

報告 高強度フライアッシュ人工骨材を用いた PC 橋の性能確認試験

原 幹夫*1・梅原 秀哲*2・池田 博之*3・渡邊 芳弘*4

要旨：コンクリート構造物の軽量化及び資源の有効活用の観点から、プレストレストコンクリート橋に軽量かつ高強度を有する高強度フライアッシュ人工骨材を採用した。採用にあたって高強度域でのコンクリート物性確認、橋梁構造の検討、コンクリートの施工性確認を行った。さらに、実橋の施工に際しては曲げ載荷による主桁耐力確認試験で普通骨材コンクリートとの比較を行い、施工後の実橋載荷実験を行った。これら一連の検討結果から、高強度フライアッシュ人工骨材を用いることで橋梁の性能及び経済性を損なうことなく、軽量化できることを示す。

キーワード：高強度フライアッシュ人工骨材，PC橋，資源再利用，軽量化

1. はじめに

構造物の耐震性，経済性，景観性などを向上させる観点から，プレストレストコンクリート（以下PCと略す）構造の軽量化が課題となっていた。軽量化の手段として，軽量骨材コンクリートを採用し，単位容積質量を小さくする方法と，コンクリートの圧縮強度を上げ，緊張材の圧縮力を受け持つコンクリート断面を小さくする方法が考えられる。しかし従来の軽量骨材コンクリートでは普通骨材コンクリートほどの強度が期待できず，また，コンクリートの静弾性係数も小さいことが制約となり，あまり有効な手段として採用されることはなかった。そのため，高強度フライアッシュ人工骨材（以下HFA骨材と略す）コンクリートを採用し，PC構造物の軽量化を図った。

HFA骨材は主原料の90%を火力発電所から排出される石炭灰の原粉（産業廃棄物）に，副原料として密度調整材（炭酸カルシウム粉末等）および粘結剤（ベントナイト等）を加えて，造粒，焼成して製造される密実な非発泡型

骨材である^{1),2)}。したがって，従来埋め立て処分等で廃棄処理される灰を積極的に有効利用する点で，環境問題に対し非常に有用な骨材である。この骨材の分類は人工軽量骨材でJISA5002「構造用軽量コンクリート骨材規格」に該当するものの，その性能は従来の人工軽量骨材と異なり，骨材比重が1.8と軽いことを除けば普通骨材に近い性能を有する^{3),4)}。

第二東名高速道路の発杭川側道橋（プレテンション方式単純中空床版橋）の主桁において，前述の特長を生かし，桁高の縮小・死荷重の軽減を図るため，HFA骨材コンクリートを使用した。本骨材の使用にあたり，設計基準強度，桁高の設定検討を行うと共に，施工に先立ちコンクリートの性状，施工性，実大桁による荷重強度等の確認実験を行った，さらに架橋後，実橋載荷実験によりその性能を確認した。

本報告は，発杭川側道橋において行った一連の実験結果をまとめ，HFA骨材コンクリートを導入した効果及び今後の課題を検討したものである。

*1 (株)日本ピーエス技術管理部次長 (正会員)

*2 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科 工博 (正会員)

*3 日本道路公団名古屋建設局構造技術課課長 (正会員)

*4 日本道路公団名古屋建設局豊田工事事務所

2. HFA骨材コンクリート導入検討

2.1 HFA骨材コンクリート導入時の検討

発杭川側道橋の縦断線形は支間中央部が最も高いクラウン部であり、その高さは河川の水位(HWL)および余裕高に橋梁の桁高を加算して決定されている。従って桁高を低くすることで、側道の道路線形はよりスムーズとなり、橋梁へのすり付け区間を短くすることができる。また、HFA骨材コンクリートは材料単価では砕石コンクリートに比べ若干割高ではあるが、桁高が小さくなるためコンクリート容積が減少し製作コストがあがらず、軽量化による運搬・架設等の施工費の軽減を期待した。

2.2 検討結果⁵⁾

HFA骨材を使用したコンクリートは 120N/mm^2 までの圧縮強度を発現できることが確認されている⁶⁾。これを基に設計基準強度を $50\sim 100\text{N/mm}^2$ の範囲で試算した結果を図-1に示す。桁高の低減効果はPC鋼材の配置スペースの関係から、コンクリート強度が 80N/mm^2 以上で桁高は一定となり、効果の増加は期待できない。

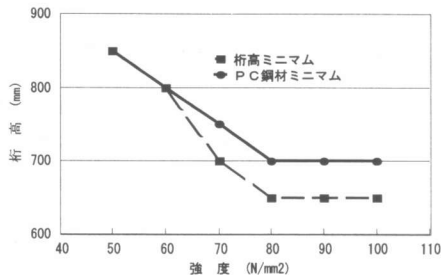


図-1 コンクリート強度と桁高の関係

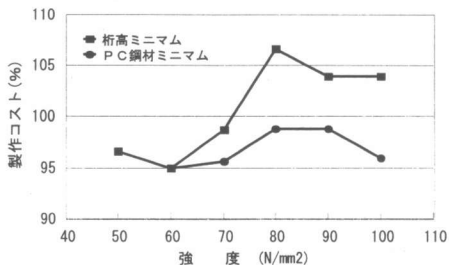


図-2 コンクリート強度と桁製作コストの関係
また、桁高ミニマムで設計した場合PC鋼材

の本数が増加し、図-2に示すように主桁製作費が割高となる。

これらの点からコンクリートの設計基準強度を 70N/mm^2 とし、図-3に示すように桁高は標準設計の 900mm を 750mm とした。

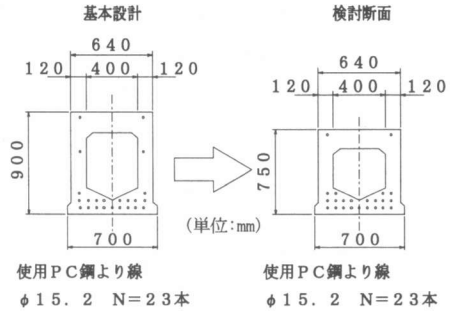


図-3 断面検討結果

3. 施工確認試験⁵⁾

3.1 コンクリートの性状確認試験

施工に先立ちHFA骨材コンクリートの試験練りおよびプラント実機練りを行い、フレッシュ及び硬化コンクリートの性状を確認した。その結果、曲げ及び引張強度はコンクリート標準示方書(土木学会)に記載されている式での計算値とほぼ同等であり、静弾性係数は普通コンクリートに比べ15%程度小さな数値であった。

3.2 施工性確認試験

(1) 充填性、骨材分布の確認

実桁に近い状態に中空枠、疑似PC鋼材、スターラップを配置したモデル桁にてコンクリートの打設試験を行なった。その結果、HFA骨材コンクリートは、流動性が良いため棒状バイブレーターののみで打設可能であり、中空枠の下面にも確実に充填されることが確認できた。さらに硬化後、供試体全断面を切断して5層に区分し、各層での粗骨材分布状況を確認した結果、粗骨材面積率の誤差は3%以内であった。

(2) 桁天端の仕上げ確認

一般に軽量骨材を使用した場合、骨材の浮き上がりが懸念される。HFA骨材コンクリートでは、適切な配合により、天端に骨材は確認できるが、浮き上がりは見られず通常の砕石コン

クリートと同程度に仕上げられた。

3.3 主桁性能確認試験

(1) 実験方法

発杭川側道橋（上り線）で使用するHFA骨材桁（以下HFA骨材桁と略す）を用い、曲げ荷重試験を行い主桁耐力を確認した。また、同一の設計強度、同一断面の砕石コンクリートPC桁（以下砕石桁と略す）を同条件で荷重し、主桁耐力を比較した。曲げ荷重実験供試体を図-4に、荷重位置を図-5に示す。

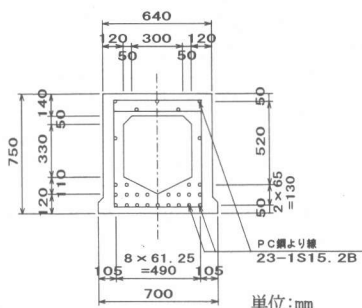


図-4 実験供試体図

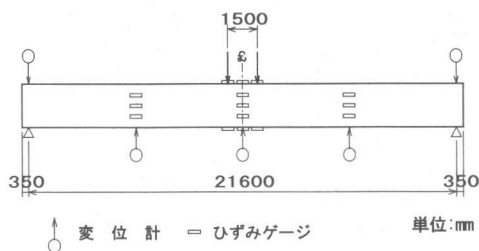


図-5 荷重位置図

荷重は供用時の応力状態に相当する荷重で100回の繰り返し荷重を行い、計算ひびわれ発生荷重及びひびわれ発生荷重でそれぞれ10回の繰り返し荷重を行った。その後、終局荷重ま

で荷重し、コンクリートのひずみ、たわみ量、ひびわれ発生荷重及び終局荷重を計測した。

(2) 試験結果

実験結果では実験値が理論値に対し、ひびわれ発生荷重でHFA骨材桁が1.26、砕石桁が1.19、破壊荷重でそれぞれ1.11、1.16となった。また、HFA骨材桁、砕石桁共に繰り返し荷重による変動は全く見られなかった。

荷重荷重と中央部のたわみ及びひびわれひずみは図-6、図-7に示すように両者とも同

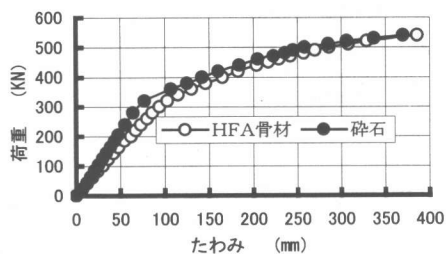
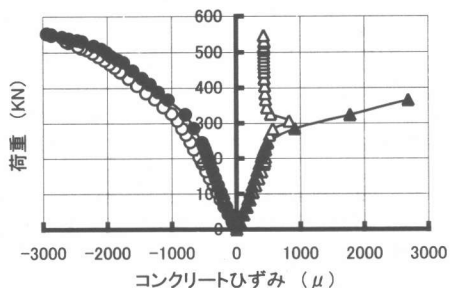


図-6 荷重荷重とたわみの関係



- 上縁(HFA骨材) △ 下縁(HFA骨材)
- 上縁(砕石) ▲ 下縁(砕石)

図-7 荷重荷重とコンクリートひずみの関係

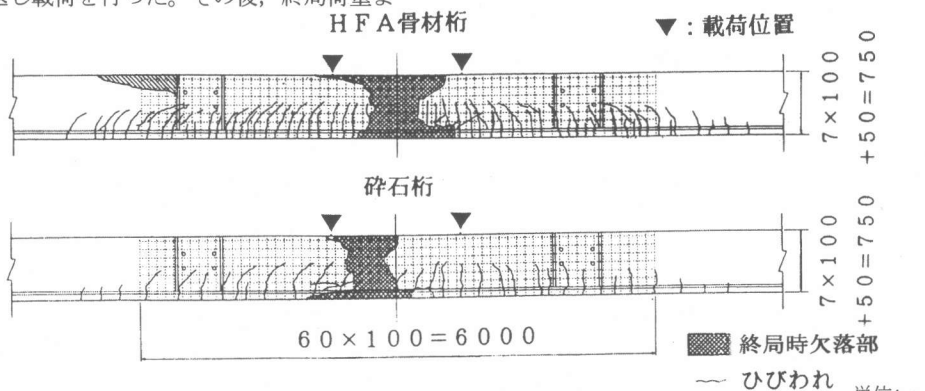


図-8 ひびわれ及び終局状況

様な挙動を示した。終局形態は、両者ともコンクリートの上縁圧縮破壊であり、差異は見られなかった。これらの結果から、HFA骨材桁は碎石桁に匹敵する十分な耐力を有すると判断できる。

ひびわれの発生状況を図-8に示す。碎石桁に比べHFA骨材桁の方がひびわれ幅が小さく、数も多く広範囲に分散した。これは骨材とモルタルの付着性状が良好であるためと考えられる。

4. 実橋載荷試験

4.1 静的載荷試験

(1) 実験方法

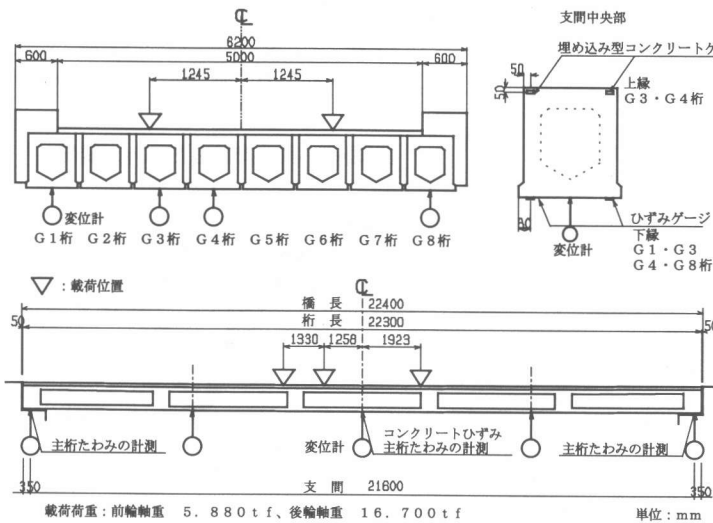


図-9 実橋載荷位置と計測位置

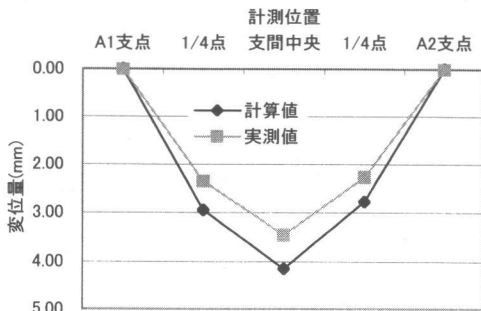


図-10 たわみ量測定結果

静的載荷試験では橋梁の変位量、及び主桁コンクリートひずみの計測を行った。載荷位置は

支間中央とし、試験車両を幅員の中心に配置した。図-9に載荷位置を写真-1に実橋載荷試験状況を示す。

(2) 実験結果

スパン中央部のたわみ量測定結果を図-10に、コンクリートのひずみ測定結果を表-1に示す。

表-1 支間中央部のコンクリートひずみ

計測位置(支間中央)	計算値(μ)	実測値(μ)	
下縁	G1桁	33	34
	G3桁	33	36
	G4桁	33	37
	G8桁	34	39
上縁	G3桁	-28	-21
	G4桁	-28	-24

スパン中央部のたわみ量はFEM解析値と比較して、実測値が20%程度小さくなった。理由として、解析時に使用した静弾性係数は供試体での測定値であり、実桁のコンクリートの値と差があることが考えられる。また、地覆・高欄等による剛性付加は計算上考慮したが、実際との差があることも想

定される。

4.2 振動試験

(1) 実験方法

静的載荷時の試験車両を用い、振動試験を行った。載荷方法は試験車両が幅員中央を走行する方法で行い、速度10、20、30、40km/hの各速度における振動性状を計測した。

(2) 実験結果

代表的な速度20km/h時の支間中央のたわみ量測定結果を図-11に示す。活荷重によるたわみ/スパン比は約1/5,200であり、鋼橋におけるたわみ制限値(1/600)と照合しても十分安定

した結果となった。また、図-12 に試験車両が橋梁を通過した後（10 秒経過後）をゼロ点補正したものを示す。この結果から、本橋梁の固有振動数は約 3.81Hz となった。

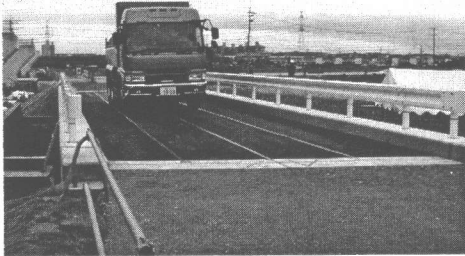


写真-1 実橋載荷試験状況

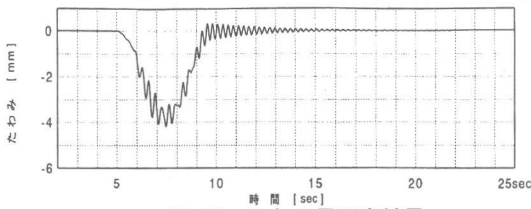


図-11 たわみ量測定結果

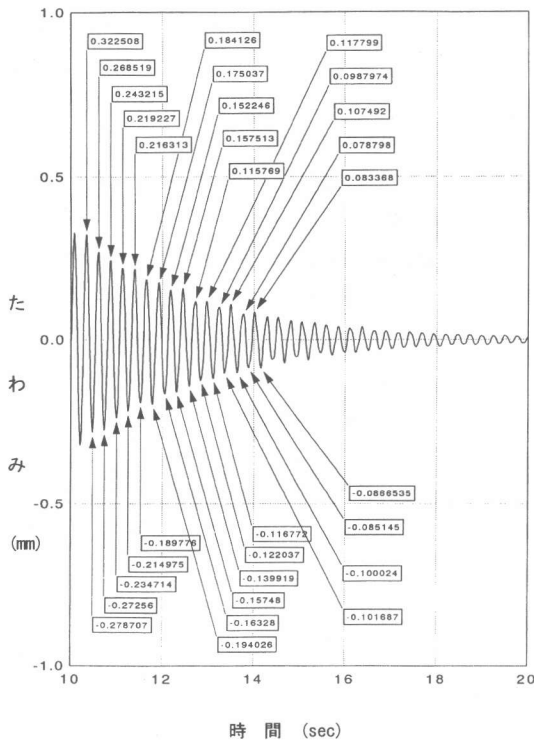
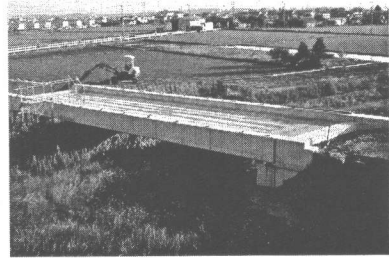


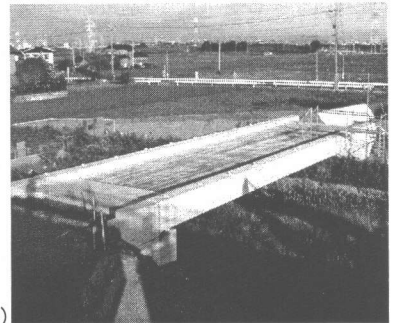
図-12 補正後のたわみ図

1次振動モード（固有振動数）を求める式⁷⁾より得られる計算値は3.96Hzであり、実測から求められた値と近似していた。実測値は一般的な橋梁の固有振動数の範囲にあると考えられる。また、減衰定数は約1.5%となり標準的な弾性挙動を示しているといえる。

これら実橋載荷試験の結果から、一般的な橋梁との大きな差異は見られず、HFA骨材コンクリートを用いた高強度コンクリートPC橋が、十分な機能を有すると判断できる。



(上り線)



(下り線)

写真-2 発杭川側測道橋施工状況

5. おわりに

発杭川側測道橋での検討の結果、HFA骨材コンクリートのフレッシュ時及び硬化コンクリートの性質は、普通骨材コンクリートと同等の基本的物性を持つことが確認できた。また施工前の確認実験では、コンクリートの施工性や、桁としての耐荷重性、終局時の性状も普通骨材コンクリート桁とほぼ同等といえ、ひび割れ分散性は同等以上という結果であった。

実橋による載荷試験結果において、荷重に対する挙動は普通骨材コンクリートの橋梁と類似し、桁高低減に起因するたわみ量の増加が想定

されたが、通常の範囲であった。

PC橋の主桁（プレテンション方式中空床版橋）にHFA骨材コンクリートを使用するのは初めての試みであったが、これら種々の確認実験の結果を総合すると、普通骨材コンクリートを使用した場合と比べ、同等以上の橋梁性能が得られると判断できる。

さらに桁高が縮小され、単位容積質量が小さいことと相まって主桁重量で22%、全体死荷重反力で16%軽量化され⁸⁾、軽減効果を下部構造まで波及させた場合、杭径が10%程度縮小できるとの試算結果⁹⁾もある。これらを加味すれば橋梁全体としてのコスト縮減効果が望めると考えられる。

今回使用したHFA骨材はコンクリートの性能を維持しながら軽量化を図るには最適な材料と思われる。また、シリカヒュームなど、特殊な混和材や配合を要せず高強度コンクリートが得られるという経済性も期待できる。コンクリート用天然骨材の枯渇、品質の低下が懸念されている現在、資源の再利用で生産され、人工品で安定した品質の骨材は、骨材需要を支える有力な対応策の一つになると考えられる。

今後、コンクリート製造設備の改良など解決しなければならない問題や、用途に応じた物性確認など検討は必要であるが、プレキャストセグメント工法やPC床版などの大型構造物の軽量化に役立つものと期待できる。

〔謝辞〕 今回の一連の実験にあたり、高強度人工骨材コンクリート研究会には多大なご支援をいただきました。ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 小谷中昭裕，高倉光昭，志水修身，大神剛章：石炭灰を原料とした人工骨材コンクリートの諸特性に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，vol.17，No.1，pp.405-410，1995

- 2) 曾根徳明：石炭灰を主原料とした高強度人工骨材，コンクリート工学，vol.36，No.12，pp.125-129，1995
- 3) 原幹夫，中川信治，濱岡弘二，船野浩司：石炭灰を原料とした人工骨材を用いた高強度コンクリートのPCへの適用（その1），第7回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.801-806，1997
- 4) 曾根徳明：石炭灰で創る高強度人工骨材，セメントコンクリート，No.618，pp.122-129，1998
- 5) 原幹夫，鈴木裕二，池田博之，鈴木規生，渡邊芳弘，滝本邦彦：高強度人工骨材コンクリートを用いた高強度PC桁橋の設計施工，軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集，pp.141-148，2000
- 6) 澤田兼二，原幹夫，濱岡弘二，船野浩司：石炭灰を原料とした人工骨材を用いた高強度コンクリートのPCへの適用（その2），第7回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.807-810，1997
- 7) 橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，1993
- 8) 原幹夫：高強度人工骨材を用いたプレキャスト部材の製造施工，コンクリート工学，vol.38，No.5，pp.55-58，2000
- 9) 高強度人工骨材コンクリート研究会：平成11年度事業報告書