

論文 再生骨材を用いた自己充填コンクリートの二次製品への適用

馬場 政教^{*1}・河中 涼一^{*2}・綾野 克紀^{*3}・阪田 憲次^{*4}

要旨：再生骨材を用いた自己充填コンクリートの二次製品への適用を目的とし，再生骨材が自己充填コンクリートの流動性，強度および耐久性に及ぼす影響を調べた。その結果，再生骨材を用いても，高性能減水剤の添加量を増やすことで自己充填コンクリートを製造することが可能であることが分かった。コンクリートの強度および耐久性は，コンクリートの単位水量と再生骨材中に含まれる吸水量の和によって説明できることが分かった。再生骨材に含まれる吸水量を考慮することにより，二次製品に要求される力学的性能を満たす製品が製造できることを示す。

キーワード：再生骨材，強度，耐久性，吸水率，二次製品，自己充填コンクリート

1. はじめに

高度成長期に建設された構造物の更新が本格化すると，コンクリート塊の発生量も急増すると予想されている。コンクリート塊の主な用途である路盤材や埋め戻し材の需要の増加が望めない現状を考慮すると，今後もその高いリサイクル率を維持していくことは難しいと思われる。一方，砂利や砂などの普通骨材の採取は，生態系や環境保全の観点から「砂利採取計画認可準則」等多くの法規制で制限されている。このような背景からコンクリート塊をコンクリート用骨材として実構造物に再利用していくことが，今後の環境負荷低減とリサイクル推進の観点から重要である。

本論文は，再生骨材を用いた自己充填コンクリートの二次製品への適用を目的に，再生骨材を用いたコンクリートの流動性，強度および耐久性について研究を行ったものである。そして，再生骨材を用いたコンクリート二次製品の外圧試験¹⁾結果より，用いた再生骨材の吸水量を考慮してコンクリートの強度の検討を行えば，二次製品に要求される力学的性能を満たす製品が製造できることを明らかにしたものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

実験に用いた普通細骨材は，砕砂（密度：2.60 g/cm³，吸水率：3.16%，F.M.：2.85）で，普通粗骨材は，碎石（最大寸法：20mm，密度：2.72 g/cm³，吸水率：0.56%，F.M.：6.59）である。ボックスカルバートの作製に用いた再生骨材は，解体されたコンクリート構造物より発生したコンクリート塊を破碎し，アスファルト等の異物を取り除いたものを用いた。再生細骨材は，密度が2.26g/cm³，吸水率が10.7%，F.M.が3.36のものを，再生粗骨材は，最大寸法が20mm，密度が2.43g/cm³，吸水率が5.20%，F.M.が6.69のものを，普通骨材を用いた自己充填コンクリートの配合を，**Table 1**に示す。再生骨材を用いた自己充填コンクリートの配合は，**Table 1**に示す配合より普通骨材と再生骨材を容積比で置換して用いた。高性能減水剤（以下，HRWRAと示す）には，カルボキシル基含有ポリエーテル系のものを，耐久性試験では，乾燥収縮ひずみ，中性化深さおよび耐硫酸塩性を調べた。乾燥収縮試験には，7日間水中養生を行った100×100×400mm

*1 大和クレス(株) 長船工場技術部（正会員）

*2 (株)ピーエス三菱（正会員）

*3 岡山大学大学院 自然科学研究科地球・環境システム科学専攻助教授 工博（正会員）

*4 岡山大学大学院 自然科学研究科地球・環境システム科学専攻教授 工博（正会員）

Table 1 Mixture proportion of self-compacting concrete.

W/C (%)	s/a (%)	Unit weight per volume (kg/m ³)					Admix.* (Cx%)
		W	C	LF	S	G	
43.0	53.3	185	431	157	846	776	1.5

*:HRWRA

Table 2 Physical properties of recycled aggregates.

Kind of aggregate		Density (g/cm ³)	Water Absorption (%)
Crushed specimen	fine	2.36	7.44
	coarse	2.54	4.66
Pavement base (Water wash)	fine	2.48	2.88
	coarse	2.65	1.64
Pavement base (Non treatment)	fine	2.37	6.30
	coarse	2.61	2.00

Table 3 Mixture proportions of concrete.

W/C (%)	s/a (%)	Unit weight per volume (kg/m ³)				Admix.* (Cx%)
		W	C	S	G	
36.0	53.0	180	500	883	819	0.9
40.0	45.0		450	769	983	0.7
45.0	43.1	203		710		
50.0	41.0	225		653		
60.0	42.0	180	300	770	1,112	0.2
65.0	40.9	195		733		
70.0	39.4	210		691		

*:HRWRA

の角柱供試体を用いた。測定は、温度が20℃で相対湿度が60%の恒温恒湿室内で行った。耐硫酸塩性試験は、供試体を飽和状態の硫酸ナトリウム水溶液中に5日間、気中に2日間おくサイクルを1サイクルとし、1サイクル毎に動弾性係数を測定した。中性化試験は、温度30℃、相対湿度60%、二酸化炭素濃度20%の条件下で実験を行った。耐久性試験には、上記の再生骨材に加え、試験室で作製したコンクリート供試体を破砕した再生骨材、路盤材用の再生骨材を水洗いしたものおよび未処理のものを用いた。実験に使用した再生骨材の物性値をTable 2に示す。ま

Table 4 Size of box culvert.

Kind of box culvert	B	H	L	t ₁	t ₂	t ₃
500x500x2,000	500	500	2,000	130	130	130
1,000x1,000x1,000	1,000	1,000	1,000	130	130	130
1,400x1,400x1,000	1,400	1,400	1,000	150	130	150

(Unit: mm)

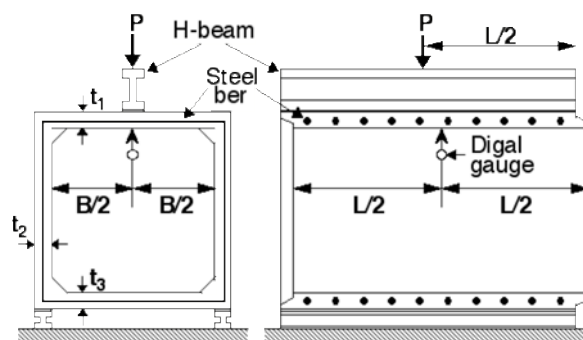


Fig.1 Load test of box culvert.

た、耐久性試験に用いた普通骨材のコンクリート配合をTable 3に示す。

2.2 再生骨材を用いた二次製品の製造

Table 4に本研究で用いた3種類のボックスカルバートの寸法を示す。ボックスカルバートの長さ方向の断面における鉄筋量は、内幅が500mmのものは510mm²/m、内幅が1,000mmのものは990mm²/m、内幅が1,400mmのものは1,300mm²/mである。ボックスカルバートは、コンクリート打ち込み後、昇温速度が25℃/時で、65℃まで温度を上昇させ、その後5時間保持する条件で蒸気養生を行った。ボックスカルバートの外圧試験法の概要を、Fig.1に示す。ボックスカルバートの外圧試験における初期ひび割れ発生荷重の算定には、式(1)に示すひび割れ抵抗モーメントM_{cr}を用いた²⁾。

$$M_{cr} = \sigma_{bt} \frac{I}{(t_1 - u)} \quad (1)$$

ここに、 σ_{bt} ：コンクリートの曲げ引張強度(N/mm²)、 I ：換算断面全体の断面2次モーメント(mm⁴)、 t_1 ：頂版断面の肉厚(mm)、 u ：圧縮縁から中立軸までの距離(mm)である。鉄筋のヤング係数には、200kN/mm²を、鉄筋コンクリートの単位重量には、24.5 kN/m³を用いた。

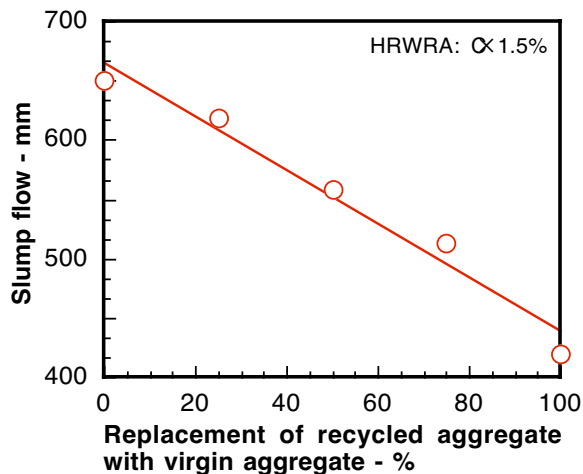


Fig.2 Relationship between replacement of recycled aggregate and slump flow.

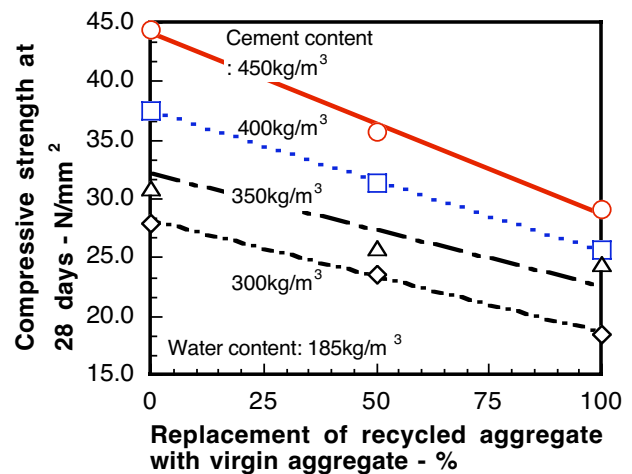


Fig.4 Influence of replacement of recycled aggregate on compressive strength.

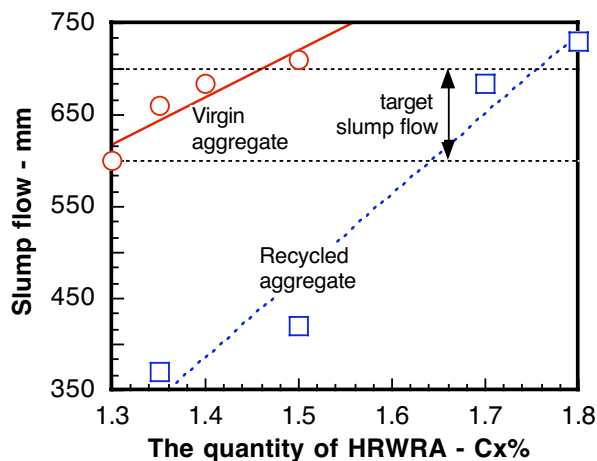


Fig.3 Relationship between quantity of HRWRA and slump flow.

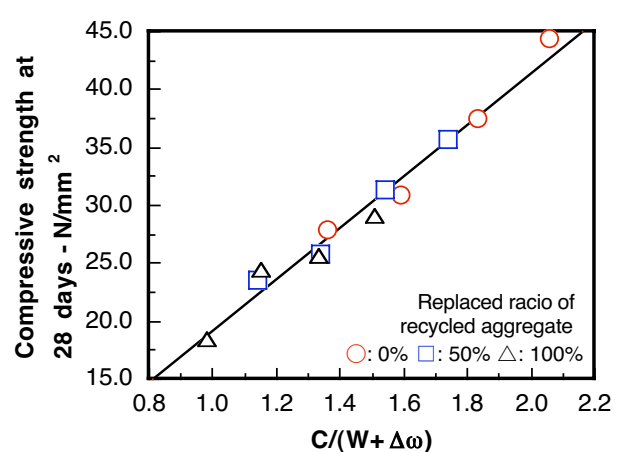


Fig.5 Relationship between $C/(W+\Delta\omega)$ and compressive strength.

3. 結果および考察

3.1 再生骨材を用いた自己充填コンクリートの流動性

Fig.2は、自己充填コンクリートのスランプフローと再生骨材の普通骨材との置換割合の関係を示したものである。高性能減水剤の添加量は、単位セメント量の1.5%一定にした。この図から明らかなように、自己充填コンクリートのスランプフローは、再生骨材の置換割合が上がるにつれて小さくなる事が分かる。

Fig.3は、自己充填コンクリートのスランプフローと高性能減水剤の添加量の関係を示したものである。図中に示す○は、普通骨材のみを用

いたコンクリートの結果を、□は、再生骨材のみを用いたものの結果を示している。この図から明らかなように、再生骨材を用いた自己充填コンクリートであっても、高性能減水剤の添加量を増やすことで、普通骨材を用いたものと同程度のスランプフローを得ることが可能であることが分かる。再生骨材を用いた自己充填コンクリートの充填性能を調べるために、U型間引き通過試験も行った。その結果、スランプフローが730mmの場合のみ若干材料分離を生じ、充填高さは180mm程度であった。しかし、スランプフローが300から700mmのものは、充填高さが200から250mmと、ボックスカルバートを製

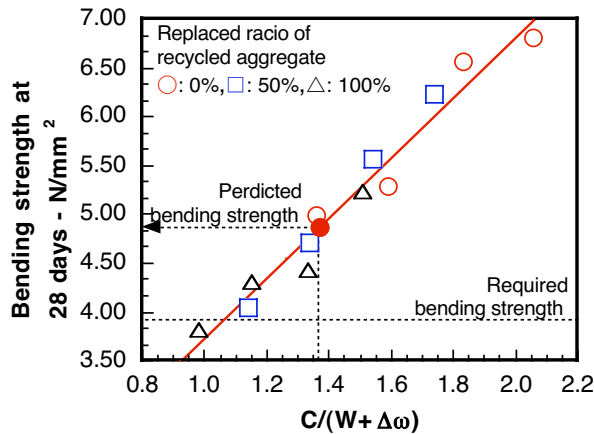


Fig.6 Relationship between $C/(W+\Delta\omega)$ and bending strength.

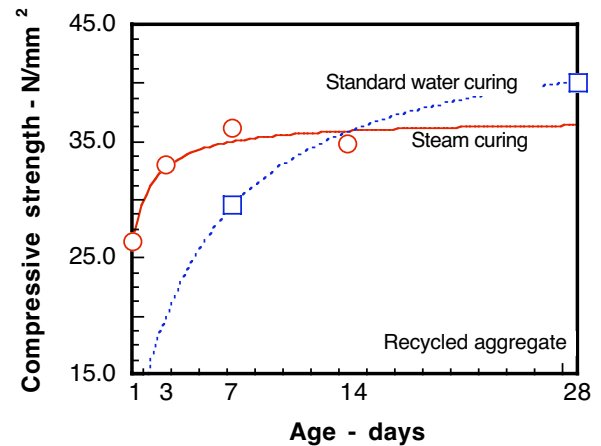


Fig.7 Relationship between development of strength and method of curing.

造するのに十分な自己充填性能があることが確かめられた。

3.2 再生骨材を用いたコンクリートの強度

Fig.4は、再生骨材の普通骨材との置換割合が材齢28日におけるコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を示したものである。この図から明らかのように、いずれの単位セメント量のコンクリートも、再生骨材の置換割合が上がるにつれ、圧縮強度は低くなることが分かる。しかし、骨材中に含まれる吸水量 $\Delta\omega$ を考慮した $C/(W+\Delta\omega)$ と圧縮強度の関係を示したFig.5からは、再生骨材の置換割合に関わらず、ほぼ直線関係が成り立つことが分かる。ただし、吸水量とは、表乾状態の骨材中に含まれる水分量である。また、図中の○は、普通骨材のみを用いたコンクリートの結果を、□は、再生骨材の普通骨材との置換割合が容積比で50%のものの結果を、△は、置換割合が100%の結果を示している。

Fig.6は、再生骨材を用いたコンクリートの $C/(W+\Delta\omega)$ と材齢28日における曲げ強度の関係を示したものである。コンクリートの曲げ強度においても、 $C/(W+\Delta\omega)$ との間にほぼ直線関係が成り立っていることが分かる。

Fig.7は、蒸気養生および標準水中養生を行った自己充填コンクリートの圧縮強度の経時変化を示したものである。○は、蒸気養生を行ったコンクリートの結果を、□は、標準水中養生を

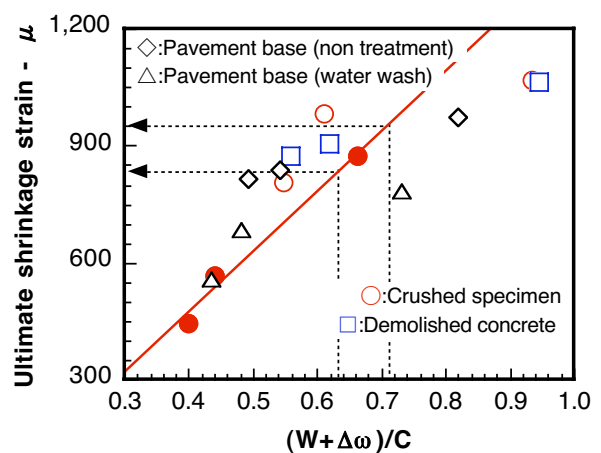


Fig.8 Relationship between $C/(W+\Delta\omega)$ and drying shrinkage strain.

行ったものの結果を示している。この図より、材齢28日における蒸気養生を行ったコンクリートの圧縮強度は、標準水中養生を行ったものの約0.87倍となることが分かる。従って、ボックスカルバート1種に要求される曲げ強度 3.40N/mm^2 のコンクリート³⁾を、蒸気養生を行って製造する場合には、標準水中養生で $3.91(=3.40/0.87)\text{N/mm}^2$ の曲げ強度となるコンクリートを製造することが要求される。本研究で用いる再生骨材を用いた自己充填コンクリートの $C/(W+\Delta\omega)$ は1.37で、Fig.6より、その曲げ強度は、 4.88N/mm^2 となる。従って、曲げ強度に関しては、要求性能を満たすことが予測される。また、実測した曲げ強度は 4.53N/mm^2 と、ほぼ

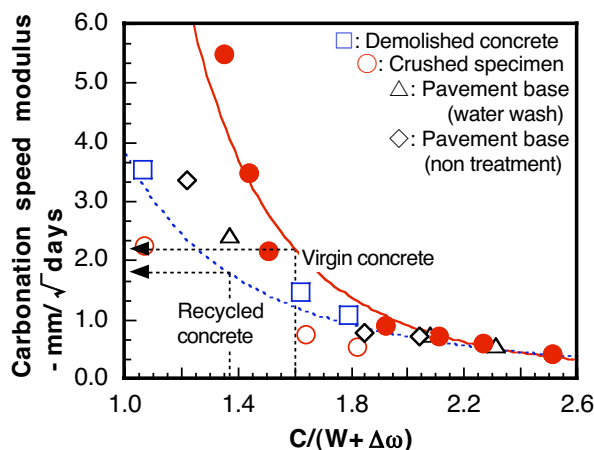


Fig.9 Relationship between $C/(W+\Delta\omega)$ and carbonation speed modulus.

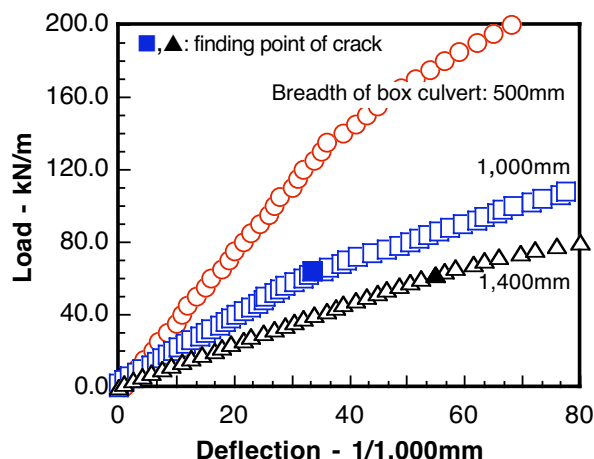


Fig.11 Load-deflection diagram of load test of box culvert.

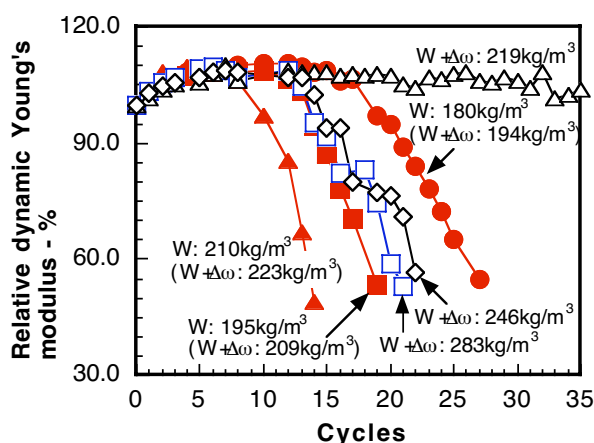


Fig.10 The result of resistance to sulfate attack test.

同じ値となった。

3.3 再生骨材を用いたコンクリートの耐久性

Fig.8は、再生骨材を用いたコンクリートの $(W+\Delta\omega)/C$ と乾燥収縮ひずみの収束値の関係を示したものである。乾燥収縮ひずみの収束値は、98日間測定を行った実験データを双曲線によって回帰し求めた。図中の直線は、普通骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの収束値と $(W+\Delta\omega)/C$ の関係を示すものである。再生骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの収束値も、図中の直線近くにあることが分かる。この図より、普通骨材を用いた水セメント比60.0%のコンクリートの乾燥収縮ひずみの収束値は約800 μ となっている。これに対して、再生骨材を用いた自己充填コンクリートの乾燥収縮ひずみ

の収束値は約900 μ である。従って、再生骨材を用いた自己充填コンクリートの乾燥収縮ひずみの収束値は、普通骨材を用いた水セメント比60.0%のコンクリートの乾燥収縮ひずみとほぼ同じ大きさとなることが分かる。

Fig.9は、再生骨材を用いたコンクリートの $C/(W+\Delta\omega)$ と中性化速度係数の関係を示したものである。●は、普通骨材を用いたコンクリートの結果である。普通骨材を用いたコンクリートの単位水量は、180から225 kg/m^3 の範囲にある。一方、□、△および◇は、再生骨材を用いたコンクリートの結果である。再生骨材を用いたコンクリートの単位水量は、いずれも180 kg/m^3 である。普通骨材を用いたコンクリートの $C/(W+\Delta\omega)$ の変化は、単位水量 W の変化に伴うもので、再生骨材を用いたコンクリートの $C/(W+\Delta\omega)$ の変化は、吸水量 $\Delta\omega$ の変化に伴うものである。 $C/(W+\Delta\omega)$ の減少に伴う中性化速度係数の増加は、普通骨材を用いたコンクリートよりも、再生骨材を用いたものの方が小さいことが分かる。すなわち、コンクリートの中性化は、骨材中に含まれる吸水量 $\Delta\omega$ よりも、単位水量 W の影響を大きく受けることが分かる。この図より、普通骨材を用いた水セメント比60.0%のコンクリートの中性化速度係数は、約2.2 $\text{mm}/\sqrt{\text{days}}$ である。一方、再生骨材を用いた自己充填コンクリートの中性化速度係数は、約1.8 $\text{mm}/\sqrt{\text{days}}$

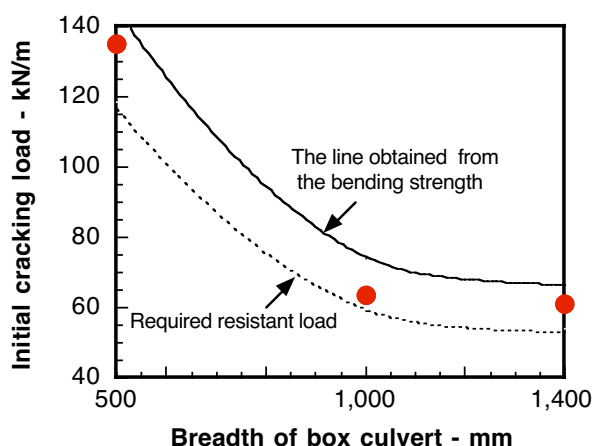


Fig.12 The result of load test of box culvert.

√ daysとなる。すなわち、再生骨材を用いた自己充填コンクリートの中性化は、普通骨材を用いた水セメント比60.0%のコンクリートに相当していることが分かる。

Fig.10は、再生骨材を用いたコンクリートの耐硫酸塩性を調べた結果である。図中に示すいずれのコンクリートも、単位セメント量は 300kg/m^3 である。□、△および◇で示される再生骨材を用いたコンクリートの単位水量は、いずれも 180kg/m^3 である。また、●、■および▲で示される普通骨材を用いたコンクリートの単位水量は、それぞれ 180kg/m^3 、 195kg/m^3 および 210kg/m^3 である。

△で示す全水量($W + \Delta\omega$)が 219 kg/m^3 の再生骨材を用いたコンクリートの結果を除き、再生骨材を用いたコンクリートの耐硫酸塩性は、普通骨材を用いた単位水量が 180kg/m^3 のものとほぼ同じであることが分かる。従って、コンクリートの耐硫酸塩性は、コンクリートの単位水量 W の影響が大きく、吸水量 $\Delta\omega$ の影響は小さいことがいえる。

3.4 ボックスカルバートの外圧試験結果

Fig.11は、ボックスカルバートの外圧試験より求めた荷重たわみ曲線である。図中の■および▲は、目視によってひび割れの発生を確認した点である。ひび割れが発生した荷重は、荷重たわみ曲線が折れ曲がる点と一致した。Fig.12に、各々の大きさのボックスカルバートにひび

割れが発生した荷重を示す。図中の破線は、ひび割れ発生荷重を基に定められたボックスカルバートに要求される耐荷力である。実線は、コンクリートの配合から予測される曲げ強度より求めたボックスカルバートの耐荷力である。この図から明らかなように、実測値とコンクリートの曲げ強度から計算されるボックスカルバートの耐荷力は、ほぼ一致していることが分かる。

4. まとめ

再生骨材を用いたコンクリートのフレッシュ時の性能、強度および耐久性は、普通骨材を用いたものよりも劣る。しかし、再生骨材を用いた自己充填コンクリートのフレッシュ時の性能は、高性能減水剤の添加量を調整することによって、ボックスカルバートを製造するのに必要なレベルにまで改善できる。再生骨材を用いることによるコンクリート強度の低下および乾燥収縮ひずみの増加は、骨材中に含まれる吸水量 $\Delta\omega$ によって説明できる。また、コンクリートの中性化および耐硫酸塩性は、骨材中に含まれる吸水量 $\Delta\omega$ よりも単位水量 W の影響が大きかった。さらに、要求される性能を満足する二次製品の製造が、再生骨材を用いた自己充填コンクリートによって、可能であることが分かった。

参考文献

- 1) 全国ボックスカルバート協会：プレキャストボックスカルバート 設計・施工マニュアル（鉄筋コンクリート製・プレキャストコンクリート製），pp.139-148，2003.4
- 2) 日本建設機械化協会北陸支部：長尺函渠設計・施工要領（改訂版），財団法人 日本建設機械化協会北陸支部，p.70，1991.10
- 3) 全国ボックスカルバート協会：プレキャストボックスカルバート 設計・施工マニュアル（鉄筋コンクリート製・プレキャストコンクリート製），p.42，2003.4