

論文 超軽量骨材の含水状態がコンクリート強度に及ぼす影響

依田 和久^{*1}・桜本 文敏^{*1}・有江 暢亮^{*2}

要旨：本研究では、水セメント比や空気量、骨材種類を変化させて得られる気乾単位容積質量 1000～1200kg/m³で圧縮強度 20～30N/mm²のコンクリートにおいて、骨材の含水状態がコンクリートの強度に及ぼす影響を明らかにした。実験の結果、絶乾状態の骨材を用いたコンクリートは、表乾状態の骨材を用いたものに比べ、同一単位容積質量の場合に圧縮強度は 10～20%大きくなった。さらに絶乾状態の骨材を用いたコンクリートにおいて構造設計に役立てるため、強度のほかに静弾性係数や、ポアソン比、引張強度を調べ、データの蓄積を行った。

キーワード：軽量コンクリート、軽量骨材、骨材の含水状態、絶乾状態、強度

1. はじめに

軽量骨材は十分にプレウェッチングを行い湿潤状態で使用するのが通例である。しかし、これは主にポンプ圧送時の吸水によるスランプの低下を防止するため実施するものである。本研究では 2 次部材への適用を計画しており、必ずしも骨材を湿潤状態で使用する必要はない。むしろ、骨材を気乾状態（もしくは絶乾に近い状態、以下、便宜的に絶乾状態という）で使った方が、練り混ぜ時に骨材による吸水の配慮が必要なものの、練り上がり時の若干の軽量化や、骨材の吸水によるコンクリートの低水セメント比化による強度向上効果が期待できるなど有利な点が多い。これらのことから最近、絶乾状態の軽量骨材を用いたコンクリートの研究が行なわれている¹⁾。しかし、全ての骨材に比重 1.0 以下の軽量骨材（以下超軽量骨材という）を用いたコンクリートの研究は塩田らの研究に見られる程度である²⁾。塩田らの研究では絶乾骨材を用いたコンクリートの実用性の検討を行っているものの、特定の調合で目標とする気乾単位容積質量と圧縮強度のコンクリートを得たもの

であり、限定された範囲の検討に留まっている。

本研究は、水セメント比や空気量、骨材種類を変えて得られる気乾単位容積質量 1000～1200kg/m³で圧縮強度 20～30N/mm²のコンクリートにおいて、絶乾状態の超軽量骨材を用いたコンクリートの適用性を見いだすため以下 a～c を目的として行ったものである。

- a. 絶乾状態の骨材使用にあたっての調合設計上の留意点を把握する。
- b. 骨材の含水状態がコンクリート単位容積質量や強度に及ぼす影響を明らかにする。
- c. 構造設計に役立てるため強度の他に静弾性係数や、ポアソン比、引張強度を調べ、データの蓄積を行う。

2. 実験計画

2. 1 実験要因と水準

実験要因は、骨材の含水状態のほか、所要のコンクリートが得られるよう空気や骨材強さに関する今までの検討結果^{3)・4)}を基に決めた。すなわち、①骨材の含水状態 2 水準、②微粉の有無 2 水準、③粗骨材種類 2 水準、④水セメン

*1 鹿島建設（株）技術研究所 第四研究部 主任研究員，工修（正会員）

*2 鹿島建設（株）技術研究所 第四研究部 研究員

ト比3水準、⑤ペースト中の空気量5水準の計5種類とした。実験要因と水準の組み合わせを表-1に示す。

ここでいうペースト中の空気量(%)とは空気量を、空気を含むペースト量で除したものである。絶乾骨材を使用した場合は骨材の吸水の影響を考慮するため、注水から供試体成形までの所要時間を10分とし、軽量骨材の10分吸水量を求め、先のペースト量は10分吸水量を減じた値とした。

2. 2 使用材料

使用材料一覧を表-2に示す。

2. 3 調査

水セメント比とペースト中の空気量は表-1に示す通りである。調査は空気を除く材料の合計を1 m³とし、空気は外割混入とした。水量は、試し練りにより、絶乾骨材を用いたコンクリートにおいて、良好なワーカビリティの得られる最小値として170kgとした。そのほかの調査設計条件は以下の通りとした。

- 細骨材率は50%とした。
- W/C28%の場合はシリカフュームをセメントの内割りで10%(重量)混入した。
- 微粉を混入する場合は微粉を細骨材の内割りで30%(体積)とした。
- 細骨材は全てGLSを用いた。
- 混和剤は所定のワーカビリティやペース

ト空気量が得られるよう適宜混入した。

f. 絶乾状態の骨材含水率は1.0%以下としたコンクリートの練り上がり性状は、骨材の浮きの有無やワーカビリティ、目標ペースト空気量を勘案して良否を判断した。

2. 4 練り混ぜ

コンクリートの練り混ぜには容量100 lの水平2軸型強制攪拌ミキサーを用いた。練り混ぜ手順はモルタルを30秒先練りし、その後に粗骨材を投入し120秒(計150秒)混練して行った。

2. 5 供試体の成形・養生

強度試験用供試体は、スランブや空気量などフレッシュ時の試験を実施後φ10×20cmの軽量モールドにコンクリートを詰めて成形し、所定の材齢まで20℃の封緘養生を行った。

2. 6 試験項目と方法

試験項目と方法を一覧にして表-3に示す。

3. 実験結果・考察

3. 1 フレッシュ時の性状

(1) 骨材の含水状態の影響

フレッシュ時のコンクリートの実験結果の範囲を骨材の含水状態別に表-4に示す。絶乾状態の骨材を用いたコンクリートのフレッシュ時の性状は、表乾状態の骨材のものに比べ、硬くなる傾向が見られた。この性状は混和剤の添加量を増すことにより改善された。

表-1 実験条件の組み合わせとコンクリートの記号

粗骨材種類		廃棄ガラス骨材 (記号: GLL)			膨張頁岩原料骨材 (記号: SM)		
微粉の有無		無し		有り	無し		有り
W/C(%)	ペースト空気量(%)	絶乾状態(D)	表乾状態(W)	絶乾状態(D)	絶乾状態(D)	表乾状態(W)	絶乾状態(D)
40	0	40-0NGD	—	40-0MGD	40-0NSD	—	40-0MSD
	20	40-20NGD	40-20NGW	40-20MGD	40-20NSD	40-20NSW	40-20MSD
35	0	35-0NGD	—	—	35-0NSD	—	—
	10	35-10NGD	—	—	35-10NSD	—	—
	30	35-30NGD	35-30NGW	—	35-30NSD	35-30NSW	—
28	0	28-0NGD	—	28-0MGD	28-0NSD	—	28-0MSD
	20	28-20NGD	28-20NGW	28-20MGD	28-20NSD	28-20NSW	28-20MSD
	40	28-40NGD	—	28-40MGD	28-40NSD	—	28-40MSD
グループ記号		NGD	NGW	MGD	NSD	NSW	MSW

合計32種類

(2) 微粉の混入や空気量の影響

水セメント比が 40% や 35% のコンクリートにおいて、微粉 MC を用いず、目標ペースト空気量を 0% とした 40-0NGD, 35-0NGD, 40-0NSD, 35-0NSD のスランプ値は 3 cm 以下となった。これらに混和剤を増してスランプを大きくしようとする粗骨材とモルタルが分離するようになり良好なワーカビリティを有する性状にならなかった。このような性状を示したのは細骨材中に構造用軽量コンクリート骨材の JIS 規格では 15% 以上含まれるべき 0.3 mm 未満の微粉が含まれていないためと考えられる。特に、粗骨材 GLL を用いた 40-0NGD, 35-0NGD では供試体の成型が困難となった。このため以後の考察の対象から除外した。これらに対し、細骨材の一部に微粉 MC を用いたり、ペースト空気量を 20% 以上としたコンクリートはいずれも良好な練り上がり性状のものが得られた。

シリカフュームを混入した水セメント比 28% のコンクリートは、空気量の多少や微粉の有無に関わらず良好な練り上がり性状を有するものが得られた。

以上、良好なワーカビリティを確保するには単位水量を一定量以上確保した上で、微粉あるいは粉体量を多くし、さらにシリカフュームの混入あるいは空気量の確保などを適宜選択し組み合わせることが有効であった。

3. 2 強度性状

3. 2. 1 圧縮強度

(1) 全体の傾向

粗骨材種類別に、コンクリートの圧縮強度を図-1 (粗骨材 GLL), 図-2 (粗骨材 SM) に示す。絶乾状態の骨材を用いたコンクリートは、材齢 28 日において単位容積質量は 947~1308kg/m³であり、圧縮強度は 17.3~34.1N/mm²であった。

材齢 7 日から材齢 28 日にかけての強度の伸びは、絶乾状態の骨材を用いたコンクリートが平均で 4.7% で、表乾状態の骨材を用いたものが平均で 8.7% であり、絶乾状態の骨材を用いたコ

ンクリートの強度の伸びは小さかった。同一養生の普通骨材を用いたコンクリートの強度の伸びは W/C40% で 20% 程度であることと比較すると、これら超軽量コンクリートの強度の伸びは小さいといえる。コンクリート強度の伸びは、マトリックス強度の伸びによるものと考えられ

表-2 使用材料一覧

材料	種類	物性等
セメント	普通ポルトランドセメント	比重: 3.16 比表面積: 3260cm ² /g
混和材	シリカフューム	比重: 2.2 比表面積: 20万cm ² /g
微粉	特殊鉱産物 (記号: MC)	絶乾比重: 0.77 24時間吸水率: 0.174% 粒度範囲: 20~300μm
細骨材	廃棄ガラス原料骨材 (記号: GLS)	絶乾比重: 0.69 10分吸水率: 5.43% 24時間吸水率: 6.67% 粒度範囲: 0.3~5mm
粗骨材	廃棄ガラス原料骨材 (記号: GLL)	絶乾比重: 0.58 10分吸水率: 5.83% 24時間吸水率: 10.9% 粒度範囲: 5~10mm
	膨張頁岩原料骨材 (記号: SM)	絶乾比重: 0.91 10分吸水率: 4.44% 24時間吸水率: 11.1% 粒度範囲: 5~15mm
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤	比重: 1.05
	高級アルコール・硫酸エステル化合物を主成分とした起泡剤	比重: 1.02
	ポリアルキレングリコール誘導体を主成分とした消泡剤	比重: 1.0 (100倍希釈液にして使用)
水	水道水	比重: 1

表-3 試験項目一覧

時	試験項目	試験方法	備考
フ	スランプ	JIS A 1101	—
レ	スランプフロー	JASS 5T-503	—
ユ	単位容積質量	JIS A 1116	—
シ	ペースト空気量	本文中に示す	重量方法
ユ	練り上がり温度	温度計による	—
硬 化	圧縮強度	JIS A 1108	材齢: 7・28日
	弾性係数	JIS 原案	材齢: 28日、 静弾性係数及び ポアソン比を算出
	引張強度	JIS A 1113	材齢: 28日
	単位容積質量	質量と寸法の測定による	圧縮供試体を利用

表-4 フレッシュ時の試験結果の範囲

骨材 含水 状態	スランプ (cm)	スランプ フロー (cm)	単位容積 質量 (kg/m ³)	ペースト 空気量 (%)	練り 温度 (℃)
絶乾	0~26.5	20~54	944~1324	0~39.8	19.2~21.7
表乾	9~27	22~58	994~1228	15.6~34.8	18.9~21.5

るが、これら超軽量コンクリートはマトリックス強さに比べ骨材強さが相対的に小さく、骨材強さがコンクリート強度に影響し、強度をほとんど一義的に決めてしまったためと考えられる。

(2) 含水状態の影響

骨材の含水状態の違いによる圧縮強度を図-3に示す。粗骨材種類に関わりなく、絶乾状態の骨材を用いたNGDやNSDは表乾状態の骨材を用いたNGWやNSWに比べ、同一の単位容積質量の場合に圧縮強度は10～20%大きくなった。これは、同一強度で比較すると単位容積質量は5%程度小さくなることを意味する。また、比強度による含水状態の比較を図-4に示す。比強度で比較した場合、絶乾状態の骨材を用いたコンクリート強度は表乾状態の骨材を用いたものに比べ1.0～1.2倍であった。これらのことは絶乾状態の骨材を使用したことによる骨材の吸水によるコンクリートの低水セメント比化と、骨材比重低減による軽量化という当初の想定を裏付けるものといえる。

(3) 微粉混入効果と粗骨材種類の影響

微粉混入の有無及び骨材種類別による圧縮強度を図-5に示す。骨材種類に関わりなく、微粉を混入したMGDやMSDは無混入のNGDやNSDに比べ、圧縮強度は5%程度と若干であるが強度の増進がみられた。

粗骨材種類については微粉MC混入の有無に関わらず、粗骨材SMを用いたNSDやMSDが粗骨材GLLを用いたNGDやMGDに比べそれぞれ大きかった。これを比強度で比べると、図の凡例中にある通り、強度と同様な傾向であった。これらの骨材種類別のコンクリートの強度差の結果は先に報告した骨材の強さを骨材強度低下係数で評価した結果⁴⁾と同一の傾向であった。

(4) マトリックスの水セメント比の影響

水セメント比別圧縮強度を微粉の混入有無別に図-6(微粉MC無し)、図-7(同有り)に示す。微粉を混入したり、微粉未混入でも粗骨材をSMとしたコンクリートは、水セメント比が小さいほど強度は高くなる傾向が見られた。

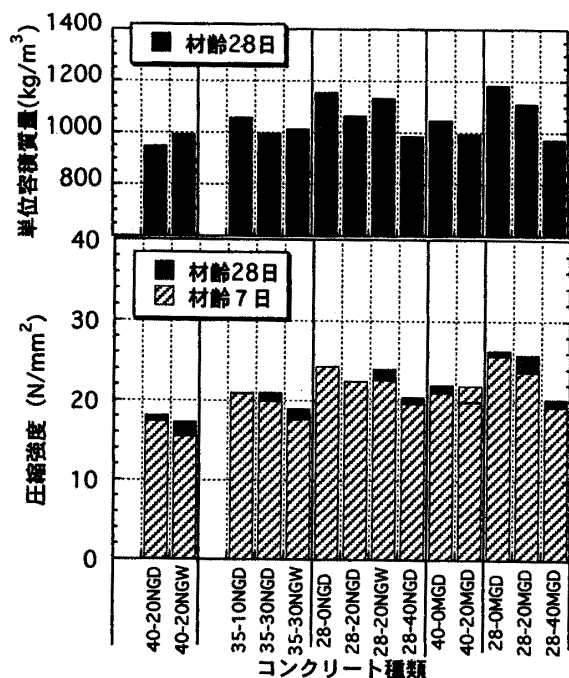


図-1 単位容積質量と圧縮強度 (粗骨材: GLL)

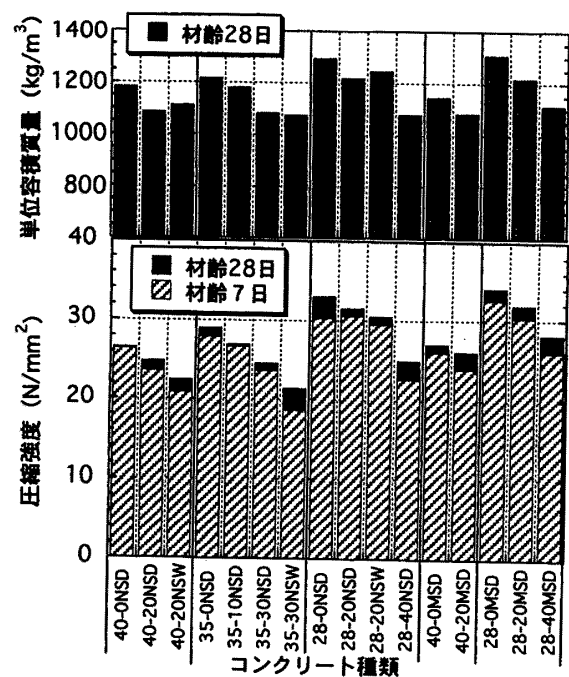


図-2 単位容積質量と圧縮強度 (粗骨材: SM)

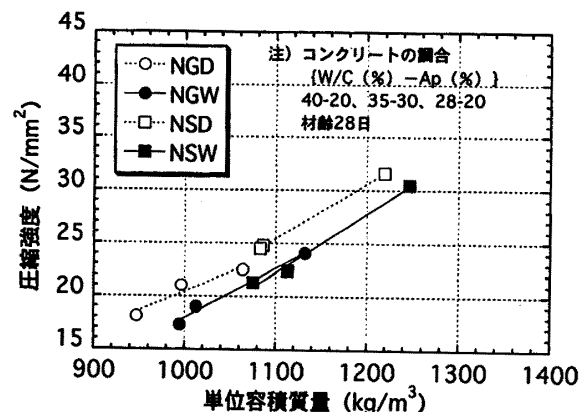


図-3 骨材の含水状態の違いによる圧縮強度

また、粗骨材 GLL を用いたコンクリート NGD は水セメント比によるコンクリートの強度差はほとんど見られなかった。これは、先に述べた通り、GLL の骨材の強さが小さく、マトリックス強度の差をコンクリート強度に反映されなかったためと考えられる。

3. 2. 2 静弾性係数

材齢 28 日において絶乾状態の骨材を用いたコンクリートの静弾性係数は $0.684 \sim 1.360 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ であった。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-8に示す。本実験の圧縮強度と静弾性係数の関係は RC 規準式⁵⁾における気乾単位容積質量 $1100 \sim 1500 \text{ kg/m}^3$ の範囲に位置し、RC 規準式にそれぞれの単位容積質量を代入して求めた静弾性係数の値よりも $0.1 \sim 0.2 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 大きくなった。

3. 2. 3 ポアソン比

材齢 28 日において絶乾状態の骨材を用いたコンクリートのポアソン比は $0.170 \sim 0.234$ であった。

圧縮強度とポアソン比の関係を図-9に示す。圧縮強度とポアソン比の間に特に相関は見られなかった。ポアソン比は $0.20 \sim 0.22$ のものが多く、この範囲の値は RC 規準に示されている軽量 1 種コンクリート及び同 2 種コンクリート（気乾単位容積質量が $1.4 \sim 1.7 \text{ t/m}^3$ ）の値⁵⁾と同程度であった。

3. 2. 4 引張強度

材齢 28 日において絶乾状態の骨材を用いたコンクリートの引張強度は $1.27 \sim 2.13 \text{ N/mm}^2$ であった。

圧縮強度と引張強度の関係を図-10に示す。引張強度は圧縮強度に対し $1/15$ 程度の値が多かった。この $1/15$ の値は既往文献による軽量 1 種コンクリート及び同 2 種コンクリートの値と同程度であった^{6), 7)}。

4. まとめ

本実験の結果、絶乾状態の超軽量骨材を用いたコンクリートについて以下のことがわかった。

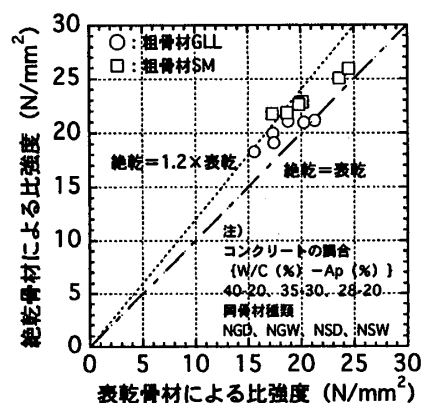


図-4 コンクリートの比強度

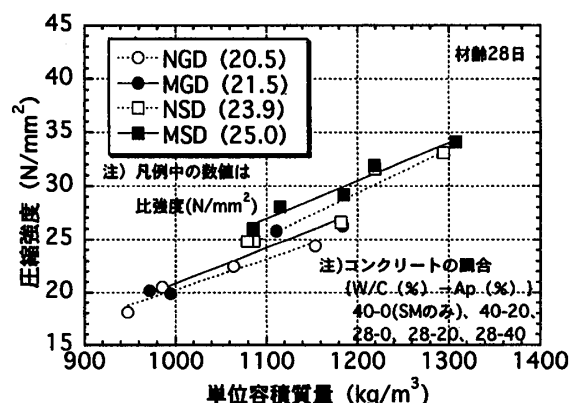


図-5 微粉の有無及び骨材種類別圧縮強度

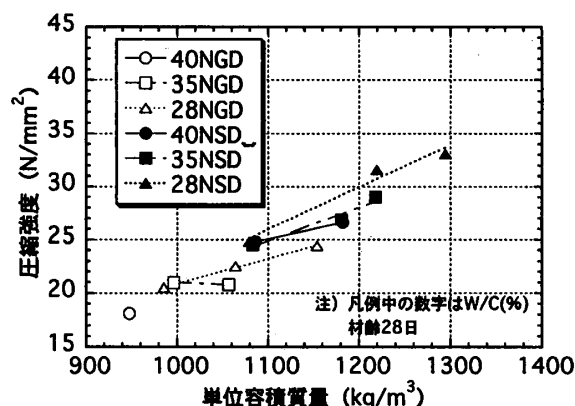


図-6 水セメント比別圧縮強度(微粉MC無し)

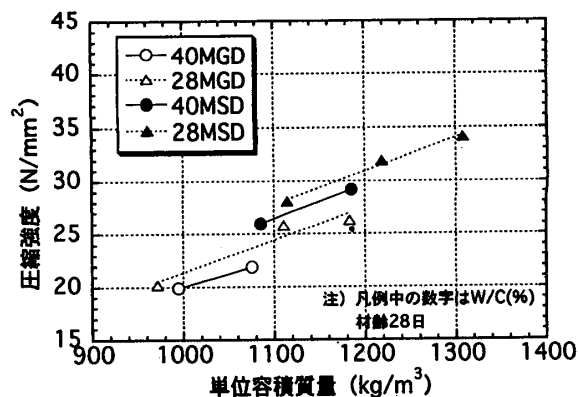


図-7 水セメント比別圧縮強度(微粉MC有り)

(1) 良好なワーカビリティを確保するには単位水量を一定量以上確保した上で、微粉あるいは粉体量を多くし、さらにシリカフュームの混入あるいは空気量の確保などを適宜選択し組み合わせることが有効であった。

(2) 表乾状態の骨材を用いたものに比べ、同一の単位容積質量の場合に圧縮強度は 10～20% 大きくなった。

(3) 静弾性係数は、RC 規準式による値よりも $0.1 \sim 0.2 \times 10^4$ 大きくなった。

(4) ポアソン比は $0.20 \sim 0.22$ がのものが多く、この範囲の値は RC 規準に示されている軽量 1 種コンクリート及び同 2 種コンクリートの値と同程度であった。

(5) 引張強度は圧縮強度に対し $1/15$ 程度の値が多かった。この $1/15$ の値は、既往文献による軽量 1 種コンクリート及び同 2 種コンクリートの値と同程度であった。

以上により、絶乾状態の超軽量骨材を用いたコンクリートの適用可能性を見いだした。

5. おわりに

今後、2 次部材の製造を想定した作業時間の検討をスランプの経時変化などで行うとともに、絶乾状態の骨材によるコンクリートでの強度向上効果のメカニズムを解明するため、骨材とモルタル界面の組織観察などを実施していきたい。

参考文献

- 1) 例えば、石川寛範ほか：人工軽量骨材の含水状態がコンクリートの強度及び乾燥収縮に及ぼす影響（その 1～その 2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.545～548，1997.9
- 2) 塩田博之ほか：絶乾状態の人工軽量骨材を用いた高強度軽量コンクリートの特性及び PCa 部材への適用について，日本建築学会技術報告集第 4 号，pp.8～14，1997.3
- 3) 依田和久，桜本文敏，池田賢悟：超軽量骨材の性質がコンクリート強度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.19，No.1，pp.493～498，1997.6
- 4) 池田賢悟，依田和久，桜本文敏：超軽量高強

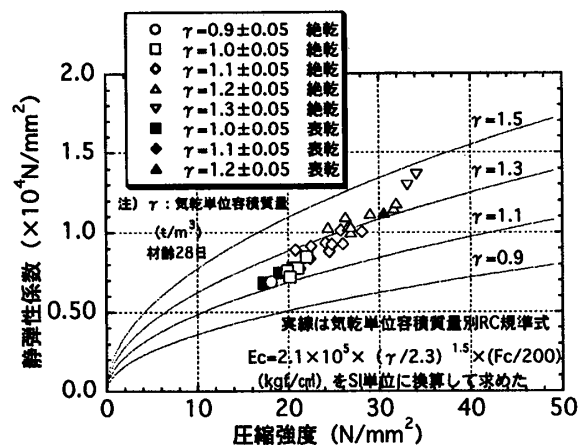


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

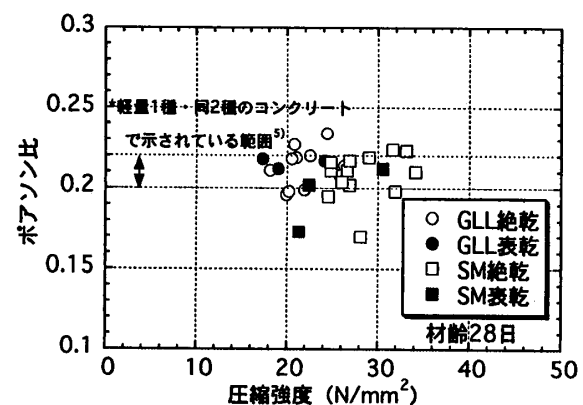


図-9 圧縮強度とポアソン比の関係

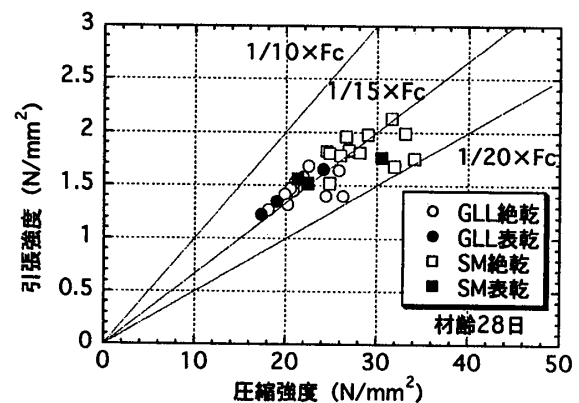


図-10 圧縮強度と引張強度の関係

- 度コンクリートの開発（その 1～その 3），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.327～332，1997.9
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，pp.43～47
 - 6) 日本建築学会：軽量コンクリート調合設計・施工指針案・同解説，pp.55～59，1981
 - 7) 友沢史紀ほか：高強度軽量コンクリートの基礎物性，コンクリート工学，Vol.24，No.4，pp.14～21，1986.4