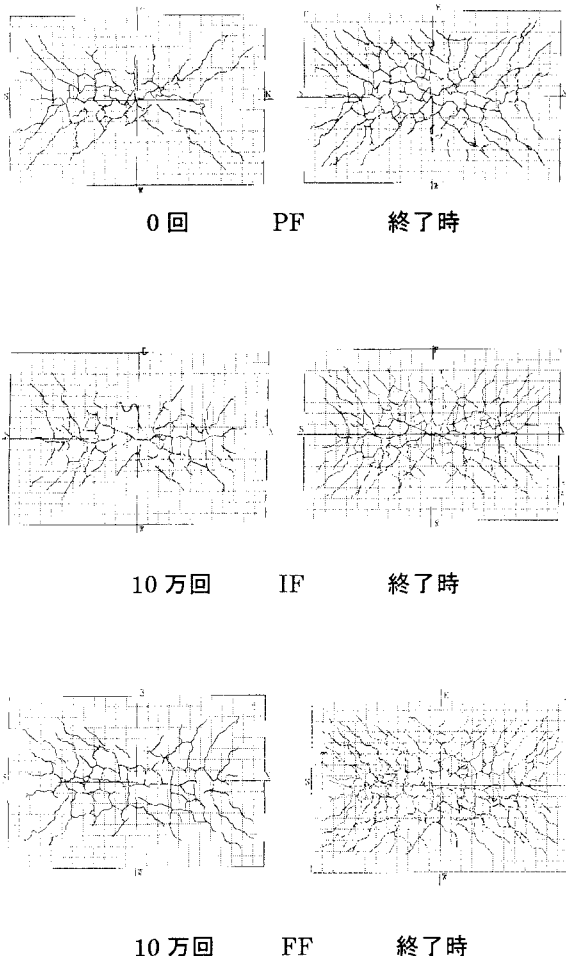


図-4 ひび割れ図

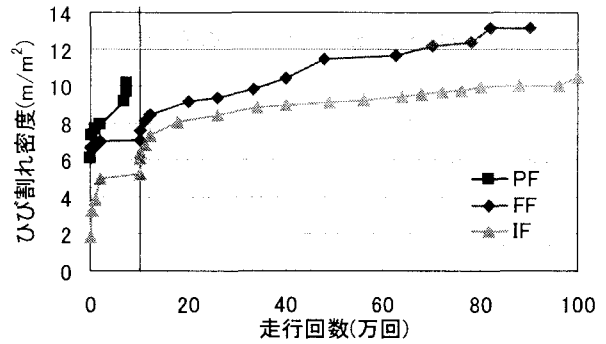


図-5 ひび割れ密度－走行回数曲線

(iii) 切断面のひび割れ

軽量床版の図-1の切断位置における、配力鉄筋に直角な切断面のひび割れ状況を図-6に示す。PFは典型的な押し抜きせん断破壊を起こしたことが確認できる。FF、IFはひび割れの高さに若干差があるが、ひび割れの特徴に違いは無いといえる。この2体の中央のひび割れ上部に水平方向のひび割れが発生している。これらのひび割れと床版上縁、下縁からの斜めひび割れが繋がることにより破壊に至ると推測される。よって軽量床版の破壊形状は、RC床版のそれと同じであるといえる。

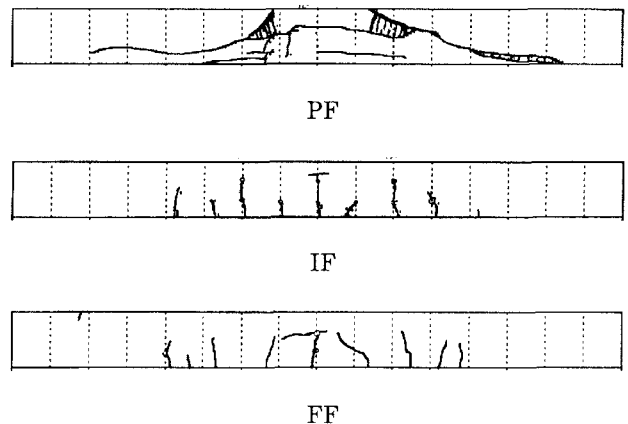


図-6 切断面のひび割れ図

3.3 鉄筋のひずみ

図-1中、○の位置の主鉄筋のひずみ－走行回数曲線を図-7に示す。RC、PFの2体は走行回数に違いがあるものの、一度ひずみが増加した後、活荷重ひずみが減少する特徴が見られた。これは、その後しばらくして破壊に至っていることから、載荷板端付近から斜めひび割れが発生し、床版内に圧縮に抵抗するアーチが形成され鉄筋がタイとなるタイドアーチが形成されたためと考えられる。次に活荷重ひずみの大きさを比較すると、FFのものはRCとほぼ等しいといえる。IFでは500 μ 程度でFFの約7割に減少している。こ

ここにIFとFFの大きな違いがあり、やはり鋼繊維の本数によるコンクリートの有効断面の違い、剛性の違いをもたらしているといえる。鉄筋の総ひずみについてもIFはFFよりも大幅に減少している。もちろんRCよりも減少している。

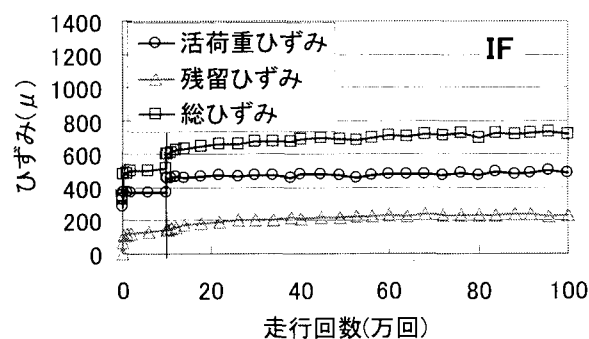
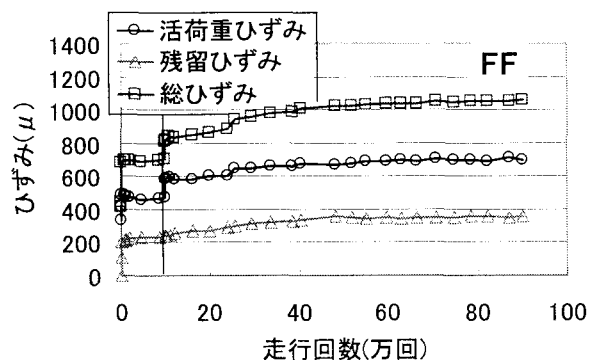
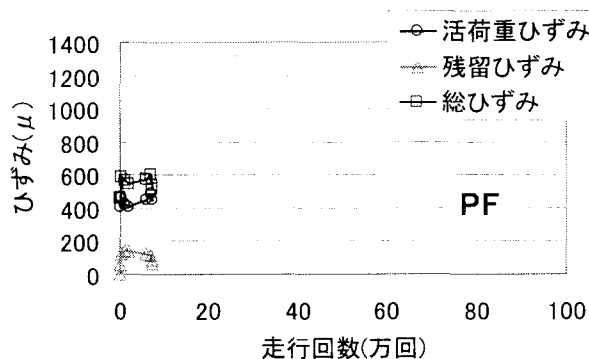
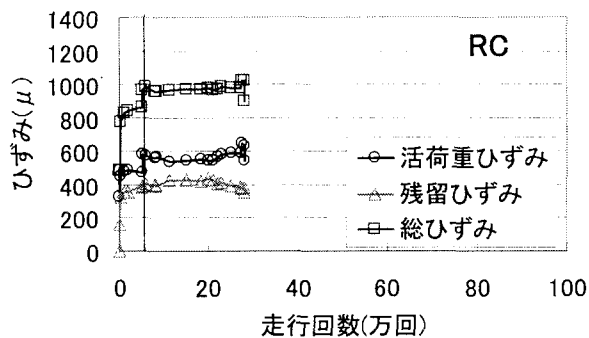


図-7 鉄筋のひずみ-走行回数曲線

4. 上部工の軽減量と経済性の評価

鋼単純合成2主鈹桁橋および鋼連続非合成2主鈹桁橋を対称に、普通コンクリート床版を軽量コンクリート床版に置き換えた場合の上部工の重量軽減とその経済効果について検討した。

4.1 上部工の軽減量

上部工の軽減量を検討するに際し、各コンクリート部材の単位体積重量は表-6の値を用いた。

表-6 各単位体積重量

コンクリート	PRC床版	壁高欄
普通	2.50	2.50
軽量	2.20	2.15

(t/m³)

(i) 鋼単純合成2主鈹桁橋

以下のような橋梁を例として行った。

■対称橋梁

構造型式：鋼単純合成2主鈹桁橋

支間長：50.600m

幅員：総幅員10.650m 有効幅員9.760m

主桁間隔：5.800m

床版構造：場所打ちPRC床版

(橋軸直角方向にプレストレスを導入)

床版厚：320mm

■コンクリート体積等の数量

床版コンクリート体積：182.1m³

床版鉄筋重量：30.328t

床版PC鋼材重量：2.952t

壁高欄コンクリート体積：35.7m³

壁高欄鉄筋重量：5.296t

■普通コンクリート使用時の鋼材重量

主桁関係重量：82.535t

横桁関係重量：13.417t

合計：95.952t

軽量コンクリート使用時の床版および壁高欄における重量軽減量は

$$182.1 \times (2.5 - 2.2) + 35.7 \times (2.5 - 2.15) = 67.125t$$

となる。

次に上記橋梁の床版を軽量コンクリートに変えて再度、設計・計算を行い、断面構成を求めた。この結果より求まる鋼材重量は以下ようになった。

■軽量コンクリート使用時の鋼材重量

主桁関係重量：79.426t

横桁関係重量：13.417t

合計：92.843t

よって鋼材の総軽減量は 3.109t となり、これは主桁関係重量において 3.24%の軽減である。また上部工全体の軽減量は橋軸方向 1m あたり約 1.39t となる。

(ii) 鋼連続非合成 2 主桁桁橋
同様に、以下のような橋梁を例として行った。

■対称橋梁

構造型式：鋼 7 径間連続非合成 2 主桁桁橋

支間長：27.000+61.250+60.000+52.100
+60.500+63.000+28.250m

幅員：有効幅員 8.725m

主桁間隔：5.500m

床版構造：場所打ち PRC 床版

床版厚：300mm

■コンクリート体積等の数量

床版コンクリート体積：1083.9m³

床版鉄筋重量：187.730t

床版 PC 鋼材重量：16.803t

壁高欄コンクリート体積：139.6m³

壁高欄鉄筋重量：19.807t

■普通コンクリート使用時の鋼材重量

主桁関係重量：647.548t

横桁関係重量：134.703t

合計：782.251t

軽量コンクリート使用時の床版および壁高欄における重量軽減量は

$1083.9 \times (2.5 - 2.2) + 139.6 \times (2.5 - 2.15) = 374.03t$
となる。

次に床版コンクリートを軽量に変えた場合の鋼材重量は以下のように求まった。

■軽量コンクリート使用時の鋼材重量

主桁関係重量：603.644t

横桁関係重量：134.703t

合計：738.347t

よって鋼材の総軽減量は 43.904t となり、これは主桁関係重量において 5.61%の軽減である。また上部工全体の軽減量は橋軸方向 1m あたり約 1.19t となる。

以上 (i)、(ii) の橋梁上部工において橋軸方向 1m あたり 1.39t、1.19t の軽量化が可能であり、耐震性の向上が十分に見込まれる。

4. 2 経済性の評価

上記のように 2 つの橋梁において鋼材重量が 3~5%

程度軽減できる。このことによりコストは軽減する。一方、鋼繊維入り軽量コンクリートと普通コンクリート(呼び強度 30)の価格差は約 19,000 円/m³であり、床版コストは増加する。トータルで考えるとほとんど差はない。しかし鋼繊維入り軽量コンクリートの疲労耐久性は向上するので LLC で考えるとメリットが大きいといえる。さらに、疲労耐久性が向上しているので床版横締めプレストレス量を減少させることが可能であり、PC 鋼材の大幅な軽減による経済効果を追加できる。

5. 結論

1) 軽量コンクリート床版は、適当な量の鋼繊維を混入することにより、普通コンクリートを用いた RC 床版の 7 倍以上の疲労耐久性を確保することができる。これは、鋼繊維によるひび割れ面の動きの拘束効果によるものである。よって、鋼繊維との共用によって人工軽量骨材は道路橋床版に適用可能であることが保証できる。

2) 今回検討した 2 橋梁では、軽量コンクリートの使用により、上部工は橋軸方向 1m あたり 1.2t 程度軽量化が計られ耐震性の向上が見込まれる。しかし現段階ではあまり経済効果はないといえる。

3) 床版における使用限界のひび割れ密度は、鋼繊維補強軽量コンクリート床版では RC 床版と同程度と推定される。ただし、ひび割れ幅は鋼繊維によって小さく抑えられる。

4) 軽量床版における各測定項目の結果から、鋼繊維重量が同量の場合、本数の違いが現れており、本数の多いタイプが望ましいといえる。

謝辞

本研究は、人工軽量骨材協会の「鋼繊維補強軽量コンクリート研究委員会」の支援を受けて行ったものである。ここに、諸氏に謝意を表する次第である。

参考文献

- [1] 人工軽量骨材協会：人工軽量骨材コンクリート技術資料、鋼繊維補強軽量コンクリート、No. 13、1998.11
- [2] 藤井伸介・松井繁之・藤木英一：SFLRC の道路橋床版への適用性に関する輪荷重走行試験、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No. 3、pp.739-744、2000.6
- [3] 岡本享久・石川雄康・榎木 隆・笹島昌男：高性能軽量コンクリート、コンクリート工学、Vol.37、No. 4、pp.12-18、1999.4