

論文 建設汚泥再生骨材を用いたコンクリートの材料特性

横田 尚也^{*1}・椛山 健二^{*2}・荒木 秀夫^{*3}・木山 邦宏^{*4}

要旨：建設汚泥の固化物をコンクリート用の骨材として活用することを目指し、この再生骨材を粗骨材として混入したコンクリートの材料特性を実験により把握した。再生骨材の混入率、養生条件を変数として強度試験および乾燥収縮試験を行い、再生骨材の混入率の増加に伴い圧縮強度が低下すること、乾燥収縮量が増大すること等を検証した。

キーワード：再資源化、建設汚泥再生骨材、圧縮強度、力学的特性、乾燥収縮

1. はじめに

わが国では「持続的な発展が可能な経済社会」の構築に向けて、大量生産・大量消費・大量廃棄物型社会から資源循環型社会への転換が求められている。特に建設業は他の産業の生産活動に比べて、膨大な資源を消費し、大量の廃棄物を生み出しており、その果たすべき役割は大きいと考えられる。建設副産物としての建設汚泥は平成14年度800万^トで全発生量の10%と決して少なくない量であり¹⁾、今後増加することが予測されるが、そのリサイクル率はコンクリート塊等に比べあまり高くないのが現状である。現在、建設汚泥は焼成処理や熔融処理して固化、粒状にすることによって埋め戻しや裏込め材などの土質材料として再利用されているものの、その種類の多様性や統一的な評価基準が無いこと等によって再資源化率が低い値にとどまっている。建設汚泥を固化したものをコンクリート塊などと同様にコンクリート用材料として活用が可能であるならば資源化率の飛躍的拡大が望め、かつ碎石等の天然資源採取の低減につながると考えられる。

本研究では比較的安定した物性を示す無機系建設汚泥を安定処理した粒状の骨材として利用したコンクリートの基礎的物性を調べることで、

再利用の可能性について検討した。

2. 建設汚泥再生骨材

本研究で使用する建設汚泥とは建物建設時における杭工事で発生する汚泥や建設発生土を水洗選別する時に発生する汚泥であり、有機物質を含まず無機汚泥である。汚泥中の粒子径は0.075mm以下で、その含水比は90~100%、密度は1.5程度の値となる。この汚泥と石炭灰、再生碎石、石灰をそれぞれ51.7%、46.7%、1.6%、微量の容積率で混入し、ミキサー内で回転運動を与えて造粒固化させ製造したものが、本研究の対象とする建設汚泥再生骨材（以下、汚泥骨材と記載）である。写真-1に汚泥骨材の外観を示す。



写真-1 汚泥骨材の形状

*1 広島大学大学院工学研究科 大学院生 (正会員)

*2 広島大学大学院工学研究科 助手 博(工) (正会員)

*3 広島大学大学院工学研究科 助教授 工博 (正会員)

*4 (株)熊野技建 汚泥再資源グループリーダー

表-1 汚泥骨材の物性一覧

表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	すりへり減量 (%)	微粒分量 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実績率 (%)
1.89	1.45	30.8	97.4	2.2	0.991	82.7

表-2 汚泥骨材の成分構成

成分	ナトリウム	マグネシウム	アルミニウム	ケイ素	リン	硫黄	塩素
wt. %	0.19	0.37	2.7	5.5	0.069	2.0	0.068
成分	カリウム	カルシウム	チタン	クロム	マンガン	鉄	コバルト
wt. %	1.2	23	0.48	0.16	0.073	8.9	0.017
成分	ニッケル	亜鉛	ストロンチウム	イットリウム	ジルコニウム	バリウム	
wt. %	0.93	0.018	0.23	0.019	0.065	0.15	

汚泥骨材の粒径は調整可能で、形はほぼ球状であるため、コンクリート練り混ぜ時のワーカビリティの向上が期待できると思われる。石炭灰には、通常より CaO の割合が高く自硬性を有する加圧流動床石炭灰 (PFBC 灰) を用い、再生砕石は汚泥骨材の核となるもので、コンクリート廃材を破碎・選別し、粒径を 75 μ m~5mm に調整している。汚泥骨材の物性を表-1 に、蛍光 X 線分析による成分構成を表-2 に示す。通常の砕石に比べ密度は小さく、吸水率は大きなものとなっている。汚泥骨材単体の強度特性として、フォースゲージを用いた一軸圧縮試験の結果を図-1 に示す。縦軸は、粒径ごとにランダムに抽出した試料 20 個の破壊荷重の平均値であり、材齢につれて増大し、一定値に近づくことが同図から確認できる。

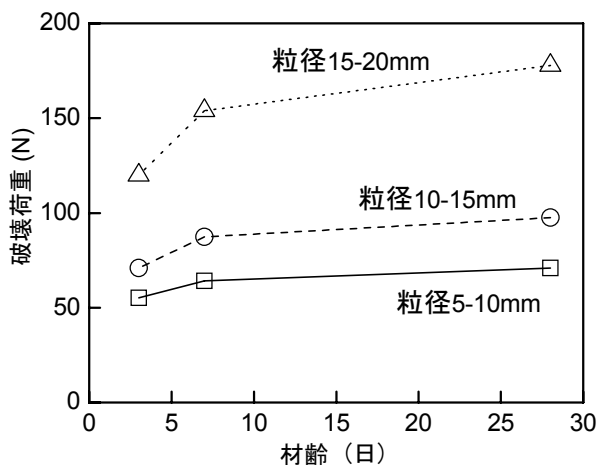


図-1 汚泥骨材の破壊荷重

3. 実験方法

3.1 試験項目

汚泥骨材を粗骨材として混入したコンクリートの性状を検証するために、汚泥骨材の混入率を変数としたコンクリートを製造し、表-3 に示す各種試験を JIS に準拠して実施した。

3.2 使用材料と調査

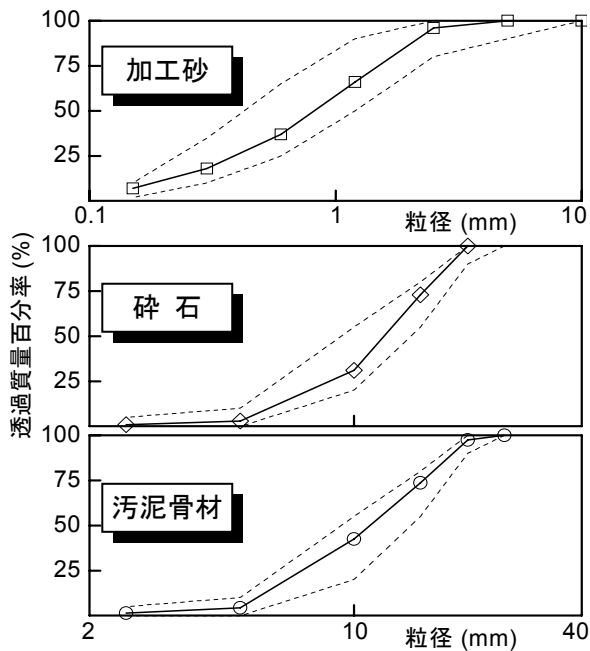
コンクリートに使用した材料とその特性を表-4 にまとめて示す。汚泥骨材は砕石に合わせて最大粒径を 20mm 以下として、JIS A 5308 を満足するよう粒度分布を調整した。各骨材の粒度分布を図-2 に示す。

表-3 試験項目の一覧

項目	備考
(フレッシュコンクリートの特性)	
スランブ試験	JIS A 1101 に準拠
空気量試験	JIS A 1128 に準拠
(硬化コンクリートの特性)	
乾燥収縮試験	JIS A 1129 に準拠
密度試験	圧縮試験供試体の質量と体積で算定
圧縮試験	JIS A 1108 に準拠
引張試験	JIS A 1113 に準拠

表-4 使用材料の一覧

材料と特性等
セメント; 普通ポルトランドセメント(比重 3.15)
細骨材; 加工砂(最大粒径 5mm, 粗粒率 2.76, 表乾比重 2.60, 絶乾比重 2.56, 吸水率 1.49%)
粗骨材; 砕石(最大粒径 20mm, 粗粒率 6.65, 表乾比重 2.68, 絶乾比重 2.66, 吸水率 0.62%)
汚泥骨材(最大粒径 20mm, 粗粒率 6.57, 他の特性は表-1 を参照)
混和剤; 減水剤標準型 I 種
水; 上水道水



※ 波線は JIS A 5308 の標準粒度

図-2 骨材の粒度分布

3.3 調合と練混

調合設計では、まず文献²⁾に従い、汚泥骨材を混入しない普通コンクリートを設計基準強度 30N/mm^2 、スランプ値 18cm として設計し、その粗骨材を容積比 25, 50, 75, 100%の割合で汚泥骨材に置き換えた。すなわち、水セメント比と水量、および、セメント、細骨材、粗骨材(= 碎石+汚泥骨材)の絶対容積は固定とした。比較対象の普通コンクリート(NC000)を含めた調合表を表-5に示す。なお、空気量に汚泥骨材混入量を与える影響を調べるために空気量は調整していない。

練混は実験室内で JIS A 1138 に従い、パン型ミキサーを用いて実施した。混和剤量は所定のス

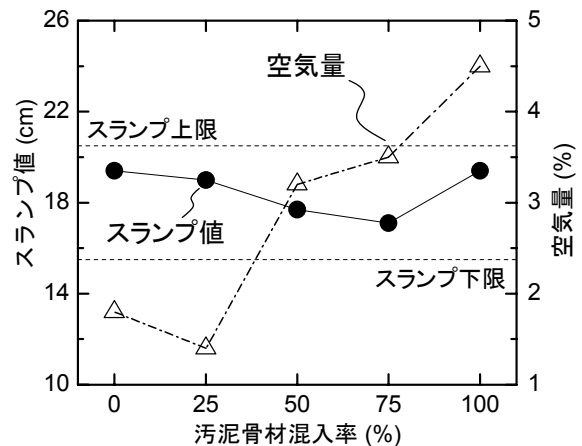


図-3 スランプ値と空気量

ランプ値 ($18 \pm 2.5\text{cm}$) が得られるよう、セメント質量比 0~2%で調整している。生コンクリートを練混し、スランプ試験と空気量試験を行い、その後に乾燥収縮試験および強度試験用の供試体を打設した。スランプ値と空気量を汚泥骨材混入率との関係として図-3に示す。汚泥骨材の混入率につれて空気量が増大することがわかる。

3.4 硬化したコンクリートの試験

乾燥収縮試験は JIS A 1129 に準拠して実施した。供試体の脱型後、1 週間の水中養生を行い、その後の乾燥収縮量を測定した。

強度試験用供試体は JIS A 1132 に準拠して作製し、養生条件の影響を検討するために、実験室内にて供試体を気中、封緘、水中で養生した。なお、温度の調節は行っていない。圧縮、引張の強度試験は材齢 7, 28, 91 日目に実施した。密度試験として、強度試験前に供試体の質量と体積を計測して密度を求めた。

表-5 調合設計の一覧

記号	汚泥骨材 混入率	水セメント 比 (%)	水量 (kg/m^3)	絶対容積 (l/m^3)				単位質量 (kg/m^3)			
				セメント	砂	碎石	汚泥骨材	セメント	砂	碎石	汚泥骨材
NC000	0%	48.0	185	122	282	366	0	385	732	981	0
EB025	25%	48.0	185	122	282	275	92	385	732	736	173
EB050	50%	48.0	185	122	282	183	183	385	732	490	346
EB075	75%	48.0	185	122	282	92	275	385	732	245	519
EB100	100%	48.0	185	122	282	0	366	385	732	0	692

4. 硬化したコンクリートの試験結果と考察

4.1 密度

供試体の密度と汚泥骨材混入率との関係を図-4に示す。材齢毎のばらつきはほとんど無かったので図中の密度はすべての材齢における養生条件毎の平均値として表した。密度の小さい汚泥骨材の混入率につれて密度が減少し、特に気中養生でその傾向が顕著であることがわかる。汚泥骨材はもともと密度が小さいことに加えて吸水率が大きいので、混入率に応じて供試体中からの水分が蒸発したためと考えられる。

4.2 乾燥収縮

100×100×400mmの角柱試験体を用いた乾燥収縮試験から求めた長さ変化率と材齢の関係を図-5に示す。乾燥収縮が進行中ではあるが16週までの結果を見ると汚泥骨材混入率に連れて収縮量が増大している事がわかる。ただし、混入率75%以上では差がない。汚泥骨材を混入していないNC000に対する長さ変化率の割合を材齢との関係として図-6に示す。汚泥骨材の混入により材齢2~8週で長さ変化率の割合が顕著に増大し、混入率50%以上では、無混入時の2倍以上の収縮を起こしている。その後、材齢が増すにつれ割合が減少することが同図からわかる。

4.3 力学的特性

基礎的な力学的特性把握のために径100×高さ200mmの円柱供試体を用いた圧縮試験および割裂試験を行った。なお、養生条件に依らず、同様の傾向を示したことから、以下については封緘養生の結果を報告する。

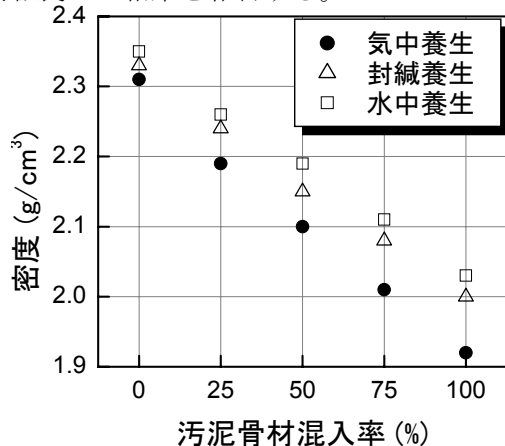


図-4 密度と汚泥骨材混入率の関係

(1) 圧縮強度と材齢の関係

材齢と圧縮強度の関係について、封緘養生した場合の結果を図-7に例示する。汚泥骨材の混入によって全体的に強度が低下するが、強度の増進傾向は混入率によって大きく変わることはなく、28日以降の強度増進はあまり期待できないようである。

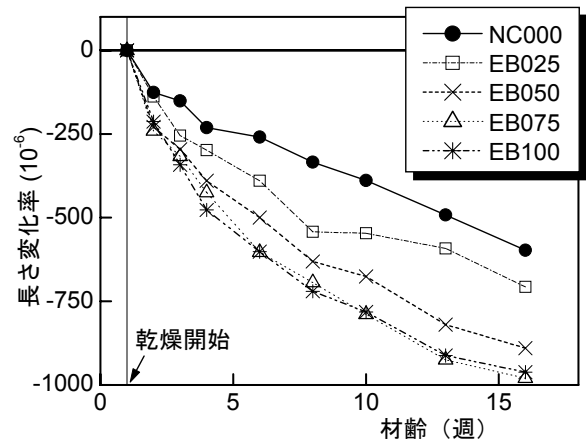


図-5 乾燥収縮による長さ変化率

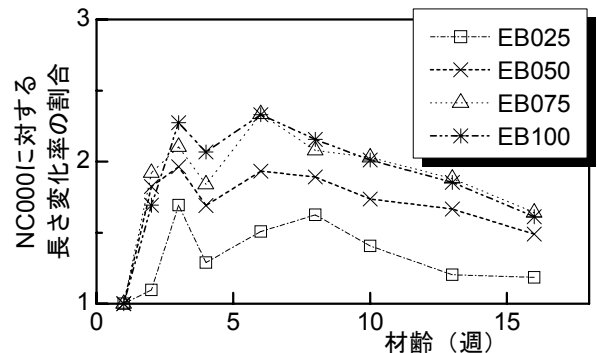


図-6 NC000に対する長さ変化率の割合

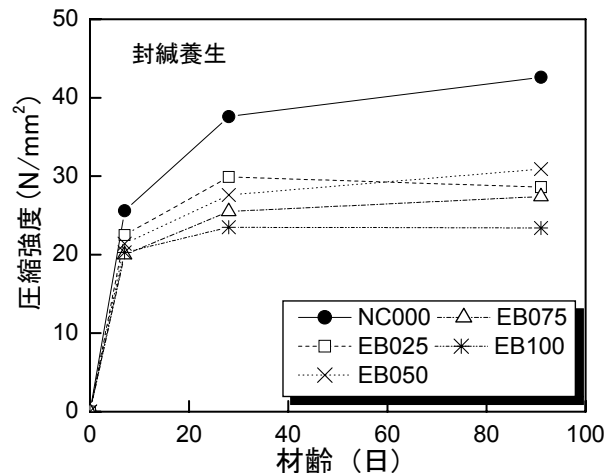


図-7 材齢と圧縮強度の関係

(2) 圧縮強度

封緘養生した供試体の材齢 28 日における圧縮強度と汚泥骨材混入率の関係を図-8 に示す。×印が各供試体の結果であり、◆印が材齢ごとの平均値である。無混入の場合は設計基準強度 30N/mm²を上回り 35~40N/mm²となっているが、汚泥骨材混入のものは混入率が大きくなるに従い、強度がほぼ直線的に低下している。25%混入のものはほぼ設計強度に達しているが、100%混入になると無混入の約 6 割程度の強度にしかならないことが分かる。汚泥骨材を混入したものはもともと強度が低いのでばらつきは少ない。

(3) 弾性係数

材齢 28 日における封緘養生した供試体の弾性係数 E_c を圧縮強度との関係として図-9 に示す。普通コンクリートとの比較を行うため図中に日本建築学会の RC 規準³⁾ に示される (1) 式を示す。混入率が 50% の場合がほぼ同式線上にあるが 50% 超えると同式の線より低下している。

$$E_c = 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{24} \right)^2 \times 3 \sqrt{\frac{f_c}{60}} \quad (1)$$

E_c : 弾性係数, f_c : 圧縮強度, γ : 気乾密度

(4) 引張強度

材齢 28 日における引張強度と圧縮強度の平均値の関係を図-10 に示す。図中には文献³⁾ に示されている両者の推定式(2)の曲線を併して表している。

$$f_t = 0.56 \sqrt{f_c} \quad (2)$$

f_t : 引張強度

無混入のものも同式の曲線を幾分下回っているものの、引張強度のばらつきのことを考えると、この式にほぼ近いといえるが、汚泥骨材を混入したものは混入率に関わらず推定式の曲線を大幅に下回っている。実験後の割裂面を見ると汚泥骨材の元の球状のままが供試体割裂面に見えるものもあり、骨材表面に付着する微粒分の影響で引張強度の大幅な低下がみられるのではないかと考えられる。設計ではひび割れ強度は考慮しない場合が多いがせん断強度や付着強度はこの引張強度とも強く関連しているので今後改善してゆく必要があると考えられる。

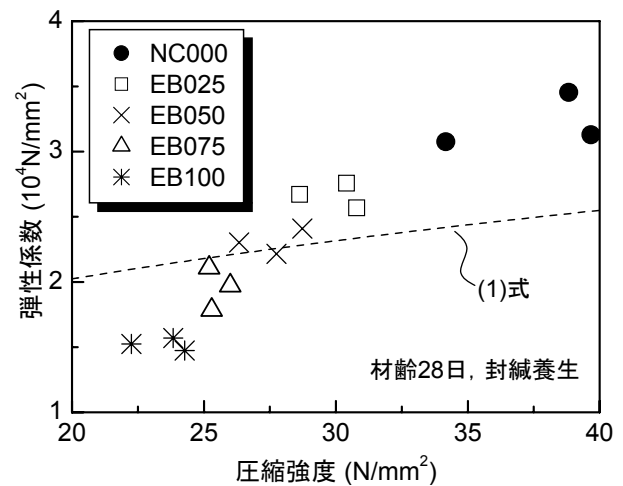


図-9 弾性係数と圧縮強度の関係

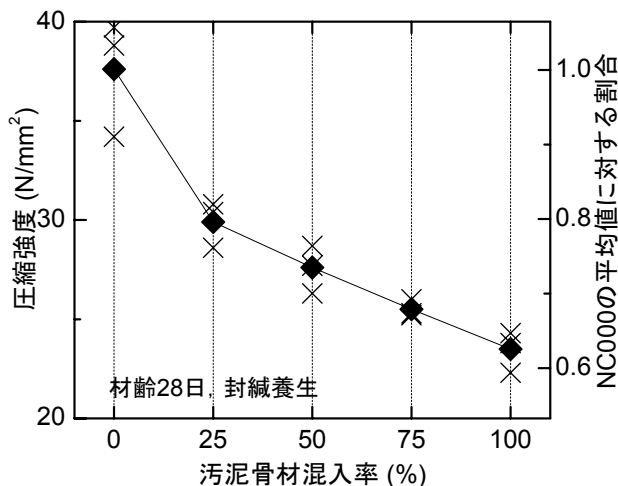


図-8 圧縮強度と汚泥骨材混入率

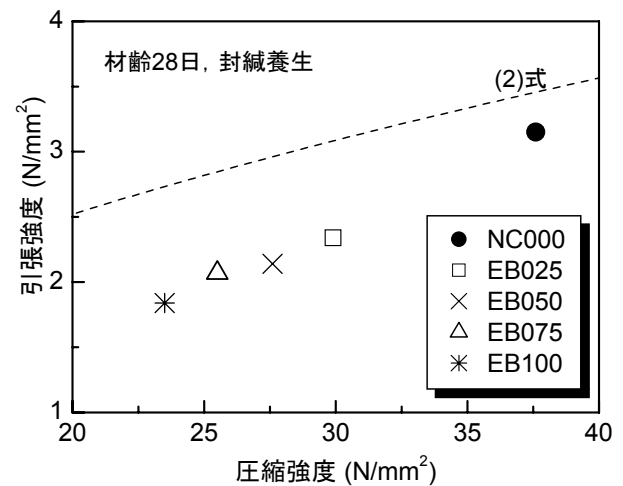


図-10 引張強度と圧縮強度の関係

(5) 最大強度時ひずみ

材齢 28 日における封緘養生した供試体の圧縮強度時ひずみの分布を図-11 に示す。その推定式の例として(3)式⁴⁾の直線を同図中に併せて示している。

$$\epsilon_m = 1400 + 16.5f_c \quad (3)$$

ϵ_m : 圧縮強度時ひずみ

汚泥骨材の混入率が高くなるに従い圧縮強度時ひずみが大きくなる傾向があることがわかる。

(6) ポアソン比

材齢 28 日におけるポアソン比の分布を圧縮強度の関係として図-12 に示す。ポアソン比の場合は文献³⁾に示されている値の 0.167~0.2 を大きく外れることはないが、汚泥骨材の混入率が高くなるに従い、ポアソン比が大きくなる傾向が見られる。

5. まとめ

本研究で得られた汚泥骨材を用いたコンクリートの基礎的物性を以下に示す。

- 1) 汚泥骨材の密度が小さいため、混入率が高くなるとコンクリートの密度は小さくなる。
- 2) 汚泥骨材混入率の増加に伴い乾燥収縮により長さ変化率が增大する。乾燥収縮が進行中であるが材齢 2~8 週で長さ変化率の割合が増大し、その後、材齢につれてその割合が減少する。
- 3) 圧縮強度について、汚泥骨材の混入率が大き

くなるに従い強度が低下する。100%混入になると無混入の約 6 割程度に低下する。

- 4) 引張強度について、汚泥骨材の混入率に関わらず、普通コンクリートの場合の推定式を大幅に下回っている。

謝辞

本研究の一部は旭硝子財団および NPO 法人広島循環型社会推進機構からの援助を受けて実施したものである。また、実験にあたっては広島大学耐震工学研究室大学院生および学生諸氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 平成14年度建設副産物実態調査結果, 国土交通省総合政策局
- 2) 日本建築学会: コンクリートの調合設計指針・同解説, 丸善, 1999年2月
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(許容応力度設計法), 丸善, 1999年11月
- 4) 日本建築学会: 高強度コンクリート技術の現状, 丸善, 1991年1月

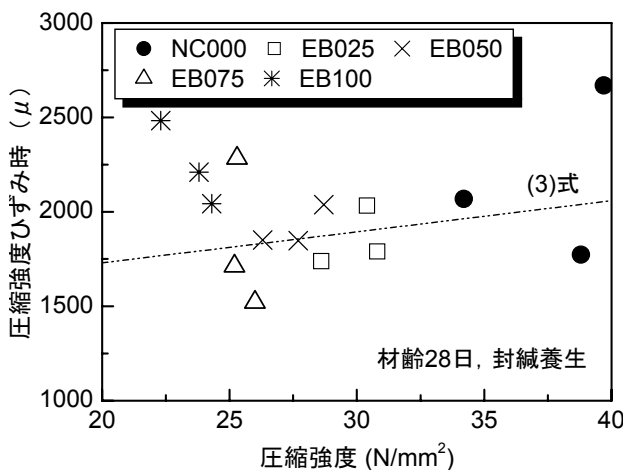


図-11 圧縮強度時ひずみと圧縮強度の関係

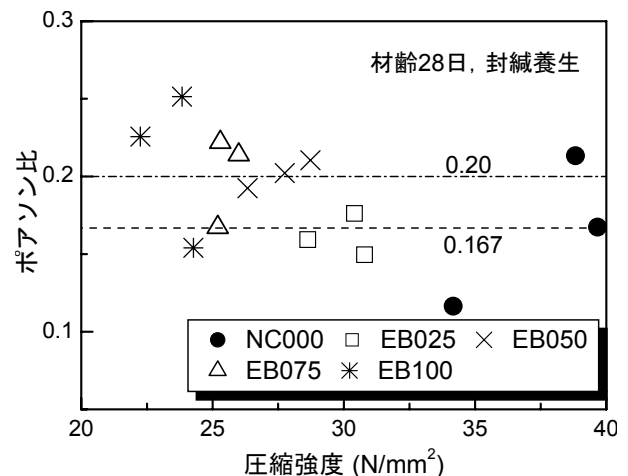


図-12 ポアソン比と圧縮強度の関係