

人工軽量骨材を適用した床版の疲労耐久性

Fatigue Durability of Reinforced Concrete Decks with Artificial Lightweight Aggregate

大西弘志*, 松井繁之**, 丸井 浩***, 石川雄康****, 大谷真生*****

Hiroshi ONISHI, Shigeyuki MATSUI, Hiroshi MARUI, Yuko ISHIKAWA and Michio OTANI

*工修 大阪大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

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

***太平洋セメント(株) 建材事業推進室 副室長 (〒101-8357 千代田区西神田 3-8-1)

****工博 太平洋マテリアル(株) 鉱産建材営業部 副部長 (〒103-0023 中央区日本橋本町 4-8-15)

*****太平洋マテリアル(株) 開発研究所 技術開発グループ (〒103-0023 中央区日本橋本町 4-8-15)

Recently, the rationalization of bridge structures is promoted to comply with social requirements in Japan. In this trend, the bridge decks are required to have high fatigue durability. Then various models of decks have been developed instead of reinforced concrete (RC) decks. However, the RC decks are the most economical and often used in Japan. But the RC decks given by the specifications become thick and heavy. These profiles are disadvantages against aseismic. As a solution of this problem, it is proposed to use artificial lightweight aggregate (ALA). With this aggregate, the modulus of elasticity, shear strength and flexural strength of the concrete is decreasing. But, it is possible to improve these properties with application of steel fiber.

In this paper, the results of fatigue tests by wheel load running machine on the decks using those materials are reported. Finally, influence of structural characteristics on fatigue durability is discussed.

Keywords: artificial lightweight aggregate, steel fiber, fatigue durability

キーワード: 人工軽量骨材, 鋼繊維, 疲労耐久性

1. はじめに

近年、鋼橋の合理化が進められ、新規建設の橋梁では2主桁橋梁に代表される少数主桁橋梁が数多く採用されている。少数主桁橋梁では、従来の非合成桁橋と異なり、床版に対しても荷重の分担を期待していることから、耐久性に優れた床版を採用する必要があり、床版厚が大きくなる傾向にある。一方、1995年の阪神・淡路大震災を契機として、橋梁の耐震性能の向上が図られているが、耐震性能向上を達成するには橋梁上部工の重量軽減が必要であると考えられる。

これらの相反する要求を達成するために、構造力学的なアプローチとして合成床版等の新しい構造形式を有する床版の開発が盛んに行われている。また、このような動きとは別に、従来のRC床版の形式を踏襲しつつ、骨材として人工軽量骨材・人工超軽量骨材を採用することで軽量化を達成することも考えられている。

粗骨材に人工軽量骨材・人工超軽量骨材を用いた場合、静弾性係数やせん断強度、曲げ強度が低下することが知られている¹⁾が、これを補うために鋼繊維を混入した鋼繊維補強軽量コンクリートを適用することで、床版の耐久性が大幅に改善されることが明らかになっている^{2),3)}。

本研究では、これまでに試験された床版に加え、鉄筋配置状況が異なる床版について輪荷重走行試験を行うことによって、鉄筋配置が床版の耐久性に与える影響を確認し、鋼繊維補強軽量コンクリートを用いたRC床版の適用性について検討を加えることにした。

2. 実験概要

2. 1. 供試体概要

本研究で使用した供試体の一覧を表-1に、供試体の配筋状況の一例を図-1に示す。これまでの一連の実験で使用した供試体の寸法は3000mm(長さ)×2000mm(幅)×180mm(厚さ)である。供試体に与えられたパラメータは粗骨材の種類・鋼繊維の種類・鉄筋配置の3つであり、従来のRC床版を基準の供試体(RC)として設定した。人工軽量骨材を使用した床版は、鋼繊維なし(P)、インデントタイプの鋼繊維で補強(I)、フックタイプの鋼繊維で補強(F)に鉄筋の配筋状況(従来と同量を配筋:F, 従来の半分の量を背筋:H)を組み合わせた計5体を用意した。人工超軽量骨材を用いた床版に関しては、鋼繊維なしとインデントタイプのみとし、鉄筋量も従来の量と同量のものについてのみ試験することとし、計5体用意した(SIF1~3)。また、SIFシリーズでは主鉄筋と配力筋の方向を入れ替えた場合についても調査を行った。

2. 2. 使用材料

今回使用したコンクリートの配合と基本的な物性を表-1に示す。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を検討し試験練りにより決定した。一般に、圧縮強度が同じであれば引張強度は普通コンクリート、軽量コンクリート、

表-1 供試体一覧

名称	コンクリートの種類	粗骨材	鋼繊維	鉄筋量
RC	NC	普通	なし	標準配筋(F)
PF	LC	軽量	なし	標準配筋(F) 半配筋(H)
IF	SFLC(I)		インデント(I)	
IH			インデント(I)	
FF	SFLC(F)		フック(F)	
FH			フック(F)	
SPF1	S-LC	超軽量	なし	標準配筋(F)
SPF2	S-SFLC(I)		インデント(I)	
SIF1				
SIF2				
SIF3				

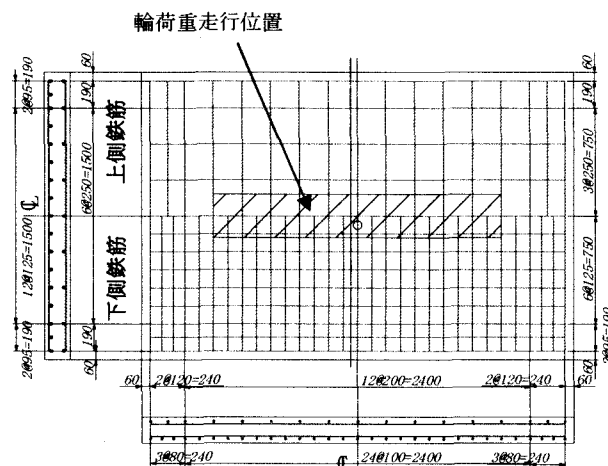


図-1 配筋図

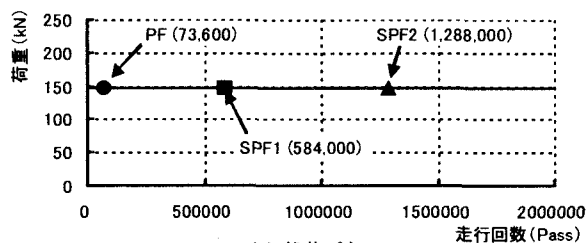
超軽量コンクリートの順に大きく、各コンクリートの脆度係数(圧縮強度/引張強度)は順に10~13, 10~15, 18程度であることが報告されている⁴⁾。今回使用したコンクリートの試験結果では、普通コンクリートと軽量コンクリートは上記の範囲に入っているが、超軽量コンクリートの脆度係数は13.5~15.8となり、18よりも小さい。また、普通コンクリートの引張による破壊はモルタルもしくはモルタルと粗骨材の境界で発生するのに対し、軽量コンクリート、超軽量コンクリートはモルタルだけではなく粗骨材自体が破壊を起こすという特性を有している⁴⁾。鋼繊維の混入効果は曲げ強度とせん断強度にお

表-2 使用したコンクリートの配合と物性

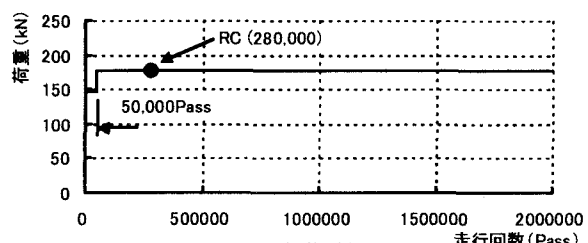
供試体	W/C (%)	s/a (%)	SF (kg/m ³)	W (kg/m ³)	単位質量 (t/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	割裂引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)			
RC	45	43	-	180	2.28	35.8	27.1	0.180	2.70	4.88	4.74			
PF	48	48	-	180	1.89	39.4	18.0	0.196	3.35	3.58	4.72			
IF		56	60	180	1.95	46.1	20.8	0.193	3.56	7.33	7.44			
IH						50.7	22.1	0.203	4.10	7.45	7.82			
FF						-	165	1.79	48.9	23.9	0.208	3.61	4.52	5.28
FH									46.5	21.6	0.222	2.95	7.33	10.5
SPF1	37.5	45.7	60	165	1.85	55.9	24.6	0.230	4.14	8.21	12.0			
SPF2														
SIF1														
SIF2	34.0	43.0	60	165	1.86	55.9	24.6	0.230	4.14	8.21	12.0			
SIF3														

表-3 載荷パターン

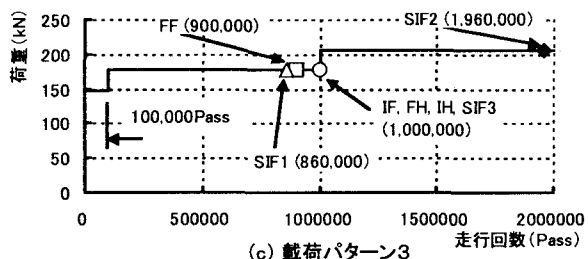
	STEP1		STEP2		STEP3		適用床版
	荷重(kN)	N(Pass)	荷重(kN)	N(Pass)	荷重(kN)	N(Pass)	
載荷パターン1	147	2000000	-	-	-	-	PF, SPF1, SPF2
載荷パターン2	147	50000	177	195000	-	-	RC
載荷パターン3	147	100000	177	90000	206	100000	FF, IF, FH, IH, SIF1, SIF2, SIF3



(a) 載荷パターン1



(b) 載荷パターン2



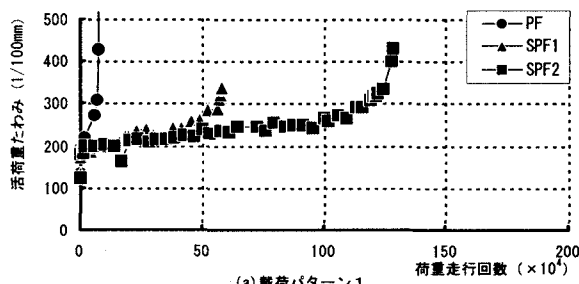
(c) 載荷パターン3

図-2 試験結果概要

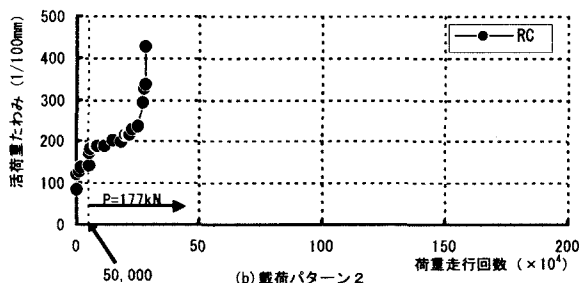
いて顕著であり、鋼繊維を混入していないコンクリートの1.6~2.3倍程度の強度を示した。

2. 3. 載荷方法

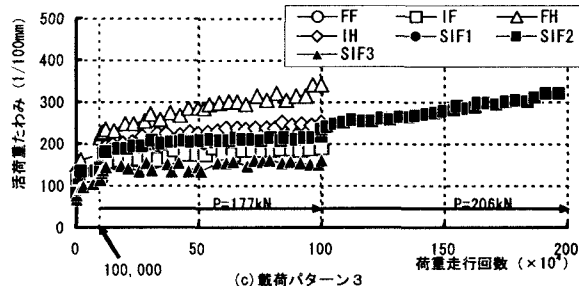
本研究では供試体床版の疲労耐久性を確認するために、輪荷重走行試験を実施した。輪荷重の走行範囲は図-1中の斜線部である。輪荷重走行試験における供試体の支持条件は長辺方向（配力鉄筋方向かつ橋軸方向）の2辺を単純支持、短辺方向（主鉄筋方向かつ橋軸直角方向）の2辺を弾性支持とした。これは、2辺単純支持、2辺自由支持とした場合、自由端より破壊が進行し、実橋で報告されるような押し抜き破壊型の床版の疲労破壊現象を再現できないためである。また、一般に矩形床版において床版中央に荷重をかけると四隅に浮き上がりが発生する。これを防止するために四隅に浮き上がり防止装置を設置した。



(a) 載荷パターン1



(b) 載荷パターン2



(c) 載荷パターン3

図-3 たわみ測定結果

輪荷重の走行は表-3に示す、3つの載荷パターンにより実施した。今回試験した床版のうち、PF・SPF1・SPF2に関しては従来のRC床版よりも弱いことが想定されたため、載荷パターン1を適用した。それ以外の床版に関しては従来のRC床版と同等以上の耐久性が期待されたため、RC床版よりもより大きな輪荷重を作用させることを考慮して、載荷パターン3を適用した。しかしながら、一部の供試体に関しては試験期間の都合上STEP2で試験を終了した。また、試験終了後には床版内部の損傷状況や鉄筋の配置状況を確認するために床版を切断し、断面を確認した。

3. 実験結果と考察

3. 1. 概要

本研究の一連の実験で得られた試験結果の概要を図-2に示す。図中のマークのうち、黒く塗りつぶされているものはそこで破壊して試験を終了したもの、白抜きのは破壊に至っていないが試験期間の都合上、その時点で試験を終了したものである。各供試体名の後ろに表示されている数値は試験終了時の荷重走行回数である。

試験結果を評価するにあたって、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した場合、実交通50年分の等価繰り返し回数は走行回数82~86万回と計算されることを勘案すると、載荷パターン1で比較的早期に破壊したPF, SPF1以外の供試体に関しては当初の予想よりも高い耐久性を示したといえる。以下に各測定項目の中からたわみの測定結果について示した後、各供試体間の材料的・構造的相違点からもたらされる影響について考察を加えることにする。

3. 2. たわみ性状

本研究で得られた活荷重たわみの経時変動を図-3に示す。載荷パターン1または2で試験された床版の結果を見ると、活荷重がある程度の値(2.0~2.5mm)に到達したときに活荷重たわみが急激に増加し、破壊に至っていることがわかる。これに対し、載荷パターン3で試験された床版では活荷重たわみの値はほぼ安定していると見ることができる。ただし、供試体FHとSIF2においては載荷の最終ステップ(FH:P=177kN, SIF2:P=206kN)において活荷重たわみが明らかに増加の傾向を示している。

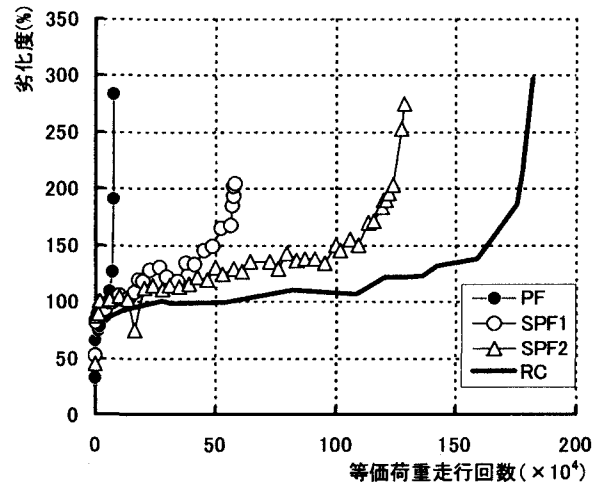
ところで、各供試体は静弾性係数が異なり、載荷プログラムも同じではない。そこで、各供試体の状態を直接比較するため、活荷重たわみによる劣化度を求めた。ここで、劣化度 α は次の式によって与えられる。

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

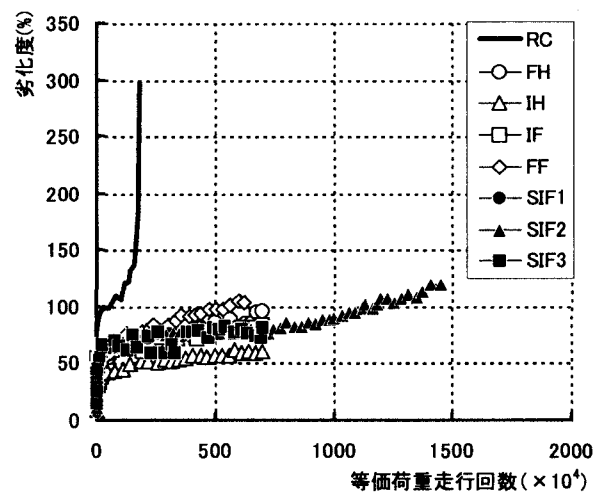
ただし、 d : 実験から得られる活荷重たわみ

d_1 : 全断面有効時の活荷重たわみ

d_2 : 引張側コンクリート無視時の活荷重たわみであり、 d_1 , d_2 は計算で求められる値を用いる。また、今回の試験では試験の進行とともに輪荷重が変化し、さらに変化の時期も載荷パターンごとに異なっているので、



(a) 鋼繊維なし



(b) 鋼繊維あり

図-4 劣化度の経時変動

各供試体に関して、147kN換算の等価繰り返し回数を求め、供試体に与えられた荷重を規準化して劣化度の比較を行った。ここで、等価繰り返し回数 N_{eq} は以下の式で与えられる。

$$N_{eq} = (P / P_0)^{11.21} \times N \quad (2)$$

ただし、

N_{eq} : 基準荷重 P_0 に換算した等価繰り返し回数

N : 実荷重 P での走行回数

これらの操作により得られた結果を図-4に示す。まず、鋼繊維なしの供試体の結果(図-4(a))を見てみると、PF, SPF1, SPF2はどれもRCよりも少ない荷重で劣化度が上昇し、破壊に至っていることがわかる。このことから、通常の軽量コンクリートや超軽量コンクリートを床版に適用するためには何らかの対策が必要不可欠であることが明らかである。これに対し、鋼繊維ありの供試体の結果(図-4(b))を見てみると、一部に劣化

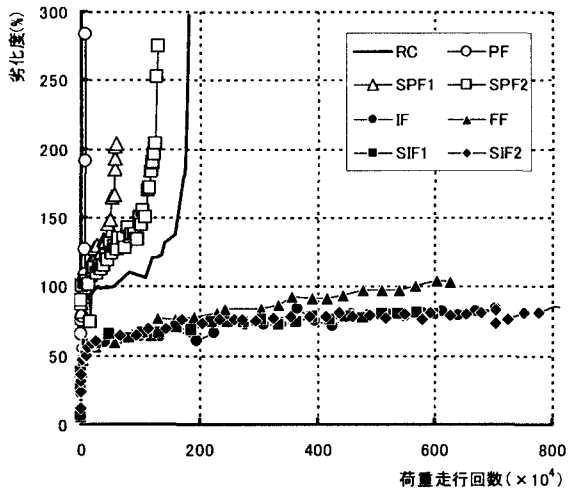


図-5 使用材料による劣化度の経時変動の違い

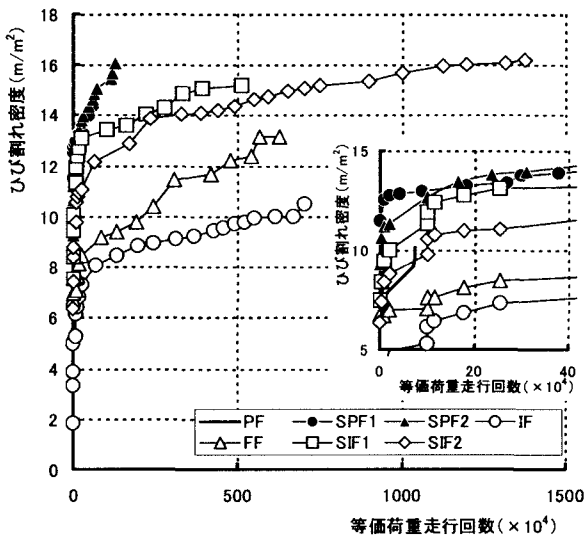


図-6 ひび割れ密度の変動

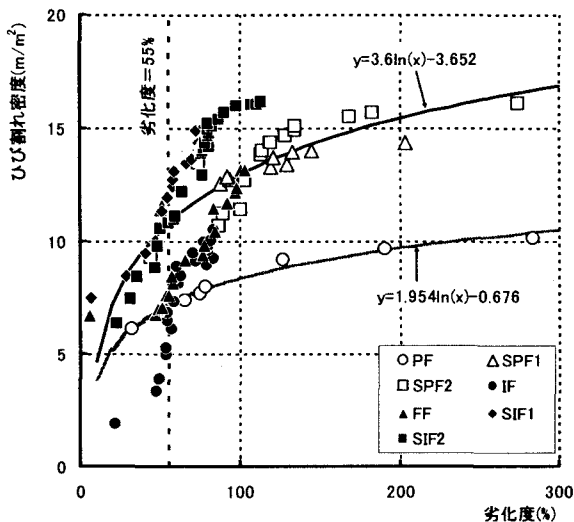


図-7 使用材料による劣化度 - ひび割れ密度関係の違い

度が 100%に到達している供試体があるものの、RC の約 4 倍の負荷に対しても破壊を生じていない。これらの供

試体の中で唯一破壊している SIF3 の等価繰り返し回数は約 1450 万回であり、RC の約 180 万回の 8 倍程度の耐久性を示している。以上のことから、鋼繊維で補強された軽量・超軽量コンクリートを用いた床版は十分な耐久性を持っていると結論付けることができる。

3. 3. 使用材料の違いによる影響

本研究では軽量・超軽量コンクリートを使用した床版の耐久性を改善するために軽量・超軽量コンクリートを鋼繊維で補強した鋼繊維補強軽量・超軽量コンクリートを使用した床版に関しても試験を実施し、データを収集している。ここでは主に、軽量・超軽量コンクリートに鋼繊維を混入したことにより得られた効果に関して述べることにする。

本研究で得られた劣化度の経時変動のうち、床版の鉄筋配置がほぼ同じものを集めたものを図-5に、また、これらの床版のひび割れ発生状況の記録結果から得られるひび割れ密度の経時変動を図-6に示す。劣化度の経時変動を確認すると、コンクリートへの鋼繊維の混入により床版の劣化度の進行は極端に遅くなり、著しい改善がなされたことが明らかである。これに対し、ひび割れ密度の変動では軽量コンクリート・超軽量コンクリート共に実験初期において期待されたほどのひび割れ密度の低減はなされていないように見える。この原因としては、同じ等価荷重走行回数であっても床版自体の劣化程度が大きく異なっているのではないかと考えられたので、劣化度を基準にしてひび割れ密度を比較することにした。

図-7に比較の結果を示す。この図を見ると、繊維の混入がなされているかどうかでデータの傾向が異なることがわかる。鋼繊維を混入していない軽量・超軽量コンクリートを使用した床版では劣化の進行と共にひび割れ発生量が停滞する傾向にあり、既存のひび割れに起因する劣化が進行していることがわかる。これに対し、鋼繊維を混入した軽量・超軽量コンクリートを使用した床版では、劣化度が 55%よりも小さい範囲ではひび割れの量が鋼繊維なしのコンクリートを使用した場合よりも小さい値となっているが、劣化度が 55%を超過する付近からひび割れ密度が増大し、試験終了に至るまで、明らかな増加の傾向をとり続けている。このことはコンクリートに

表-4 鉄筋位置の実測値

供試体名	主鉄筋		配力鉄筋	
	d' _m	d _m	d' _d	d _d
RC	3.00	15.00	4.60	13.40
PF	5.29	14.43	7.36	12.83
IF	5.32	14.50	7.32	12.85
FF	5.25	14.36	7.40	12.80
IH	5.28	14.5	6.54	12.55
FH	5.09	14.31	6.74	12.40
SPF	6.50	12.70	4.90	14.30
SIF	6.50	12.70	4.90	14.30
SIF3	3.00	15.00	4.60	13.40

(注1) d' : 圧縮側鉄筋の有効高さ(cm)

(注2) d : 引張側鉄筋の有効高さ(cm)

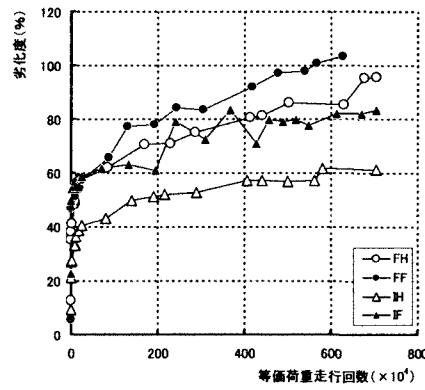


図-8 鉄筋配置による劣化度の経時変動の違い (軽量コンクリート)

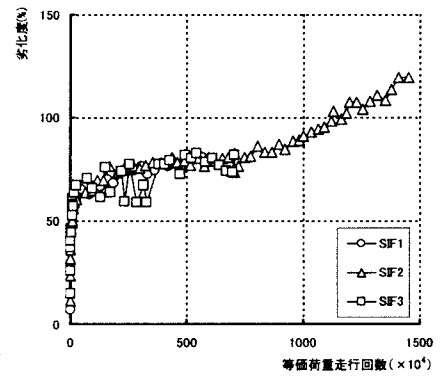


図-9 鉄筋配置による劣化度の経時変動の違い (超軽量コンクリート)

混入された鋼繊維が劣化度 55%未満の範囲ではひび割れ抑制, 劣化度 55%以上の範囲ではひび割れ分散に寄与したものと考えられ, 鋼繊維による有害なひび割れ発生防止効果があったと考えられる。

3. 4. 鉄筋配置の違いによる影響

本研究では, より適切な鉄筋配置についての検討を行うために, 鉄筋配置の違いによってどのような影響が出るのかについても検討を行った。本研究で使用された床版の鉄筋位置の実測値を表-4に示す。ここで, 供試体名の中に含まれるアルファベットの最後の文字がFのものは図-1に示した鉄筋配置, Hのものはその半分の量の鉄筋を配置したものである。これらの供試体のうち, 鉄筋配置のみが異なるという関係に当たるものに対して, 劣化度やひび割れ密度の確認を行った。図-8, 9に劣化度の経時変動を, 図-10に劣化度とひび割れ密度の関係を示す。まず, 鉄筋量を変化させた場合の影響について確認する。図-8に示した4体の結果を見ると, 鉄筋量の減少が劣化度に悪影響を与えていないように見えるが, 図-10中のIHとIFのデータを見ると, 同じ劣化度でも最大で2倍のひび割れ密度になってしまっているのがわかる。このことから, 鉄筋の減少は鋼繊維のひび割れ抑制効果を有効に機能させない可能性があることがわかる。また, 図-9より, 主鉄筋と配力筋の有効高さの位置を入れ替えた場合の影響について確認することを試みたが, この図でも明らかなように, 劣化度の経時挙動に違いが全く無く, このことから有効高さの入れ替えを行っても大きな影響は無い可能性が高いと考えられる。

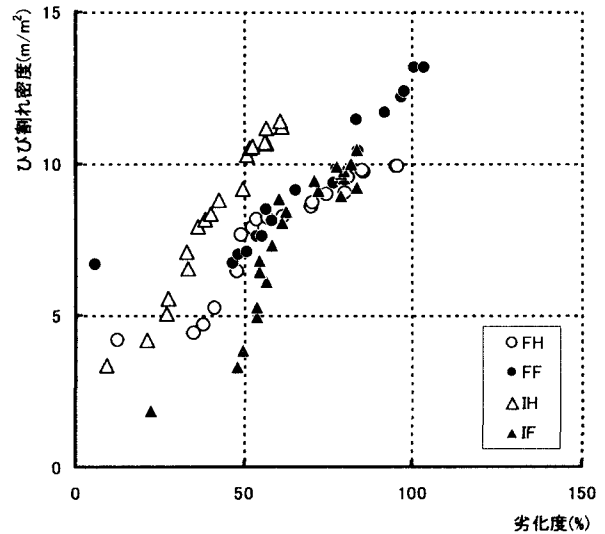


図-10 鉄筋配置による劣化度—ひび割れ密度関係の違い

4. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 人工軽量骨材・人工超軽量骨材を使用したコンクリートを床版に適用する際には鋼繊維による補強をしなければ, 十分な耐久性を得ることはできない。
- 2) 鋼繊維補強軽量・超軽量コンクリートを使用した場合, 鉄筋量を減らすと鋼繊維のひび割れ抑制効果が失われる可能性がある。

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)松井繁之，藤井伸介，安松敏雄，藤木英一：人工軽量骨材コンクリートの道路橋への適用性に関する基礎的研究，第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.95~100，2000.10
- 4)岡本享久・石川雄康・棚木 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