

論文 トンネル覆工コンクリートの強度発現と鋼板打撃による周波数応答特性の関係

樋渡 洸^{*1}・大野 健太郎^{*2}・歌川 紀之^{*3}・北川 真也^{*4}

要旨：筆者らは、トンネル覆工コンクリートの脱型時期推定を目的として衝撃弾性波法の適用を検討しており、天端模擬供試体を用いた既往の検討結果ではコンクリートの強度発現に伴う周波数応答特性の変化が確認された。ここで、鋼板打撃に用いる鋼球径やセントルの鋼板厚、覆工コンクリート厚の各要因が周波数応答特性に影響する可能性が考えられた。そこで、天端模擬供試体にて実験を行い、上記の各要因が周波数応答特性および強度推定に及ぼす影響について検討した。また、波形の計測条件が周波数応答特性に及ぼす影響についても併せて検討した。その結果、本手法が脱型時期判定手法として有効であることが示唆された。

キーワード：覆工コンクリート、脱型時期推定、衝撃弾性波法、周波数応答特性、ゲイン増加率

1. はじめに

山岳トンネル工事における覆工コンクリートの施工順は、側壁から天端へ向けてコンクリートが打ち込まれるため、最終打込み箇所となる天端が最も若材齢となる。また、覆工コンクリートの施工で用いられるセントル（鋼製型枠）の脱型は、通常、コンクリート打設完了後 12～20 時間で取り外している例が多く、脱型時目標圧縮強度は 2～3N/mm²を目安としている場合が多い¹⁾。ところが、施工サイクル（2日に1回の打設）を考慮すると、目安の強度が発現する前に取り外す場合もあるとされ²⁾、若材齢となる天端においてコンクリートの剥離、剥落の懸念がある。したがって、覆工コンクリートの施工時における強度および脱型時期の推定手法が求められている。

既存の脱型時期判定手法として、反発度³⁾、超音波法⁴⁾、有効材齢⁵⁾、積算温度⁶⁾等を用いた手法が検討されているが、いずれの手法もセントル内のコンクリートに対して直接計測を行うため、セントルの一部改造を伴う、もしくは硬化後のコンクリート内部にセンサ等の機器が残留されるため、セントルを介したコンクリートの強度推定手法が望まれている。

このため、本研究ではセントルを介した覆工コンクリートの若材齢強度推定を非破壊試験方法である衝撃弾性波法を用いて実施し、覆工コンクリートの脱型時期判定の適用性について検討した。本手法では、覆工コンクリートの強度発現とトンネル内空のセントル面を鋼球打撃した際の周波数成分の変化の関係を把握し、脱型時期推定の可能性を検討するものである。これにより、セントル内のコンクリートに直接触れることなく、型枠を介して間接的に施工位置コンクリートの脱型時期推定が可能となると考えられる。

既往の検討^{7,8)}では、覆工コンクリート天端を模擬した供試体に対し衝撃弾性波法を適用することで、コンクリートの強度発現に伴い周波数成分が高周波側へ移行する傾向が確認された。また、コンクリート打込み前の周波数スペクトルに対するコンクリート打込み後の各材齢での周波数スペクトルの応答、すなわち周波数応答特性に着目したゲイン増加率が、コンクリートの強度発現に伴って増加し、ゲイン増加率が強度推定指標として有効であることが示された。ここで、強度推定指標のゲイン増加率がコンクリートの強度発現のみに依存して値が変化しているのか、あるいはその他の要因（例えば、打撃に用いる鋼球、コンクリート厚、鋼板厚など）による影響が含まれるかについては現時点で未確認である。

以上のことから、本稿では覆工コンクリートの天端を模擬した供試体にて、鋼球径やコンクリート厚、鋼板厚を変えて衝撃弾性波法を適用し、各要因が周波数応答特性に及ぼす影響について検討した。また、波形の計測条件（サンプリング時間間隔やサンプリング時間長）がゲイン増加率に及ぼす影響についても併せて検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体は図-1(a)に示すように、4辺支持した 650×650mm の鋼板上に 500×500mm のコンクリートを打込むことで、鋼板をセントルとして覆工コンクリートの天端を模擬した。なお、本研究では鋼板厚およびコンクリート厚が振動特性に及ぼす影響を検討するため、鋼板厚を 6mm と 9mm の 2 水準（s6 シリーズ、s9 シリーズと称す）、コンクリート厚を 100mm と覆工の設計巻厚の標準である 300mm⁹⁾の 2 水準（c100、c300 と称す）とした。それぞれ

*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 准教授 博士(工学)（正会員）

*3 佐藤工業（株） 技術センター 土木研究部 上席研究員 博士(工学)（正会員）

*4 佐藤工業（株） 土木事業本部 設計部 設計第二課長（正会員）

表－1 コンクリートの配合

	Gmax (mm)	SL (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	A
s6シリーズ	20	8	55	4.5	47.4	172	313	836	935	1.096
s9シリーズ	20	8	55	4.5	47.7	172	313	838	926	1.409

表－2 試験パラメータ，試験材齢および略称

水準 (略称)	鋼板厚 (mm)	コンクリート厚(mm)	鋼球径 (mm)	Δt(μs)	衝撃弾性波法の試験材齢(h) (下線は圧縮強度試験を併せて行った材齢)
s6c100	6	100	19,30,40	0.1	0,1,2,3, <u>5,6,7,8,9,10,11,12</u> , <u>14,15,16</u> , <u>18</u> , <u>20</u> , <u>22</u> , <u>24</u>
s6c300		300	40,63	0.1	0,1, 3, 5,6,7,8,9,10,11,12,13, 24
s9c100	9	100	30,40,63	0.1,0.5,2.5	0,1, 3, <u>5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15</u> , <u>17,18</u> , <u>24</u>
s9c300		300	30,40,63	0.1,0.5,2.5	0,1, 3, 5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18, 24

のシリーズの計画配合を表－1 に示す。また、図－1 に示す供試体と同一のコンクリートにてφ100×200mmの円柱供試体を作製し、圧縮強度試験に用いた。各供試体は20℃、60%R.H.の恒温恒湿環境に静置し、供試体中央部の熱電対（図－1(b)）にて打設直後から1分間隔で温度を計測した。

2.2 衝撃弾性波法および圧縮強度試験

衝撃弾性波法による計測では、図－1 に示す供試体の鋼板下面の中央部を鋼球で打撃し、打撃位置から100mm離れた位置に設置した加速度計（感度：5mV/(m/s²），周波数範囲±3dB：3～10,000Hz）にて信号を記録した。表－2 に実験パラメータ，試験材齢および水準（略称），表－3 に各水準での試験項目をそれぞれ示す。s6c100 ではφ19, 30, 40mmの鋼球，s6c300 ではより大きなエネルギーの入力を目的としφ40, 63mmの鋼球，s9c100 および s9c300 ではφ30, 40, 63mmの鋼球を用いて鋼板を打撃した。

ここで、FFT（高速フーリエ変換）により算出される周波数スペクトルの分解能Δfは、サンプリング時間長：T、サンプリング数：S、サンプリング時間間隔：Δtから式(1)で示される。

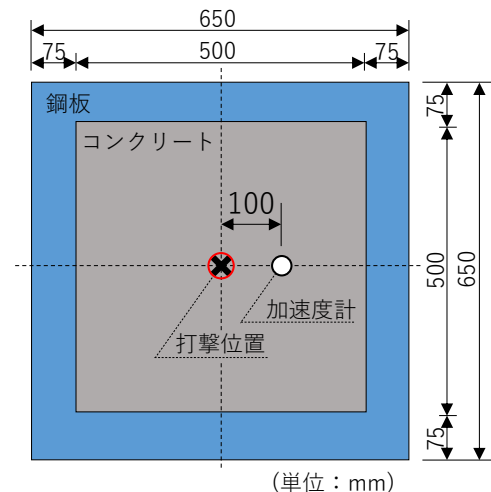
$$\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{1}{S \Delta t} \quad (1)$$

式(1)より周波数分解能はサンプリング数と時間間隔に依存する。既往の検討^{7,8)}およびs6シリーズではS：20,000個，Δt：0.1μsで信号を記録し、FFTを16,384個のサンプル数で実施したため、s6シリーズではΔf≒0.61kHzとなり、0.61kHz未満の低周波領域の振動特性が把握できなかった。このため、s9シリーズではS：20,000個，Δt：0.1, 0.5, 2.5μsで波形を記録し、周波数分解能Δfを0.61, 0.12, 0.024kHzの3水準とすることで、低周波領域および周波数分解能が周波数応答特性に及ぼす影響について検討した。

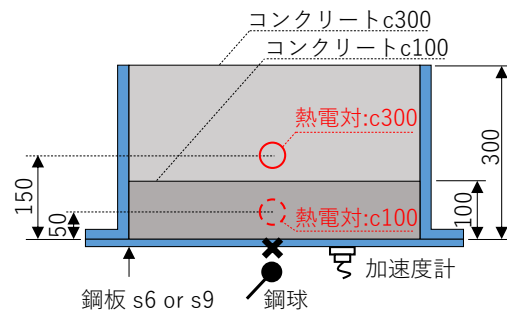
なお、衝撃弾性波法による計測と並行して、表－2 下線部に示すs6c100 および s9c100 の材齢で圧縮強度試験を実施した。圧縮強度試験は、円柱供試体打込み面を石膏でキャッピングし、載荷速度を0.01N/mm²/sとして実施した。

表－3 各水準の試験項目

水準 (略称)	衝撃弾性波法	圧縮強度試験	温度計測	
			天端模擬供試体	円柱供試体
s6c100	○	○	○	—
s6c300	○	—	○	○
s9c100	○	○	○	○
s9c300	○	—	○	○



(a) 平面図



(b) 正面図

図－1 天端模擬供試体概要

2.3 周波数応答関数の算出

鋼球打撃X(f)により生じた振動を加速度計を含めた記録装置U(f)で記録した際の波形Y(f)は、一般に式(2)で表され

る。

$$Y(f) = X(f) \cdot D(f) \cdot U(f) \quad (2)$$

ここで、 $D(f)$ は振動媒体を表し、「 $\cdot$ 」は周波数領域での積を表す。

本研究の振動媒体 $D(f)$ は、鋼板 $S(f)$ 、コンクリート $C(f)$ の2成分から構成されると考えられ ($D(f)=S(f) \cdot C(f)$)、このうち $C(f)$ は経過材齢に伴い強度発現し、物性変化を示す項であると考えることができる。したがって、この $C(f)$ の変化のみを抽出することができれば、コンクリートの強度推定指標として用いることができる。このことから、コンクリート打込み前の振動 $Y_0(f)$ とコンクリート打込み後の材齢 t の振動 $Y_t(f)$ の間には、式(3)で示される周波数応答関数 $H_t(f)$ が存在すると考えられる。

$$\begin{aligned} H_t(f) &= \frac{Y_t(f)}{Y_0(f)} = \frac{X(f) \cdot D_t(f) \cdot U(f)}{X(f) \cdot D_0(f) \cdot U(f)} = \frac{D_t(f)}{D_0(f)} \\ &= \frac{S(f) \cdot C_t(f)}{S(f)} = C_t(f) \end{aligned} \quad (3)$$

なお、本研究では、各材齢において鋼球打撃による入力 $X(f)$ は同一の信号入力が行えたものと仮定して検討を行うこととした。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの強度発現と温度履歴

図-2に材齢経過に伴う円柱供試体 (s6c100, s9c100) の圧縮強度の推移を示す。図中の材齢はセメントと水の接水時刻を 0h として算出した。図より、圧縮強度は全体的に s6c100 で強度発現が早い傾向を示すものの、概ね同様の傾向を示した。図-3 に円柱供試体および天端模擬供試体

(TC) の温度の推移を示す。図より、円柱供試体の温度履歴は、練上り温度の違いによって材齢 2h 程度までばらつくものの、材齢 2h 以降は概ね同様の温度履歴となった。一方、天端模擬供試体の温度 (TC) では、10h 程度までは全ての水準で同様の温度履歴を示すが、10h 以降ではコンクリート厚ごとに異なる温度履歴を示し、コンクリート厚 100mm よりも 300mm 厚の場合に高い温度傾向となった。図-2,3 の結果より、s6 シリーズと s9 シリーズでの配合の違いによる強度発現の差は小さいと考えられるが、天端模擬供試体ではコンクリート厚により温度履歴が異なり、それに伴い強度発現が異なると考えられる。したがって、温度履歴を考慮した強度として、図-2,3 から得た円柱供試体の積算温度と圧縮強度の関係に天端模擬供試体の積算温度を代入することで得られた天端模擬供試体の推定強度を各材齢のコンクリート強度として以降の考察を進めることとする。なお、積算温度と圧縮強度の関係は、円柱供試体の圧縮強度試験と温度計測を同時に行った s9c100 の円柱供試体から得られたデータから構築した。

図-4 に s9c100 の積算温度と圧縮強度の関係を示す。なお、指数関数および1次関数を用いた近似式を併せて示す。図より、各近似式の決定係数は直線近似で 0.992、指数近似で 0.743 となり、指数近似に比べて直線近似では高い相関を示した。このため、式(4)に示す近似直線を用いて天端模擬供試体の推定強度を算出した。

$$y = 0.0079x - 1.5792 \quad (4)$$

ただし、 $185 \leq x \leq 756$ とする。

3.2 コンクリート厚および鋼板厚の影響

図-5 に s9c300、鋼球径 40mm、サンプリング時間間隔

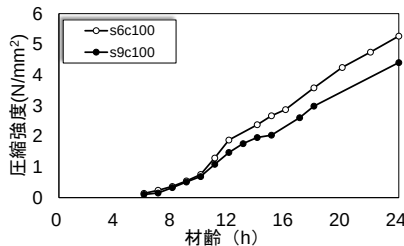


図-2 円柱供試体の圧縮強度

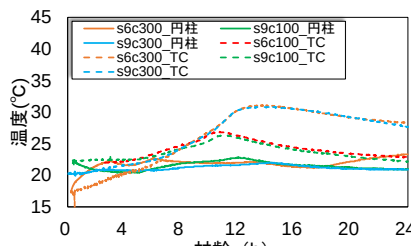


図-3 天端模擬供試体 TC と円柱供試体の温度

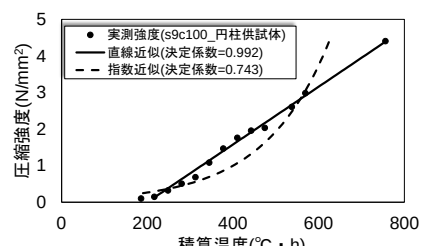


図-4 積算温度と圧縮強度の関係

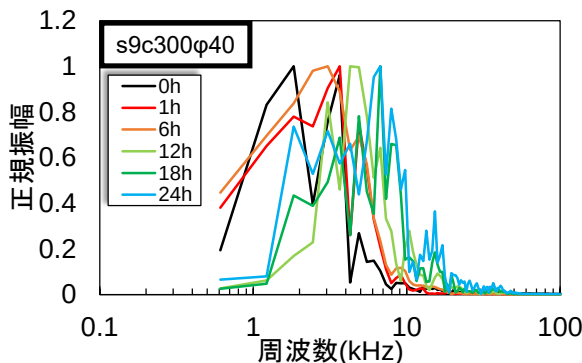


図-5 周波数スペクトル

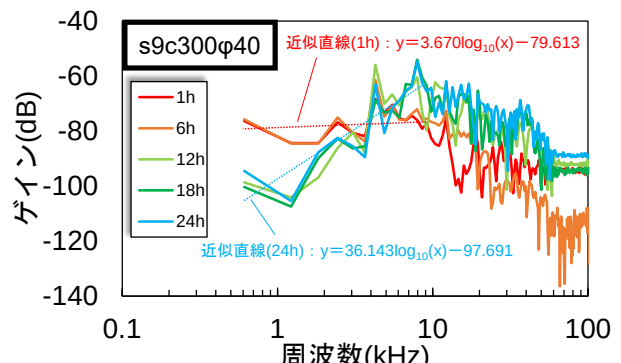


図-6 周波数応答関数

0.1 μ s（周波数分解能 0.61kHz）で計測した各材齢での周波数スペクトルを示す。図より、既往の検討^{7,8)}と同様にコンクリートの強度発現に伴い卓越する周波数成分が 1kHz 付近から 10kHz 付近に向けて移行する傾向が確認された。この傾向は、コンクリート厚、鋼板厚、鋼球径によらず全ての条件で同様に確認された。

図-6 に、図-5 の計測結果を用いて、コンクリート打込み前（材齢 0h）の振動特性に対する各材齢の振動特性を表す周波数応答関数 $H(f)$ を示す。図より、材齢の経過に伴い 1kHz 付近では周波数応答が低く、10kHz 付近では周波数応答が高くなる傾向が確認された。これは、周波数スペクトルが前述のように高周波側へ移行する現象、すなわちコンクリートの強度発現に伴う変化を反映していると考えられる。そのため、加速度計の周波数応答特性と既往の研究成果に基づき⁸⁾、0.61～10kHz までの近似直線の傾きをゲイン増加率と定義すれば、図-6 に示すように材齢 1h では 3.670dB/dec、材齢 24h では 36.143dB/dec となり、材齢の進行に伴い近似直線の傾き（ゲイン増加率）は大きくなる。このことからゲイン増加率を強度推定の評価指標とした。

図-7 にサンプリング時間間隔 0.1 μ s（周波数分解能 0.61kHz）で得られた全水準のゲイン増加率の推移を示す。ここで、凡例を s（鋼板厚）c（コンクリート厚） ϕ （鋼球径）とし、各天端模擬供試体の推定強度を併せて示す。図より、全体的な傾向として、材齢経過に伴いゲイン増加率は増加傾向を示し、コンクリート厚 100mm では -10～30dB/dec の範囲で緩やかに増加するのに対し、コンクリー

ト厚 300mm では -10～50dB/dec の範囲でやや急激な増加傾向を示した。

ここで、加速度計で得られた振動の主成分が全体（鋼板とコンクリート）のたわみ振動と仮定すると、四辺固定された矩形薄板の固有振動数 F_{ij} は式(5)で表される¹⁰⁾。また、曲げ剛性 D の算出を式(6)に示す。

$$F_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho'}}$$
 (5)

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu^2)}$$
 (6)

ここで、 λ_{ij} ：振動モードの固有値、 ij ：モード数、 a ：板の代表寸法、 ρ' ：面密度、 E ：ヤング係数、 h ：板厚、 ν ：ポアソン比とする。

式(5)および式(6)に示すように、四辺固定された薄板の振動は曲げ剛性の平方根に比例し、曲げ剛性は板厚の 3 乗に比例する。すなわち、コンクリート厚 300mm（以下、c300 と称す）はコンクリート厚 100mm（以下、c100 と称す）と比較して同一材齢時に曲げ剛性は 27 倍高く、c300 は c100 に比べて高い周波数を示すと考えられる。このため、c300 では c100 と比較し周波数スペクトルが高周波側に移行し、ゲイン増加率が大きく評価されたと考えられる。また、材齢経過に伴うコンクリートの強度発現によりコンクリートと鋼板の付着特性（一体性）が高くなると仮定すると、若材齢時にはコンクリートと鋼板の付着特性が乏しく、鋼板の振動の影響が卓越することで、いずれの条件のゲイン増加率も同程度の値を示し、材齢経過およびコンクリート

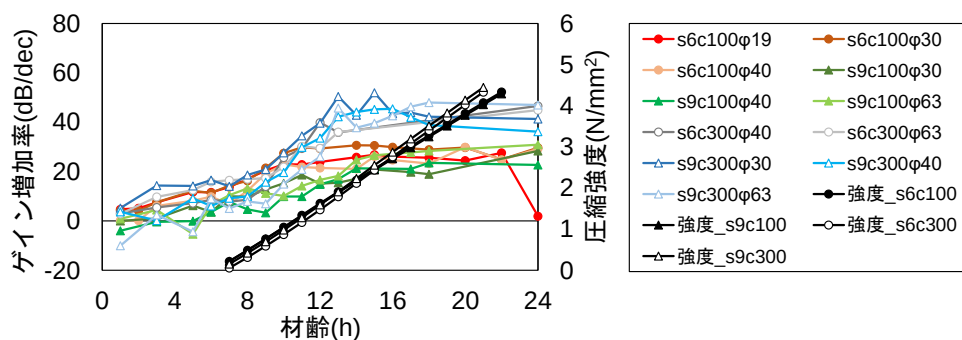


図-7 材齢経過に伴うゲイン増加率の推移

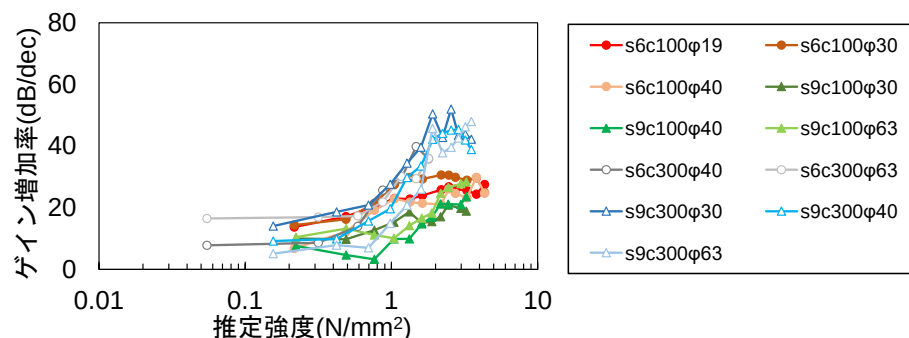


図-8 圧縮強度とゲイン増加率の関係

の強度発現に伴い鋼板とコンクリートが一体となって振動することで、コンクリート厚の違いによりゲイン増加率が異なる傾向を示したと考えられる。

一方、図-7より、コンクリート厚の影響と比較すると、鋼板厚および使用した鋼球径が周波数応答関数に及ぼす影響は明確に確認されなかった。これは、式(3)に示したように、周波数応答関数を算出する際に、コンクリート打込み前と打込み後で共通する項の影響は相殺されたことが要因であると考えられる。

図-8にサンプリング時間間隔 $0.1\mu\text{s}$ (周波数分解能 0.61kHz) で得られたゲイン増加率と天端模擬供試体の推定強度の関係を示す。図より、コンクリート厚 300mm では鋼板厚および鋼球径によらず、実施工でのセントル脱型の目安となる 2N/mm^2 程度までゲイン増加率が増加傾向を示し、 2N/mm^2 以降では変化が小さい傾向を示した。これは、コンクリートの硬化に伴う弾性係数の変化が振動特性に影響を及ぼした結果と考えられる。すなわち、式(6)から弾性係数の増加により式(5)中の曲げ剛性 D が増加し、その結果として振動の周波数が高くなる。このため、 2N/mm^2

以前は弾性係数の増加に伴う周波数成分の変化が大きく、 2N/mm^2 以降では弾性係数の増加に伴う周波数成分の変化が比較的小さくなったことが要因として考えられる。したがって、本手法により 2N/mm^2 以上の強度推定を行う場合には、弾性係数の変化に伴う周波数の僅かな変化を取得可能な、より高感度な入力および検出方法が必要と考えられ、今後の検討課題とする。

3.3 周波数分解能が周波数応答特性に及ぼす影響

サンプリング時間間隔 Δt 別に各材齢で得られた周波数スペクトルおよび周波数応答関数を図-9, 10に示す。ここでは、s9c300、鋼球径 40mm で得られたものを示す。図-9より、周波数分解能を向上させることで、 0.61kHz よりも低い周波数の挙動が明瞭となり、本計測では 0.1kHz 以下の成分はほとんど含まれていないことがわかる。これは、加速度計の一定感度を有する周波数範囲が 0.003kHz 以上であることを考慮すると、 0.1kHz 以下の振動は生じていないと判断できる。次に、図-10より、周波数応答関数は 1kHz 付近で最小となり、コンクリートの強度発現に伴い約 2kHz 以下の周波数領域では周波数応答が低下し、それ

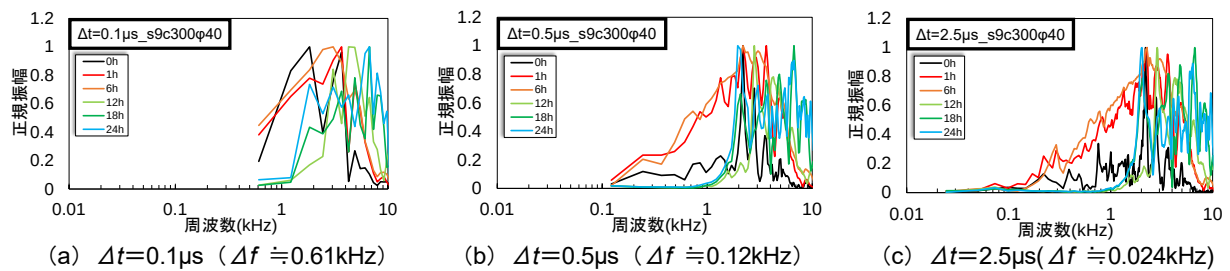


図-9 Δt ごとの周波数周波数スペクトル

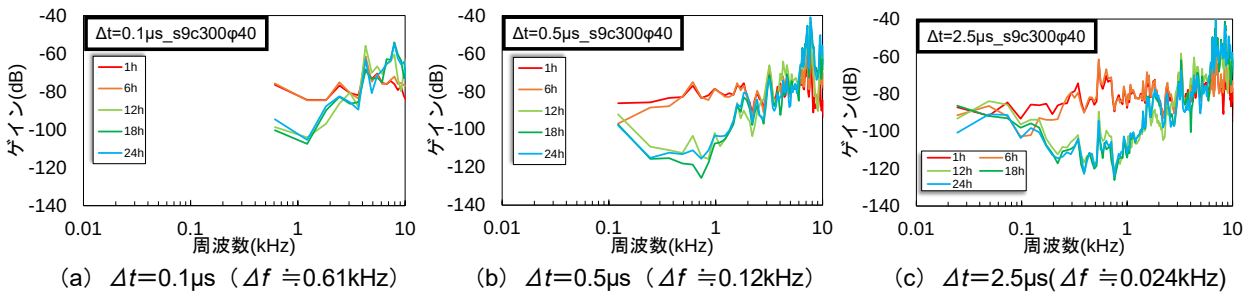


図-10 Δt ごとの周波数応答関数

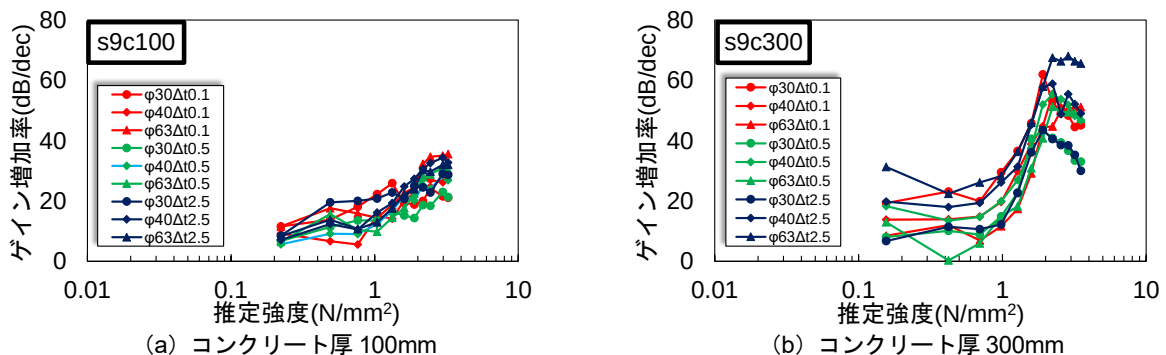


図-11 Δt ごとのゲイン増加率の推移

以上の領域では周波数応答が 10kHz 付近まで増加する傾向が確認された。この傾向は、コンクリート厚および鋼球径によらず同様であった。このため、周波数応答関数において 1~10kHz のゲインの近似直線から傾きを算出し（ゲイン増加率）、このゲイン増加率を強度推定指標として以下の検討を行った。

図-11 に Δt を変えた各水準で得られたゲイン増加率と天端模擬供試体の推定強度の関係をコンクリート厚ごとに示す。ここで、凡例を ϕ （鋼球径） Δt （サンプリング時間間隔）とした。図-11 は図-8 と同様なゲイン増加率の増加傾向を示しており、周波数分解能 Δf の違いによるゲイン増加率の明確な変化はみられなかった。このため、図-9, 10 で示される周波数の取得領域を考慮し、サンプリング数 20,000 個ではサンプリング時間間隔 0.5~2.5 μ s、すなわちサンプリング時間長 10~50ms で計測することが望ましいと考えられる。一方、図-11 よりコンクリート厚 300mm において、圧縮強度 2N/mm² 以上で圧縮強度の増加に伴いゲイン増加率が低下する傾向を示した。この傾向は、材齢経過に伴い 1kHz 付近の低周波域のゲインが僅かに増加したことが要因であり、コンクリート厚 100mm ではこのような傾向は確認されなかった。このような傾向の違いが生じた要因は現時点で不明であり、今後の課題とする。

ここで、図-8, 11 より、覆工コンクリートの設計巻厚標準となる 300mm ではゲイン増加率 40dB/dec 程度で実施工でのセントル脱型強度の目安 2N/mm² 程度となり、ゲイン増加率の値から覆工コンクリートの脱型時期を判定できる可能性が示された。この指標は、コンクリート厚さに応じて変わる可能性があり、他のコンクリート厚さでの脱型時の目安となるゲイン増加率は異なると考えられる。なお、今後も強度推定の精度向上に向けたデータの蓄積が必要である。

4. 結論

本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) 覆工コンクリート天端模擬供試体に衝撃弾性波法を適用した結果、コンクリートの強度発現に伴い振動の周波数成分が高周波側へ移行し、ゲイン増加率はコンクリートの圧縮強度と相関すると推察される。
- (2) 強度推定指標としたゲイン増加率は、鋼球径および鋼板厚には影響を受けず、コンクリートの強度発現に加え、コンクリート厚さの影響を受けることが確認された。
- (3) 衝撃弾性波法では、サンプリング時間間隔 0.5~2.5 μ s、サンプリング時間長 10~50ms で信号計測を行うこ

とが望ましく、1kHz から 10kHz の間の周波数応答関数の傾きをゲイン増加率とすることで推定強度と相関を示した。

- (4) 本実験の範囲では、覆工の標準巻厚 300mm の場合、脱型可能強度である 2N/mm² に相当するゲイン増加率は 40dB/dec 程度となり、ゲイン増加率から覆工コンクリートの脱型時期が推定できる可能性が示唆された。

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をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー第 102 号 トネルコンクリート施工指針(案), pp.15-16, 2000.8
- 2) 鈴木健, 諏訪至：覆工の型枠の取り外し時期の検討, 土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会講演概要集, VI-10, 2020.9
- 3) 高取秀和, 川崎元, 鈴木昌次, 綾野克紀：PT 型シュミットハンマーを用いたトンネル覆工コンクリートの脱型時強度の推移方法, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, VI-303, pp.605-606, 2008.9
- 4) 塚本耕治, 廣中哲也：超音波を用いた覆工コンクリートの若材齢強度推定に関する検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, VI-010, pp.19-20, 2014.9
- 5) 野口貴文ほか：スマートセンサ型枠システムのスライドセントルへの適用(その 1), 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, VI-335, pp.669-670, 2013.9
- 6) 京免継彦, 宇野洋志城, 桑原嗣, 乾川尚隆：脱型時期判定を目的とした積算温度管理に関する一考察, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, VI-013, pp.25-26, 2010.9
- 7) 樋渡洗ほか：若材齢コンクリートの圧縮強度と鋼板-コンクリート間の弾性波伝搬特性の関係, 土木学会第 76 回年次学術講演会講演概要集, V-332, 2021.9
- 8) 大野健太郎ほか：鋼板打撃による若材齢コンクリートの周波数応答特性と圧縮強度の関係, 土木学会第 77 回年次学術講演会講演概要集, VI-250, 2022.9
- 9) 土木学会：2016 年制定トンネル標準示方書[共通編]・同解説／[山岳工法編]・同解説, pp.76-79, 2016.8
- 10) 山岸豪敏, 坂田展甫, 大鶴徹：長方形板の振動特性解析, 日本建築学会計画系論文報告集, No.357, pp.1-7, 1985.11