

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粗骨材量が及ぼす影響

小森 由仁*1・大野 健太郎*2・賀上 諒太郎*3・永元 直樹*4

要旨：コンクリートの応力推定に関する著者らの既往の研究では、圧縮応力の増加に伴い載荷軸方向の超音波速度が増加し、単位応力当たりの速度変化率（音弾性定数）は粗骨材量が多くなるほど大きくなった。また、実構造物では、応力を導入した橋軸方向とその直角方向の超音波速度を用いてコンクリートの応力が推定される。ここで、載荷軸直角方向の音弾性定数に及ぼす粗骨材量の影響は未検討であるため、本研究では、粗骨材量を変化させた供試体で実験を行った。その結果、載荷軸直角方向では、応力増加に伴い超音波速度が僅かに減少すること、粗骨材量の増加に伴う超音波速度の変化は生じにくいことが確認された。

キーワード：応力推定, 超音波法, 音弾性定数, 超音波速度変化率, 粗骨材, 遷移帯

1. はじめに

プレストレストコンクリート (PC) 構造はコンクリートにプレストレスを与えることでコンクリートへの引張応力の発生を抑制した構造である。しかし、導入したプレストレスは鋼材のリラクゼーションやコンクリートのクリープ、乾燥収縮を要因として減少するため、残存プレストレス量の推定が維持管理において重要である。現在実用化されているプレストレス量の推定手法はコンクリートや鉄筋の一部破壊を伴うため、同じ位置で継続的な測定は困難であり、非破壊による応力推定手法の確立が望まれている。

筆者らは既往の研究¹⁾²⁾³⁾において、超音波法を用いたコンクリートの応力推定手法の確立を目指し検討を継続中である。本手法では、圧縮応力導入方向に伝搬する超音波速度 V_{stress} とその直交方向の超音波速度 $V_{nonstress}$ に着目し、超音波速度変化率 $\Delta V/V_{nonstress}=(V_{stress}-V_{nonstress})/V_{nonstress}$ が圧縮応力と相関することが既往の研究結果より示されている¹⁾。さらに、本手法を既設 PC 連続箱桁橋へ適用した結果、超音波速度変化率が計算上の応力と相関し、さらにコア切込み応力開放法から得られる応力の推定値とも相関することを報告している⁴⁾。

ここで、載荷軸方向に伝搬する超音波において、載荷過程における音弾性定数 α (単位応力当たりの超音波速度変化率の変化量)は粗骨材量の増加に伴い大きくなり、これはコンクリート内部の微細空隙や遷移帯等が収縮し、密になるためと推察されている³⁾。一方、除荷過程においては、粗骨材量が増加するほど載荷前後での超音波速度変化率差 $\Delta\beta$ が大きく、材料の不均質性による非弾性挙動による影響が示唆されている³⁾。なお、超音波法によ

る類似の検討^{5) 6)}では、音弾性定数および超音波速度変化率差は粗骨材種類によって異なることが示されており⁶⁾、これは用いる骨材により生成される遷移帯量が異なるためと報告されている。これらの粗骨材量、粗骨材種類あるいは遷移帯量が音弾性定数および超音波速度変化率差に及ぼす影響に関する検討では、超音波の伝搬方向が載荷軸方向のみの検討であり、載荷軸直角方向における粗骨材量と音弾性定数および超音波速度変化率差の関係、粗骨材周囲の遷移帯等の内部組織の挙動に関する検討は未検討である。実構造物での測定を考慮すると、粗骨材量 (あるいは遷移帯量) が載荷軸直角方向の音弾性定数および超音波速度変化率差に及ぼす影響の把握は不可欠と考えられる。

これらの背景から本研究では、載荷軸方向での検討手法³⁾を参考に、載荷軸方向および載荷軸直角方向における応力と超音波速度変化率の関係について、粗骨材量を変えて検討を行った。さらに、コンクリートやモルタルと比較して均質材料とみなせる MC ナイロン製の供試体においても同様の実験を行い、コンクリートやモルタルなどの複合材料と異なる材質の違いが各伝搬方向の音弾性定数および超音波速度変化率差に及ぼす影響について考察した。

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に粗骨材量が及ぼす影響を検討するため、コンクリート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

*1 東京都立大学 都市環境学部 都市基盤環境学科 (学生会員)

*2 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 東京都立大学 都市環境学部 都市基盤環境学科 (学生会員)

*4 三井住友建設(株) 土木本部構造開発技術室長 博士 (工学) (正会員)

表-1 コンクリートおよびモルタルの計画配合

	Gmax (mm)	SL (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
						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-2 力学的特性および載荷時の最大応力

	圧縮強度(N/mm ²)	静弾性係数(kN/mm ²)	載荷時の最大応力(N/mm ²)	無応力時の超音波速度(m/s)
G55	36.8	27.6	10	3908.9
G25	35.6	25.9	10	3795.1
G0	17.8	26.9	5	3649.7
MCナイロン	95.0	3.53	10	2635.1

とする)の3水準とした。また、材料構成の違いが音弾性定数および超音波速度変化率差に及ぼす影響について検討するため、コンクリートやモルタルと比較して均質材料とみなせるMCナイロン製の供試体についても併せて検討した。

2.2 供試体

コンクリートおよびモルタルの配合を表-1に示す。供試体は図-1に示す寸法400×400×100mmの版形状とし、各配合で1体ずつ作製した。供試体は材齢1日で脱型し、その後材齢28日まで水中にて養生した。その後、含水率調整のため、40°C、30%R.H.環境にて43日間保管し乾燥させた。これは、既往の検討結果³⁾より、コンクリートの含水状態が音弾性定数および超音波速度変化率差に影響することが報告されており、本研究では、短期間で出来るだけ実構造物の含水状態に近い環境での測定を模擬するため、このような含水率調整期間を設けた。また、G55およびG25ではφ100×200mm、G0ではφ50×100mmの円柱供試体をそれぞれ3本用いて算出した各供試体の材齢28日における圧縮強度と静弾性係数を表-2に示す。なお、MCナイロンの圧縮強度および静弾性係数においては、製品のカタログ値を記載した。ここで、G55およびG25の圧縮強度と比較すると、G0の圧縮強度が低いが、これはフレッシュ時の流動性が低く、圧縮強度試験用のテストピースの成型がやや困難であった結果と考えられる。

2.3 載荷方法および載荷試験時の最大応力

図-1に示すように耐圧試験機を用いて100×400mmの面に圧縮応力を作用させた。また、載荷軸直角方向の変形を拘束しないために、載荷面にはテフロンシートを挿入した。作用させた最大応力は表-2に示すように、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/mm²変化する度にパルサーにてパルス波をAEセンサ(60kHz共振型)に作用させ、信号入力を100回行った。超音波の測定面は型

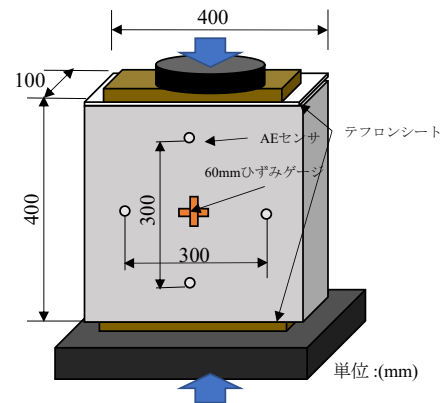


図-1 供試体概要とセンサ配置

枠底面とし、載荷軸方向および載荷軸直角方向の測定距離をそれぞれ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、サンプリング時間間隔0.1μsで記録した。得られた波形は超音波入力時間を基準とし、100波を重ね合わせた1つの波形として処理を行った。

2.5 超音波速度変化率の算出

超音波速度 V はセンサ間距離300mm、受信センサ検出波形の初動部から求めた到達時刻と超音波発信時刻の時間差 Δt を用いて式(1)から求めた。

$$V = \frac{0.300}{\Delta t} \quad (1)$$

また、超音波速度変化率は式(2)より求めた。

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_i - V_0}{V_0} \times 100(\%) \quad (2)$$

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である。

3. 粗骨材量の違いが音弾性定数および超音波速度変化率差に及ぼす影響

3.1 載荷軸方向における圧縮応力と超音波速度変化率の関係

図-2(a)に載荷軸方向における各水準の圧縮応力と超

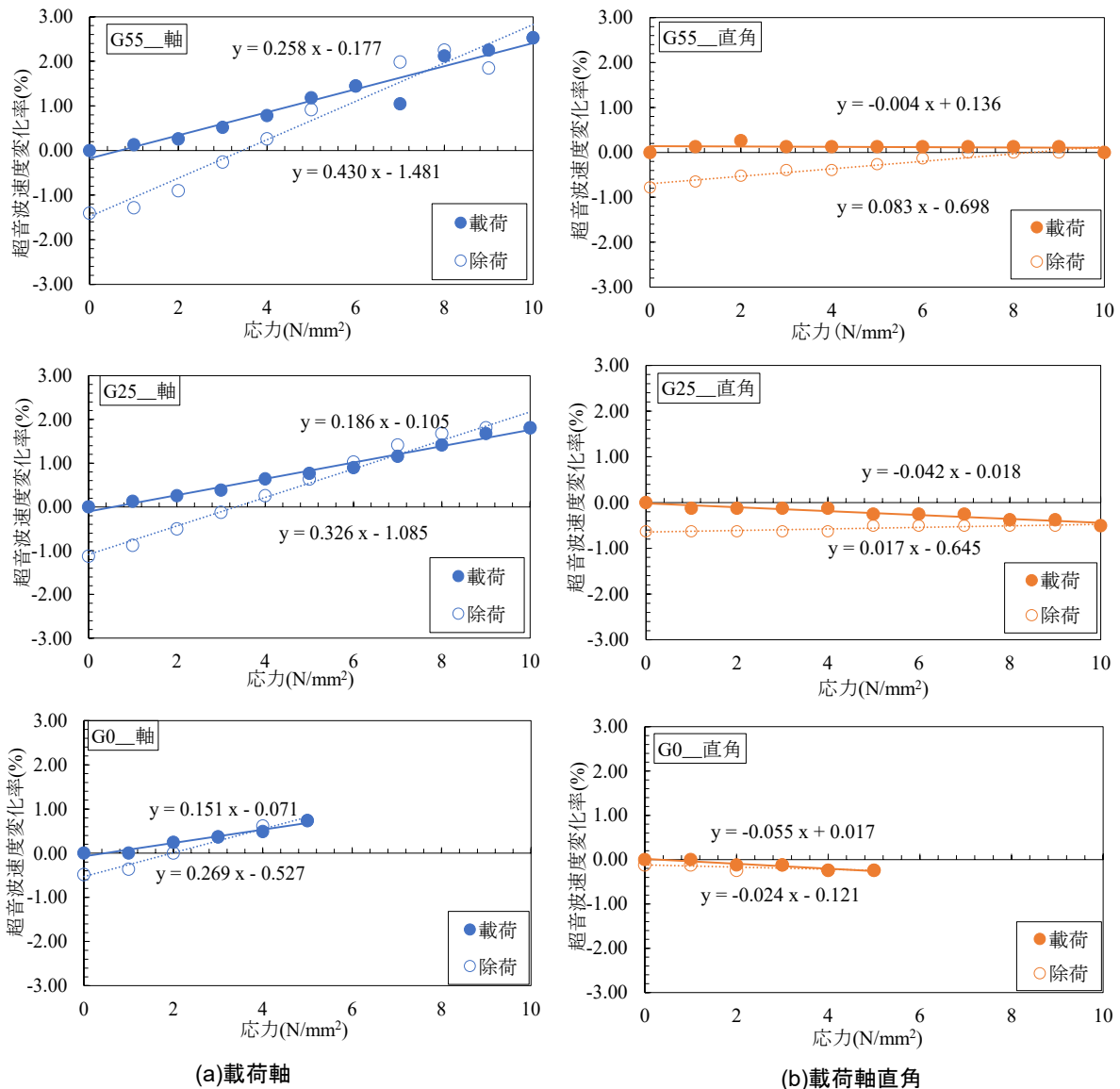


図-2 応力と超音波速度変化率の関係

音波速度変化率の関係を載荷および除荷過程の線形近似直線とともに示す。図より、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近似直線の傾き（音弾性定数 a ）および近似直線の切片差（応力 0N/mm^2 での載荷前後の超音波速度変化率差 $\Delta\beta$ ）は大きくなっていることがわかる。これは既往の研究結果³⁾と同様の傾向である。

3.2 載荷軸直角方向における圧縮応力と超音波速度変化率の関係

図-2(b)に載荷軸直角方向における各水準の圧縮応力と超音波速度変化率の関係を載荷および除荷過程の線形近似直線とともに示す。図より、水準によって応力の増減に伴う超音波速度変化率の傾向が違ってくる。G55においては、載荷過程では応力が増加しても超音波速度変化率はほとんど変化を示さず、音弾性定数が極めて0に近い値を示している。除荷過程では応力が減少す

るに伴い超音波速度変化率が減少する傾向を示している。G25においては、載荷過程、除荷過程ともに超音波速度変化率が減少する傾向を示している。G0においては、応力が増加するに伴い超音波速度変化率は減少し、応力が減少するに伴い超音波速度変化率が増加している。また、粗骨材量が少ないほど載荷過程および除荷過程の両過程において音弾性定数は小さくなり、載荷前後の超音波速度変化率差は粗骨材量が多いほど大きくなった。

3.3 均質材料での圧縮応力と超音波速度変化率の関係

図-3(a)に載荷軸方向におけるMCナイロンの圧縮応力と超音波速度変化率の関係を示す。なお、図中には、載荷中のひずみによるセンサ間距離の変化を補正した結果も併せて示す。ここで、コンクリートやモルタルではひずみが小さいことでセンサ間距離の補正は不要であると考えられたが、既往の研究³⁾と同様にMCナイロンのひずみがコンクリートの6倍程度大きいため、各応力段

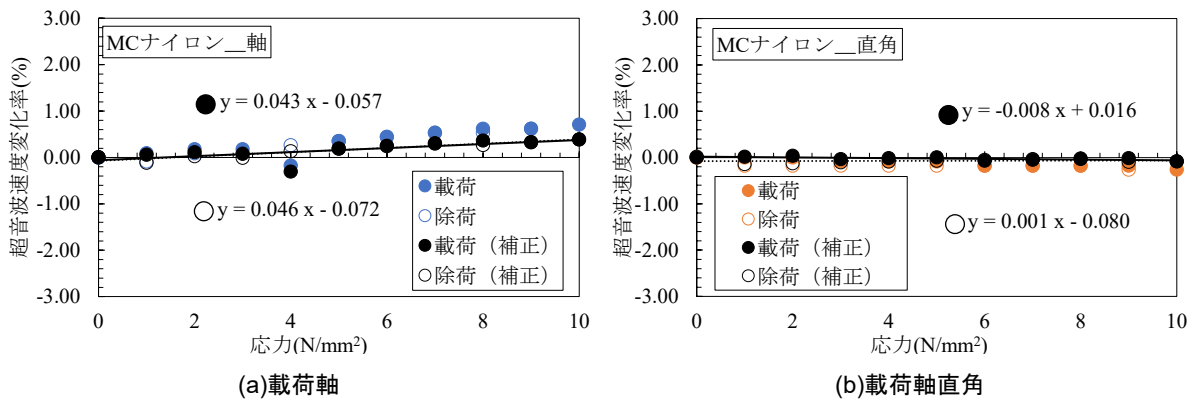


図-3 MC ナイロンにおける応力と超音波速度変化率の関係

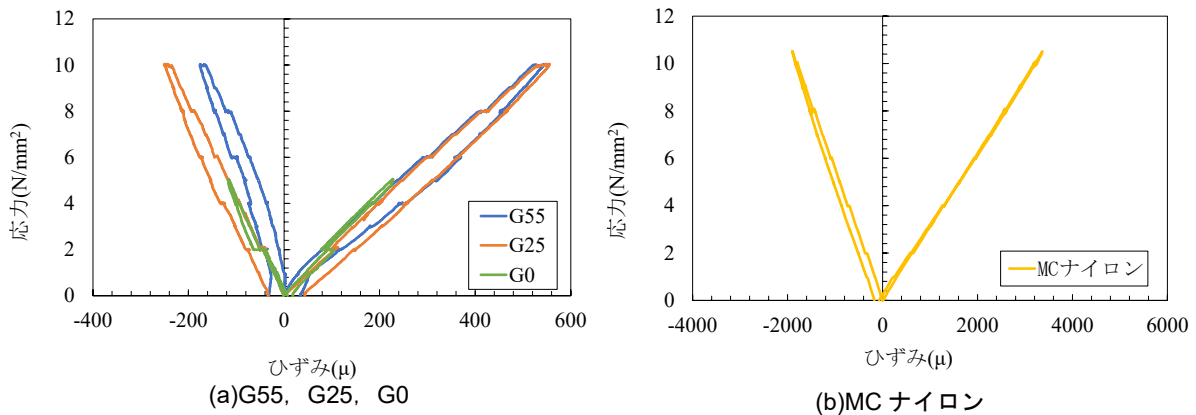


図-4 応力ひずみ曲線

階でセンサ間距離の補正を実施した。以降では、距離補正後の値で考察を行う。図より載荷過程の応力 4N/mm^2 を除いて、載荷過程と除荷過程において同一応力では超音波速度変化率に大きな差は生じず、載荷前後の超音波速度変化率差もおよそ 0% となっている。

図-3(b)に載荷軸直角方向における MC ナイロンの圧縮応力と超音波速度変化率の関係を示す。図より応力の増加に伴い超音波速度変化率は僅かに減少し、応力の減少に伴い超音波速度変化率は増加、すなわち載荷前の状態に戻る傾向が見られる。また、コンクリートやモルタルと比較すると、載荷過程と除荷過程における同一応力での超音波速度変化率は近い値を示しており、載荷前後の超音波速度変化率差もおよそ 0% となっている。

3.4 応力ひずみ曲線

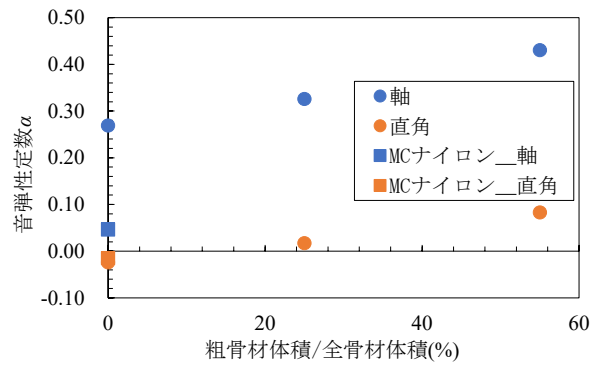
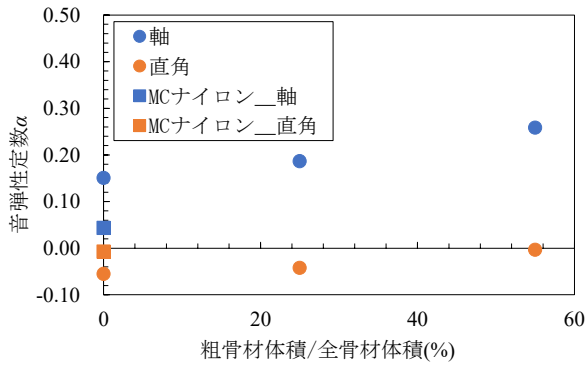
図-4 にコンクリートおよびモルタルと MC ナイロンの載荷試験時の応力ひずみ曲線を示す。なお、ここでは圧縮を正として示している。図よりコンクリートおよびモルタルにおいては載荷過程と除荷過程で同一経路を辿らず、除荷後に残留ひずみを生じていることから、非弾性挙動を示していることがわかる。MC ナイロンにおいては、縦ひずみは載荷過程と除荷過程で同一の経路を辿っており、除荷後の残留ひずみも小さくなっている。ま

た、コンクリートおよびモルタルと比較して、MC ナイロンでは載荷軸方向および載荷軸直角方向において載荷過程と除荷過程の傾きに差は生じない傾向にあり、弾性係数が近い値にあることがわかる。

3.5 粗骨材量と音弾性定数 α の関係

図-5(a)に載荷過程の載荷軸方向および載荷軸直角方向における粗骨材量と音弾性定数の関係を示す。図より、載荷軸方向においては全ての水準において正の値を示した。粗骨材量が多くなると音弾性定数が大きくなり、応力の増加に伴い超音波速度変化率が増加しやすいことがわかる。載荷軸直角方向においては全ての水準において負の値を示した。粗骨材量が多いと音弾性定数は 0 に近い値となり、応力増加に伴う速度変化率は生じにくいことがわかる。また、MC ナイロンは載荷軸方向および載荷軸直角方向ともにコンクリートおよびモルタルと比較して 0 に近い値を示した。特に、MC ナイロンの載荷軸直角方向では、極めて 0 に近い値を示しており、応力増加に伴う感度は非常に小さいと考えられる。

図-5(b)に除荷過程の載荷軸方向および載荷軸直角方向における粗骨材量と音弾性定数の関係を示す。図より、載荷軸方向においては全ての水準で正の値を示した。粗骨材量が多くなると音弾性定数が大きくなり、応力の減



(a) 載荷過程

(b) 除荷過程

図-5 粗骨材量と音弾性定数 α の関係

少に伴い超音波速度変化率が減少しやすいことがわかる。載荷軸直角方向においては G55 および G25 で正の値を示し、応力の減少に伴い超音波速度変化率が減少することがわかる。一方、G0 および MC ナイロンでは応力の変化に伴う超音波速度変化率の変動は小さく、応力に対する感度が小さいことがわかる。また、載荷軸方向と比較すると G0 と MC ナイロンが極めて近い値を示した。

3.6 粗骨材量と超音波速度変化率差の関係

図-6 に載荷軸方向および載荷軸直角方向それぞれの超音波速度変化率差（載荷過程および除荷過程の近似直線の切片差）と粗骨材量との関係を示す。図より、載荷軸方向、載荷軸直角方向ともに超音波速度変化率差は正の値を示し、粗骨材量が多いほど大きくなることがわかる。載荷軸方向と載荷軸直角方向を比較すると、全ての水準において載荷軸方向の超音波速度変化率差が大きくなっている。また、MC ナイロンにおいては載荷軸方向および載荷軸直角方向でコンクリートおよびモルタルと比較して 0 に近い値を示した。しかし、載荷軸方向より載荷軸直角方向の超音波速度変化率差が僅かに大きい値を示しており、これは図-4(b)に示した MC ナイロンの応力ひずみ曲線から、完全除荷後の残留ひずみが載荷軸方向に比べ載荷軸直角方向で大きいと考えられる。なお、載荷軸直角方向の残留ひずみが大きい理由は現段階では不明である。

3.7 音弾性定数および超音波速度変化率差に影響を与える要因

載荷軸方向において、既往の研究結果³⁾と併せて考察すると、圧縮応力の増加に伴い粗骨材周りの遷移帯が収縮し、超音波伝搬経路中の組織が密になることで超音波速度が増加し、単位応力当たりの速度増加率（音弾性定数）は粗骨材量が増加するに伴い大きくなると考えられる。また、コンクリートの不均一性による非弾性挙動から超音波速度変化率差が大きくなると考えられる。ここで、圧縮過程の粗骨材とモルタルの付着特性に関する熊野らの結果⁷⁾を参考にすると、載荷過程と除荷過程の付

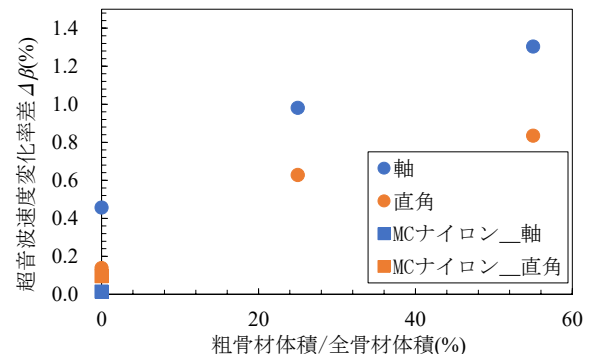
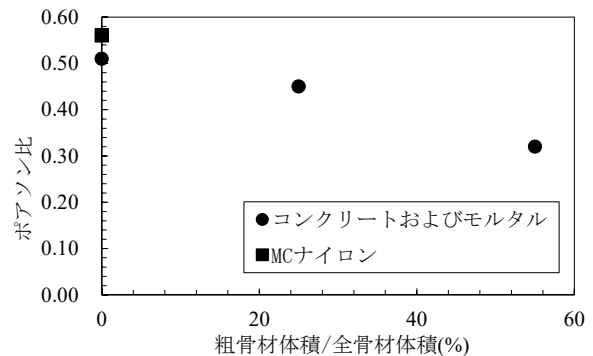
図-6 粗骨材量と超音波速度変化率差 $\Delta\beta$ の関係

図-7 粗骨材量とポアソン比の関係

着特性の違いが推察できる。すなわち、圧縮強度 40N/mm² 程度のモルタル相にひずみゲージを貼付した粗骨材を入れた供試体において、載荷軸方向の供試体全体のひずみと粗骨材 1 個の載荷軸方向のひずみが比較的低応力 (5N/mm² 程度) の段階から差が生じることが示されており⁷⁾、このことから、本研究で行った応力範囲においてもモルタル相と粗骨材の付着が低下したことが推察される。その付着低下の影響が除荷時に顕著に表れ、載荷過程と除荷過程で音弾性定数が異なり、超音波速度変化率が粗骨材量の増加に伴い大きくなる結果が得られたと考えられる。一方、MC ナイロンにおいては、コンクリートおよびモルタルと比較し均質材料かつ弾性挙動を示すことから、音弾性定数および超音波速度変化率差が小さい値を示すと考えられる。このことから、超音波速度変化率差は載荷により生じた微細組織の損傷の程度を

表すと考えられる。

載荷軸直角方向においては、ポアソン効果による載荷軸直角方向への引張応力が生じることで、音弾性定数が負の値を示すと考えられる。すなわち、音弾性定数は、圧縮応力作用下では正の値を示すパラメータであり、引張応力作用下では負の値を示す。図-7 に粗骨材量とポアソン比の関係を示す。なお、ポアソン比は最大応力段階における縦ひずみと横ひずみの比から算出した。粗骨材量が多いほど粗骨材が載荷軸直角方向への変形を抑制することでポアソン比が小さくなり、それに伴い G55 の載荷軸直角方向の音弾性定数は 0 に近い値を示したと考えられる。また、MC ナイロンの音弾性定数が 0 に近い値を示したことから、均質材料においては、ポアソン効果による膨張が載荷軸直角方向における超音波速度に大きな影響を与えなかったことがわかる。さらに、G55 の音弾性定数が 0 に近い値となったことから、粗骨材周りの遷移帯の載荷軸直角方向への膨張による超音波速度の減少は生じにくいと推察される。また、粗骨材量が増えるほど超音波速度変化率差が大きくなること、MC ナイロンにおける超音波速度変化率差が小さくなることから、載荷過程で横方向に膨張した粗骨材周りの遷移帯および微細組織が除荷過程で完全に元に戻ることができず、非弾性挙動の要因の 1 つとなっている可能性が示唆された。つまり、載荷軸直角方向においても超音波速度変化率差は載荷により生じた微細組織の損傷を示すパラメータであると考えられるが、載荷軸方向と比較すると損傷の程度が小さいと考えられる。

4. 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数に及ぼす粗骨材量の影響について、載荷軸方向および載荷軸直角方向の影響を検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリートおよびモルタルの載荷軸方向においては、既往の文献³⁾と同様の傾向を示し、圧縮応力の増加および減少に伴い、超音波速度変化率が増加および減少傾向を示した。また、粗骨材量が増えるほど音弾性定数および超音波速度変化率差は大きな値を示した。これは、粗骨材量の増加に伴う遷移帯量の増加と関連していると考えられる。
- (2) コンクリートおよびモルタルの載荷軸直角方向においては、音弾性定数は全ての水準で負の値を示し、粗骨材量が増加するに伴い 0 に近い値を示し、応力変化に対する感度が載荷軸方向と比較して非常に小さいことがわかった。超音波速度変化率差は全ての水準で正の値を示し、粗骨材量の増加に伴い大き

い値となった。

- (3) コンクリートおよびモルタルと比較して均質材料と考えられる MC ナイロンでは、載荷軸方向および載荷軸直角方向において、載荷過程と除荷過程の同一応力における超音波速度変化率は極めて近い値を示した。また、載荷軸方向の音弾性定数は応力に対する感度を有するが載荷軸直角方向では応力に対する感度は非常に小さいことがわかった。超音波速度変化率差はコンクリートおよびモルタルと比較して 0 に近い値を示した。

謝辞

本研究に際し、東京都立大学の上野敦准教授、鎌田知久助教にご助言いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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
- 2) 永田昂大, 大野健太郎, 篠崎裕生, 野並優二: プレストレスを導入したコンクリートの超音波速度変化率の経時変化とその変動要因に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1606-1611, 2020.6
- 3) 永田昂大, 大野健太郎, 玉置一清, 上野敦: コンクリート圧縮応力と超音波速度変化率の関数に及ぼす諸要因の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1121-1126, 2021.6
- 4) 大野健太郎, 玉置一清, 永元直樹, 広野邦彦: 超音波法による PC 連続箱桁橋のコンクリート応力推定法の提案と実橋検証, プレストレストコンクリート工学会第 31 回シンポジウム論文集, pp.339-342, 2022.10
- 5) 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, Vol.41, No.1, pp.1727-1732, 2019.6
- 6) 槌賀瑞樹, 渡邊健, 橋本親典, 石丸啓輔: 圧縮応力下でコンクリート中の超音波速度に粗骨材の岩種が及ぼす影響, アップグレード論文報告集, 第 22 巻, pp.381-384, 2022.10
- 7) 熊野知司, 檜田篤志, 葉山和則: コンクリート中における粗骨材のひずみ挙動に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.57-62, 2016.6