

報告 シェルコンクリートの強度特性について

清宮 理*1・山内 匡*2・横田 季彦*3

要旨: ほたて貝殻の有効利用のためコンクリートの細骨材への利用を提案している。現在のコンクリートの要求性能を極力満足するよう回転式粉砕機によりほたて貝殻を粉砕し砂と混合してコンクリートを製造する。このコンクリートが所定の強度が得られるかほたて貝殻の混入率を変化させて各種強度試験を実施し、強度面からほたて貝殻のリサイクル材としての強度特性を実験的に把握した。この実験結果より混合率により若干強度特性が変化するものの通常のコンクリートとほとんど強度特性に顕著な差異がないことを確認した。ただし混合率が大きい場合には、練り混ぜが難しくなり打ち込み時に注意が必要であった。

キーワード: ほたて貝殻, 強度特性, 回転式破砕機, リサイクル, 細骨材

1. はじめに

加工済みのほたて貝殻が青森県や北海道において屋外に大量に放置されている。長期間野積状態にされ、悪臭の発生や景観を損ねている。しかしほたて貝殻に対して大量に処理できる有効なリサイクルが提案されていない。そこで主成分が炭酸カルシウムであるほたて貝殻をコンクリートの細骨材として、大量にリサイクルして活用する技術開発を現在実施¹⁾している。



写真-1 野積みのほたて貝殻

ほたて貝殻は扁平であるため、コンクリート用骨材として用いるためには、適用可能な大きさまで細粉砕しその性質がコンクリート標準示方書の規格に適合することが求められる。ここでは回転式破砕機を用いて、貝殻を破砕した。本報告では破砕したほたて貝殻を細骨材として用いたコンクリートの強度特性、鉄筋付着性、鉄筋コンクリート梁の曲げせん断試験について報告する。貝殻をコンクリートに適用可能な大きさまで細粉砕し、粒度を調整することは、一般砂より大きなコストアップとなる場合が多い。しかし、回転式破砕機の場合、円筒内で高速回転する複数のチェーンの打撃力で貝殻を細粉砕し、回転数、破砕機構を適切に設定することで細骨材の粒度標準に近い分布に調整することが可能である。図

—1 に回転式破砕機のプロットを示す。破砕させる物体、物体の回転数、物体と容器の間隔などを検討して所定の粒度にほたて貝殻を破砕させる。粉砕したほたて貝殻と通常の細骨材を混合して製造したシェルコンクリートの基本的性質については既に検討¹⁾がなされている。通常の細骨材と粉砕したほたて貝殻を混合したものをシェルサンドとここで定義する。

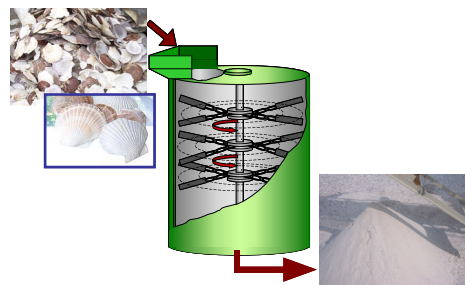


図-1 回転式破砕機のプロット

2. ほたて貝殻の性質

粉砕した貝殻の顕微鏡写真を写真-2 に示す。粉砕されたほたて貝殻の形状は扁平な薄片や棒状となる。碎片の縦横比(粉砕後の貝殻の長辺と短辺の比)は0.8~2.0の範囲であり平均的には1.2程度である。

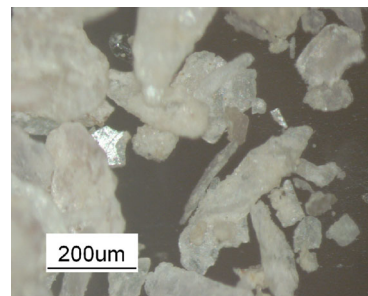


写真-2 粉砕されたほたて貝殻(顕微鏡写真)

*1 早稲田大学 創造理工学社会環境工学科 教授 工博 (正会員)

*2 日本国土開発(株) 技術研究所コンクリート研究室 主任(正会員)

*3 日本国土開発(株) 施工本部技術開発部 副部長 工博

ほたて貝殻の主成分である炭酸カルシウムは結晶構造の違いによりカルサイト、アラゴナイトおよびバテライトに分類されるが粉末X回折分析でカルサイトが大半であった。

3. 粒度分布

回転式破砕機のチェーン回転数を1200rpmとして細粉砕した粒度分布を図-2の置換率100%に示す。図中の実線は細骨材（砕砂）の標準粒度の範囲であるが、細粉砕した貝殻は概ね標準より下側である。やや微粉末量が多い。通常の細骨材（置換率0%）と粉砕されたほたて貝殻を混ぜたときの粒度分布も同図に示すがほぼ標準粒度内に収まっていた。

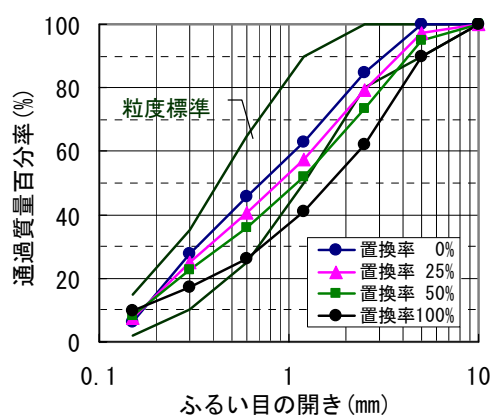


図-2 細粉砕後のほたて貝殻の粒度分布

4. 物理的特性

本実験で使用した細粉砕後のほたて貝殻の物理試験結果を表-1に示す。微粒分量の物性値以外は、コンクリート標準示方書の規格を満足する値であった。

表-1 細粉砕後のほたて貝殻の物理的特性

試験項目	物性値	試験方法
表乾密度 (g/cm ³)	2.63	JIS A 1109
吸水率 (%)	0.86	
実積率 (%)	55	JIS A 1104
微粒分量 (%)	8.9	JIS A 1103

細粉砕後のほたて貝殻に含まれる NaCl 含有量および有機不純物試験結果を表-2に示す。NaCl 含有量は許容値 0.04%以下 (JIS A 5308) を十分満足する値であり、

また、有機不純物についても問題のない量であった。本実験で使用した貝殻は加工用にボイルされたものであり、また、屋外に長期間集積されていたため、この間に雨水等によって洗われていたことが考えられる。またほたての養殖は「耳吊り」と呼ばれる方法が一般的で、海中に吊るすために貝殻の端に穴を開けテグスを通して細いロープにつなぐ。貝殻を粉砕する際、このテグスが混入する。また、貝殻の表面にはふじつばなどの有機物が付着しているのが確認できた。しかしテグスは質量割合で、0.0082%であり、これらは粉砕された後には目では物質を特定できないほど細かく砕けていた。

表-2 NaCl 含有量および有機不純物

試験項目	試験結果	試験方法
NaCl 含有量	0.00%	JASS 5T 202
有機不純物	薄い	JIS A 1105

5. シェルコンクリートの製造

5.1 配合

表-3に使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメントである。水セメント比を50%とした。

表-3 使用材料

使用材料	種類および主な性質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント; 密度: 3.16 g/cm ³
ほたて貝殻 (SS)	青森県産; 表乾密度: 2.63g/cm ³
細骨材 (S)	大井川産川砂; 表乾密度: 2.58g/cm ³
粗骨材 (G)	相模川産 2005 砕石; 表乾密度: 2.65g/cm ³
AE 減水剤 (Ad)	リグニンスルホン酸化合物

表-4に曲げ試験での表-5に付着試験での配合を示す。梁試験体の配合も表-5と同じである。両配合も基本的には同一で減水剤の量が少し異なっている。

5.2 フレッシュ性状

ほたて貝殻の置換率の増加にともない、スランプ 8cm を得るのに必要な単位水量は増えた。各配合において、良好なワーカビリティが得られたが、置換率 100%の場合については、貝殻が扁平な形状のため、突き棒がやや突き難い状態であった。空気量はほたて貝殻の置換率の増加にともない、増えたため、AE 剤の添加量を低減させ、空気量を調整した。試験体製作時のミキサーで混合する際、貝殻が多くなるにつれて貝殻がミキサーの刃

表-4 曲げ試験コンクリート配合

記号	W/C (%)	ほたて貝殻置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)					C× (%)	
			W	C	SS	S	G	Ad	AE
N50-0	50	0	157	314	0	811	1018	0.32	2.4
N50-25		25	172	344	172	561	1018	0.32	1.2
N50-50		50	188	376	313	340	1018	0.32	0.7
N50-100		100	204	408	563	0	1018	0.32	0.0

表-5 付着試験, 梁試験体コンクリート配合

記号	W/C (%)	ほたて貝殻置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)					C× (%)	
			W	C	SS	S	G	Ad	AE
N50-0	50	0	158	316	0	804	1021	0.25	2.3A
N50-25		25	171	342	191	562	1021	0.25	1.6A
N50-50		50	185	370	352	345	1021	0.25	1.3A
N50-100		100	195	390	661	0	1021	0.25	0.0A

の隙間と噛み合ってしまう、ミキサーに不具合が生じることがあった。実際にプラントでの製造や現場での施工を考えると貝殻の置換率が高いときには注意が必要であり、現在では置換率が25%-50%程度のもので施工的には良いと考える。

6. 力学試験の概要²⁾

6.1 曲げ試験

JCI 規準(JCI-S-001-2003)に従って切欠梁を用いた曲げ試験をほたて貝殻の置換率を 0%,25%,50%および 100% に変えて試験体を各 3 体ずつ製作して実施した。梁の寸法は幅 10cm, 高さ 10cm, 長さ 40cm で中央にコンクリートカッターで深さ 30mm の切欠を設けた。単調荷重で 3 点曲げ試験を行い、ロードセルで荷重値、パイ型ゲージで切欠の開口変位、コンクリートひずみゲージで梁上端の圧縮ひずみを計測した。

6.2 付着試験

JSCE-G503-1999 に従って鉄筋とコンクリートとの付着試験をほたて貝殻の置換率を 0%,25%,50%および 100%に変えて試験体を各 3 体ずつ製作して実施した。コンクリートブロックの寸法は 15cm x 15cm x 15cm の立方体とし、D19 の鉄筋をブロック内に貫通させてコンクリートを打ち込んだ。鉄筋とコンクリートとの非付着長を 75mm とし 5mm ほど単部をブロック外に出した。引張試験は単調に引き抜き荷重値と自由端での変位を計測した。

6.3 梁の曲げ荷重試験

鉄筋コンクリート梁をほたて貝殻の置換率を 0%,25%,50%および 100%に変えて製作し曲げ荷重試験を行った。図-3 に曲げ荷重試験用の梁の概要を示す。梁の寸法は全長 2200mm, 高さ 250mm, 幅 200mm である。主鉄筋の材質は SD295 で引張側鉄筋は D19 が 2 本, 圧縮側鉄筋は D13 が 2 本配置した。鉄筋比は 1.13% である。また鉄筋のかぶり厚は 30mm とした。帯鉄筋は D10 を 15cm 間隔で配置した。荷重試験は容量 200MN の油圧ジャッキを使用して梁中央で鉛直方向に静的に単調荷重で行った。荷重は 2 点荷重, 2 点支持条件で行いせん断スパン比は 4.09 とした。計測項目はロードセルによる荷重値,

梁中央部の鉛直変位, ひずみゲージによる鉄筋ひずみ (赤) およびコンクリートひずみ (緑), パイ型ゲージ (青) によるひび割れ幅, 目視によるひび割れ進展状況の観察とした。鉄筋のひずみは, 梁中央部の圧縮鉄筋および引張鉄筋で 2 箇所, 梁 1/4 位置での帯鉄筋の 1 箇所の計 3 箇所で, コンクリートのひずみは梁中央分上側に 1 箇所で計測を行った。ひずみゲージの取り付け位置は図中の長方形で示す。パイ型ゲージは梁中央部の曲げスパン内の下端に 6 箇所取り付けした。図中の逆Ω形で位置を示す。

6.4 梁のせん断荷重試験

鉄筋コンクリート梁をほたて貝殻の置換率を 0%, 25%, 50% および 100% に変えて製作しせん断荷重試験を行った。図-4 にせん断荷重試験用の梁の概要を示す。梁の寸法は全長 1100mm, 高さ 250mm, 幅 200mm である。配筋状況は曲げ荷重試験用の梁と同じとした。荷重試験は容量 200MN の油圧ジャッキを使用して梁中央で鉛直方向に静的に単調荷重で行った。荷重は 2 点荷重, 2 点支持条件で行いせん断スパン比は 1.59 とした。計測項目も曲げ荷重試験用の梁と同じとした。鉄筋のひずみ (赤) は, 梁中央部の圧縮鉄筋および引張鉄筋で 2 箇所, 梁 1/4 位置での帯鉄筋の 1 箇所の計 3 箇所で, コンクリートのひずみ (緑) は梁中央分上側に 1 箇所で計測を行った。パイ型ゲージ (青) は梁中央部の曲げスパン内に 3 箇所取り付けした。

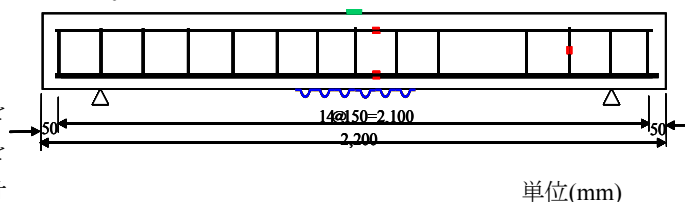


図-3 曲げ荷重試験用の梁構造

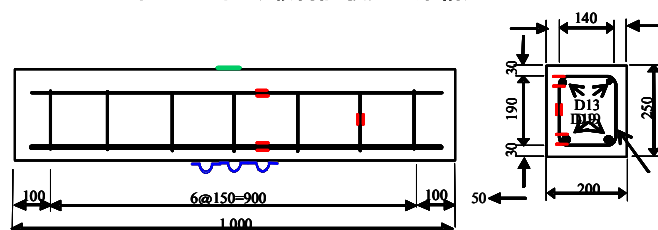


図-4 せん断荷重試験用の梁構造

7. 力学試験の結果

7.1 圧縮試験の結果

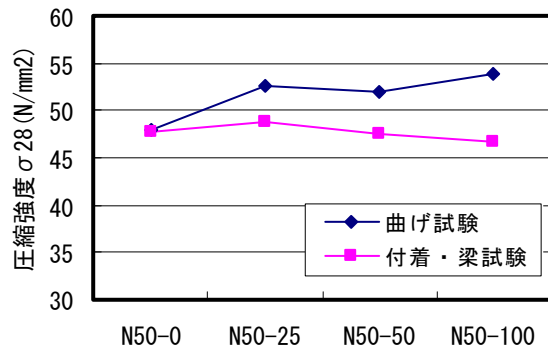


図-5 ほたての混入率と圧縮強度の関係

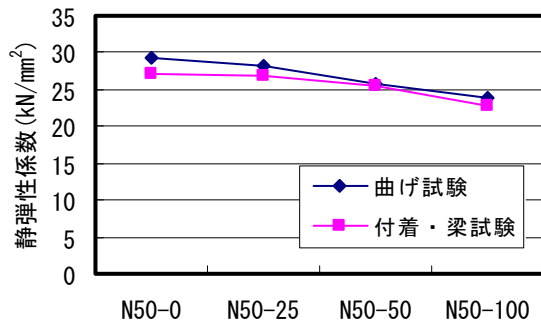


図-6 ほたての混入率と静弾性係数の関係

図-5にはほたて貝殻の置換率と管理試験体の28日目の圧縮強度の関係を示す。表-4に示す配合では置換率が大きくなると圧縮強度が増加したが表-5に示す配合では逆に低下した。今まで実施してきた試験でも一般的な傾向は見られなかったが、ほたて貝殻を用いることにより圧縮強度に大きな影響を与えることはなさそうである。図-6にはほたて貝殻の置換率と静弾性係数との関係を示す。静弾性係数は置換率が増加するとやや減少する傾向が見られた。圧縮強度と静弾性係数はほぼ比例関係にあるが、シェルサンドでは逆の場合となる。この原因は明確ではないがほたて貝殻の形状が扁平なため繊維補強のような効果があり強度が増加するときがあるのと、逆にシェルサンド自体の強度は砂より低いので置換率が增大すると静弾性強度が低下すると考えている。

7.2 曲げ試験の結果³⁾

曲げ強度とシェルサンドの置換率との関係を表-6に示す。置換率が増加すると曲げ強度はやや増加する傾向が見られた。梁の破壊エネルギーは、次式に示される日本コンクリート工学協会の式に従って計算した。

$$W_1 = 0.75 \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \times CMOD_c \quad (1)$$

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (2)$$

ここで G_F : 破壊エネルギー(N/mm), W_0 : 試験体が破断

するまでの荷重-CMOD 曲線下の面積(N・mm), W_1 : 試験体の自重および載荷治具がなす仕事(N・mm), A_{lig} : リガメントの面積(mm²), m_1 : 供試体の重量(kg), S : 載荷スパン(300mm), L : 供試体の全長(mm), m_2 : 試験機にとりつけられておらず供試体に載っている器具の質量, $CMOD_c$: 破断時のひび割れ開口変位(mm)

表-6 ほたての混入率と曲げ強度, G_F の関係

記号	曲げ強度 (N/mm ²)	破壊エネルギー G_F (N/mm)	$CMOD_c$ (mm)
N50-0	2.92	0.22	4.99
N50-25	2.91	0.25	5.27
N50-50	3.13	0.26	4.88
N50-100	3.33	0.34	4.99

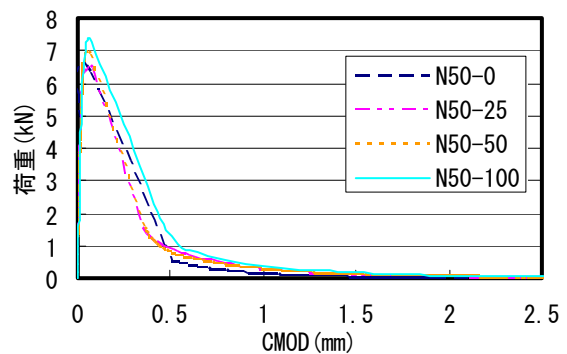


図-7 荷重-CMOD 曲線

図-7に荷重-CMOD 曲線を示す。また図-8に置換率と破壊エネルギーとの関係を示す。置換率が大きくなると曲げ強度が増加するとともに荷重-CMOD 曲線下の面積がやや増加する傾向が見られた。この原因として圧縮強度でも述べたようにシェルサンドの扁平な形状により一種の補強効果を出すものと考えられる。ただひび割れ開口変位は、混入率を変えてもほぼ同じであった。

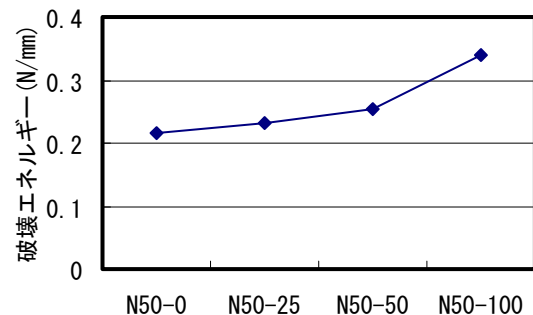


図-8 置換率と破壊エネルギーとの関係

曲げ試験結果からシェルサンドを用いることによりコンクリートの曲げ強度とひび割れ性状に悪い影響はなく逆にひび割れ抵抗性が若干増加する結果となった。

7.3 付着試験の結果

鉄筋とコンクリートとの付着応力度は次の式で計算した。

$$\tau = \frac{P}{4\pi D^2} \times \alpha \quad (3)$$

ここで τ : 付着応力度(N/mm²), P : 引張荷重(N), D : 鉄筋の直径, α : 補正係数(=30/f_c)

図-9に置換率と0.002Dでの付着強度との関係を示す。この図よりすべり量が0.002Dにおける付着応力度は貝殻の置換率とともに上昇した。これも貝殻の扁平な形状が関係していると考えられる。しかし、図-10に示す最大付着応力度に関しては置換率25%の時をピークにして、貝殻の置換率の上昇によって若干小さくなる傾向があったもののほとんど一定と考えて良い。これらの結果からシェルサンドを使用しても最大付着強度には特に大きな影響を与えないと言える。

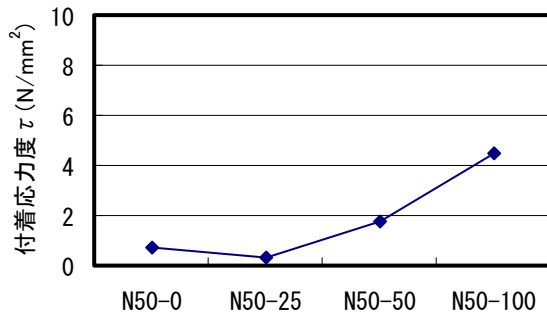


図-9 置換率と0.002Dでの付着強度との関係

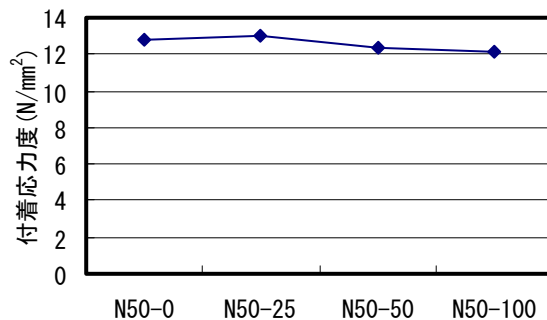


図-10 置換率と最大付着強度との関係

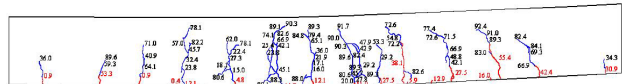
7.4 曲げおよびせん断荷試験の結果

表-7に荷重試験結果の一覧を示す。図-11に混入率0%と100%での荷重試験の最終段階でのひび割れ進展状況を示す。いずれの曲げ梁試験体も梁中央部から曲げひび割れが生じ、荷重荷重の増加とともにひび割れは上方に進展し、ひび割れは分散して発生した。引張側の鉄筋が降伏後、梁の上方でコンクリートが圧壊して終局に至る典型的な曲げ破壊となった。特に混入率で異なった破壊形式は見られなかった。

表-7 曲げ荷試験結果の概要

記号	ひび割れ荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	初期剛性 (kN/mm)
N50-0	12.1	92.4	66.9	28.8
N50-25	11.8	92.3	62.2	23.6
N50-50	8.8	97.9	70.3	27.9
N50-100	12.7	96.9	69.3	26.7

混入率 0%



混入率 100%

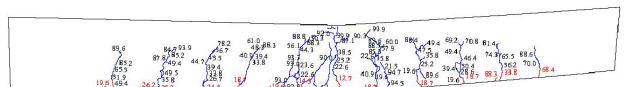


図-11 曲げ荷試験でのひび割れ発生状況

図-12に各混入率での荷重荷重と梁中央部の鉛直変位との関係を示す。混入率にかかわらず荷重-変位の関係は各梁試験体で類似していた。5.1で示したように混入率が多くなると圧縮強度は増加し静弾性係数は低下したが、梁試験体でも鉄筋が降伏後の荷重荷重が80kN付近では、混入率が多いほど同一の鉛直変位で荷重荷重が大きくなった。ひび割れ発生荷重と鉛直変位から求まる初期剛性(勾配)は混入率が大きくなると表-7に示すようにやや低下したが顕著ではなかった。

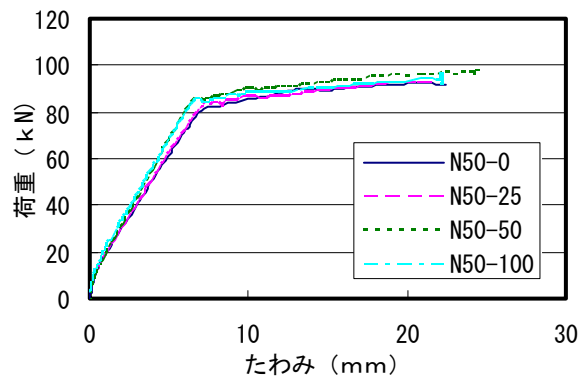


図-12 曲げ荷試験での荷重と鉛直変位との関係

図-13に荷重荷重とパイ型ゲージで計測されたひび割れ幅との関係を示す。ひび割れ幅は、鉄筋降伏前の荷重で混入率が多いほど大きい値となった。これは、5.2で示したように混入率が多いほどひび割れ発生荷重と破壊エネルギーが大きくなりひび割れ抵抗性が大きかったことと対応していると考えられる。

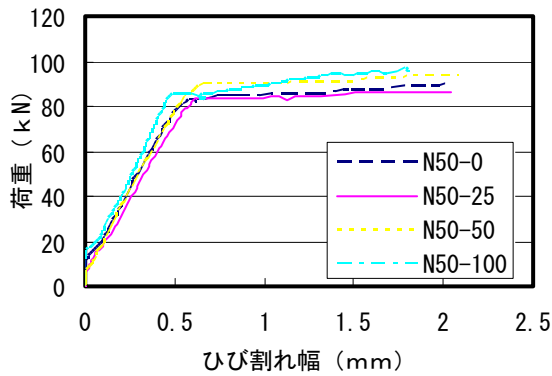


図-13 曲げ載荷試験での荷重とひび割れ幅との関係

図-14 に混入率 100%のときのせん断試験での載荷荷重最終段階でのひび割れ発生状況を示す。載荷荷重を増加させると梁中央部から曲げひび割れが発生し上方に進展するとともに支点近傍から斜め方向にひび割れが発生進展していった。終局時は載荷点近傍のコンクリートが圧壊した。ひび割れの発生状況は試験体により少し異なったが典型的なせん断破壊であった。

表-8 せん断載荷試験結果の概要

記号	ひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)
N50-0	40.9	198.1	141.1
N50-25	44.0	204.9	140.4
N50-50	32.8	203.9	153.4
N50-100	49.1	194.9	139.5

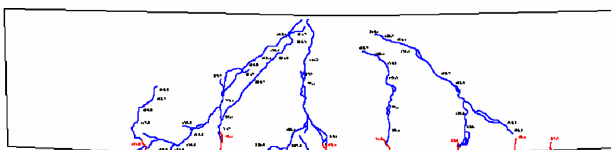


図-14 せん断載荷試験でのひび割れ発生状況

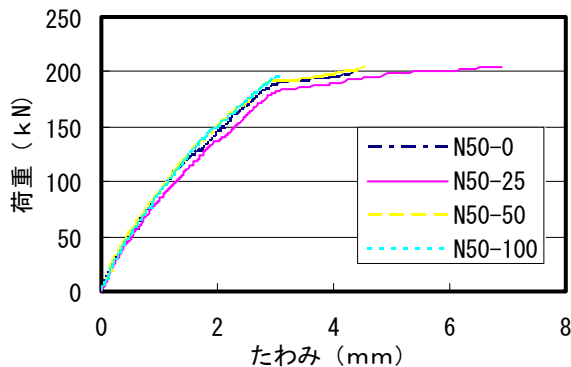


図-15 せん断載荷試験での荷重と変位の関係

図-15 に載荷荷重と梁中央部での鉛直変位の関係を示す。混入率によらずほぼ同様な荷重と変位の関係が得られたが、混入率が多いと曲げ載荷試験結果と同様にやや最大荷重が増加し初期剛性がわずかではあるが小さくなった。

8. 結論

今回のシェルコンクリートの各種基礎的な強度試験で、以下の結論を得た。

- (1) 圧縮強度に関しては、シェルサンドの置換率の影響はさほど大きくないが静弾性係数は置換率が多いと若干低下した。
- (2) 切欠を有する試験体による曲げ試験では、置換率が大きいほど普通コンクリートより破壊エネルギーが大きく、ひび割れ抵抗性がやや増加した。
- (3) 付着応力度試験では、置換率が大きいほど付着応力度が増加したが、最大付着応力度はほとんど変わらなかった。
- (4) 混入率によらず曲げ載荷試験結果およびせん断載荷試験結果での力学性状は各試験体でほぼ同じであった。またひび割れ性状もほぼ同様であった。ただ混入率が多くなると若干最大の載荷荷重が大きくなり、一方初期剛性がわずかながら低下する傾向があった。
- (5) ほたて貝殻を混入しても普通コンクリートとほぼ同等の力学特性が得られ特に問題となる状況は見られなかった。以上の試験結果から今回使用した破砕機により作成したほたて貝殻を混入した細骨材は、鉄筋コンクリートの構成材料として強度の面から十分使用できると判断できた。ただ混入率が多いとコンクリートの練混ぜなどの施工性が悪く、混入率を 50%以内とすれば施工性にほとんど問題がなかった。

あとがき

ほたて貝殻を使用したコンクリートの開発は、早稲田大学、日本国土開発(株)、国土交通省東北地方整備局、(独)港湾空港技術研究所の共同研究として実施している。耐久性試験、現地での実証試験なども今実施しており、これら研究成果を元にガイドラインの作成を行っている。

参考文献

- 1) 山内匡, 清宮理, 横田季彦, 八木展彦: ほたて貝殻を細骨材として活用したコンクリートの基本的性質, コンクリート工学年次論文集, pp.1649-1654, 2006.6
- 2) 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準および関連規準, pp.239~242, 2005
- 3) JCIホームページ: 切欠きはりを有したコンクリートの破壊エネルギー試験方法, JCI-S-001-2003