

論文 セメント硬化体の若材齢時におけるポアソン比の経時変化

五十嵐 豪^{*1}・丸山 一平^{*2}・寺本 篤史^{*3}・堀口 直也^{*4}

要旨: ポアソン比と、セメント種類、水セメント比、および養生材齢との関係は確立されていない。本研究では、セメント硬化体において、異なるセメント種類、水セメント比でヤング率およびポアソン比を、圧縮試験および超音波試験により測定し、試験法による値の差異について考察を行った。併せて行った密度試験から得られた相組成の観点から、従来あまり着目されてこなかった若材齢時のポアソン比の経時変化について評価を試みた結果、セメント種類、水セメント比によらず、ゲル/スペース比と一定の関係が得られた。

キーワード: ポアソン比, 超音波, 若材齢, 相組成, ゲル/スペース比, 真密度, セメント硬化体

1. はじめに

コンクリートのヤング率、ポアソン比あるいは体積弾性率について、セメント種類、水セメント比、養生材齢および骨材粒度との関係は解明されていない。一般に、硬化後のコンクリートのポアソン比の値は、0.15~0.20で変化することが知られており、RC規準では、コンクリートの種類に関わらず、0.2の値を採用している¹⁾。しかし、高強度コンクリートでは小さく、飽水時や動的荷重を受けたコンクリートでは大きくなること指摘されている²⁾、加えて、極若材齢に荷重を受けたコンクリートの挙動を評価するためには、クリープポアソン比とともに弾性ポアソン比の経時変化も必要とされる³⁾。

近年、硬化挙動の評価手法として、セメント硬化体およびコンクリートの硬化過程における超音波伝播速度の測定が行われているが⁴⁾、ポアソン比のデータは少ないのが現状である。

従来、ポアソン比の測定は、圧縮試験にて載荷中の縦ひずみと横ひずみの測定によるものと⁵⁾、超音波試験による縦波伝播速度と横波伝播速度の測定によるものと知られている⁶⁾。

本検討では、圧縮試験と超音波試験により、若材齢時におけるセメント硬化体のヤング率およびポアソン比の測定を行い、試験方法が測定値に及ぼす影響について考察を行った。

加えて、密度試験と含水率の測定を行い、その結果からセメント硬化体中の未水和セメント相、水和生成物相、液相、気相の割合を予測し、セメント硬化体中の相組成とポアソン比の関係を整理した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

本実験では、研究用普通ポルトランドセメント(N)、市販の中熟ポルトランドセメント(M)および低熟ポルトランドセメント(L)を使用した。JIS R 5202, JIS R 5204による化学分析の試験成績を表-1に示す。これらのセメントを水セメント比0.55, 0.40(記号55, 40)のセメントペーストとしてブリーディングがなくなるまで練り返しを行ってから、φ5×10cm円柱試験体および4×4×16cm角柱試験体を作製した。練混ぜにはオムニミキサを使用し、注水後に3分、掻き落しを行った後に更に3分練混ぜた。作製直後から、φ5×10cm円柱試験体はアルミ粘着テープにより、4×4×16cm角柱試験体はポリ塩化ビニル製製のラップフィルムで覆い、その上から湿布をかけることにより、それぞれ封緘を施し、20±1℃の恒温室に静置した。

2.2 超音波伝播速度試験

材齢0.5日に4×4×16cm角柱試験体の脱型を行い、材齢0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 3, 5, 7, 14, 28日において超

表-1 セメントの試験成績

セメント種類	密度 (g/cm ³)	ブレン比表面積 (cm ² /g)	ig.loss (%)	化学成分 (%mass)								
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻
N	3.16	3110	0.64	21.8	4.49	2.90	63.9	1.84	2.26	0.20	0.38	0.007
M	3.20	3210	0.8	23.3	3.8	3.9	63.3	0.9	2.4	0.30	0.35	0.000
L	3.22	3400	0.7	26.3	2.8	3.2	62.9	0.7	2.4	0.15	0.41	0.005

*1 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 (正会員)

*2 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 日本学術振興会特別研究員 (正会員)

*4 名古屋大学 工学部社会環境工学科

音波到達時間を計測し、3体の平均値としてポアソン比およびヤング率を算出した。試験体は脱型後、測定箇所以外は常時、測定箇所は、計測時以外についてはアルミ粘着テープにより封緘した。

超音波到達時間の計測には、Panametrics-NDT™超音波探触子(V103-RM, V153-RM), Panametrics-NDT™パルスレーザ 5077PR (OLYMPUS 社製), およびデジタル・スコープ・オシロスコープ TDS2012B (Tektronix 社製) を使用した。測定条件として、パルス発振電圧: -400V, 探触子周波数: 1.0MHz, パルス繰返し周波数 (PRF): 100Hz として、透過法により測定した。

試験体中央部において、縦波到達時間、横波到達時間をリファレンス波形と透過波形の差分からそれぞれ計測し、縦波伝播速度、横波伝播速度に換算し、ポアソン比を算出した。到達時間の判定には、最大ピーク波形において最大値を示した時間を用いた。ここで、計算に用いる試験体の厚さは、40mm 一定とした。

ポアソン比は、式(1)により縦波と横波の伝播速度比で表される⁷⁾。

$$\nu = \frac{1 - 2(V_s/V_p)^2}{2 - 2(V_s/V_p)^2} \quad (1)$$

ここで、 ν : ポアソン比 (-), V_p : 縦波伝播速度 (km/sec.), V_s : 横波伝播速度 (km/sec.)である。

また、得られたポアソン比から、式(2)によりヤング率を算出した⁷⁾。

$$E = V_p^2 \rho_{paste} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (2)$$

ここで、 E : ヤング率 (GPa), ρ_{paste} : セメント硬化体密度 (g/cm^3)である。

セメント硬化体密度は、封緘では質量変化がないはずなので、注水直後から一定値と仮定して、水セメント比と表-1に示されるセメント密度から算出した。式(2)の計算に用いた密度の値を表-2に示す。

式(1), (2)は、弾性理論に基づくものであり、微細なひ

表-2 セメント硬化体の密度

密度	N40	N55	M40	M55	L40	L55
g/cm^3	1.95	1.79	1.96	1.80	1.97	1.80

び割れなどによる塑性変形が卓越しやすい若材齢でのセメント硬化体への適用妥当性を示すデータは限定的である⁸⁾。しかし、既往の研究でも予測・確認されている経時変化⁸⁾、すなわち、水のような体積変化のない値 ($\nu=0.5$) から、硬化に伴い、一般に知られるコンクリートのポアソン比の値付近に収束する傾向が実験的に確認されたため、セメント硬化体の弾性ポアソン比を求められるものと判断している。なお、圧縮試験でのひずみゲージの測定ではまったく逆の、すなわち、材齢に応じてポアソン比が増加する傾向が示されており、一般的な概念と逆の傾向が示されているので、本検討では、最終的に超音波法の方が正しいものと考察を行っている。

2.3 圧縮試験

圧縮試験直前に脱型および研磨を行った $\phi 5 \times 10\text{cm}$ 試験体により、材齢 1, 3, 7, 28 日において載荷中の縦ひずみと横ひずみを計測し、3体の平均値としてポアソン比とヤング率を算出した。計測には、コンプレッソメータに取り付けられた精度 1/1000mm の CDP により、標点間 50mm で縦ひずみを、試験体の高さ中央部分に載荷方向と直角方向に貼り付けられたワイヤストレインゲージにより横ひずみをそれぞれ測定し、1/3 圧縮強度範囲での縦ひずみに対する横ひずみの比によりポアソン比を、1/3 圧縮強度範囲での縦ひずみに対する圧縮応力の比によりヤング率を、最小二乗近似を用いて算出した。

2.4 密度試験および含水率測定

材齢 0.5, 0.75, 1, 3, 7, 28 日にて、封緘中のセメント硬化体をハンマーで約 1g 程度に砕き、その時点の質量を測定した。次に、水没させ、真空ポンプによる減圧で飽水させ、表面乾燥飽水状態質量、およびアルキメデス法による見かけの密度を測定した。その後、真空ポンプにより脱水させ、定温乾燥機により 105°C で 24 時

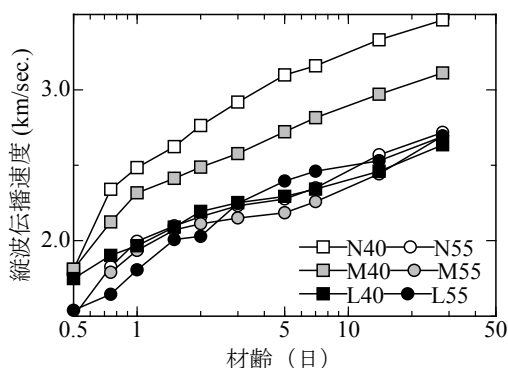


図-1 縦波伝播速度の経時変化

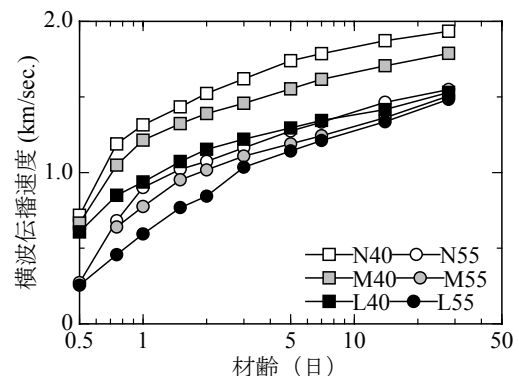


図-2 横波伝播速度の経時変化

間以上乾燥させ、絶対乾燥状態質量を、それぞれ 0.1mg まで測定可能な電子天秤で秤量を行い、含水率、飽和含水率、真密度を 3 体の平均値としてそれぞれ有効数字 3 桁にて算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 ヤング率

超音波試験から得られた縦波伝播速度、横波伝播速度、およびヤング率の経時変化を図-1、図-2、図-3、圧縮試験から得られたヤング率と、超音波試験から得られたヤング率の関係を図-4に示す。

図-4に示すように、超音波法によるヤング率の方が、圧縮試験によるヤング率より、若干大きい傾向を示すものの、高い相関が見られる。

これは、超音波法による値は、動弾性係数であり、圧縮試験による値は静弾性係数であるため、圧縮試験により得られたひずみにはクリープひずみが若干ながら含まれており、完全弾性体としての挙動を示さないため、ヤング率を小さく評価したものと推察される。また、材齢の進行により、ヤング率が増加するにつれて、クリープの影響が小さくなり、両試験の値がほぼ一致することが図から確認される。

3.2 ポアソン比

超音波試験及び圧縮試験から得られたポアソン比の経時変化を、水セメント比別に図-5、図-6に示す。ここで、凡例として、超音波試験による値を U、圧縮試験による値を C として各パラメータの末尾に表記した。また、図中には、Abeele らによる水セメント比 0.33 のコンクリートにおける試験結果（記号：33U）についても併せて示した⁹⁾。

図-5、図-6に示すように、超音波試験により得られたセメント硬化体のポアソン比は、材齢の進行とともに、減少しながら、収束する傾向が得られた。これは、Abeele らのコンクリートをういた検討と一致する⁹⁾。Abeele らと比較して、値が大きくなったことは水セメント比の相違と骨材の影響であると考えられる。

また、水セメント比が 0.40 よりも 0.55 の方が、ポアソン比が大きい値から減少する傾向は、Swamy の検討と一致する¹⁰⁾。N,M,L の順に、減少速度が速いことは、水和反応の進行などが原因として考えられるが、今後の長期データの蓄積による考察が必要である。

一方、圧縮試験によるポアソン比は、材齢の進行とともに増加する傾向が見られた。加えて、材齢の進行とともに、両試験法による値は漸近する傾向を示すが、材齢 28 日時点では、圧縮試験による値が下回る結果となった。

この差異は、ヤング率の考察と同様に、両試験法により測定されるひずみの違いによるものと考えられる。超

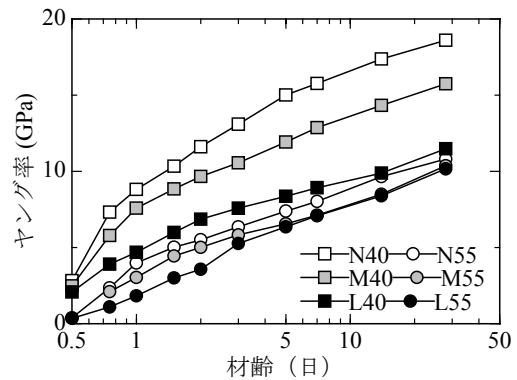


図-3 超音波試験によるヤング率の経時変化

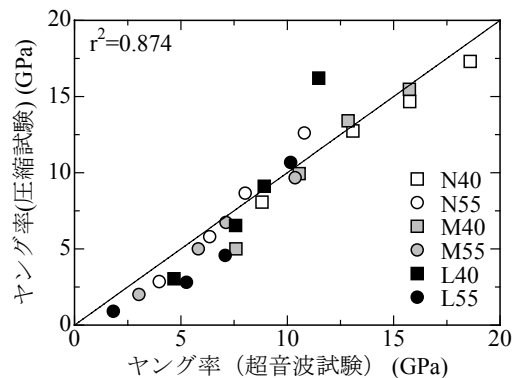


図-4 試験法によるヤング率の比較

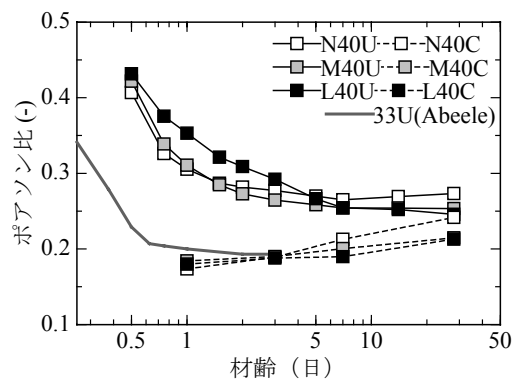


図-5 W/C=0.40 のポアソン比の経時変化

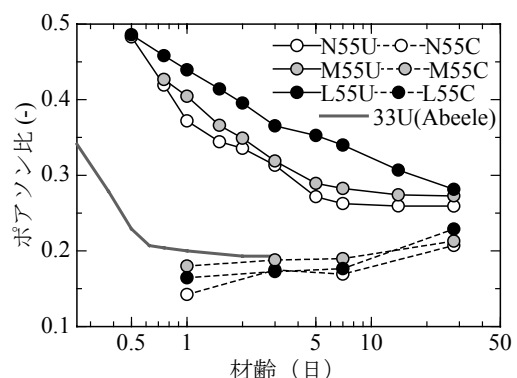


図-6 W/C=0.55 のポアソン比の経時変化

音波試験においては、超音波伝播は弾性ひずみにより生じるため、弾性ひずみ成分のみによるポアソン比となるが、圧縮試験においては、荷重を加えるため、弾性ひずみ成分と圧縮クリープひずみ成分によるポアソン比と考えられる。

また、ポアソン比の値がヤング率に比べて試験法の違いにより差が大きくなったのは、伊東らの指摘同様¹¹⁾、圧縮試験において横ひずみが、端板の拘束効果のために、縦ひずみに対して小さくなったためだと考えられる。

3.3 圧縮強度とポアソン比の関係

超音波試験から得られたポアソン比と圧縮強度の関係を図-7に示す。

図に示すように、若材齢における水和反応の進行を基として、ポアソン比と圧縮強度の相関を評価した場合には、セメント種類、水セメント比に関わらず圧縮強度とポアソン比の関係は、今回の検討の範囲において、一つの曲線で評価できることが実験的に確認された。

この結果は、若材齢については、超音波測定によるポアソン比は水和の進行とともに減少傾向を示し、初期の強度増進に対して結果的に負の相関をとることを示すものである。このことは、硬化後で、骨材を含んだ系と強度とポアソン比が正の相関を有すると指摘する過去の知見とは相反するものであった¹²⁾。

3.4 真密度

真密度、飽和含水率および含水率の経時変化を図-8、図-9、図-10に示す。ここで、真密度とはセメント硬化体中の固相部分のみ（未水和セメントと水和生成物）の密度を表す。

図-5、図-6においてポアソン比が水セメント比の影響を大きく示したのに対して、真密度は、図-8に示すようにセメント種類の影響が大きく見られる。このことは水和反応だけでなく、初期値であるセメントの密度自体が異なることも影響しているものと推察される。

一方、図-9、図-10に示すように、飽和含水率および含水率については、ポアソン比と同様に、水セメント比の影響が大きく見られる。

ここで、後の考察のために、式(3)により真密度の経時変化の回帰を行い、水和収束時点の値の同定を行った。回帰の結果を図-8中に示す。

$$\rho_{sol} = \rho_{cem} \cdot \left[1 - \frac{a}{\exp\left\{\left(\frac{1}{t}\right)^{0.4}\right\}} \right] \quad (3)$$

ここで、 ρ_{sol} :真密度 (g/cm³)、 ρ_{cem} :セメント密度 (g/cm³)、 t :材齢 (日)、 a :定数である。

セメント種類別に回帰に使用した定数と、回帰の結果、同定された水和収束時点の真密度を表-3に示す。

ここで得られた数値は、水和生成物の主となる C-S-H

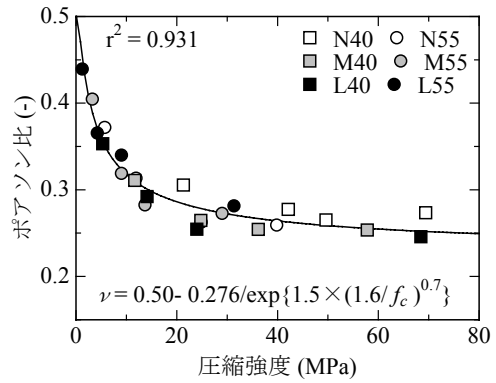


図-7 ポアソン比と圧縮強度の関係

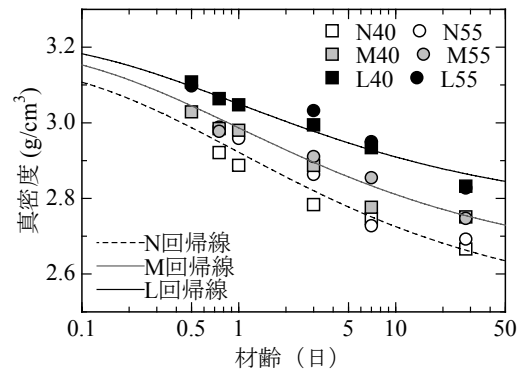


図-8 真密度の経時変化

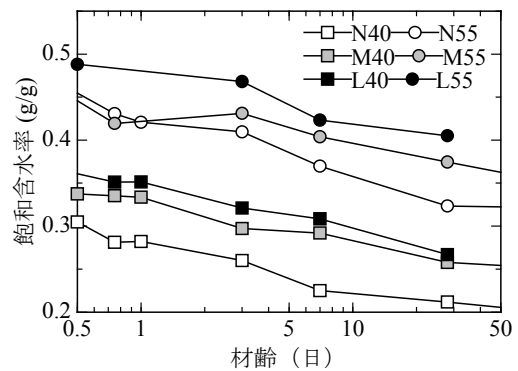


図-9 飽和含水率の経時変化

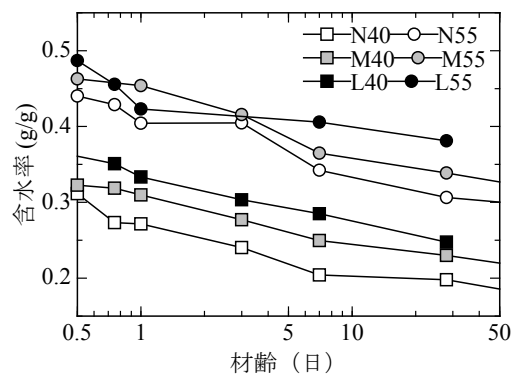


図-10 含水率の経時変化

表-3 各定数値および水和収束時点の真密度

セメント種類	a	ρ_{hyd}
N	0.647	2.51
M	0.580	2.62
L	0.462	2.76

の密度の観点からおおむね妥当な数値の範囲といえる¹³⁾。また、セメント種類によって、異なる数値に収束したのは、セメントの鉱物組成の違いから、各水和生成物の体積比が異なるためと考えられる。

3.5 ゲル/スペース比とポアソン比の関係

ポアソン比を相組成の観点から評価する目的で、式(4)～式(10)により、密度試験および含水率測定により得られた実験値を用いて、セメント硬化体を未水和セメント相、水和生成物相、液相、気相の4相に分離を行った。

$$\rho_{paste} \cdot V_{paste} = \rho_{sol} \cdot V_{sol} + \rho_{pore} \cdot V_{pore} \quad (4)$$

$$\rho_{sol} \cdot V_{sol} = \rho_{cem} \cdot V_{cem} + \rho_{hyd} \cdot V_{hyd} \quad (5)$$

$$\rho_{pore} \cdot V_{pore} = \rho_{wat} \cdot V_{wat} + \rho_{air} \cdot V_{air} \quad (6)$$

$$V_{paste} = V_{sol} + V_{pore} \quad (7)$$

$$V_{sol} = V_{cem} + V_{hyd} \quad (8)$$

$$V_{pore} = V_{wat} + V_{air} \quad (9)$$

$$\rho_{hyd} = \lim_{t \rightarrow \infty} \rho_{sol} \quad (10)$$

ここで、 ρ_{pore} : 空隙密度 (g/cm³)、 ρ_{hyd} : 水和収束時の真密度 (g/cm³)、 ρ_{wat} : 液相密度 (g/cm³)、 ρ_{air} : 気相密度 (g/cm³)、 V_{paste} : セメント硬化体体積 (cm³)、 V_{sol} : 固相体積 (cm³)、 V_{pore} : 空隙体積 (cm³)、 V_{cem} : 未水和セメント体積 (cm³)、 V_{hyd} : 水和生成物体積 (cm³)、 V_{wat} : 液相体積 (cm³)、 V_{air} : 気相体積 (cm³)である。

ρ_{paste} については、表-2の値、 ρ_{cem} については、表-1の値、 ρ_{hyd} については、3.4で同定した表-3の値、 ρ_{wat} については、20℃、1気圧における純水の密度 (= 0.998)、 ρ_{air} については、20℃、1気圧における乾燥空気密度 (= 0.001)を用いて相組成を同定した。

今回の検討におけるパラメータでは、見かけの体積変化に影響する自己収縮量が小さいため、これらの仮定は、実現象と大きく乖離せず評価できると考えられる¹⁴⁾。

結果として得られた相組成の経時変化を図-11に示す。この経時変化から、式(8)により Powers のゲル/スペース比を算出し¹⁵⁾、ポアソン比との関係を図-12に示す。

$$X = \frac{V_{hyd}}{V_{hyd} + V_{pore}} \quad (8)$$

ここで、 X : ゲル/スペース比 (vol./vol.)である。

ゲル/スペース比は、水和生成物が析出しうる空隙部分に対する水和生成物の存在比で表されるが、これは強度とも高い相関があり¹⁵⁾、水セメント比、温度履歴によらず強度を評価できることが実験的に確認されており¹⁶⁾、水和生成物量によりセメント硬化体のさまざまな物理性状が評価できると考えられる。

図-12に示すように、ゲル/スペース比とポアソン比は、セメント種類、水セメント比に関わらず、ある一定の相関が見られる。

今回の検討の範囲では、ポアソン比に与える影響は水和生成物相が支配的であるとの結論を得たが、セメント硬化体中の各相の分離、セメント各鉱物の反応率等の影響を含めて更なる高精度化を検討する予定である。

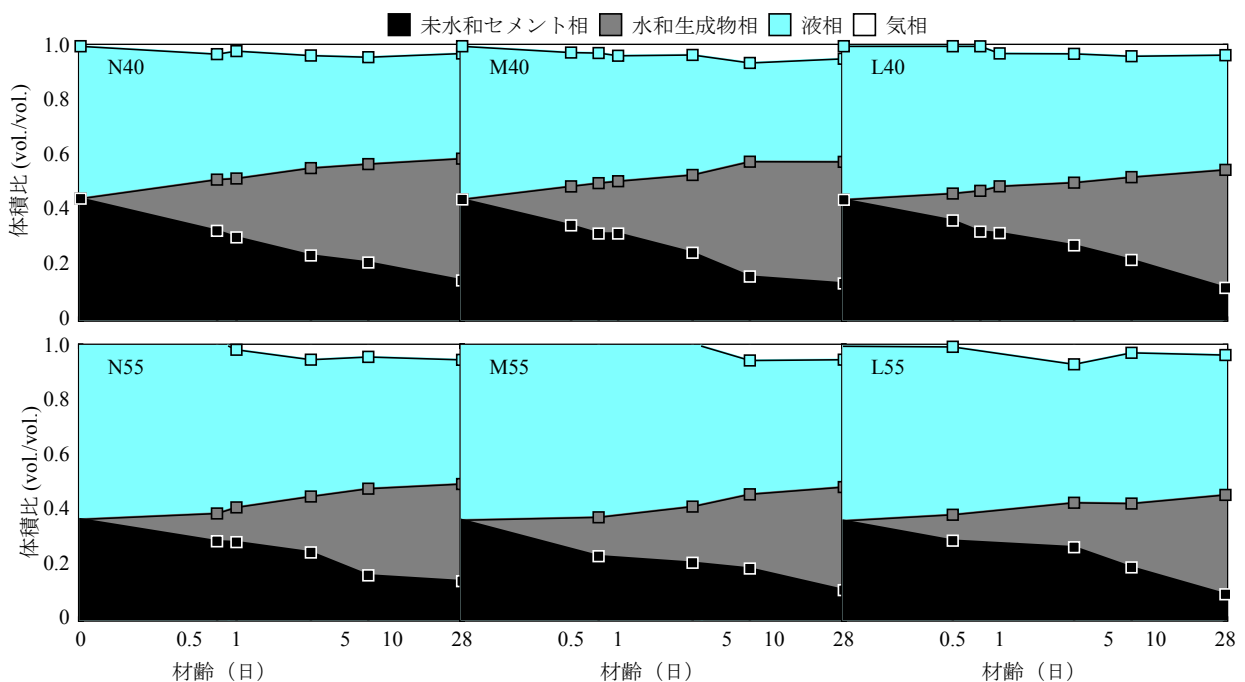


図-11 セメント硬化体中の相組成の経時変化

4. 結論

研究用普通ポルトランドセメント，中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントを用いて作製した水セメント比 0.40, 0.55 のセメント硬化体について，若材齢時におけるポアソン比について試験法の検討および相組成との関係について検討を行い，その結果，以下の知見が得られた。

- 1) セメント種類，水セメント比に関わらず，圧縮荷重により得られたヤング率と超音波試験によるヤング率は，高い相関がみられる。しかし，圧縮荷重によるヤング率は，超音波試験によるヤング率よりも若干小さい値を有し，これは，クリープ挙動が含まれるためであると推察された。
- 2) 超音波試験によるポアソン比の測定は，体積変化をしない 0.5 程度の値から，水和にともなって減少する傾向が得られ，極若材齢時から弾性ポアソン比の経時変化を安定して計測することが可能であると考えられた。
- 3) 超音波試験による弾性ポアソン比と圧縮強度との相関を評価した場合には，セメント種類および水セメント比に関わらず，材齢初期の強度増進に対して負の相関をとることが実験的に確認された。
- 4) 密度試験から相組成の同定を行い，得られた相組成からゲル/スペース比を算出して，弾性ポアソン比の評価を試みたところ，本研究の範囲では，セメント種類，水セメント比に関わらず，ポアソン比はゲル/スペース比と一つの曲線で示された。

謝辞：本研究は，経済産業省：高経年化対策強化基盤整備事業技術評価検討 WG の一環として行いました。超音波測定装置に関する測定技術については，3 大学連携事業「地震に強いまちづくりのための減災技術の開発と評価（H20-22）」において実施しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 1999，日本建築学会，pp.40-41，1999 改定
- 2) たとえば，田澤榮一，佐伯昇：コンクリート工学，技報堂出版，p.87，1998
- 3) 小澤美津雄，嶋田久稔，森本博昭：若材齢コンクリートのクリープポアソン比に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，2005
- 4) 内田慎哉，河村彰男，鎌田敏郎，久田真：超音波測定に基づくコンクリートの硬化挙動の評価手法に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1569-1574，2002
- 5) たとえば，伊東浅之：コンクリート円柱供試体の加圧面

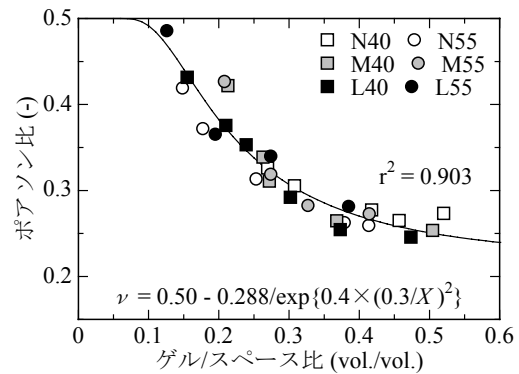


図-12 ポアソン比とゲル/スペース比の関係

の状況によって生じる強度とポアソン比の変化に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.9-10，1987

- 6) たとえば，小山智幸，松藤泰典，山口謙太郎，濱崎仁：横波超音波の波動伝達関数解析によるコンクリートの物性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.17，No.1，1995
- 7) 三木幸蔵：わかりやすい岩石と岩盤の知識，鹿島出版会，pp.128-129，1978
- 8) 河角誠：コンクリートのクリープ予測式における瞬間ひずみ成分の決定任意の配合・材令におけるセメントペーストの静弾性係数の予測，電力中央研究所報告・研究報告 U93043，1994.3
- 9) Abeele, K. Van Den, Desadeleer, W., Schutter, G. De, Wevers, M.: Active and passive monitoring of the early hydration process in concrete using linear and nonlinear acoustics, Cement and Concrete Research, Vol.39, pp.426-432, 2009
- 10) Swamy, R. Narayan: DYNAMIC POISSON'S RATIO OF PORTLAND CEMENT PASTE, MORTAR AND CONCRETE, Cement and Concrete Research, Vol. 1, pp.559-583, 1971
- 11) 伊東浅之：コンクリートのポアソン比と圧縮試験に於ける受圧面摩擦拘束に関わる諸問題の理論的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1111-1112，1984
- 12) たとえば，野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第 472 号，pp.11-16，1995
- 13) Taylor, H. F. W.: CEMENT CHEMISTRY SECOND EDITION, Thomas Telford, pp.121-122, 1997
- 14) たとえば，日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.132-137，2002
- 15) Powers, T. C.: Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement, J. Amer. Ceram. Soc., Vol.40, pp.1-6, 1958
- 16) 五十嵐豪，丸山一平，高松伸之，山田一夫：高温履歴を受けるセメント硬化体中の普通ポルトランドセメントの水和反応と硬化体の物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.715-720，2009