論文　コンクリートの圧縮応力と超音波速度変化率の関係に及ぼす諸要因の検討

永田　昂大[*1]・大野　健太郎[*2]・玉置　一清[*3]・上野　敦[*4]

要旨：超音波法によるコンクリートの圧縮応力推定手法の確立を目的とした既往の研究において，無応力状態に対する各応力状態の超音波速度変化率はコンクリートの圧縮応力と相関し，コンクリートの音弾性効果が認められたが，コンクリートとモルタルなどの材料構成の違いや測定対象物の水分状態が音弾性効果に及ぼす影響は明確となっていない。本研究では，コンクリート中の粗骨材量および飽水度が音弾性効果に及ぼす影響について検討を行った。その結果，粗骨材量は音弾性定数および載荷過程と除荷過程の超音波速度変化率差に，飽水度は音弾性定数に影響を及ぼすことが示唆された。

キーワード：プレストレストコンクリート，応力推定，超音波速度変化率，粗骨材量，飽水度，音弾性定数

1. はじめに

プレストレストコンクリート（PC）構造では，あらかじめコンクリートに圧縮応力（プレストレス）を与えることで外力起因の引張力に抵抗する。PC 鋼材のリラクセーションやコンクリートの乾燥収縮およびクリープによりプレストレスは時間経過に伴い減少することが知られている[1)]。しかし，予期せぬ PC 鋼材の腐食・破断等によっても想定外にプレストレスが減少する可能性が指摘されている。

本事象に対する PC 橋における非破壊試験を活用した点検方法は，グラウト未充填部検出や PC 鋼材破断検知などが主であるが，維持管理上最も重要な評価項目は，残存プレストレス量であると考える。残存プレストレス量の推定方法として現状用いられている技術は部材の一部破壊を伴うものであり，完全非破壊によるコンクリートの応力推定技術が望まれている。

非破壊によるコンクリートの応力推定に関する研究では，超音波法による検討が実施されている[2)-10)]。これらによれば，コンクリートの圧縮応力漸増過程に超音波法を適用し，得られた超音波波形の Coda 波あるいは初動到達部に着目し，無応力状態に対する各応力状態の超音波速度変化率を算出することで，圧縮応力と超音波速度変化率が線形性を有すると報告されている。ここで，応力変化に伴い速度が変化する現象は音弾性効果と呼ばれ，単位応力変化に対する速度変化率を音弾性定数という[11)]。ここで，筆者らの既往の研究[12)]において，コンクリートとモルタルでは，同一応力時の超音波速度変化率がコンクリートのほうが大きいこと，また，乾燥状態に比べ，湿潤状態のコンクリートでは弾性波速度が高く検出され，応力度を変化させても弾性波速度に及ぼす影響が小さいことが報告されている[13)]。

本研究では，既往の研究[12)]において遷移帯によって載荷過程と除荷過程の超音波速度変化率差が生じる可能性が示唆されたことから，コンクリート中の粗骨材量の違いが圧縮応力と超音波速度変化率の関係に及ぼす影響についてより詳細に検討を行った。また，測定対象物の水分状態が音弾性効果に及ぼす影響にも着目した。さらに，コンクリートやモルタルのような複合材料ではなく，均質材料とみなせる同形状のアクリル製および MC ナイロン製の供試体にて同様の試験を行い，複合材料との違いを考察した。

2. 実験概要

2.1 検討水準

本研究では，コンクリートの圧縮応力と超音波速度変化率の関係（音弾性効果）に及ぼす要因を検討するため，粗骨材量と飽水度に着目し検討を行った。粗骨材量は，配合内の全骨材体積を一定とし，細骨材率を 45%, 75%, 100%（以下，粗骨材量が多い順に G55, G25, G0 とする）の 3 水準とした。飽水度は，材齢 28 日の水中養生後，載荷試験を行うまでの乾燥期間を変化させ，試験日までの

表－1　試験水準および呼称

		乾燥期間（日）		
		0	7	35
細骨材率（%）	45	G55_D0	G55_D7	G55_D35
	75	G25_D0	G25_D7	G25_D35
	100	G0_D0	G0_D7	G0_D35

*1 東京都立大学大学院　都市環境科学研究科　都市基盤環境学域（学生会員）
*2 東京都立大学大学院　都市環境科学研究科　都市基盤環境学域助教　博士（工学）（正会員）
*3 三井住友建設(株)　技術本部　環境・リニューアル技術部　リニューアル技術グループ　修士（工学）（正会員）
*4 東京都立大学大学院　都市環境科学研究科　都市基盤環境学域准教授　博士（工学）（正会員）

表－2　コンクリートおよびモルタルの配合

	Gmax (mm)	SL (cm)	*W*/*C* (%)	Air (%)	*s*/*a* (%)	単位量(kg/m³)				
						W	*C*	*S*	*G*	*Ad*
G55	20	8	55	4.5	45	172	313	791	985	0.939
G25	20	-	55	4.5	75	172	313	1318	448	0.313
G0	-	-	55	4.5	100	172	313	1758	-	0.313

表－3　試験材齢時の力学的特性および載荷試験時の最大応力

呼称	圧縮強度（N/mm^2）	静弾性係数（kN/mm^2）	載荷試験時の最大応力（N/mm^2）	無応力時の超音波速度（m/s）
G55_D0	36.8	27.3	12	4044
G55_D7	41.2	25.0	13	3823
G55_D35	41.1	22.3	13	3650
G25_D0	47.5	29.1	15	4133
G25_D7	54.7	28.7	18	3895
G25_D35	58.3	25.4	19	3763
G0_D0	44.0	26.7	14	4030
G0_D7	51.7	26.2	17	3879
G0_D35	52.0	24.3	17	3738

質量変化から算出した。試験材齢は，28 日養生直後の乾燥期間 0 日と 40℃，30%R.H.環境にて 7 日，35 日保管後の 3 水準とし，それぞれ飽水度（（*t* 日質量/0 日質量）×100(%)）を算出した。試験水準およびそれぞれの呼称を**表－1** に示す。

2.2 供試体

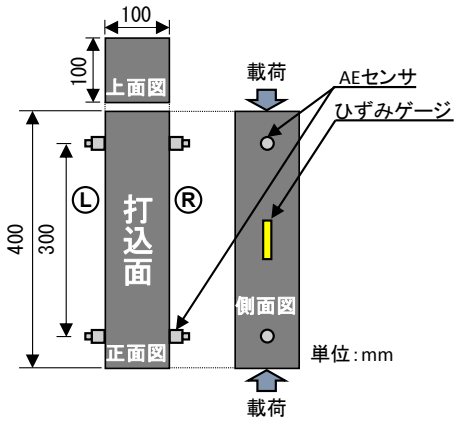
コンクリートおよびモルタルの配合を**表－2** に示す。供試体は，**図－1** に示す寸法 100×100×400mm の角柱供試体とし，各配合で 3 本ずつ計 9 本作製した。供試体は材齢 1 日で脱型し，その後材齢 28 日まで 20℃の水中にて養生した。同日同配合で作製したテストピース（φ100×200mm）3 本を用いて算出したそれぞれの供試体の試験材齢時の力学的特性を**表－3** に示す。

2.3 載荷方法および載荷試験時の最大応力

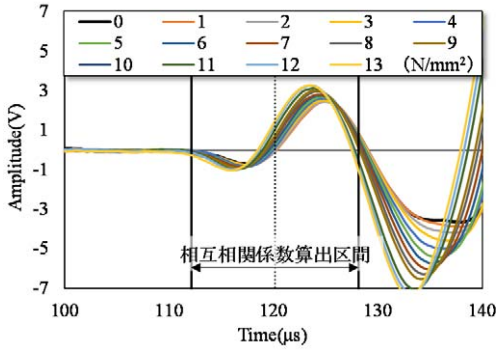
実験では耐圧試験機を用いて角柱供試体を載荷し，供試体に圧縮応力を作用させた。最大応力は，**表－3** に示すとおり，各供試体の圧縮強度の 1/3 を超えない範囲で行った。

2.4 超音波測定

超音波の入力は，圧縮応力が 1N/mm^2 変化する度にファンクションジェネレータにて振幅値を 15V，継続時間 10μs とした矩形波を AE センサ（60kHz 共振型）に作用させ，信号入力を 20 回行った。超音波の測定は**図－1** に示すように，打込面を正面にした時の左右の型枠面で行い，測定距離を 300mm とした。AE センサ（60kHz 共振型）により検出した信号は，プリアンプにて 60dB 増幅した後，500kHz ローパスフィルタ処理を施し，D0 シリーズではサンプリング時間間隔 0.1μs，D7，D35 シリーズではサンプリング時間間隔 0.0125μs で記録した。得られた波形は超音波入力時間を基準とし，20 波を重ね合わせた 1 つの波形として処理を行った。なお，本検討ではサンプリング時間間隔を変更して測定したが，両者の違いが結果に及ぼす影響は確認されなかった。



図－1　供試体概要とセンサ配置



図－2　受信波形初動部例

2.5 超音波速度変化率の算出

既往の実験成果において，初動到達時刻は不明瞭であり厳密性の確保が難しい場合が生じたため，超音波速度変化率の算出は既往の研究 [12]と同様に以下のように行った。**図－2** に受信波形初動部の例を示す。なお，図中の凡例は波形取得時の応力（N/mm^2）を示している。図に示すように，無応力状態の初動波形 1/2 周期点（破線）を基準とし，1 周期相当となる±8μs の区間を相互相関係数算出区間として設定し，式(1)に示す相互相関係数が最

大値を示す時間差 τ を求め，式(2)より超音波速度変化率を算出した。

$$CC_{(h_0,h_i)}^{(t_1,t_2)}(\tau)=\frac{\int_{t_1}^{t_2} h_0[t(1+\tau)]\cdot h_i[t]dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} h_0^2[t(1+\tau)]dt\int_{t_1}^{t_2} h_i^2[t]dt}} \quad (1)$$

ここに，$h_0(t)$：無応力状態での時刻 t における振幅値，$h_i(t)$：各応力状態での時刻 t における振幅値，τ：時間差，$CC(\tau)$：相互相関係数である。

$$\frac{\Delta V}{V_0}=\frac{V_i-V_0}{V_0}\times 100=\left(\frac{t_0}{t_0-\tau}-1\right)\times 100(\%) \quad (2)$$

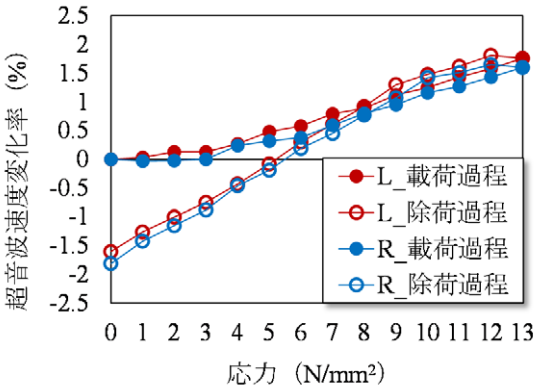
ここに，V_0：無応力状態での超音波速度，V_i：各応力状態での超音波速度，t_0：無応力状態で受信した信号の超音波発信時刻からの到達時間差，τ：相互相関係数が最大となるときの時間差である。

3. 粗骨材量の違いが音弾性効果に及ぼす影響

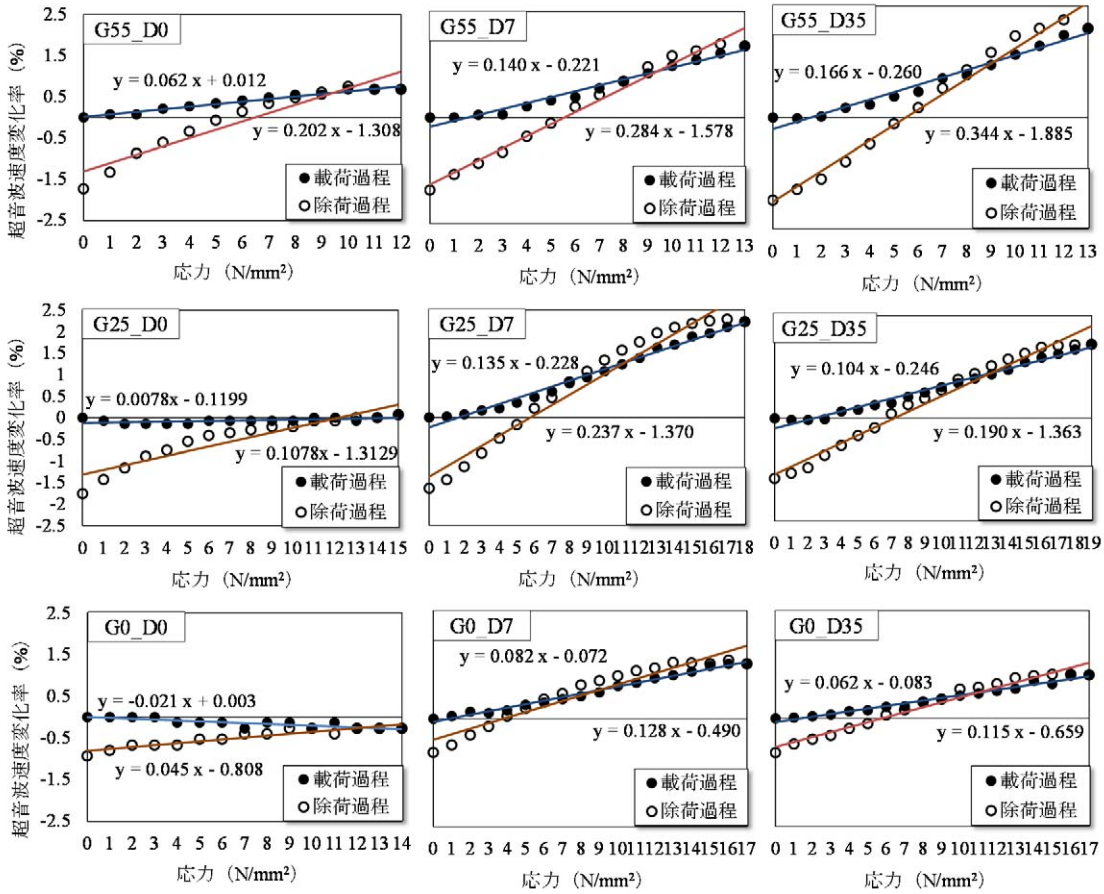
図－3 に G55_D7 の圧縮応力と超音波速度変化率の関係を左右の測線（L，R）ごとに示す。図より，どちらの測線においても応力の増減に伴い，超音波速度変化率も増減することが確認できる。また，2 測線の挙動は同様であるため，以降は 2 測線で算出した各応力の超音波速度変化率の平均値を用いて考察を行う。

3.1 圧縮応力と超音波速度変化率の関係

図－4 に全試験水準の応力と超音波速度変化率の関係を載荷，除荷過程の線形近似直線とともに示す。図より，G25_D0 と G0_D0 以外は，応力の増減に伴い超音波速度変化率も増減していることがわかる。また，粗骨材量が多いほど載荷過程のグラフの傾き（音弾性定数）は概ね大きくなっており，載荷前後の超音波速度変化率の差が大きくなっていることがわかる。ここで，粗骨材量と音弾性定数および載荷前後の超音波速度変化率差に着目して考察する。なお，それぞれの指標の算出については，音弾性定数は載荷過程の近似直線の傾き（α），載荷前後の超音波速度変化率差は，載荷過程と除荷過程の近似直線の切片差（$\Delta\beta$）とした。



図－3　応力と超音波速度変化率の関係（G55_D7）



図－4　コンクリートの圧縮応力と超音波速度変化率の関係

3.2 粗骨材量と音弾性定数の関係

図－5 に粗骨材量と音弾性定数 α の関係を示す。図より，乾燥期間が同じである場合，粗骨材量が多くなると音弾性定数 α は大きくなることがわかる。筆者らの既往の研究[12]より，コンクリートでは，圧縮応力の増加に伴い，粗骨材周りの遷移帯が収縮し，組織が密となることで超音波速度変化率が増加する可能性を示唆している。このことから，音弾性定数 α は，コンクリート中の粗骨材周囲の遷移帯量の影響を受ける可能性が改めて示唆された。

3.3 粗骨材量と切片差 $\Delta\beta$ の関係

図－6 に粗骨材量と載荷前後の超音波速度変化率差 $\Delta\beta$ の関係を示す。図より，粗骨材量が多くなると載荷前後の超音波速度変化率差 $\Delta\beta$ は大きくなることがわかる。ここで，載荷前後の超音波速度変化率差 $\Delta\beta$ が生じる理由の一つに，コンクリートおよびモルタルの載荷中に，非弾性的な挙動を示すことが考えられる。

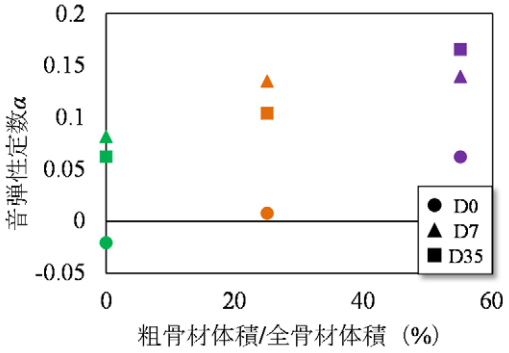
3.4 均質材料での応力と超音波速度変化率の関係

ここでは，応力と超音波速度変化率の関係に及ぼす影響要因の一つとして材料の不均質性が考えられたため，コンクリートやモルタルと比較しより均質な材料であり，かつ弾性的な挙動を示すと考えられたアクリルおよび MC ナイロン製のそれぞれの角柱供試体（100×100×400mm）を用いて同様の試験を行い，その違いについて検討を行った。

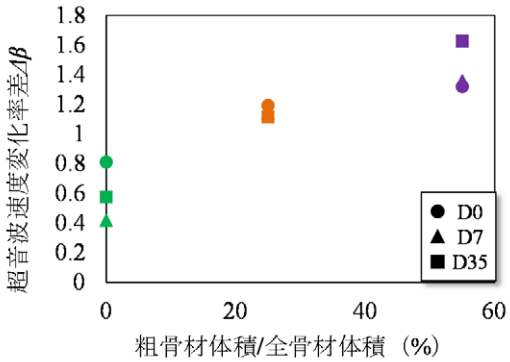
アクリルおよび MC ナイロン製角柱供試体は**図－1** と同様にひずみゲージと AE センサを設置し，最大応力が 10N/mm^2 となるまでの載荷過程および 0N/mm^2 までの除荷過程で 1N/mm^2 刻みで超音波測定を行った。なお，アクリルと MC ナイロンの密度はそれぞれ 1.19g/cm^3，1.17g/cm^3，無載荷時の超音波速度は 2605m/s，2599m/s である。また，**図－7** に示す載荷試験中の応力ひずみ曲線から算出したアクリルと MC ナイロンの弾性係数はそれぞれ 3.6kN/mm^2，4.4kN/mm^2 である。

図－7 に G55_D35，G25_D35，G0_D35 とアクリルおよび MC ナイロンの載荷試験時の応力ひずみ曲線を示す。図より，コンクリートおよびモルタルでは，載荷過程と除荷過程で同一経路を辿らず，完全除荷後の残留ひずみが確認できることから，非弾性的な挙動を示していることがわかる。一方，均質材のアクリルおよび MC ナイロンは，G55，G25，G0 に比べ載荷過程と除荷過程のひずみに差がなく，完全除荷後も残留ひずみは認められない。

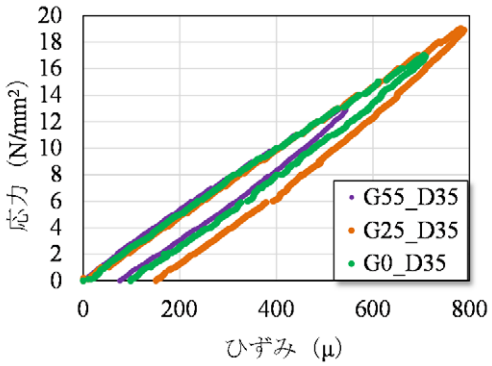
図－8 にアクリルおよび MC ナイロンの応力と超音波速度変化率の関係を示す。なお，グラフ中には距離補正ありとなしをプロットした。ここで，距離補正とは載荷試験中のひずみが，アクリルおよび MC ナイロンの場合，コンクリートの 3～4 倍生じたことから，コンクリート



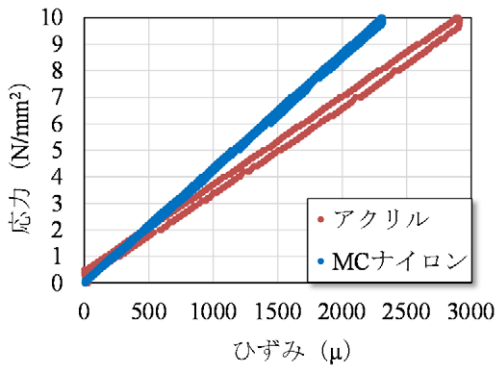
図－5　粗骨材量と音弾性定数 α の関係



図－6　粗骨材量と超音波速度変化率差 β の関係



(a)　G55，G25，G0（D35）



(b)　アクリル，MC ナイロン

図－7　応力ひずみ曲線

においては無視できていたセンサ間距離の変化を考慮に入れる必要があると考えられたため，各応力段階での測定距離の変化を得られたひずみから補正したものである。

図－8 より，均質材の両者においても応力の増減に伴う超音波速度変化率の増減が確認できる。一方，**図－4** の

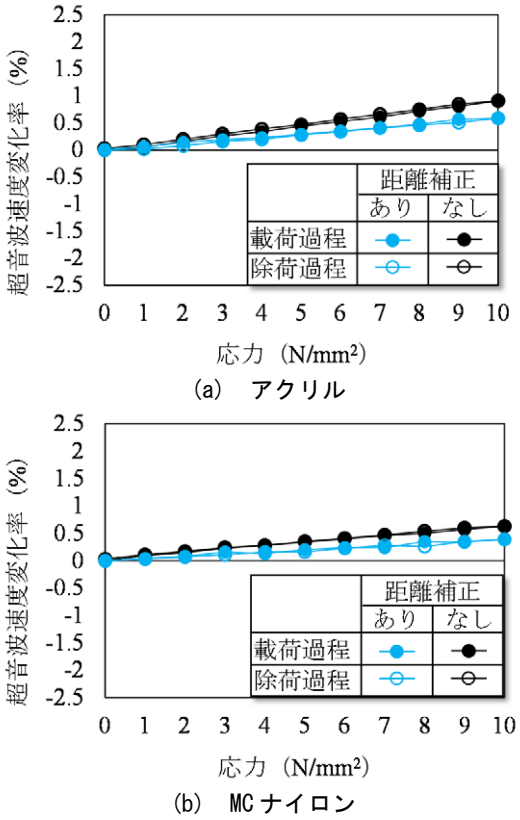
D7 および D35 の乾燥期間を設けた水準と比較すると，アクリルや MC ナイロンでは音弾性定数が小さいことがわかる。これは，3.2 で考察したように，コンクリートおよびモルタルにおいては，均質材料であるアクリルや MC ナイロンと異なり，載荷によって変化する遷移帯等が多く存在し，その結果，音弾性定数 α が大きくなったと考えられる。

また，**図－8** より，アクリルおよび MC ナイロンでは，載荷過程と除荷過程の超音波速度変化率に差は生じず，完全除荷後の超音波速度変化率もおよそ 0%となっている。均質材料では，応力ひずみ関係からコンクリートやモルタルと比較し理想的な弾性体と見なせ，載荷前後で超音波速度変化率差が生じないことから，コンクリートおよびモルタルでは，材料の不均一性により載荷除荷間で非弾性挙動を示し，その結果が載荷前後の超音波速度変化率差に繋がったと考えられる。さらに，粗骨材量が多いほど遷移帯量が多くなった結果，粗骨材量の増加に伴い $\Delta\beta$ が大きくなったと考えられる。

以上より，コンクリートおよびモルタルでは，遷移帯等の比較的変形しやすい組織の変化によって均質材料に比べ音弾性定数 α が大きくなり，非弾性挙動を示すことから載荷前後の超音波速度変化率差 $\Delta\beta$ が生じると考えられる。

4. 飽水度の違いが音弾性効果に及ぼす影響

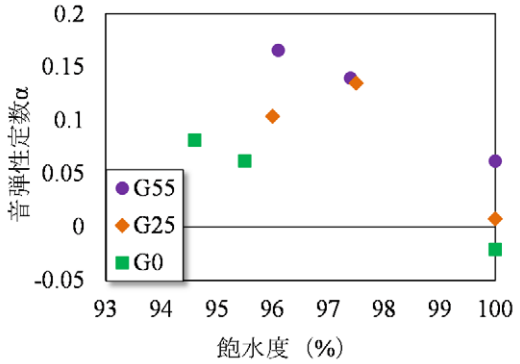
ここでは，音弾性定数 α と各供試体の飽水度の関係に着目し検討する。**図－9** に飽水度と音弾性定数 α の関係を示す。図より，G55，G0 では，飽水度の低下に伴い，音弾性定数 α は大きくなっていることがわかる。既往の研究[13]より，湿潤状態では，骨材周辺のポーラスな遷移帯やセメントペースト相の細孔に水が存在することにより，弾性波が伝搬しやすくなることから，無応力時の超音波速度が乾燥状態よりも高くなり，応力の増加に伴う弾性波速度の変化が小さいと報告されている。本研究においても，**表－3** に示す細孔が飽水状態と考えられる水中養生直後の供試体の無応力時の超音波速度は，7 日間乾燥期間を設けた供試体の無応力時の超音波速度より 3.9～6.1%高く，乾燥期間 35 日では 7.8～10.8%高い結果であった。一方，**表－3** より，乾燥期間あるいは供試体材齢が長くなると圧縮強度は高くなる傾向を示しているが，強度増分による組織形成の進行よりも水分逸散の程度が弾性波速度に及ぼす影響が大きいと考えられる。また，**表－3** より乾燥期間の増加に伴い静弾性係数が低下傾向を示すことから，飽水度 100%では内部に存在する水の影響で載荷時は比較的均質材に近い状態で組織が変化し音弾性定数 α が小さくなり，一方，乾燥により飽水度が低下すると比較的疎な組織内部の水が逸散し，載荷



(a) アクリル

(b) MC ナイロン

図－8 応力と超音波速度変化率の関係



図－9 飽水度と音弾性定数 α の関係

により疎な組織である遷移帯などの変形が大きくなることで静弾性係数が小さくなり，また音弾性定数 α は大きくなったと考えられる。

5. まとめ

本研究では，コンクリートの圧縮応力と超音波速度変化率の関係（音弾性効果）に影響を及ぼす諸要因について，粗骨材量と飽水度に着目し検討した。得られた知見を以下に示す。

(1) コンクリートの音弾性効果は，粗骨材量が多くなると音弾性定数が大きくなることがわかった。アクリルや MC ナイロンのような均質材料では，音弾性定数は小さいことから，コンクリートのような複合材料における超音波速度変化率の変化は，圧縮応力の増加に伴い，内部の微細空隙や遷移帯等の比較的変

形しやすい組織が収縮し，密になるために均質材料よりも大きな値として得られると考えられる。遷移帯量は粗骨材量により増減すると考えられることから，粗骨材量が多いほど音弾性定数が大きくなったと考えられる。

(2) 除荷過程において非弾性的な挙動を示すコンクリートでは，載荷前後で超音波速度変化率差が生じ，その差は粗骨材量が多いほど大きくなることがわかった。一方，均質材料とみなせるアクリルや MC ナイロンは除荷過程での非弾性挙動は見られず，載荷過程と除荷過程の超音波速度変化率差も生じない。載荷前後の超音波速度変化率差は材料の不均質性による組織の非弾性挙動により生じると推察される。

(3) 音弾性定数は飽水度の減少に伴い大きくなることがわかった。飽水度 100%（水中養生直後）では供試体は内部に存在する水の影響で，弾性波伝搬の観点において均質材料に近い組織状態のため，載荷による組織変化が生じにくくなり，音弾性定数が小さくなったと考えられる。乾燥により水分が逸散すると，組織の均質性が局所的に失われ，載荷による組織変化が大きくなり，音弾性定数が大きくなったと考えられる。

謝辞

本研究に際し，東京都立大学の宇治公隆教授にご助言いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) 公益社団法人　プレストレストコンクリート工学会：コンクリート構造診断技術，pp.25-26，2019.1
2) 木全伯光，岡村明彦，大島義信，宮川豊章：コンクリートの音弾性効果に関する基礎的研究，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，V-246，pp.491-492，2010.9
3) Oshima, Y., Okamura, A., and Kawano, H.: Stress evaluation in concrete members using ultrasonic propagation velocity, Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading - Proceedings of the 6th International Conference on Concrete under Severe Conditions(CONSEC2010), pp.127-134, 2010.
4) Ohno, K. et al.: The relation between applied stress and ultrasonic velocity variation in concrete under uniaxial compressive stress, PROGRESS in ACOUSTIC EMISSION XIX, The Japanese Society for NDI, pp.33-38, 2018.11
5) 森拓未，大野健太郎ほか：コンクリートの作用応力と超音波速度変化率に関する基礎的検討，土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集，V-173，pp.345-346，2018.8
6) Planès, T., Larose, E.: A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 53, pp.248-255, 2013.7
7) Bompan, K., F., Haach, V., G.: Ultrasonic tests in the evaluation of the stress level in concrete prisms based on the acoustoelasticity, Construction and Building Materials , Vol.162, pp.740-750, 2018.
8) 永田昂大，大野健太郎，篠崎裕生，野並優二：伝搬方向の異なる超音波の速度変化率を用いたコンクリートの応力推定手法の基礎検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1805-1810，2019.6
9) 永田昂大，大野健太郎ほか：コンクリートの応力と超音波速度変化率の関係に及ぼす鉄筋の影響：土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集，V-553，2019.8
10) 永田昂大，大野健太郎，上野敦，宇治公隆ほか：コンクリートの応力と超音波速度および速度変化率の関係，第 22 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集，pp.29-32，2019.10
11) 福岡秀和，戸田裕己，平尾雅彦：音弾性の基礎と応用，株式会社オーム社，p.8，1993.4
12) 永田昂大，大野健太郎，上野敦，宇治公隆：粗骨材がコンクリートの圧縮応力と超音波速度変化率の関係に及ぼす影響，土木学会第 75 回年次学術講演会講演概要集，V-368，2020.8
13) 松田秀和，佐竹将也，渡辺健，橋本親典：プレストレス状態における弾性波伝搬特性に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol41，No.1，pp.1727-1732，2019.6