

軽量コンクリートを用いたプレキャストPC床版の 疲労耐久性に関する検討

Fatigue Durability of Pre-cast PC Slabs with Lightweight Concrete

小野聖久*, 稲葉尚文*, 紫桃孝一郎**, 庄中憲***

Kiyohisa ONO, Naofumi INABA, Koichiro SHITO, Tsukasa SHOUNAKA

*正会員 工修 日本道路公団試験研究所 道路研究部橋梁研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

**正会員 日本道路公団試験研究所 道路研究部橋梁研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

***正会員 工修 (社) 施工技術総合研究所 研究第二部 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

Lightweight concrete with artificial lightweight aggregate has been considered as one of the cost reduction measures by reducing dead load of the concrete slab, which enables reduction of size and weight of main beams and piers. Since shear strength of lightweight concrete is usually smaller than of normal concrete, it becomes especially important to check shear capacity and fatigue durability when applying it to the structures like slabs of highway bridges which receive the traffic load directly.

In this study, wheel load running fatigue test was carried out for pre-cast PC slabs of lightweight concrete. Effect of short fiber reinforcement and property of lightweight concrete were also studied. The result of this study showed good applicability of lightweight concrete with short fiber to the bridge deck slab.

Keywords : lightweight concrete, PC slab, wheel load running fatigue test, fatigue durability, short fiber

1. はじめに

軽量骨材を用いたコンクリート(以下、「軽量コンクリート」という)は、構造物の死荷重や地震時の慣性力の低減により、主桁や下部工の建設コストの削減が見込まれている。軽量骨材は1960年代後半に一部の土木構造物で採用されたが、ポンプ圧送時に骨材が吸水することによる配管の閉塞や、骨材中の水の凍結融解作用に起因するコンクリートの凍害による劣化などの問題があり、現在では土木構造物にはほとんど採用されていない。日本道路公団(以下、「JH」という)においても、東名高速道路や中央自動車道が建設された時代に、鋼橋RC床版の何橋かに採用された事例がある程度である。しかし、近年、吸水率が低く、高強度の人工軽量骨材が開発されたこと、良質な天然骨材の枯渇や環境問題が深刻になっていることから、人工軽量骨材の利用が見直されつつある。

軽量コンクリートは、普通骨材を用いたコンクリート(以下、「普通コンクリート」という)に比べ、一般的にせん断耐力が低下するが¹⁾、その対策として繊維補強材を用いて補強することが有効であると言われており、鋼繊維補強材を用いた軽量コンクリートの適用性も検討されている²⁾。

一方、鋼繊維補強材は、トンネルの吹付けコンクリートおよび覆工コンクリートなどに使用されているが、橋梁の部材に使用する場合、コンクリート表面付近の繊維の発錆

により点錆びが生じたり、ポンプ圧送時に閉塞し易いなどの問題がある。それらの対策として、近年、有機系材料を使用した非金属繊維補強材に着目し、適用に向けた検討がなされている³⁾。

そこで、本報告は、非金属繊維補強材を混入した軽量コンクリートプレキャストPC床版の疲労耐久性試験を実施し、軽量コンクリートの床版への適用性と繊維補強材の補強効果について検討した結果と、床版の施工や耐久性に影響を及ぼす軽量コンクリートの諸物性について、試験結果をとりまとめ報告するものである。

2. 使用材料および配合

本試験に使用した軽量コンクリートは、粗骨材のみ軽量骨材を用いた。軽量骨材は堆積粘土を原料とした骨材で最大寸法は15mmである。また、繊維補強材には、近年非金属繊維としてよく使用されているポリプロピレン(以下、PPという)を原料とした繊維を使用し、繊維長は30mmとした。使用した材料の物性を表-1に示す。

疲労耐久性試験に使用した軽量コンクリートの配合は、プレストレストコンクリート(以下、PCという)で使用実績のある目標強度50N/mm²とした。また、スランプは12cm、空気量は5.0%を目標に配合を決定した。繊維の混入の無し(0%)と有り(1.0%)について、それぞれ最適s/aとなるように試し練りを実施し決定した。また、物性試験に

表-1 使用材料の物性

使用材料	種類	主な物性
セメント	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm ³
細骨材	大井川産川砂	密度 2.62g/cm ³ 吸水率 1.52%
粗骨材	堆積粘土系人工軽量骨材	密度 1.18 g/cm ³ 最大骨材寸法 15mm 24 時間吸水率 1.01%
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボキシル酸系
	AE 剤	変性アルキルカルボキシル化合物
繊維	ポリプロピレン	断面積 1.77×0.38mm ² ヤング係数 3.7kN/mm ²

表-2 軽量コンクリートの配合

配合名	繊維 %	単位量(kg/m ³)				SP C ×%	AE C ×%	単位容積重量(kg/m ³)
		W	C	S	G			
LC-0	0	145	382	803	440	0.70	0.60	1820
LC-1	1.0	163	429	870	359	0.75	0.50	1880
LC-2	2.0	186	489	944	264	0.70	0.20	1950

については、上記の 2 配合と併せて繊維混入量 2.0%についても試験を行なった。試験に使用した配合を表-2 に示す。

3. 疲労耐久性試験の概要

3.1 試験体

試験体は、図-1 に示すプレキャスト版（以下、PCa 版という）を 7 枚橋軸方向にならべ、その継目部を、PCa 床版の継手部として一般的に採用されている RC ループ継手で接合した構造とした。試験体の平面図および側面図を図-2 に示す。軽量床版に使用したコンクリートは、表-2 に示す配合のうち、繊維補強材を混入しない軽量コンクリートの配合 LC-0 を 3 枚（E～G 版）（以下、軽量床版）と、PP 繊維を 1.0% 混入した軽量コンクリートの配合 LC-1 を 4 枚（A～D 版）（以下、軽量繊維床版）とし、床版の端部には、床版の連続性を確保するために場所打ちコンクリートを打設した。

3.2 荷重方法

試験は、JH 所有の輪荷重走行荷重試験機⁴⁾（写真-1）を使用して行った。荷重荷重は 1 軸 2 輪で、図-2 に示す荷重中心位置から前後 1.5m の範囲内を往復移動荷重した。荷重位置の両端では、荷重を抜くことにより荷重振幅が大きくなり、実橋に近い荷重状態を再現できる。荷重は図-3 に示すように、軸重を 198kN を 8 万走行、294kN を 60 万走行、392kN を 20 万走行と順次荷重荷重を増加させた。なお、ステップ 2 の 60 万走行は、現東

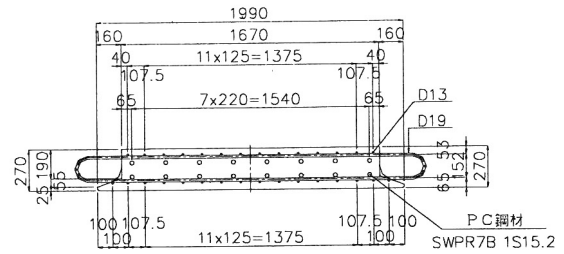


図-1 PCa 版断面図

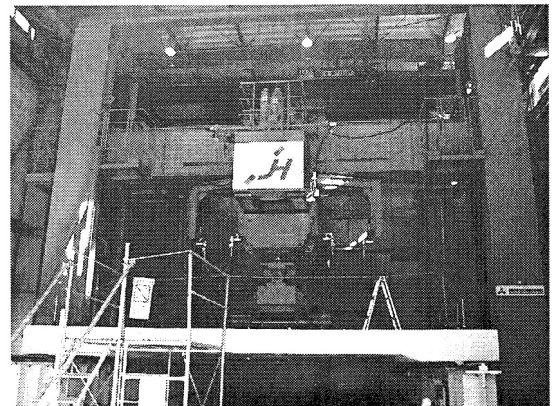


写真-1 輪荷重走行試験機

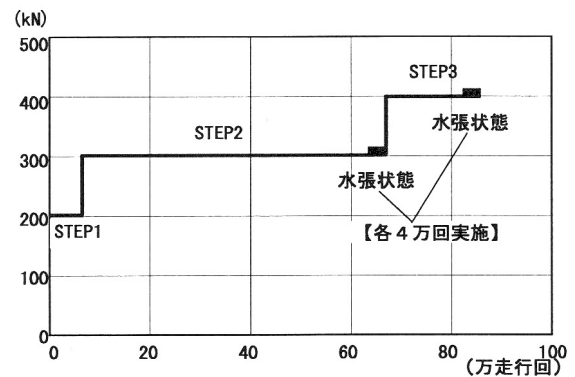
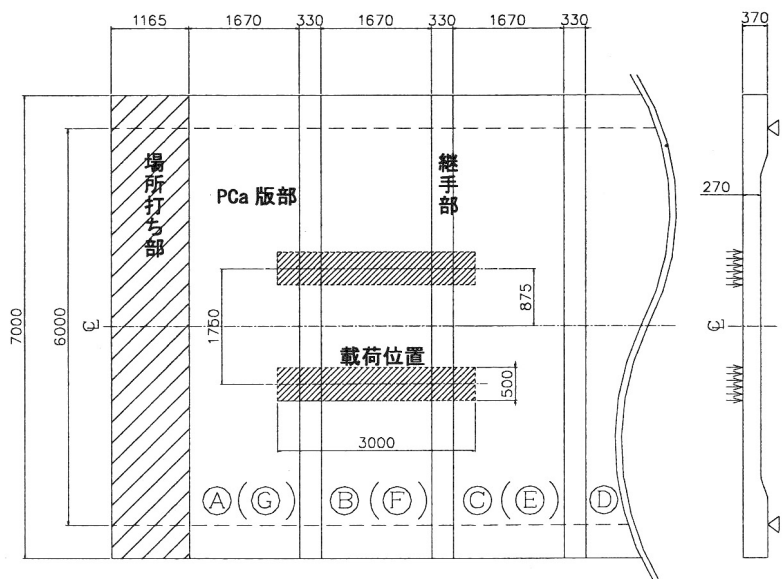


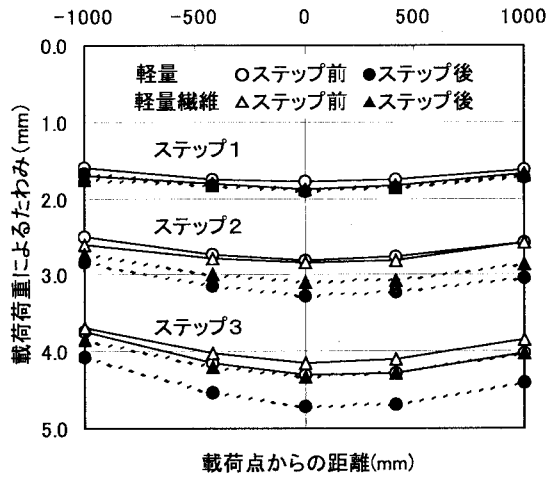
図-3 荷重ステップ



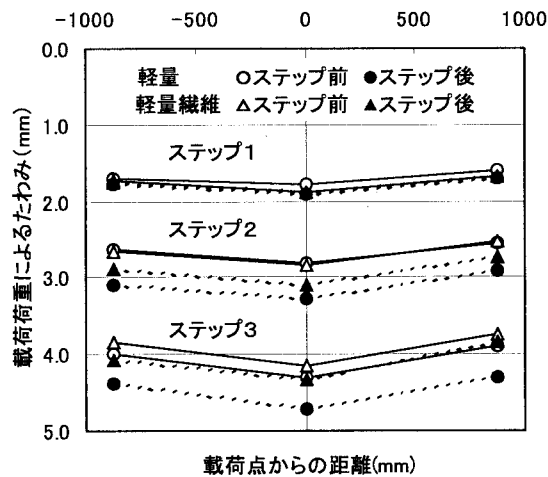
平面図

側面図

図-2 床版試験体



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-4 活荷重による床版のたわみ分布

名高速道路の50年分の疲労に相当するものである。

3.3 測定項目

輪荷重走行載荷試験の途中で静的載荷試験を実施した。載荷荷重は、各載荷ステップの移動載荷荷重とし、載荷位置は輪荷重載荷の中央 (B版およびF版の中央) およびRC継手部位置 (B-C版およびE-F版継手部) とした。静的載荷試験において、床版のたわみ、鉄筋およびコンクリートのひずみを測定した。

4. 疲労耐久性試験結果と概要

4.1 試験結果概要

軽量床版および軽量繊維床版について、輪荷重走行試験を実施した結果、各載荷ステップにおいて、載荷荷重による床版たわみ、鉄筋ひずみの増加はほとんど認められなかった。また、床版下面に微細なひび割れが発生したが、0.1mm以下であり、水張り状態での載荷においても漏水は認められず、貫通ひび割れでは無いことが確認された。

以下に試験結果を詳述するとともに、同様な条件で載荷した、普通コンクリートを用いた場所打ちPC床版(以下、

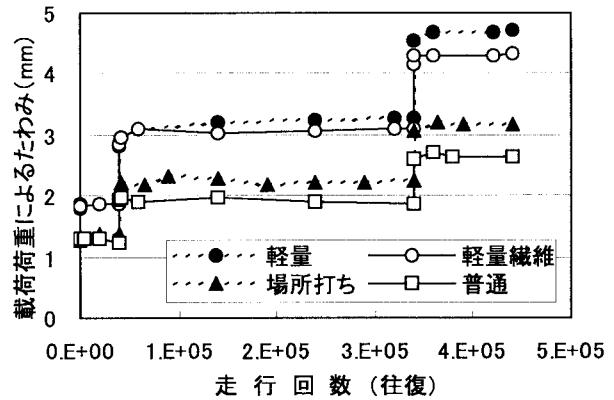


図-5 載荷荷重による床版たわみの経時変化

場所打ち床版という) および普通コンクリートを用いたPCa床版(以下、普通床版という)の既往の試験結果^{5),6)}と比較する。

4.2 床版たわみ

各載荷ステップの前後における活荷重たわみ分布を、橋軸方向、橋軸直角方向別に図-4に示す。橋軸方向において、多少左右が対称でないのは、床版端部のコンクリートが軽量コンクリートでなく、剛性が異なったためと考えられる。

軽量床版、軽量繊維床版ともに、荷重の増加に伴ってたわみは増加する。また、ステップ2および3の前後において、活荷重たわみの増加が見られ、特に軽量床版での増加が顕著であった。

載荷荷重たわみの経時変化を、場所打ち床版、普通床版の結果とあわせて図-5に示す。軽量床版のたわみは、場所打ち床版および普通床版に比べ、約1.5倍程度大きかった。これは、5.1で述べるように、軽量コンクリートの静弾性係数が普通コンクリートに比べ小さいことによる影響と考えられる。また、繊維の混入による効果は見られなかった。しかし、支間6mに対しステップ3においても4.5mm程度のたわみであり、また、床版たわみの経時変化により残留たわみは徐々に増加するものの、図-5に示す載荷荷重たわみにはほとんど増加傾向が認められなかったことから、十分な疲労耐久性が確保されていると考えられる。

4.3 鉄筋およびコンクリートひずみ

載荷ステップの前後における上側鉄筋ひずみおよび下側鉄筋ひずみについて、橋軸方向を図-6に示す。上側鉄筋は、各荷重ステップ前後のひずみの増加は見られなかったが、下側鉄筋ひずみについては、ステップ2および3においてひずみの増加が見られた。また、繊維の混入により、鉄筋ひずみは1~2割低下した。

床版の載荷点直下の下側鉄筋の活荷重により生じるひずみを、場所打ち床版、普通床版と併せて図-7に示す。

軽量床版の活荷重鉄筋ひずみは、場所打ち床版、普通床

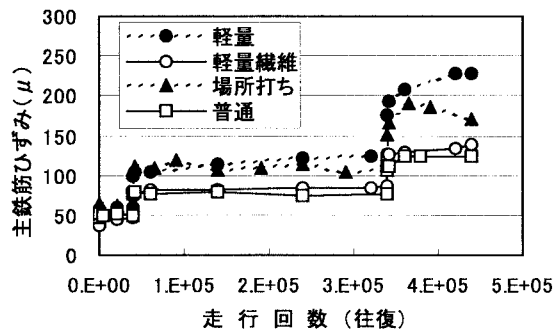
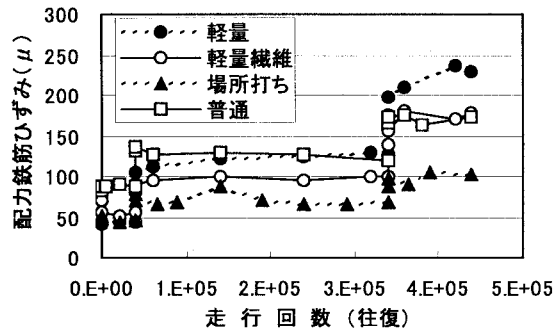
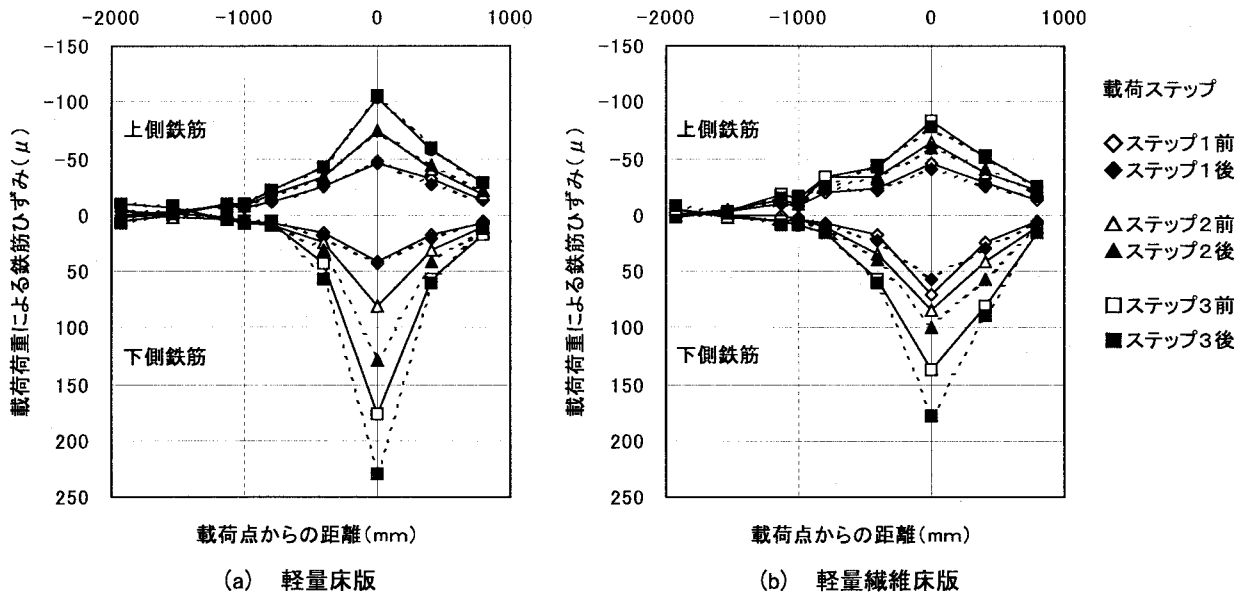


図-7 載荷荷重による鉄筋ひずみの経時変化

版に比べ、橋軸、橋軸直角方向ともに大きめの傾向にある。しかし、現場打ち床版の橋軸直角方向と比較すれば大差はなく、また、ステップ3の載荷状態に対しても、鉄筋ひずみは最大で約240 μ と小さな値であり、鉄筋の許容応力度(換算ひずみ667 μ)に比べてかなり余裕のある結果が得られた。

軽量繊維床版は、橋軸、橋軸直角方向ともに普通床版と

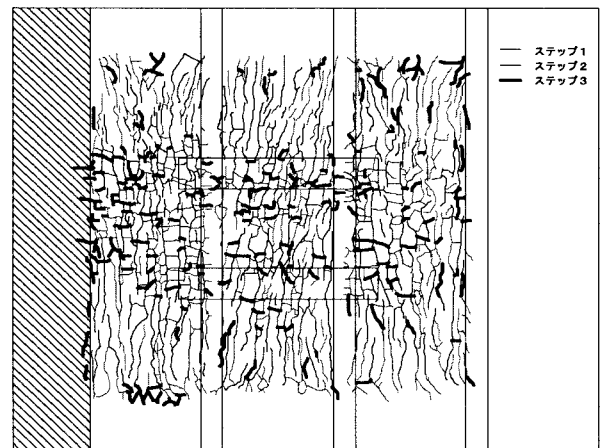
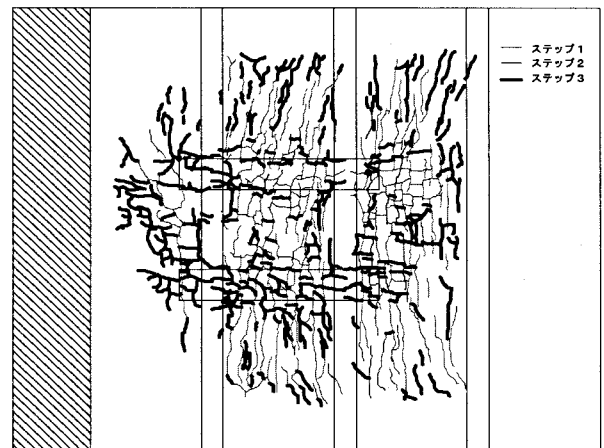


図-8 床版下面のひび割れ状況

同程度のひずみを示し、軽量床版より小さい値となった。

4.4 ひび割れ

ひび割れの進展状況として軽量床版および軽量繊維床版の、各ステップ終了後の床版下面のひび割れ状況を図-8

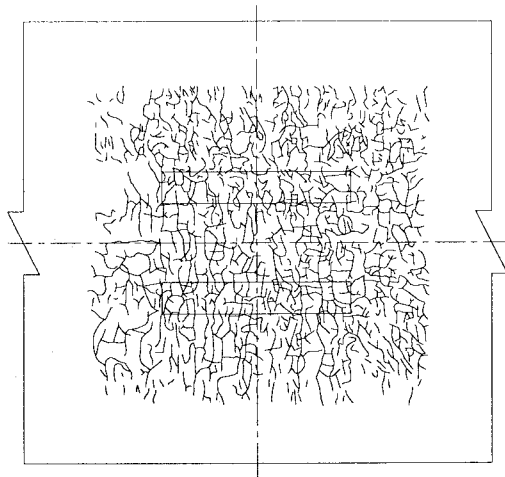


図-9 場所打ち床版のひび割れ状況

に示す。

軽量床版のひび割れは、普通床版のひび割れと比較するとかなり多い結果であったが、図-9 に示す場所打ち床版と比較すると同程度であった。また、今回の試験では、軽量繊維床版がステップ1 終了時点で多くのひび割れが発生しており、これまでのPC 床版に見られない傾向を示した。この原因としては、繊維補強材によりひび割れが分散したことに加えて、今回の繊維補強材を混入した軽量コンクリートの配合は、単位水量が比較的多いため、5.2 に述べるように乾燥収縮による引張力が大きく働いたことも一つの要因と考えられる。したがって、高性能 AE 減水剤などにより単位水量を小さくするなどの配合を工夫することにより、ある程度のひび割れの抑制は可能であると予想される。

また、軽量床版のひび割れ幅は 0.04~0.07mm、軽量繊維床版のひび割れ幅は 0.03mm~0.08mm であり、普通床版と同程度のひび割れ幅であった。いずれも管理上問題とされていない 0.2mm 以下の微小ひび割れであり、十分な疲労耐久性を有していると推測される。

5. 軽量コンクリートの性状

今回の試験では PCa 床版を用いたが、現場では場所打ちによる PC 床版も多く採用されている。このため、PCa 床版および場所打ち床版に軽量コンクリートを適用する場合、コンクリートの温度上昇特性や硬化後の性状に留意する点として、以下の点があると考えられる。

- ・PCa 床版製作時の蒸気養生時に、ひび割れが発生しないか
- ・PCa 床版運搬・架設時に、角欠けなどが生じないか
- ・場所打ち床版の施工時に、温度ひび割れ、乾燥収縮ひび割れが生じないか

これらの性状を確認するために、軽量コンクリートの物性試験を実施した。

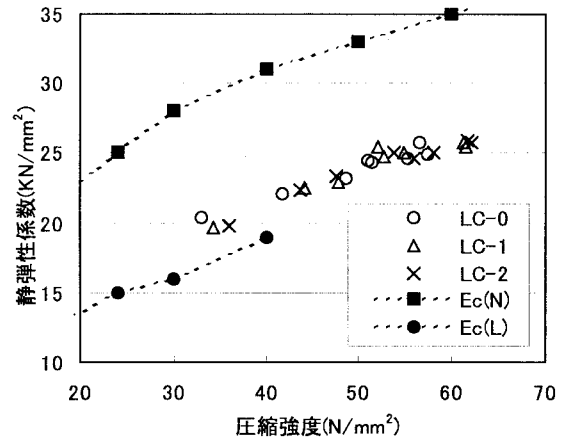


図-10 圧縮強度と弾性係数の関係

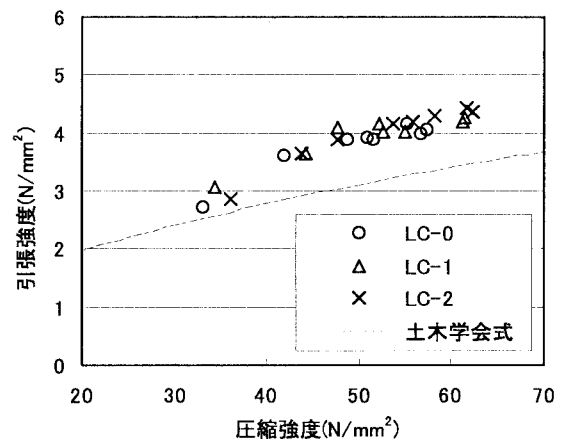


図-11 圧縮強度と引張強度の関係

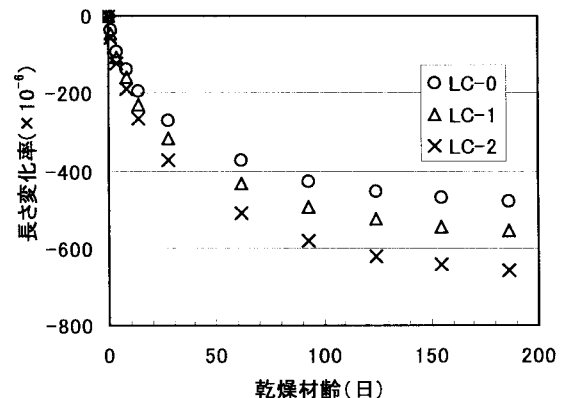


図-12 乾燥収縮

5.1 圧縮強度・静弾性係数・引張強度

材齢 1~91 日の圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度を測定した。試験結果として、圧縮強度と静弾性係数の関係を図-10 に示す。比較のため、土木学会コンクリート標準示方書[性能照査編]に示されている、普通コンクリートおよび軽量コンクリートの静弾性係数(それぞれ $E_c(N)$ 、 $E_c(L)$ とする)を併せて示す。但し、軽量コンクリートは、細骨材、粗骨材ともに軽量コンクリートの場合である。た

だし、図-10に示す $E_c(N)$ 、 $E_c(L)$ の圧縮強度はともに設計基準強度である。したがって、実際の強度にすれば $E_c(N)$ 、 $E_c(L)$ は図の右側にシフトすると考えられ、今回の軽量コンクリートは $E_c(N)$ と $E_c(L)$ の中間に位置すると思われる。

圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-11に示す。比較のため、コンクリート標準示方書[構造性能照査編]に示されている、普通コンクリートの圧縮強度と引張強度の関係をあわせて示すが、今回使用した軽量コンクリートの割裂引張強度は比較的高めであった。

5.2 乾燥収縮

乾燥収縮試験は、JIS S 1129-2に規定するコンタクトゲージ方法に準じて行った。材齢7日まで20℃水中養生した供試体を基長とし、20℃60%RHで6ヶ月まで実施した。

測定結果を図-12に示す。乾燥収縮は繊維の混入率が高いほど収縮量が大きい傾向を示した。これは今回の配合が単位水量の上限を定めずに決定し、繊維の混入率が大きくなるほど単位水量が大きくなっているためと考えられる。このため、混和剤を適切に使用することにより、収縮量は低減可能であると言える。

5.3 断熱温度上昇

LC-1について、断熱温度上昇試験を実施した。測定結果を近似した式を次式に示す。

$$Q_t = 83.9(1 - \exp(-2.193t)) \quad (1)$$

終局温度上昇は83.9℃に達し、コンクリート標準示方書[施工編]を元に計算した場合(打込み温度20℃の場合、 $Q_\infty = 67.8^\circ\text{C}$)に比べかなり大きな結果となった。この理由としては、軽量骨材の比熱は天然骨材に比べ小さいためと思われる。

6. まとめ

本研究では、人工軽量骨材を用いた軽量コンクリート床版の輪荷重走行試験を実施し、軽量コンクリートの疲労耐久性について検討するとともに、繊維補強材による補強効果について検討を行なった。また、軽量コンクリートを床版に使用する場合に影響があると思われるコンクリートの性状について確認を行なった。

結果として軽量コンクリートを用いたPC床版は、十分な疲労耐久性を有しており、さらに繊維補強材を混入することにより、床版のたわみ、鉄筋ひずみが抑制されることが確認された。得られた知見の詳細を以下に示す。

・軽量コンクリート床版のたわみは、普通コンクリート床版に比べ1.6倍程度大きかった。これは、軽量コンクリートの弾性係数が、3割程度小さいためと考えられる。また、いずれの試験体も、各載荷ステップにおける活

荷重たわみの増加は見られなかった。

- ・軽量コンクリート床版は、普通コンクリート床版に比べ、橋軸、橋軸直角方向ともに鉄筋ひずみが増大するが、設計荷重の2倍の載荷状態においても、鉄筋の許容応力度に比べてかなり余裕がある結果であった。
- ・繊維を混入することにより、活荷重による床版たわみが1割程度、鉄筋ひずみが2~3割程度小さくなり、繊維の補強効果が確認された。
- ・軽量コンクリート床版のひび割れは、0.03~0.08mm程度の微小ひび割れが多く発生し、発生量は既存のPCa床版に比べて多く、場所打ち床版とは同程度であった。また、繊維を混入した床版の方が多くのひび割れが発生したが、これは繊維混入によりひび割れが分散したものである。
- ・軽量コンクリートの弾性係数、引張強度と圧縮強度との関係は、既存の算定式の傾向とほぼ一致しており、実験結果を元に算定式を設定可能である。
- ・軽量コンクリートの断熱温度上昇量は、普通コンクリートに比べ高い値を示した。これは、軽量骨材の比熱が小さいためと考えられ、蒸気養生や断面の厚い場所打ち床版などでは、養生方法等、ひび割れ対策に留意する必要がある。

参考文献

- 1)土木学会：人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル，1985.6
- 2)保坂鐵矢，山田高裕，中野幹一郎：鋼繊維軽量コンクリートを用いた連続合成鉄道橋—阿佐線・物部川橋りょう—，コンクリート工学，Vol.38，No.6，pp.24-30，2000.6
- 3)伊藤始，岩波光保，横田弘：ビニロン短繊維の混入がRCはりのせん断耐荷力に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1723-1728，2003
- 4)三百田健治，飯東義夫：移動載荷疲労試験機の新設について，高速道路と自動車，Vol.39，No.7，pp.37-40，1996.7
- 5)長谷俊彦，上東泰，安松敏雄：長支間PC床版の移動輪荷重走行疲労試験による耐久性評価，コンクリート工学年次論文報告書，Vol.12，No.3，pp.259-264，1999
- 6)松井繁之，角昌隆，向井盛夫，北山耕造：RCループ継手を有するプレキャストPC床版の移動載荷試験，プレストレストコンクリート技術協会第6回シンポジウム論文集，pp.149-154，1996.10