

超音波を用いたPC部材の応力度評価および シリンダー法による簡便な透気性評価手法の開発

～徳島大学における非破壊試験によるコンクリートの品質評価の取り組み～

徳島大学大学院 社会産業理工学研究部

 辺 健

本日の講演内容

- 鉄筋コンクリート部材を対象とした非破壊試験について
- 非破壊試験に関する研究紹介
- 将来展望



鉄筋コンクリート部材を対象とした 非破壊試験について



コンクリート橋（構造物）における非破壊試験の適用（１）

コンクリート橋（構造物）で用いられる手法と得られるデータ

調査方法		得られるデータ（例）
反発度に基づく方法	反発度法	コンクリートの反発度 （強度推定に使用される場合もある）
電磁誘導を利用する方法	鋼材の導電性および磁性を利用する方法	コンクリート中の鋼材の位置，径，かぶり
	コンクリートの誘電性を利用する方法	コンクリートの含水状態
弾性波を利用する方法	打音法	コンクリート中の浮き，剥離
	超音波法	コンクリートの弾性波速度 （弾性係数や強度推定に使用される場合もある） コンクリートのひび割れ深さ コンクリート中の浮き，剥離
	衝撃弾性波法	内部欠陥 部材厚さ・部材寸法 PCグラウトの未充填箇所の検出
	アコースティック・エミッション（AE）法	内部ひび割れ進展



出展：土木学会 社会インフラメンテナンス学

コンクリート橋(構造物)における非破壊試験の適用(2)

調査方法		得られるデータ(例)
電磁波を利用する方法	X線法	鋼材の位置, 径, かぶり PCグラウトの充填状況
	赤外線法 (サーモグラフィ法)	浮き, 剥離, 空隙 表面のひび割れの分布状況
	電磁波レーダ法	鋼材の位置, 径, かぶり コンクリートの浮き, 剥離, 内部空隙
電気化学的方法	自然電位法	鋼材の腐食傾向
	分極抵抗法	鋼材の腐食速度
	四電極法	コンクリートの電気抵抗

出展：土木学会 社会インフラメンテナンス学

新しい非破壊試験の開発・提案

- ・コンクリートの物質移動性・表層品質の評価手法
 - ・非接触の測定が可能な手法
 - ・内部可視化手法(トモグラフィ技術)
 - ・未開拓の波長領域の利用(テラヘルツ波など)
- etc.



日本非破壊検査協会規格 NDISの紹介 * RC部門のみ

NDIS規格一覧

番号	規 格 名 称	制定年月日	改正年月日	制定／改正
NDIS 1401	コンクリート構造物の放射線透過試験方法	1992/4/22	2009/3/16	-
NDIS 2426-1	コンクリート構造物の弾性波による試験方法― 第1部 超音波法	2009/6/29	-	-
NDIS 2426-2	コンクリートの非破壊試験―弾性波法―第2部:衝撃弾性波法	2009/6/29	2014/9/11	改正中
NDIS 2426-3	コンクリート構造物の弾性波による試験方法 第3部 打音法	2009/6/29	-	-
NDIS 3418	コンクリート構造物の目視試験方法	1993/5/28	2022/9/08	-
NDIS 3419	ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法	1999/8/18	2011/4/18	-
NDIS 3422	グルコン酸ナトリウムによる硬化コンクリートの単位セメント量試験方法	2002/8/29	2020/11/18	-
NDIS 3424	ボス供試体の作製方法及び試験方法	2005/11/28	2011/2/17	2021/9/7 廃止
NDIS 3429	コンクリートの非破壊試験―鉄筋平面位置及びかぶり厚さの電磁波レーダー試験方法―	2011/2/17	2021/3/3	-
NDIS 3430	電磁誘導法によるコンクリート構造物中の鉄筋探査方法	2011/2/17	-	-
NDIS 3432	構造体コンクリートと一体成形された供試体の試験方法通則	2011/2/17	2021/9/7	-
NDIS 3433	硬化コンクリート中の塩化物イオン量の簡易試験方法	2017/9/12	-	-
NDIS 3434-1	コンクリートの非破壊試験―打撃試験方法 第1部:一般通則	2017/5/19		-
NDIS 3434-2	コンクリートの非破壊試験―打撃試験方法 第2部:接触時間試験方法	2017/5/19	-	-
NDIS 3434-3	コンクリートの非破壊試験―打撃試験方法 第3部:機械インピーダンス試験方法	2017/5/19	-	6 -

日本非破壊検査協会規格 NDISの紹介(2) * RC部門のみ

NDIS 3435	コンクリートの非破壊試験-鉄筋平面位置及びかぶり厚さの試験方法の種類とその選択	2015/9/15	-	-
NDIS 3436-1	コンクリートの非破壊試験―表層透気試験方法 第1部:一般通則	2020/8/27	-	-
NDIS 3436-2	コンクリートの非破壊試験―表層透気試験方法 第2部:ダブルチャンバー法	2020/8/27	-	-
NDIS 3436-3	コンクリートの非破壊試験―表層透気試験方法 第3部:シングルチャンバー法	2020/8/27	-	-
NDIS 3436-4	コンクリートの非破壊試験―表層透気試験方法 第4部:ドリル削孔法	2020/8/27	-	-
NDIS 3436-5	コンクリートの非破壊試験―表層透気試験方法 第5部:校正器	2020/8/27	-	-
NDIS 3437	硝酸銀溶液の噴霧による硬化コンクリートの塩化物イオン浸透深さの試験方法	2021/3/3	-	-
NDIS 3438	コンクリートの反発速度比の測定方法	-	-	制定中
NDIS 3439	コンクリートの小径コアによる圧縮強度の試験方法	2022/11/17	-	
NDIS 3440	コンクリートの透水・吸水試験方法	-	-	制定中
NDIS 3441	ボス供試体による静弾性係数試験方法	2021/9/7	-	-
NDIS 3442	ボス供試体による促進中性化試験方法	2021/9/7	-	-
NDIS 3443	ボス供試体による長期モニタリング試験方法	2021/9/7	-	-
NDIS 3444	立方体ボス供試体の作製方法及び圧縮強度試験方法	2021/9/7	-	-

非破壊検査協会規格NDIS⇒JIS化された規格 * RC部門のみ

番号	規 格 名 称	制定年月日	改正年月日	制定／改正
JIS A 1163	ボス供試体の作製方法及び圧縮強度試験方法	2020/1/27	-	-



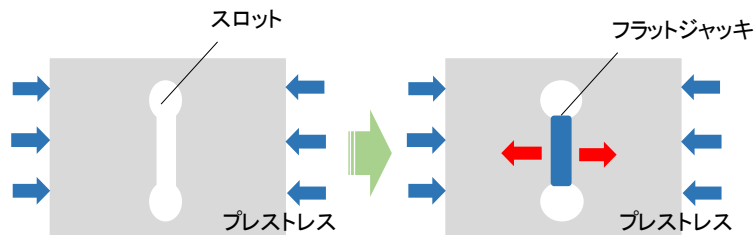
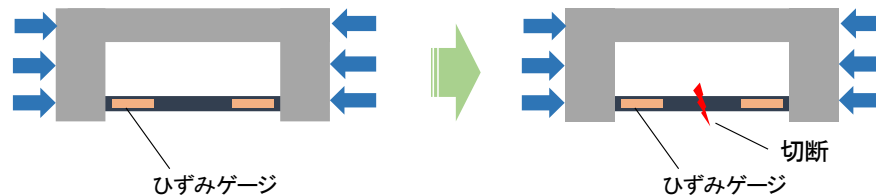
研究紹介(その1)

- 超音波を用いたプレストレスト・コンクリート部材の
応力度評価

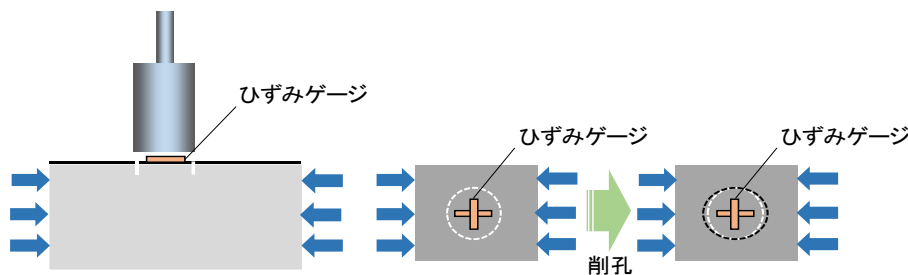


研究背景(既往のプレストレス評価)

■ PC部材における従来のプレストレス評価手法



スロットストレス法



コンクリート応力解放法

■ 従来手法

- ・鉄筋切断法
- ・スロットストレス法
- ・コア切込応力解放法

■ 問題点

- ・微破壊を伴う
- ・調査時間が長い
- ・費用が高価

■ 課題

- ・非破壊的かつ簡易な評価手法の確立

研究の目的: 超音波法による原位置での応力度評価

コンクリート中の弾性波伝搬特性
を利用したプレストレス評価手法
の確立に向けた研究



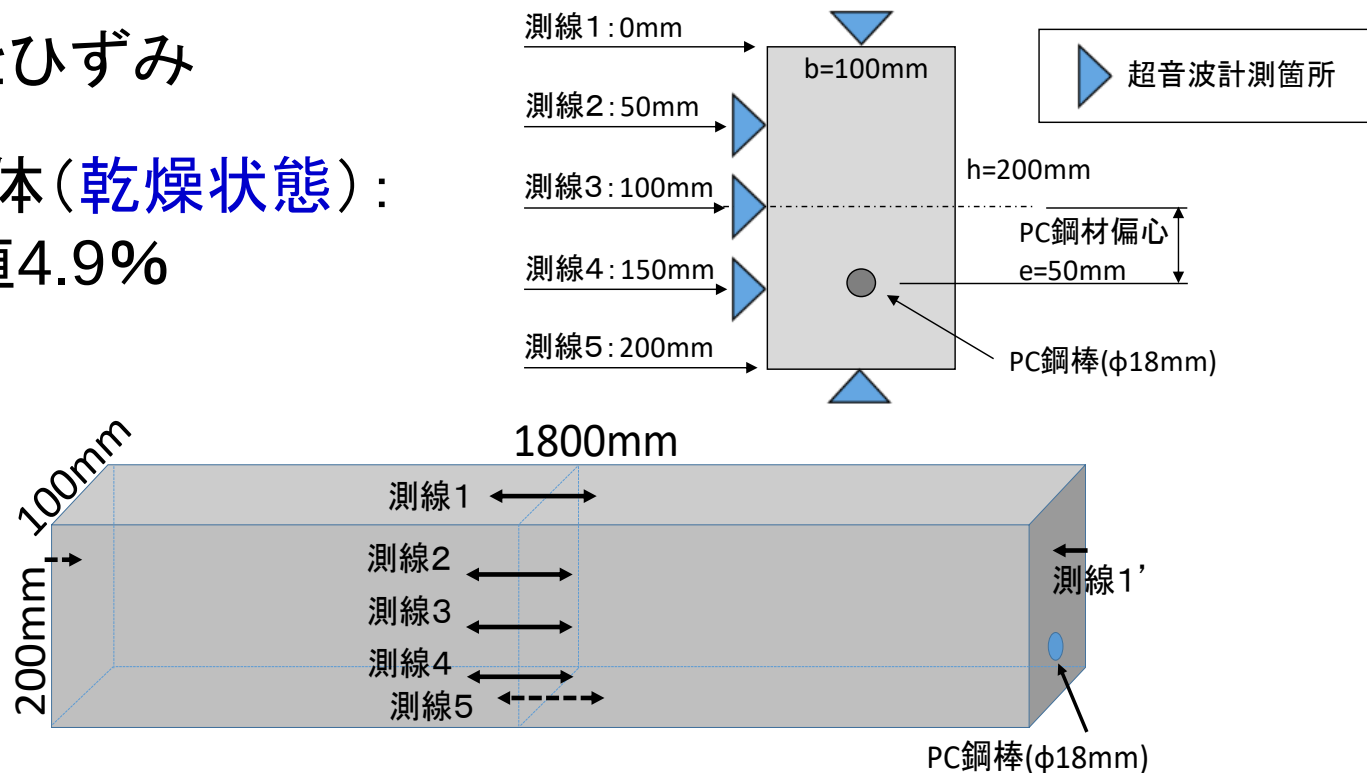
- コンクリート中を伝搬する超音波の速度を用いてPC桁の健全性を評価することを目的
- 実用化に向け、より現地での作業性に優れる小型のハンディタイプの超音波計測機を使用



プレストレスト・コンクリート梁部材での実験

梁の応力度とひずみ

PC梁供試体(乾燥状態):
表面水分値4.9%



PC梁供試体の形状と測定方法

緊張力(kN)	0	40	80	120	160	120	80	40	0
計算上の上縁引張応力度(N/mm ²)	0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	0.0
計算上の下縁圧縮応力度(N/mm ²)	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	15.0	10.0	5.0	0.0
上縁ひずみ(μ) ※(+)伸び	0	11	33	55	74	62	44	24	9
下縁ひずみ(μ) ※(-)縮み	0	-147	-284	-421	-552	-441	-310	-171	-10
表面水分率	4.9								

プレストレスト・コンクリート梁部材での実験

配合表

供試体	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)						
		W (水)	C (セメント)	S (砂)	G (粗骨材)	G (細骨材)	AEA (AE減水剤)	SP (高性能AE減水剤)
PC梁 供試体	40	161	403	761	376	563	2.02	6.1



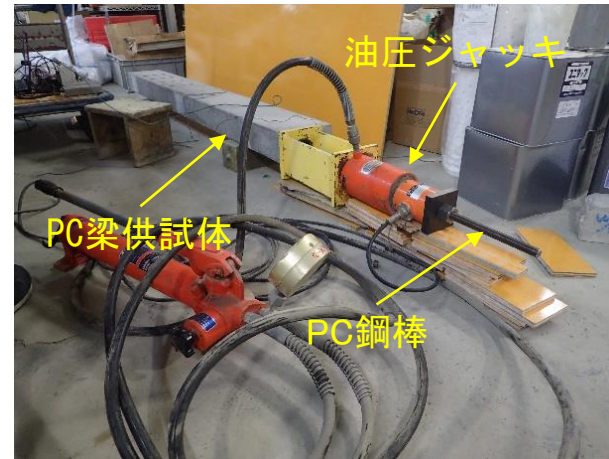
圧縮強度 : 75.7 N/mm²
静弾性係数 : 31.4 kN/mm²

- ・ 供試体 : 28日間湿潤養生後, 気中にて乾燥



プレストレスト・コンクリート梁部材での実験

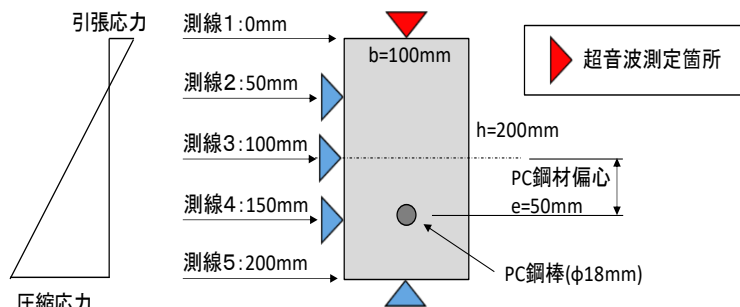
PC梁供試体とプレストレス載荷方法



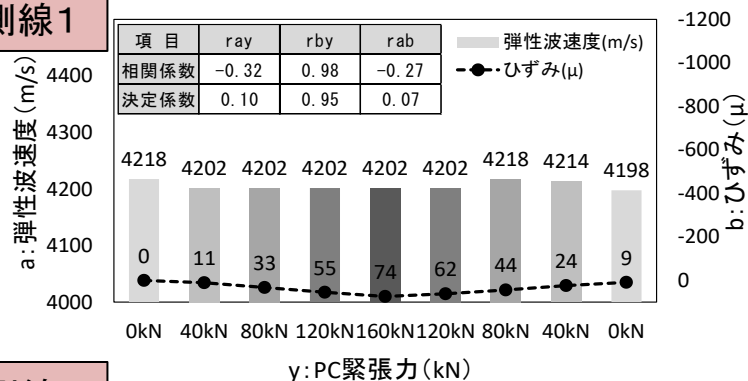
油圧ジャッキによるPC梁供試体への荷重載荷状況

実験結果

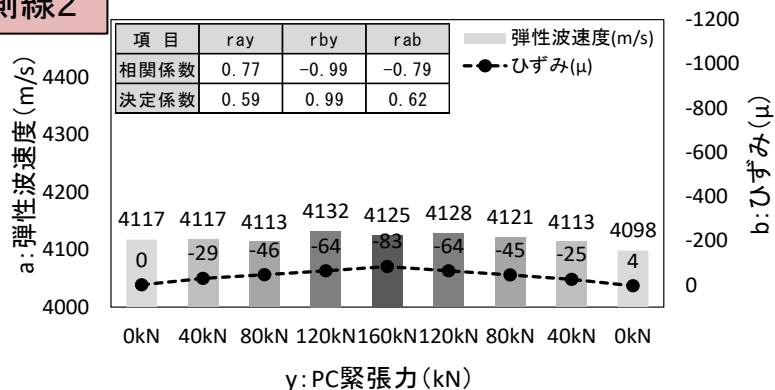
超音波法: 全側線結果



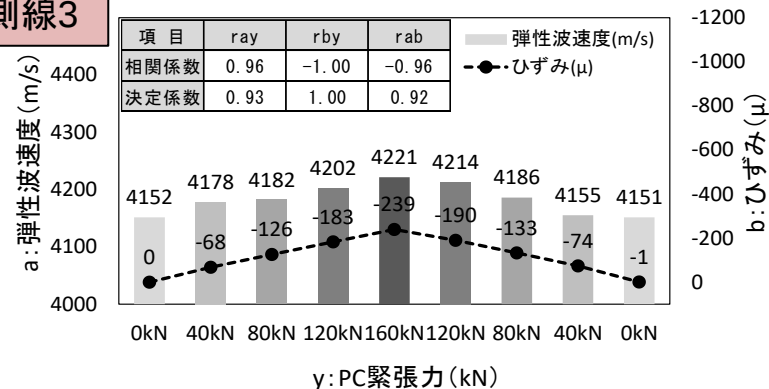
・測線1



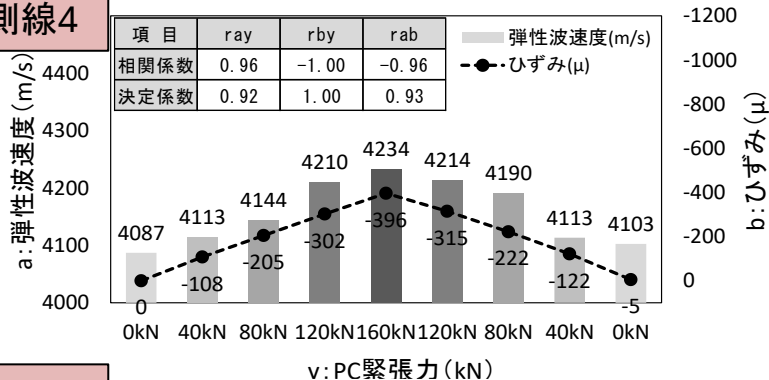
・測線2



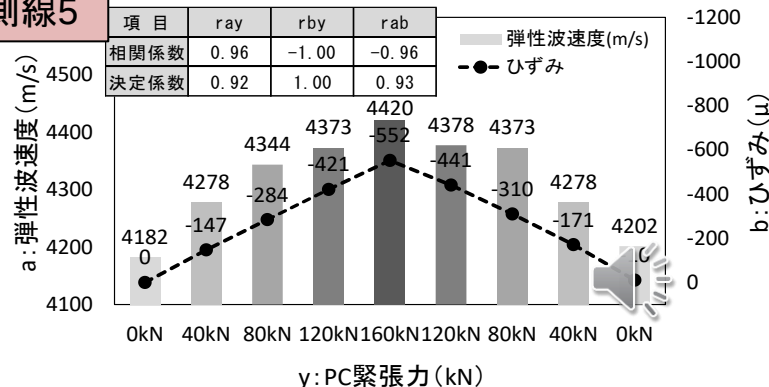
・測線3



・測線4



・測線5



⇒ 各側線で高い相関性、荷重除荷時も同様な変化率であることを確認

弾性波速度の測定方法：超音波法



写真 超音波計測機による現地測定状況

弾性波速度の測定について

- ・高所作業車を用いて、PC桁の下面で弾性波速度の測定を実施
測線の設置も含めた主桁1箇所あたりの測定時間は約5分程度で可能
⇒定期点検の近接目視に合わせて調査が可能であることを確認



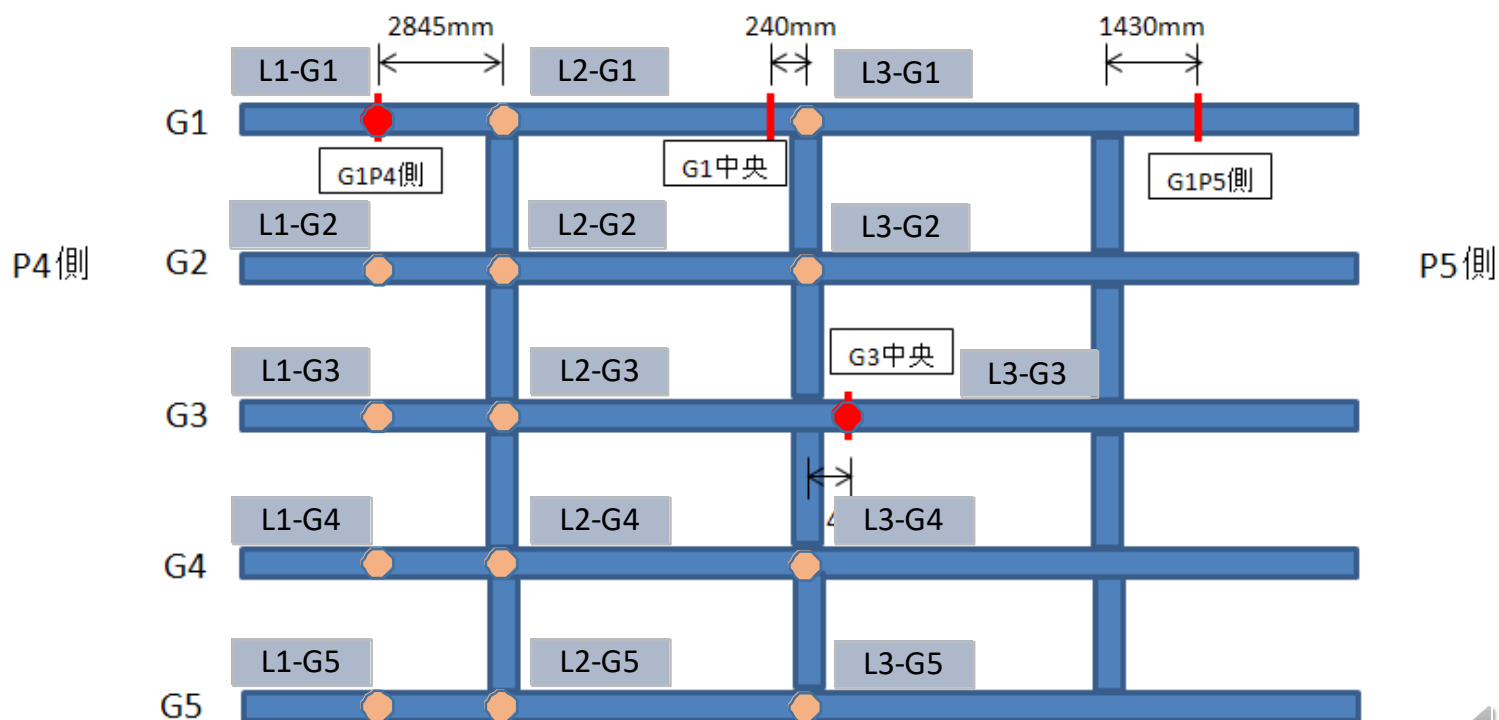
実橋梁での測定箇所

測定箇所について

測点	横桁からの距離(m)	方向	桁端からの距離(m)
G1 P4側	2.845	P4側へ	5.330
G1 中央	0.240	P4側へ	15.735
G1 P5側	1.430	P5側へ	6.745
G3 中央	0.460	P5側へ	15.515

■測定箇所

- ・支間1/8 : L1測線
- ・支間1/4 : L2測線
- ・支間1/2 : L3測線



● 応力開放調査箇所

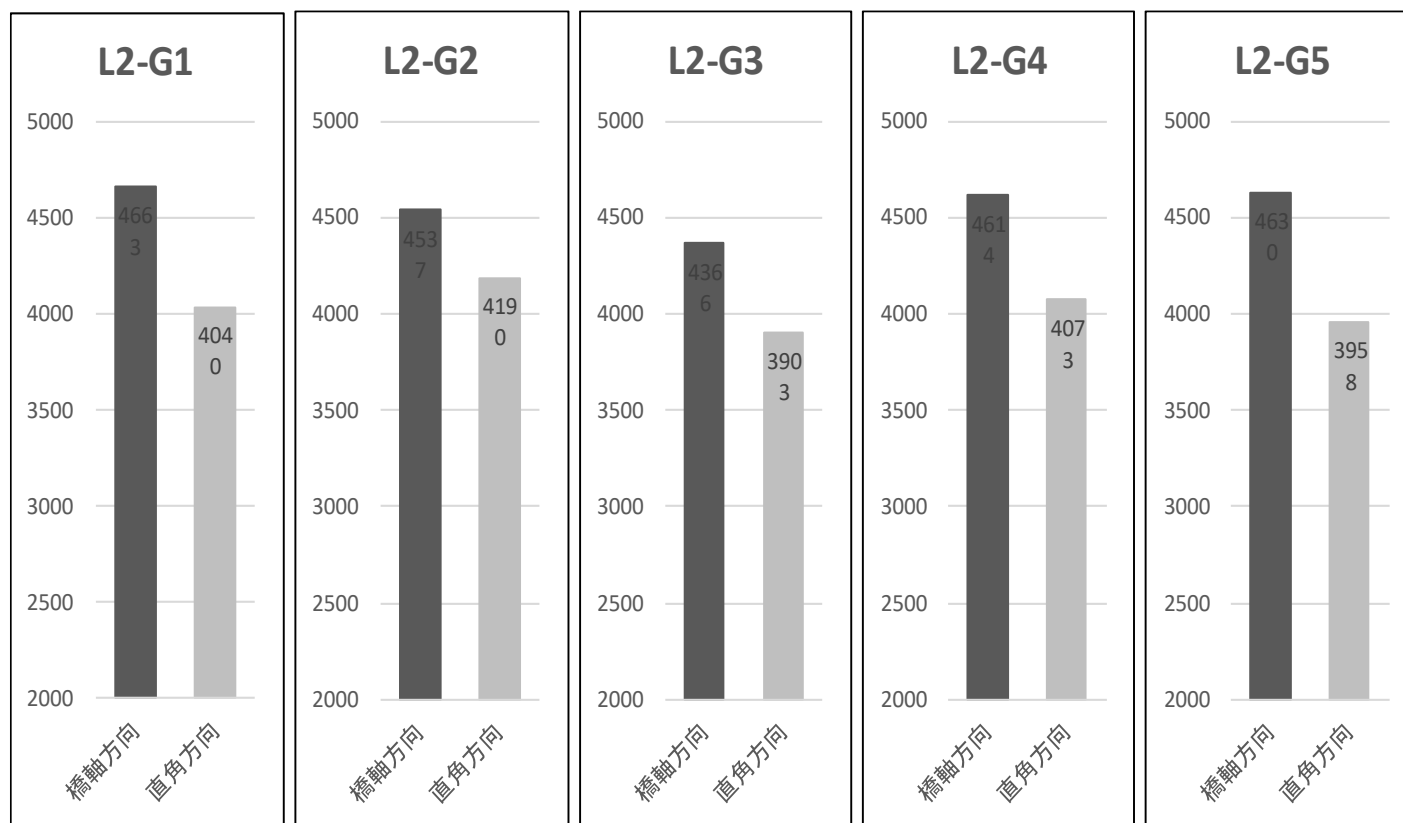
● 応力未開放調査箇所



実橋梁での検討結果

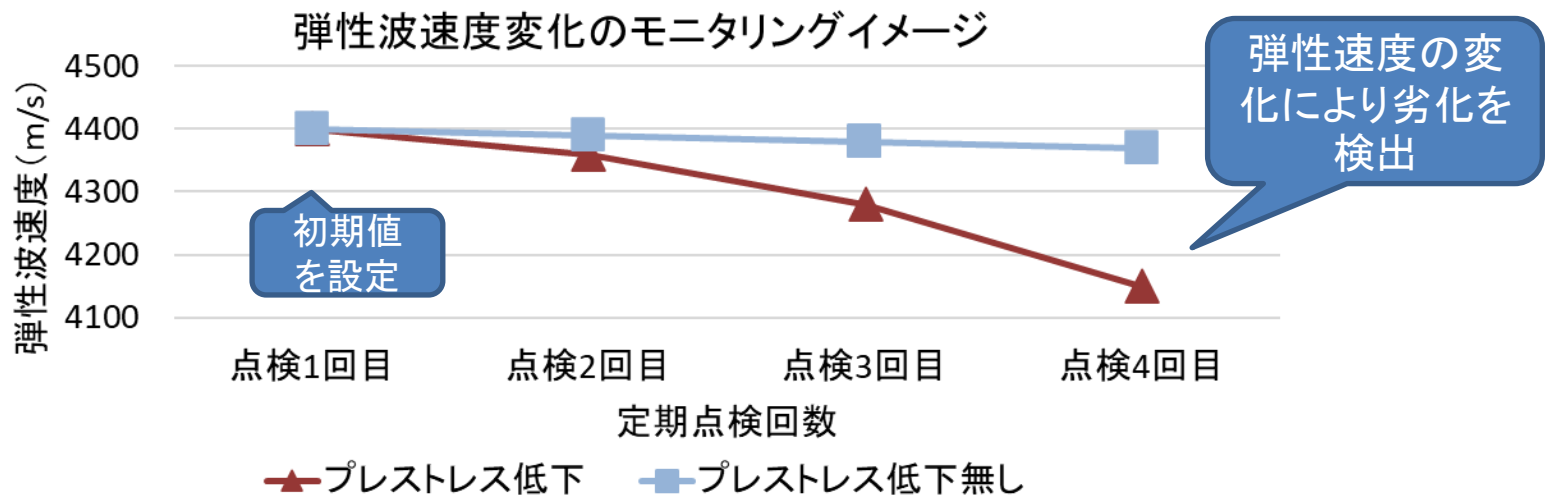
・L2測線部(支間1/4付近:横桁位置)

橋軸方向に対する橋軸直角方向の弾性波速度の比率は86～92%
橋軸直角方向より橋軸方向の方が高い弾性波速度を示す

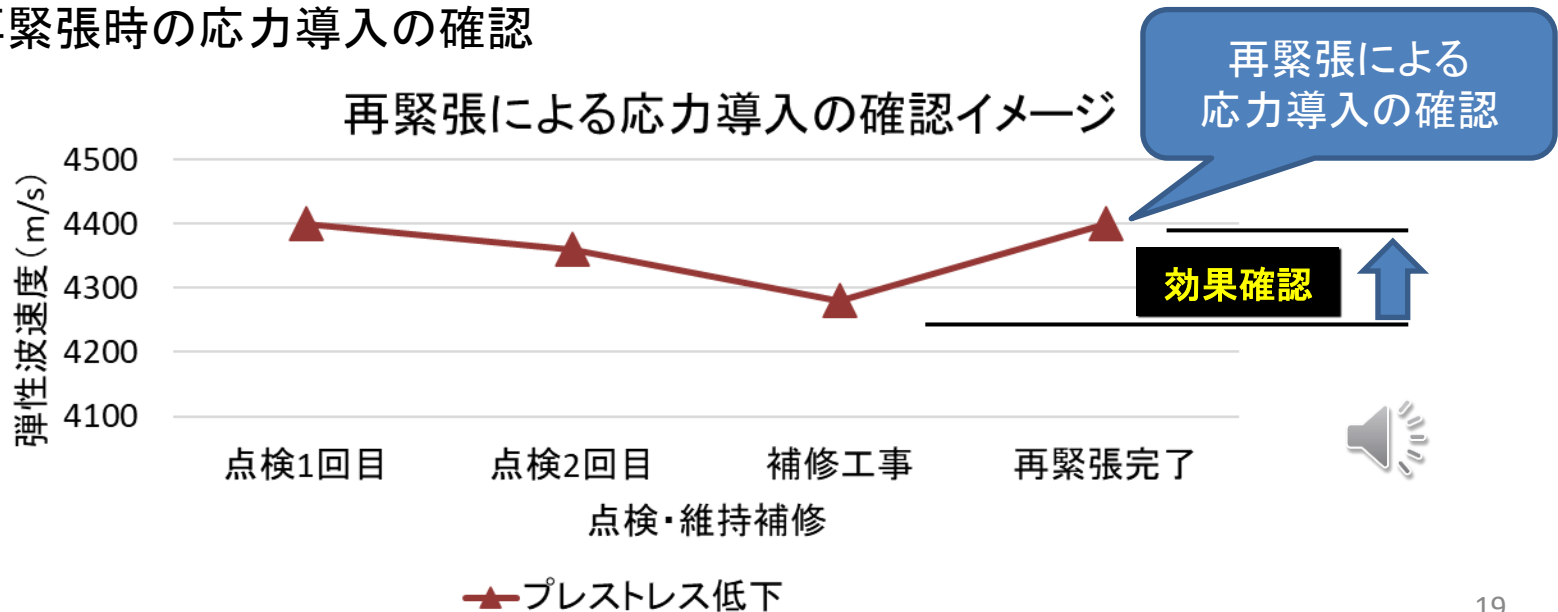


本技術の適用イメージ

①PC桁の健全性モニタリング



②PC桁の再緊張時の応力導入の確認



骨材周辺の遷移帯が超音波速度変化に与える影響について検証

- ・遷移帯とは
骨材と水和セメントペースト
の界面付近にできる**空隙**



粗骨材の岩種が圧縮応力下のコンクリート中の超音波速度に与える影響について検討



実験概要(使用した粗骨材)

岩種の特徴

- ・砂岩、石灰岩、銅スラグの3つの骨材を粗骨材として使用



砂岩: 砂が固まってできた岩石



石灰岩: 炭酸カルシウムが浅海底で降り積もった岩石



銅スラグ: 銅の溶融製錬の際に発生する副産物 成分: 鉄、ケイ素

密度

2.67 g/cm³

2.70 g/cm³

3.50 g/cm³

実験概要(コンクリート配合)

・W/Cは45%、50%、55%の3水準

・細骨材率は45%で一定

コンクリートの配合

配合名	水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
		水 W	セメント C	細骨材率	細骨材 S	粗骨材	
				s/a(%)	細骨材	G1	G2
砂岩粗骨材	45	170	378	45	778	458	373
石灰岩粗骨材					778	478	389
銅スラグ粗骨材					778	754	486

配合名	水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
		水 W	セメント C	細骨材率	細骨材 S	粗骨材	
				s/a(%)	細骨材	G1	G2
砂岩粗骨材	50	170	340	45	792	518	340
石灰岩粗骨材					792	486	396
銅スラグ粗骨材					792	754	495

配合名	水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
		水 W	セメント C	細骨材率	細骨材 S	粗骨材	
				s/a(%)	細骨材	G1	G2
砂岩粗骨材	55	170	309	45	804	525	345
石灰岩粗骨材					804	493	402
銅スラグ粗骨材					804	765	503

計測機の特徴

接触媒質が不要

入出力箇所のは長さは150mmで固定

バッテリー駆動

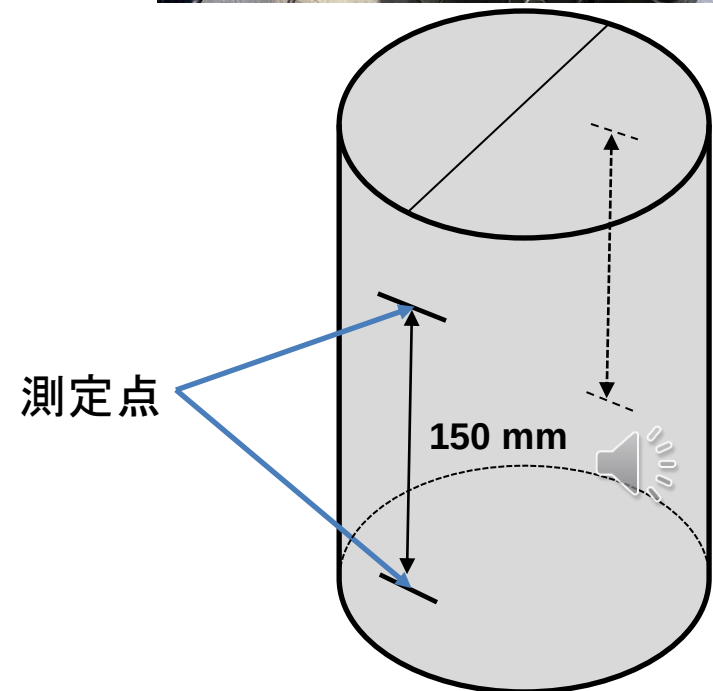
伝搬時間(伝搬速度)がデジタル表示

使用周波数: 50kHz

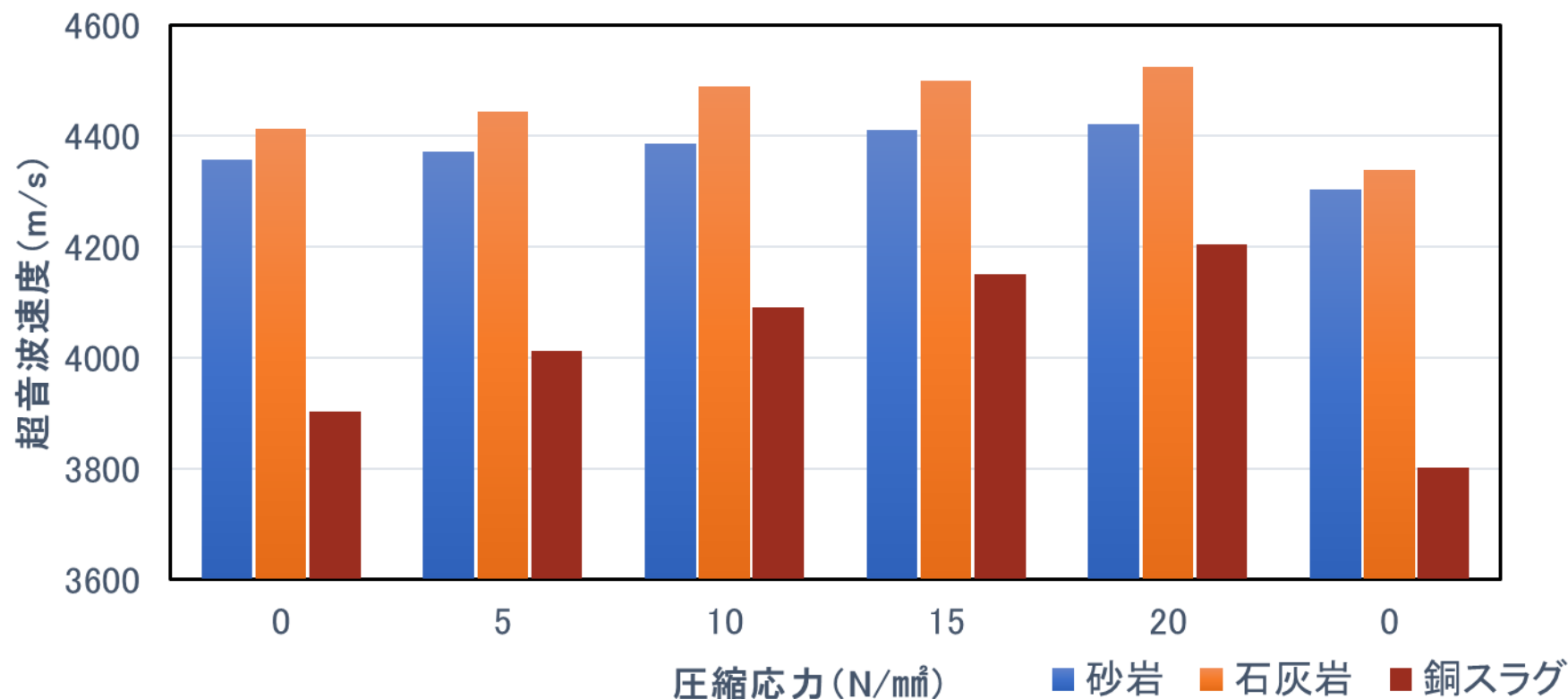


測定方法

- 万能試験機を用いて、設定した各圧縮応力ごとに供試体の超音波速度を測定する
- 固定した測定点を設け、対角に2か所で超音波速度を測定する



W/C=45% 各岩種の超音波速度の比較



- ・使用する岩種により超音波速度に違いが表れた

原因

- 遷移帯による影響
- 弾性係数の違いによる影響



遷移帯の影響の検討

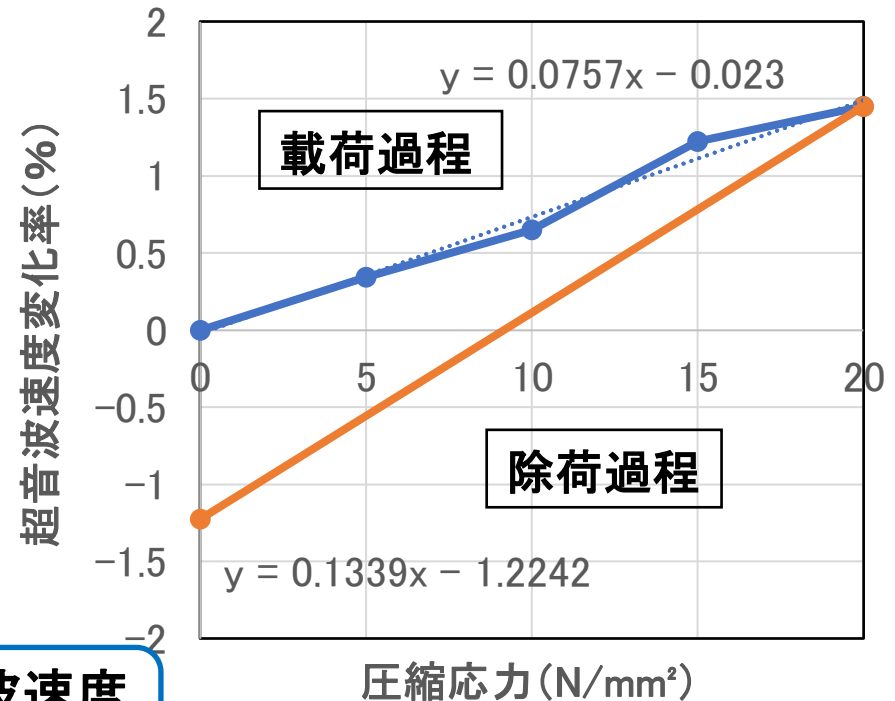
永田らの検討を参考に実施*

* 永田 昂大、大野 健太郎、玉置 一清、上野 敦: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, コンクリート工学年次論文集 Vol.43, No.1, 2021

超音波速度変化率＝

$$\frac{V_i - V_0}{V_0} \times 100(\%)$$

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



・ 載荷過程の近似直線式

$$y = 0.0757x - 0.023$$

音弾性定数

超音波速度
変化率差

・ 除荷過程の近似直線式

$$y = 0.1339x - 1.224$$

粗骨材量を増やし、遷移帯量を増やす



音弾性定数や超音波速度変化率差が大きくなる

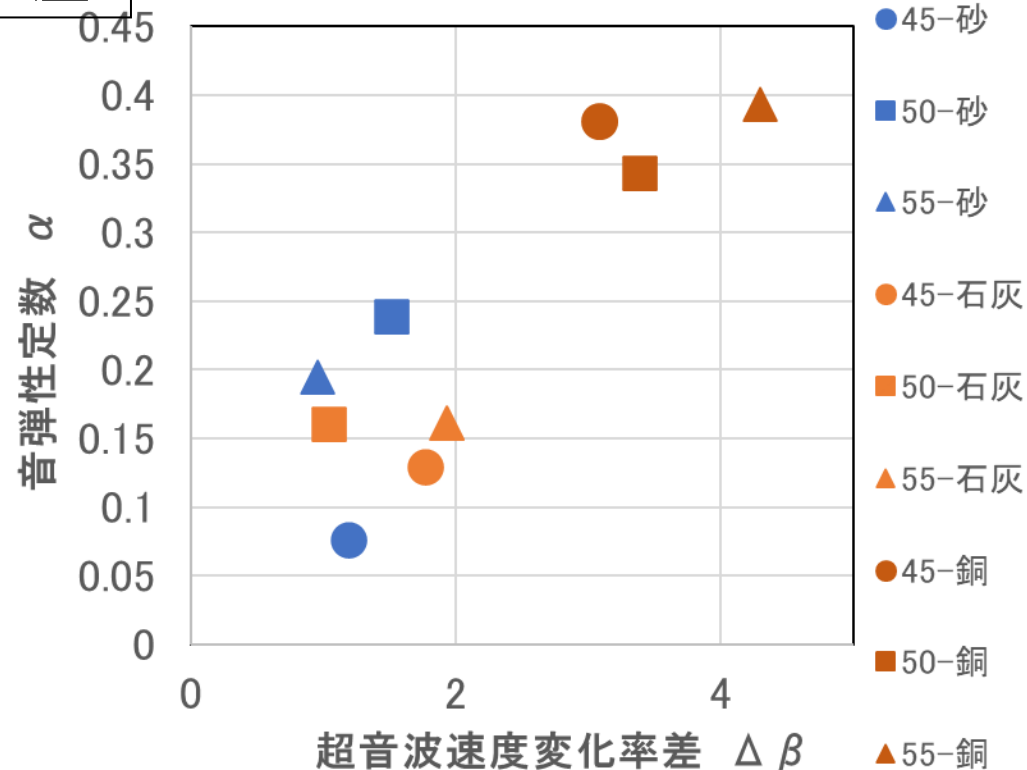
音弾性定数と超音波速度変化率差

・砂岩と石灰岩の比較

音弾性定数と超音波速度変化率差には大きな違いはない

・銅スラグ

音弾性定数と超音波速度変化率差はともに大きい



原因

➤ブリーディングが生じやすく、遷移帯が多く生成されていると考えられる

研究紹介(その2)

□ シリンダー法による簡便な透気性評価手法の開発



研究の背景

表面から劣化因子侵入
耐久性低下を招く



表層品質(かぶり)が重要

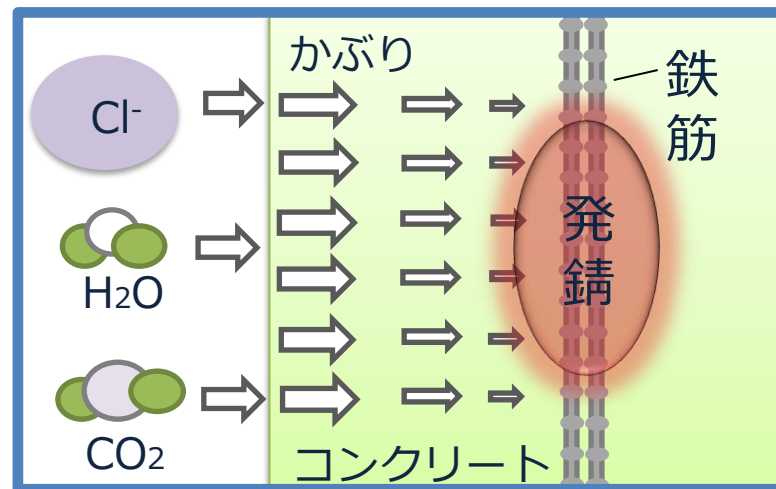
表層透気性



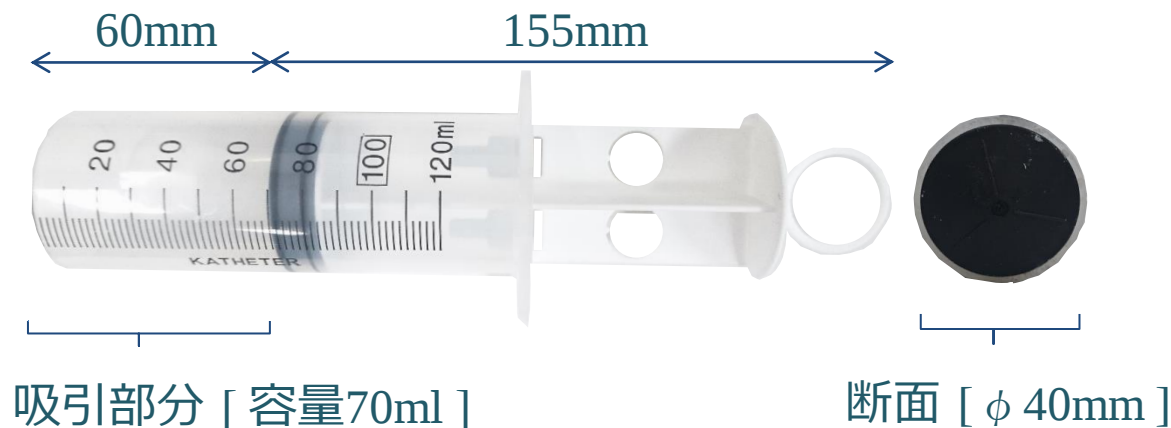
代表的な試験方法
DC法(Torrent法)

現場での測定実績が豊富...

電源なしで
簡易的な評価ができないか？



シリンダーを用いた手法の開発の着手



簡易透気試験

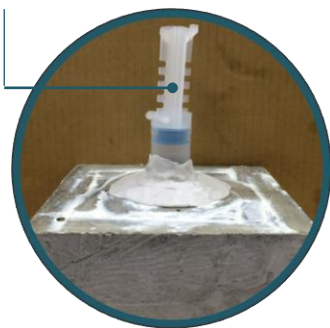
試験装置

装置が**安価**

電源が不要

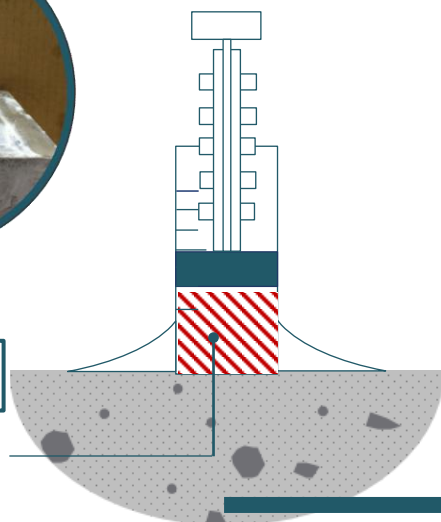
操作性が簡易

測定原理



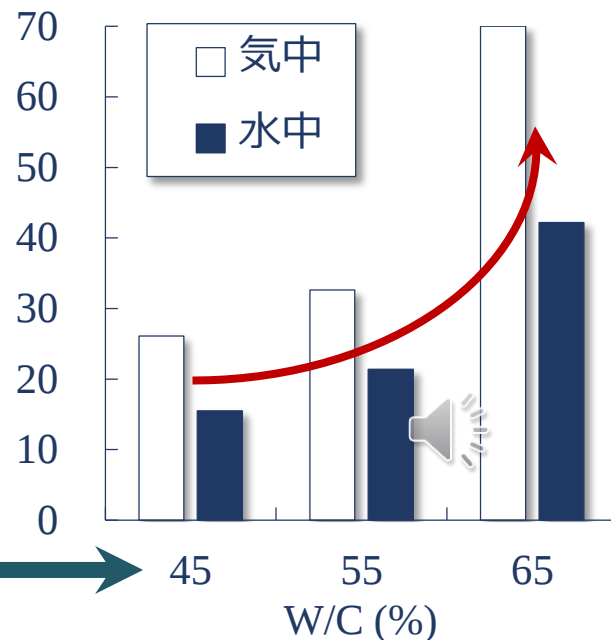
透気性の指標

流入空気容積



流入空気容積 (ml)

実験室レベル



シリンダー法として装置の開発

装置の改良

- アタッチメント部, アタッチメント先端のシリコンガスケットによりコンクリート表面への設置を簡略容易にした.
- ストッパーを設け, 内部ピストンの保持を容易とした.



試験手順

1. 機器をコンクリート表面に押し当てる
2. シリンダー内部のピストンを引き, ロック機構によりピストンを保持し, シリンダー内部に負圧を発生させる。
3. 60秒後にロックを解除し復圧させる。
4. シリンダー内部に流入した空気量をシリンダーの目盛りから読み取り, 空気流入量とする。



試験方法

1. 機器をコンクリート表面に押し当てる
2. シリンダー内部のピストンを引き、ロック機構によりピストンを保持し、シリンダー内部に負圧を発生させる。
3. 60秒後にロックを解除し復圧させる。
4. シリンダー内部に流入した空気量をシリンダーの目盛りから読み取り、空気流入量とする。



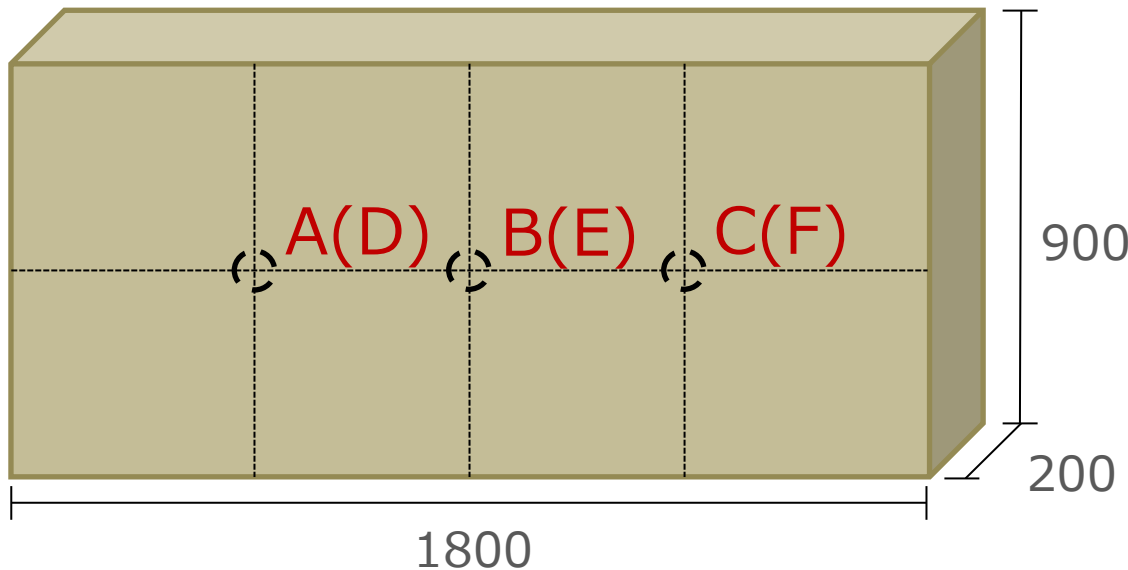
実大壁試験体によるシリンダー法とダブルチャンバー法の比較

- ・実大壁供試体に対して測定

□ 計画配合

呼び強度	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
			セメント	水	砕砂	山砂	碎石	混和剤	混和材
15	85	47.8	210	180	442	424	974	2.4 (AE)	40
27	54	49.2	333	180	436	424	915	2.9	—
33	47	47.3	383	180	410	398	925	2.99	—
40	40	44.9	450	180	378	365	936	3.51	—

※各呼び強度：2体ずつ



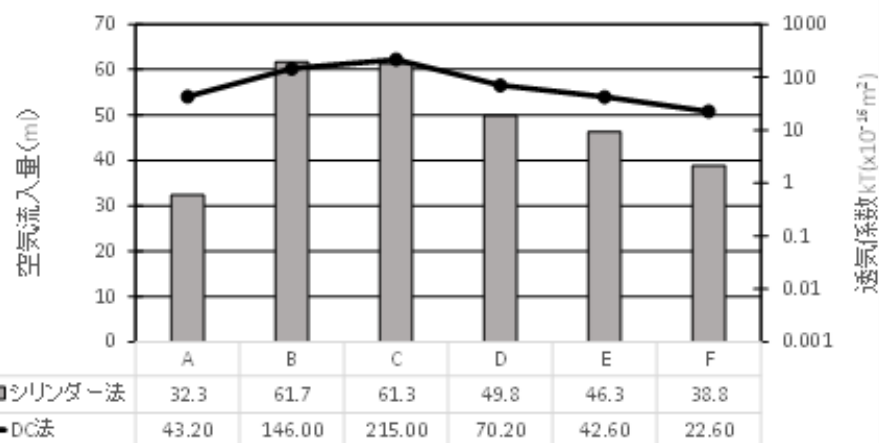
シリンダー法：6回ずつ
ダブルチャンバー法：1回ずつ

表面含水率：3.27%～4.27%
今回は含水率の補正等は行わず
考察

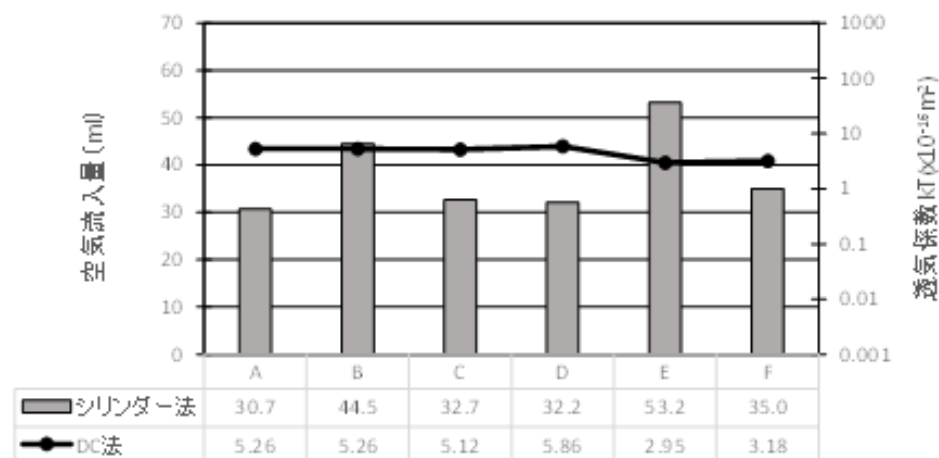
比較結果

シリンダー法により呼び強度の異なる壁の表層透気性を空気流入量により簡便に評価することができた

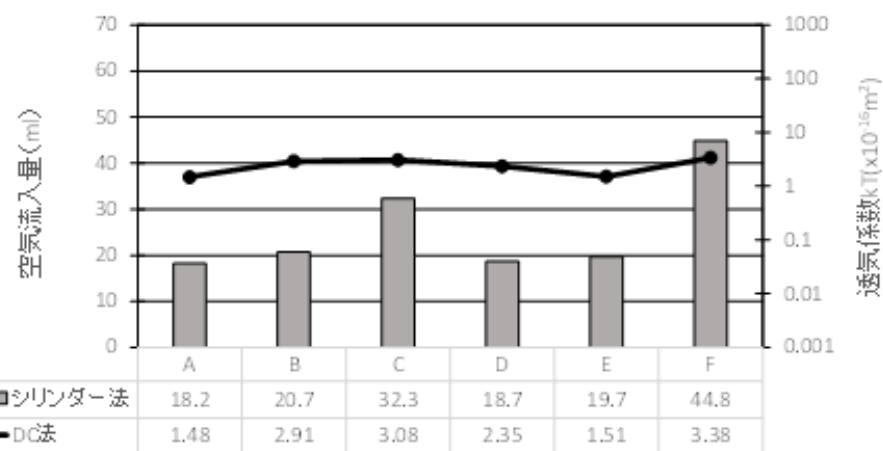
呼び強度15の空気流入量(60秒)と透気係数



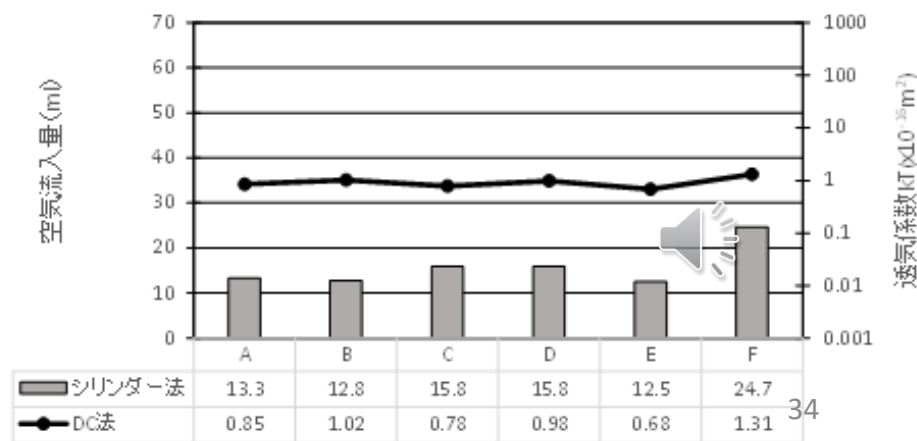
呼び強度27の空気流入量(60秒)と透気係数



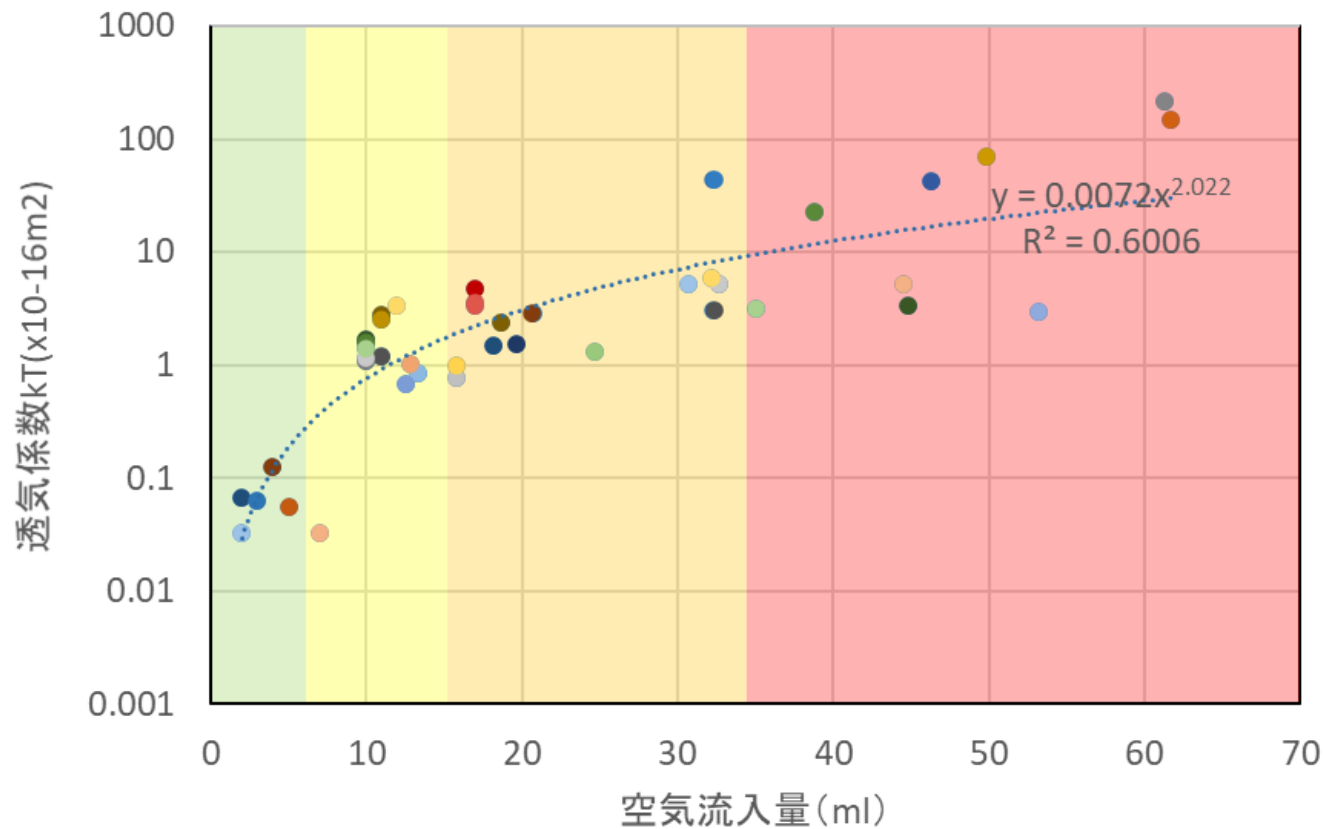
呼び強度33の空気流入量(60秒)と透気係数



呼び強度40の空気流入量(60秒)と透気係数



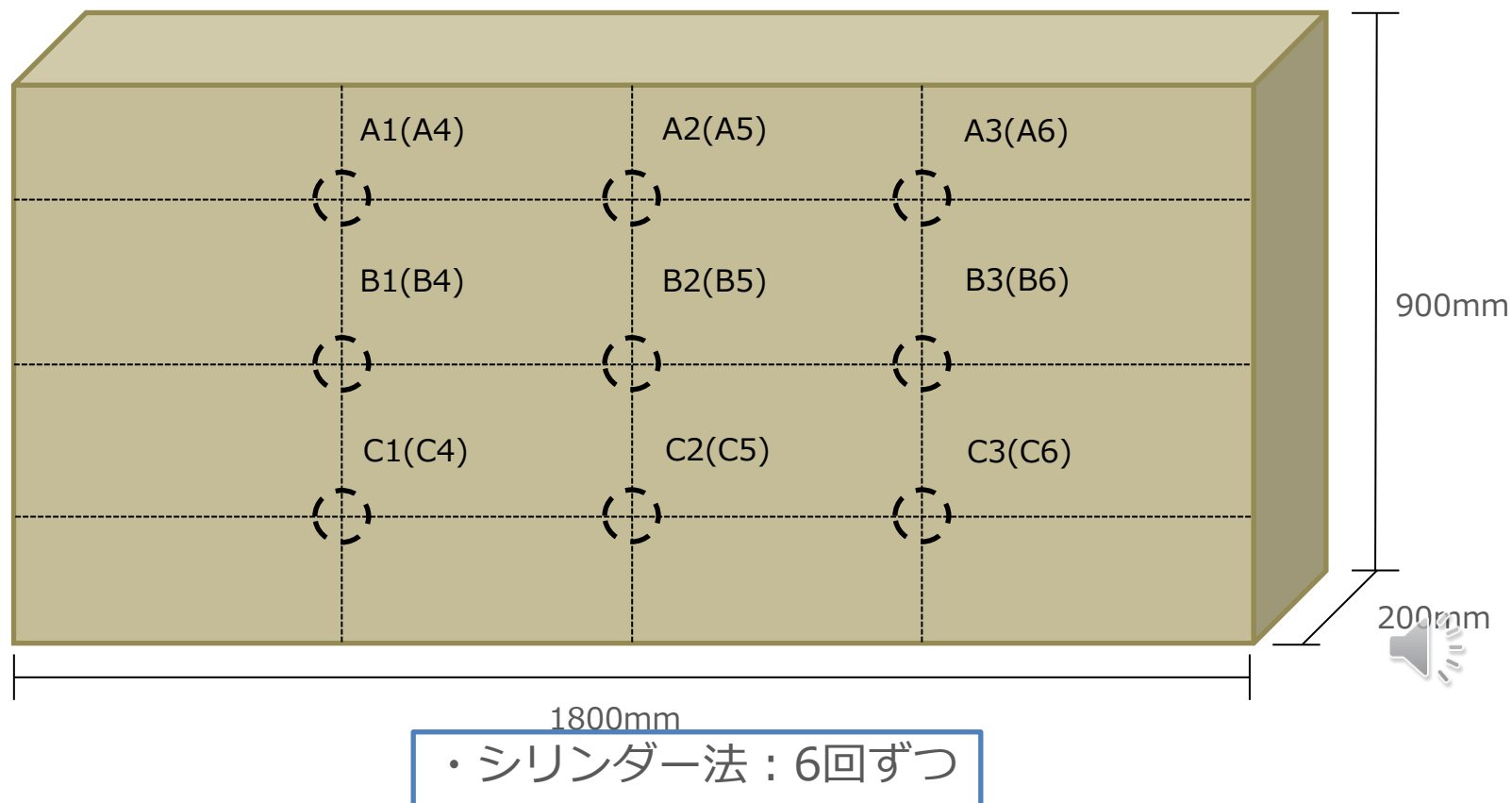
シリンダー法とダブルチャンバー法の関係の考察



- ブロック状のコンクリート供試体の寸法200×200×200mmでW/C30 , 40, 50, 60, 70, 80%と変化させた供試体の結果を追加した。
- シリンダー法により得られた空気流入量とダブルチャンバー法により求められる透気係数には相関性が認められた。

多点測定による品質の評価方法の検討

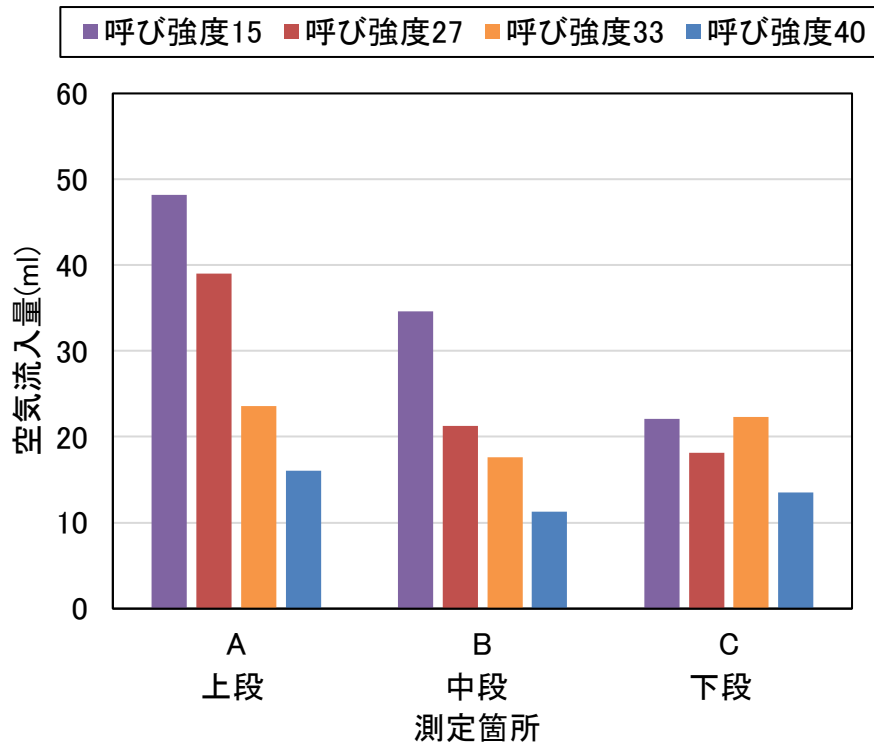
**短時間（60秒）で測定できることを活かして、
多点で測定した結果より品質評価を試みる。**



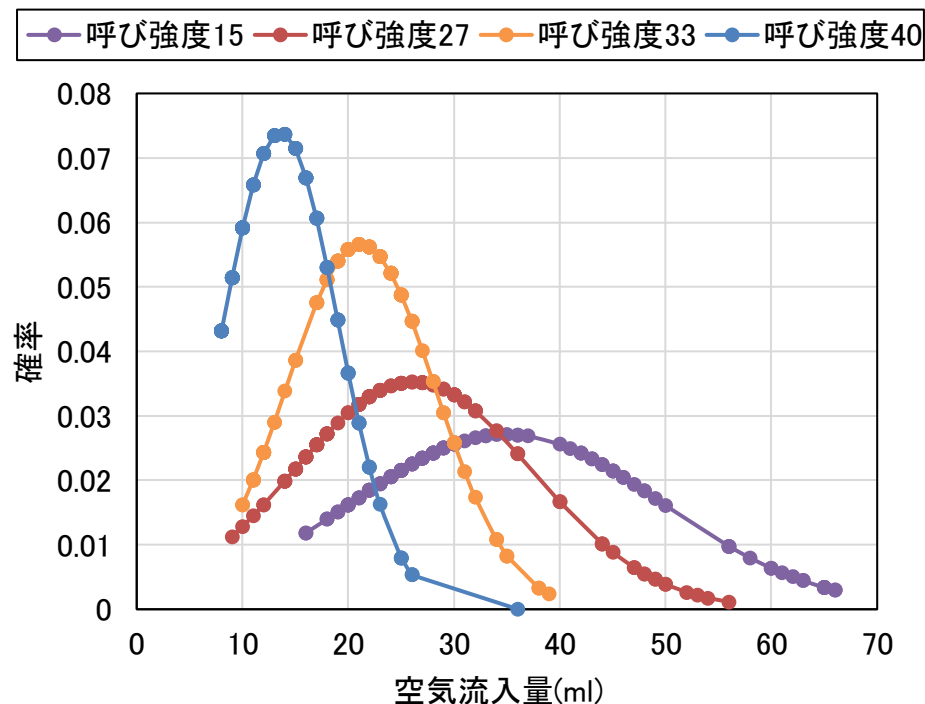
実験結果

□ 実験結果

- ・ 実大壁供試体に対して測定結果
 - ・ 各段（上，中，下）の空気流入量



- ・ 各呼び強度の測定の確率分布



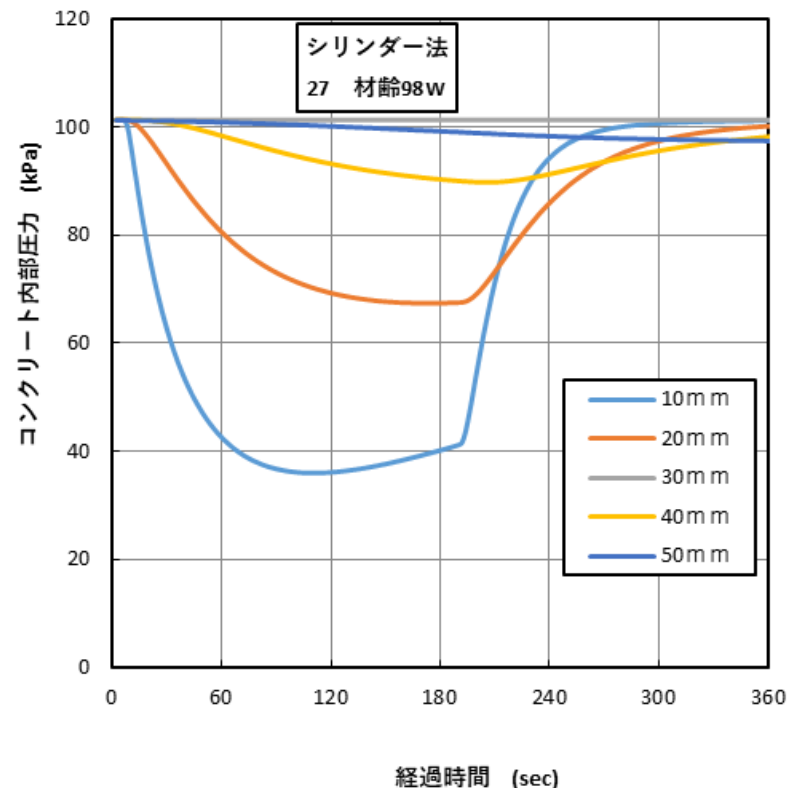
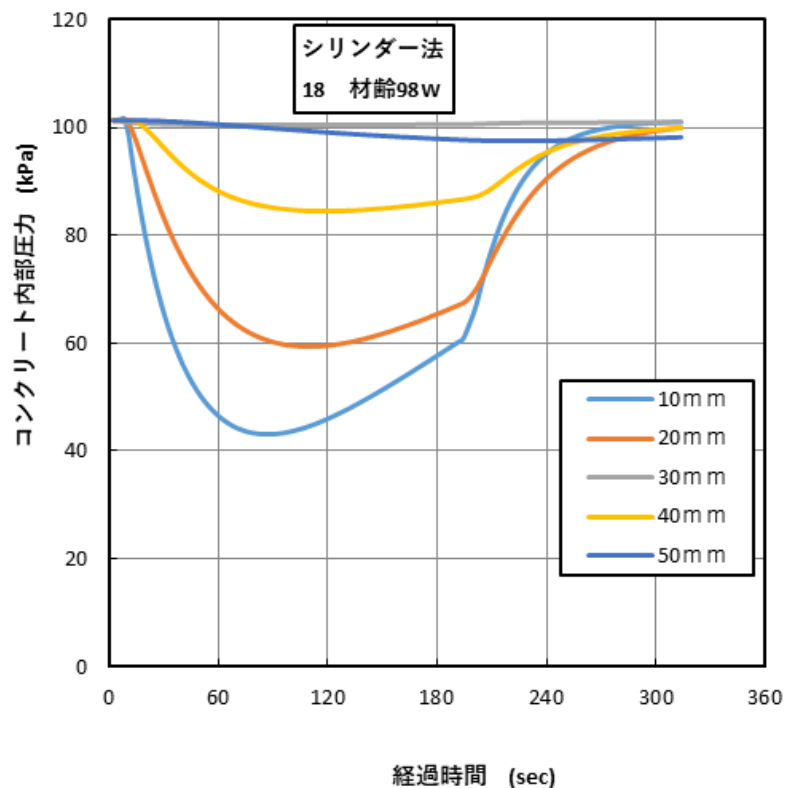
測定箇所を多く設け、供試体全体を測定

- ・ 呼び強度が小さくなるにつれて
上下方向で表層透気性の差が大きい

- ・ ばらつきにより
品質を評価することが可能



透気領域の検討について



配合や乾燥条件によって変化するが、実験によって20～40mm程度の深さまで圧力変動が確認できている



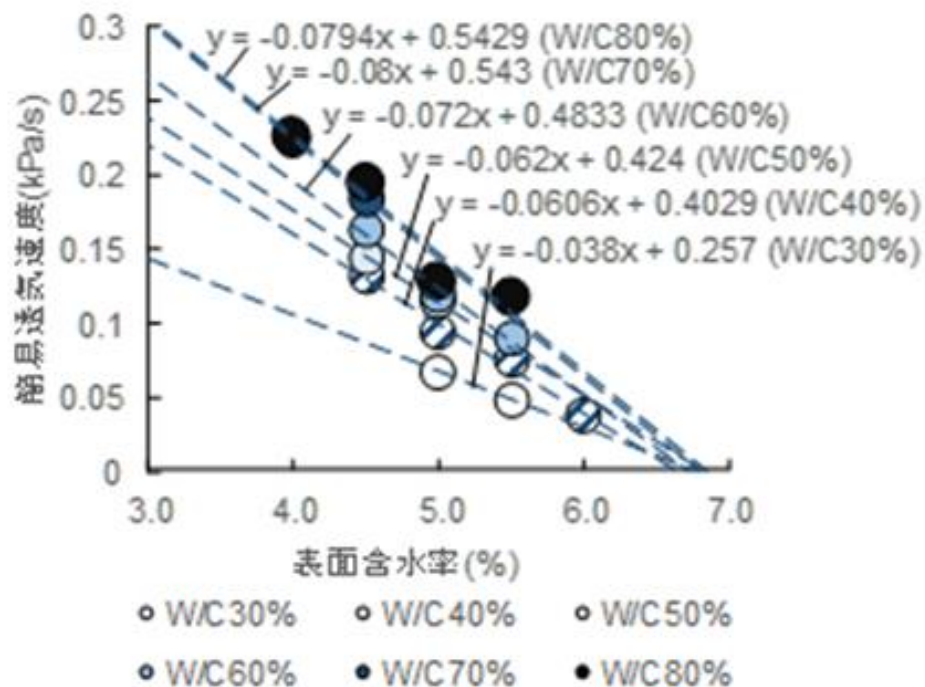
* 浅沼組技術研究所 山崎氏・加藤氏の協力のもとに実施

内部圧力を利用した評価(中性化速度係数との関係)

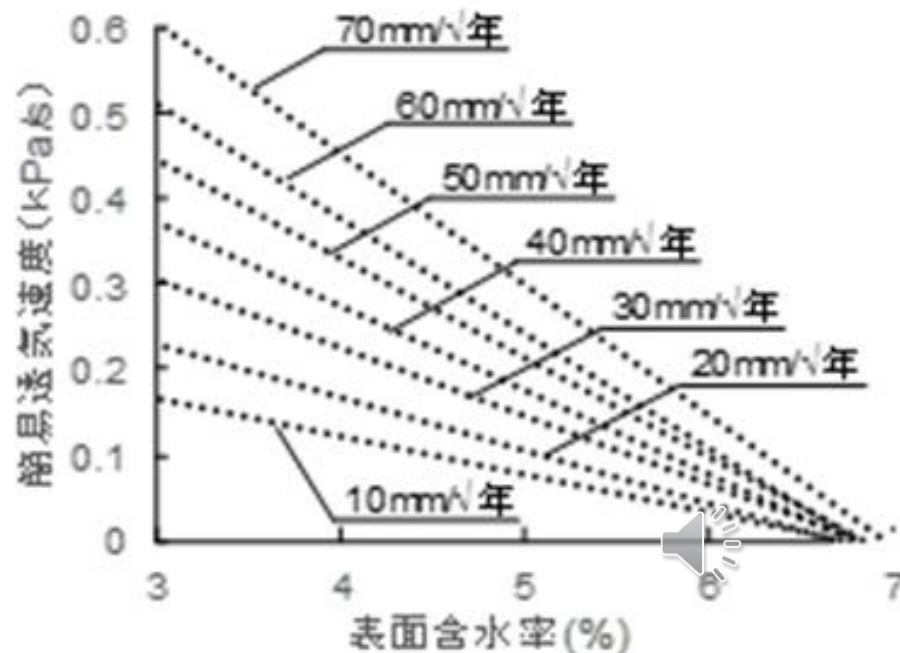
河合ら*の研究を参考にして, 品質評価図を作成した事例

内部圧力の時間変化から求めた「簡易透気速度」と「表面含水率」の関係
⇒中性化速度係数の推定および表層品質の定量化の可能性を示した.

* 河合慶有, 國方翔太, 氏家勲: 現場透気試験によるかぶりコンクリートの耐久性能評価手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp2140-2145, 2014



簡易透気速度と表面含水率の関係



品質評価図

将来展望



今後の非破壊試験およびメンテナンスのあり方についての考察

□試験結果を用いた評価・診断手法の確立

評価・診断・予測への各種技術の適用（パターン認識、AI）

□データ蓄積と利用

BIM/CIMの実装と維持管理シナリオとのつながり

□規格の整備

NDIS ⇒ JIS ⇒ ISO 日本からの情報発信

□非破壊試験の技術者認証などの教育システム

コンクリート構造診断士、コンクリート診断士、MEなどの資格・
技術者育成制度との連動



ご視聴ありがとうございました

