

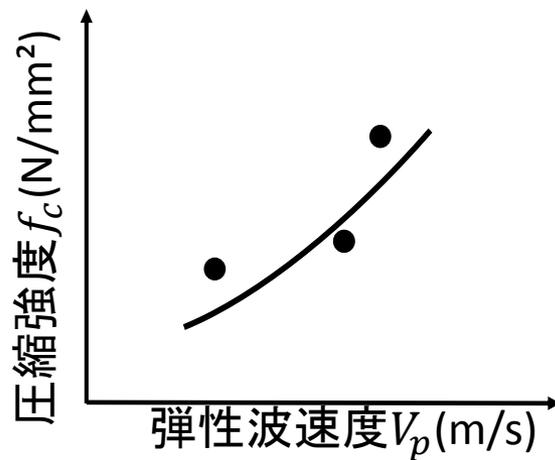
弾性波速度を用いた スラグコンクリートの強度推定結果の紹介

徳島大学大学院 渡辺 健

■ 日本非破壊検査協会NDIS2426-2 附属書D(参考)
コンクリート圧縮強度評価方法



衝撃弾性波法



✓ 圧縮強度と弾性波速度
の関係を指数関数で
近似した評価式

✓ 使用材料や配合条件で
変化

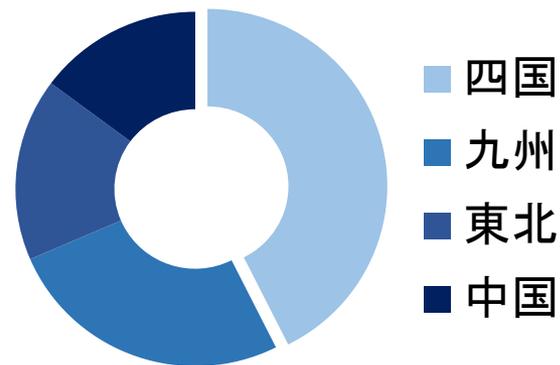
骨材資源確保

- スラグ骨材の利用
- 材料の多様化

■ JIS A 5011-3 銅スラグ骨材

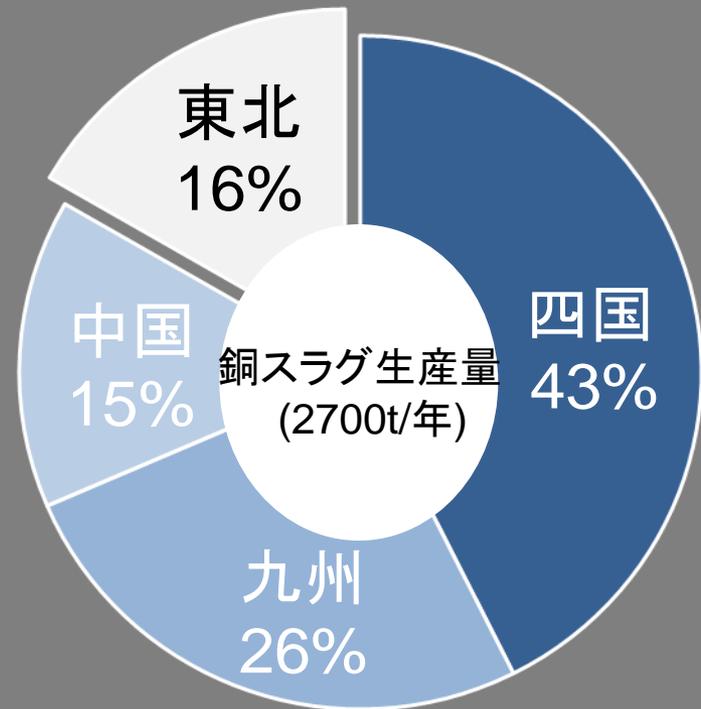


銅スラグ



約4割は四国で生産

非鉄スラグ

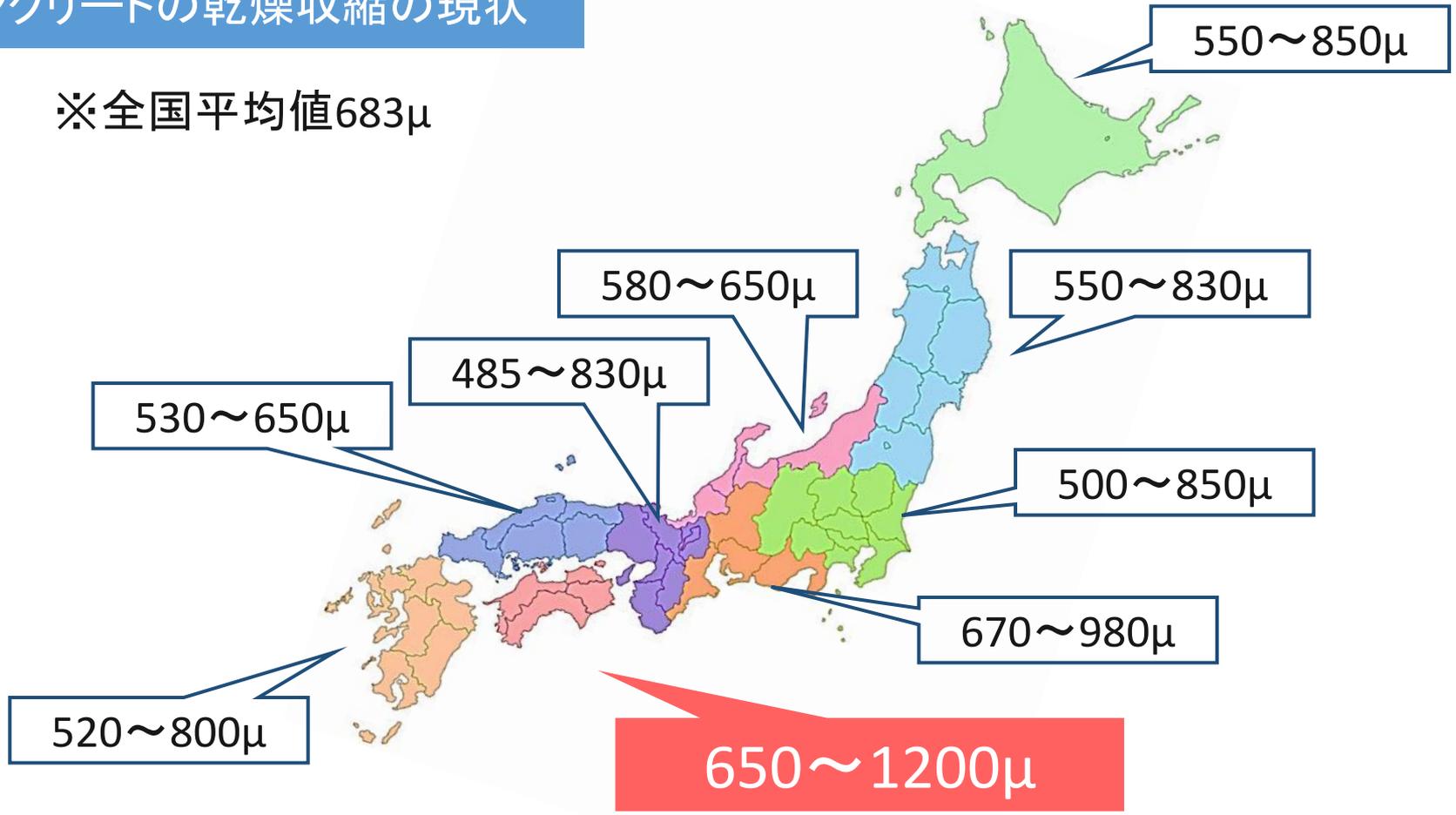
フェロニッケルスラグ
(JIS A 5011-2)銅スラグ
(JIS A 5011-3)

出典: 日本鋳業協会 スラグ委員会

- 代替骨材としての利用用途拡大
- 産業副産物の有効利用

コンクリートの乾燥収縮の現状

※全国平均値683μ



乾燥収縮率 **大** → 耐久性に影響



新たな骨材の供給形態構築が急務

JCI コンクリートの収縮問題検討委員会報告書 2010 をもとに作成



実験室レベルにおける実験結果

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤(C×%)			SL (cm)	air (%)	Ct (°C)	
			W	C	S			G	AE 減水剤	高性能 AE減水剤				AE剤
					N	FNS	CUS							
N (徳島産碎石砕砂)	47	45	165	350	780	-	-	949	0.5	-	0.2	8	3.5	21.3
FNS1.2-30% (大江山産)		43			522	268	-	950	0.7	-	0.2	8.5	4	20.5
FNS5.0-50% (八戸産)		46			399	478	-	951	0.5	-	0.2	9	4.5	21.1
FNS5.0-100% (八戸産)		47			-	976	-	952	0.35	-	0.2	10	5.5	21
CUS2.5-50% (小名浜産)		45			390	-	536	953	-	0.35	0.3	10	4.5	18.8
CUS2.5-100% (小名浜産)		46			-	-	1095	954	-	0.28	0.2	8	4	19
CUS2.5-50% (東予産)		46			399	-	547	955	-	0.3	0.2	7.5	4.5	18.8
CUS2.5-100% (東予産)		48			-	-	1142	956	-	0.25	-	7	5.5	18.6

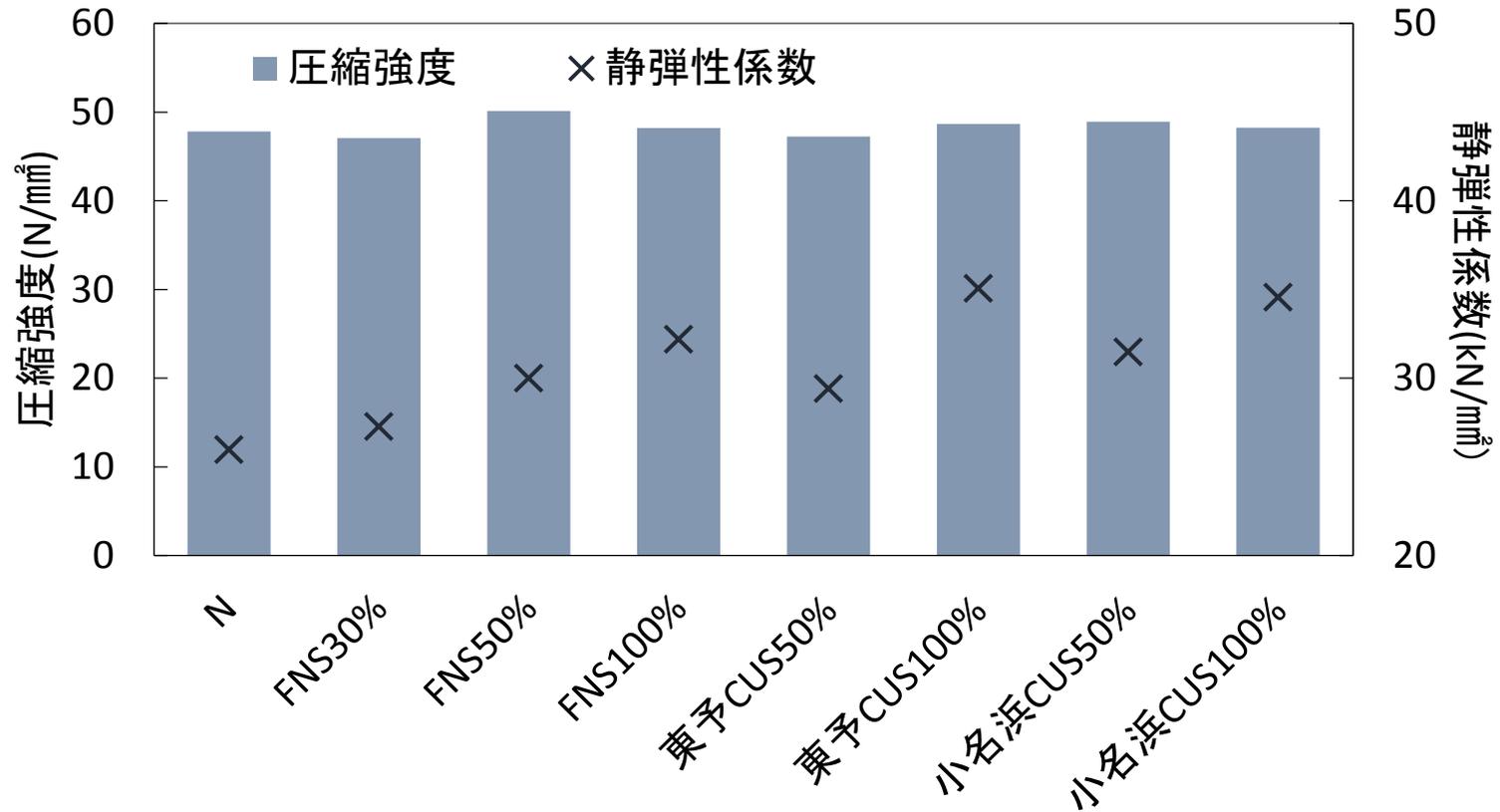
※記号に続く数字は骨材の最大寸法(mm)

パーセンテージは細骨材の容積に対する置換率を表す

骨材		記号	産地	表乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)
非鉄スラグ 細骨材	フェロニッケル スラグ	FNS1.2	大江山	3.08	0.31
		FNS5.0	八戸	3.08	1.78
	銅スラグ	CUS2.5	小名浜	3.53	0.1
		CUS2.5	東予	3.60	0.11
普通骨材	碎石	G	板野町	2.57	1.6
	砕砂	N	阿波市	2.57	1.77

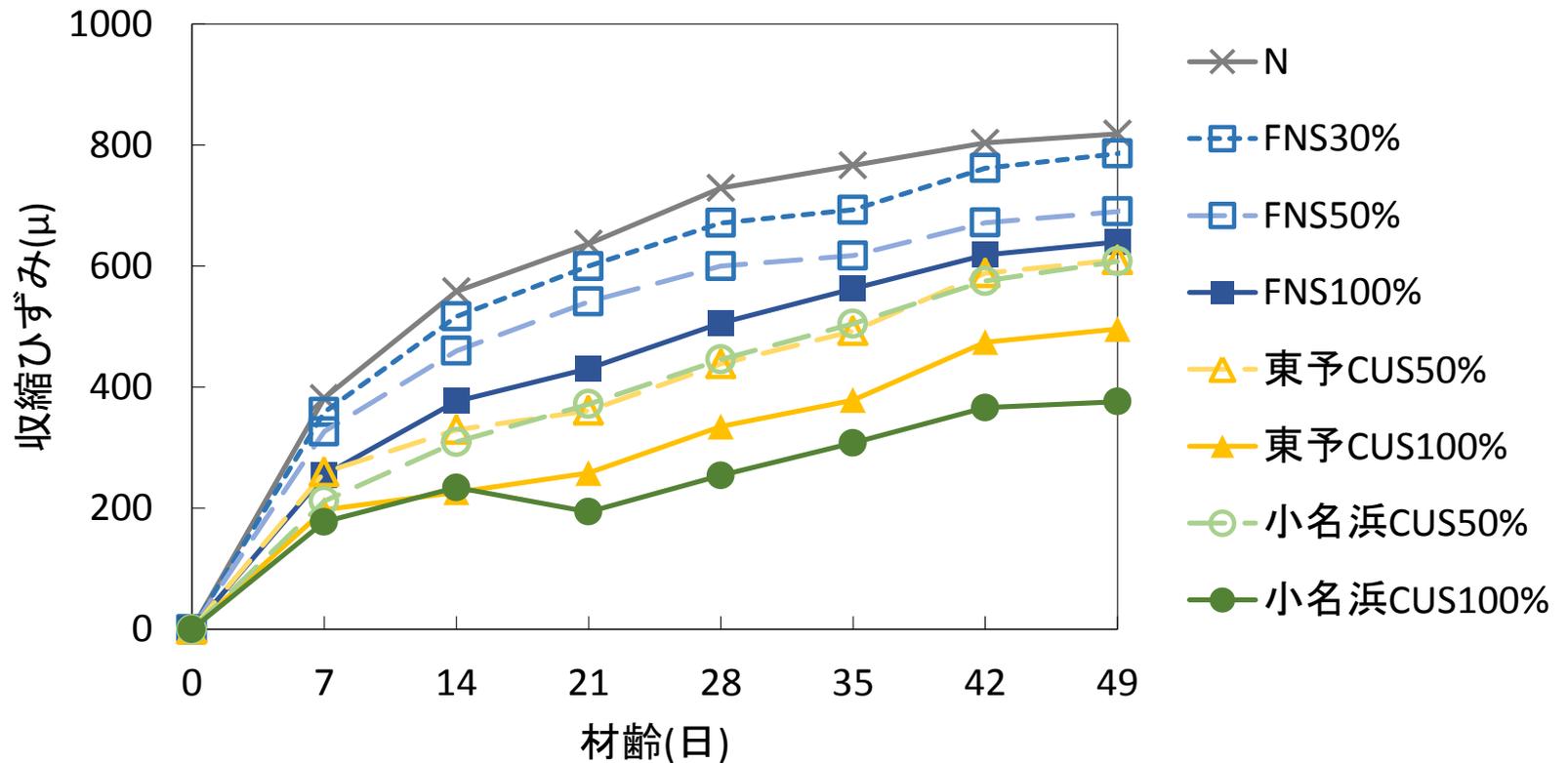
- 骨材の置換率による影響を検討するため、W/Cおよび単位水量を一定とした
- FNSは、粒径の違うものを2種類、CUSは産地の異なるものを2種類用いた

材齢28日強度試験結果



非鉄スラグ細骨材を置換した場合、強度に影響は無い
Nとの強度比97~105%

収縮ひずみ測定結果



非鉄スラグ細骨材を用いた**全ての配合で収縮量が抑制**
同一骨材では置換率を上げるほど収縮抑制効果が高くなる

- 土木学会コンクリートライブラリー147「銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計施工指針」, 平成28年(2016年)
- 建築学会「フェロニッケルスラグ骨材または銅スラグ細骨材を使用するコンクリートの調合設計・製造・施工指針・同解説」, 平成30年(2018年12月)
- 日本建築学会近畿支部 特別調査研究委員会
銅スラグ細骨材の建築用コンクリートへの適用性に関する研究報告書, 平成31年(2019年3月)

コンクリート製品は社会経済活動基盤を構築し、快適で豊かな生活を実現している⇔一方、これらは地球環境破壊行為とも解釈できる。

持続可能な開発のためには次のことが必要になってくる。

- 資源・エネルギー消費を最小し、その機能の最大化を図ること。
- 持続可能な開発目標 (SDGs) のため、CO2を2050年に80%削減するためには、イノベーションが必要となる。
- 地域資源のトータルマネジメントが価値化する可能性

銅スラグ細骨材や産業副産物の有効活用は、

- ①天然資源である砂(世界的にも不足が危惧されている。)の消費を削減
- ②副産物輸送や骨材輸送に由来するCO2を削減(地産地消)
- ③コンクリートの品質を向上させる効果

銅スラグ細骨材コンクリートに対して…

推定手法	衝撃弾性波法
	超音波法
測定値	弾性波伝搬速度 V_p

圧縮強度評価式

(同じ配合のコンクリートにおける材齢の進行に伴う弾性波速度と圧縮強度の相関関係を利用)



本研究の目的

- 銅スラグ細骨材コンクリートに圧縮強度評価式が適用可能か検討
- それぞれの手法による推定精度の比較

配合表

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)						
			W	C	CUS	S	G	AEA (C×%)	SP (C×%)
N	55	45	170	308	-	790	965	0.004	2
CUS30					325	553			1.8
CUS60					651	316			1.5



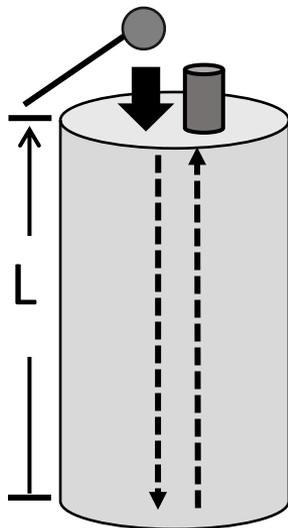
基準配合に対して
銅スラグ細骨材を30%, 60%体積置換

それぞれ, 3日・7日・28日・56日間水中養生

実施試験

- ・圧縮強度試験
- ・衝撃弾性波試験
- ・超音波試験

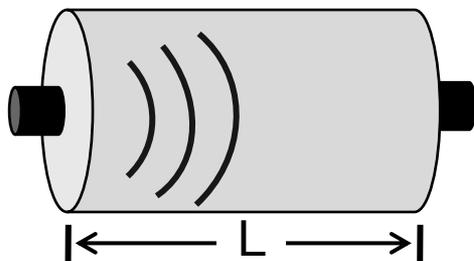
衝撃弾性波法



$$V_p = 2 \cdot L \cdot f_0$$

f_0 : 時間波形のフーリエ変換で
得られる**基本周波数**

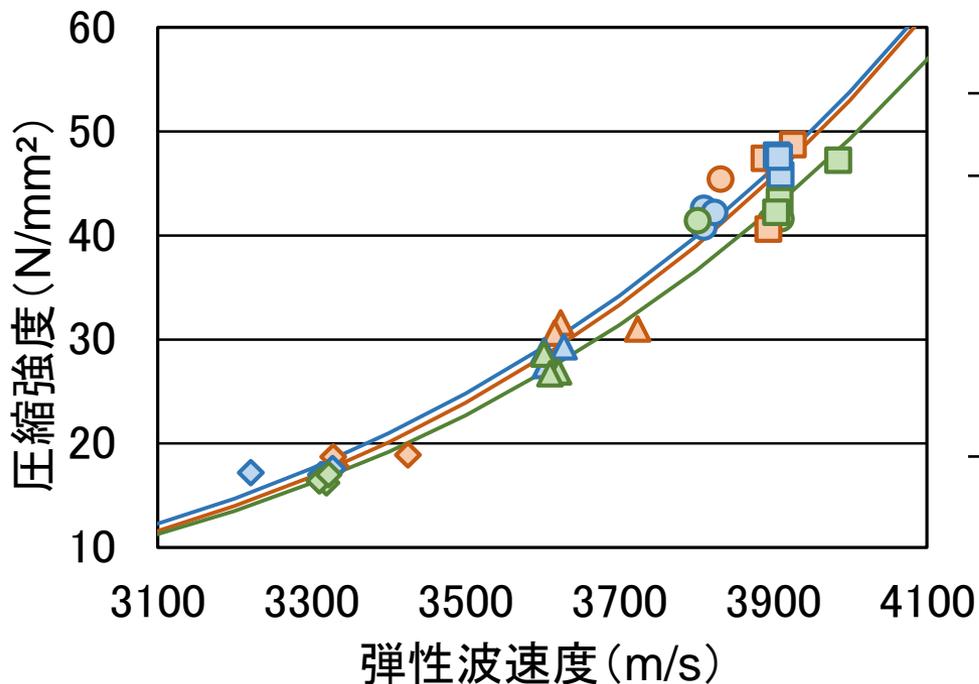
超音波法



$$V_p = L/t$$

t : 伝搬時間

4 実験結果(衝撃弾性波法)



圧縮強度評価式

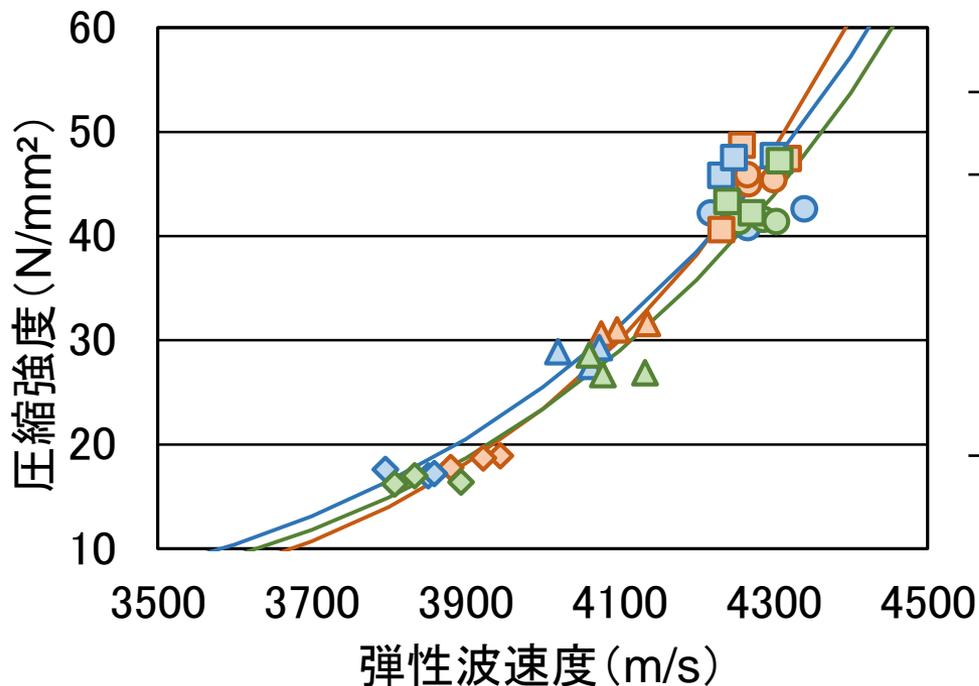
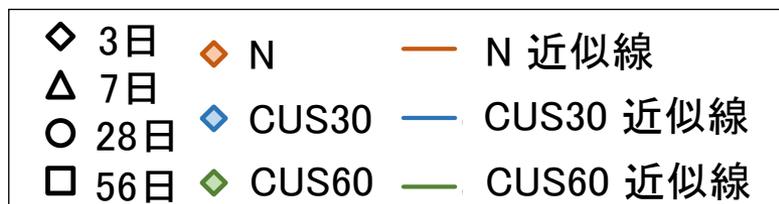
$$f_c = \beta \times V_p^\alpha$$

配合名	衝撃弾性波法
N	$f_c = 1.863 \times 10^{-20} \times V_p^{5.956}$
CUS30	$f_c = 6.841 \times 10^{-20} \times V_p^{5.801}$
CUS60	$f_c = 6.809 \times 10^{-20} \times V_p^{5.791}$

α : 日本非破壊検査協会 4~6

➤ 銅スラグを置換することで若干 α , β の値が変化した。

実験結果(超音波法)

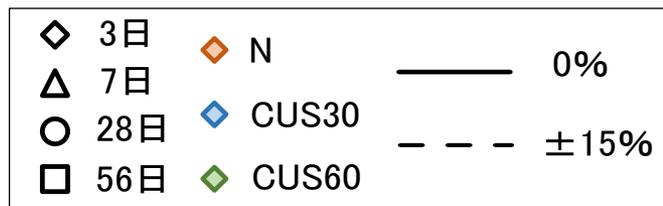


圧縮強度評価式

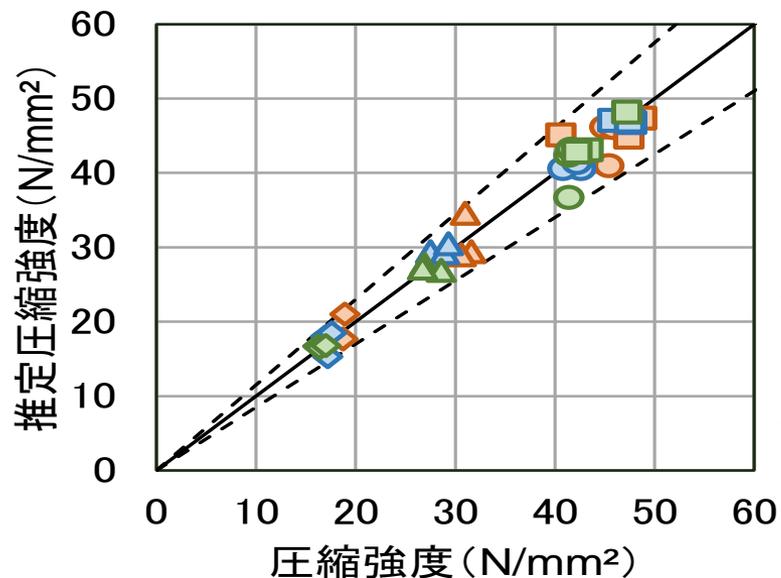
$$f_c = \beta \times V_p^\alpha$$

配合名	超音波法
N	$f_c = 1.844 \times 10^{-35} \times V_p^{10.02}$
CUS30	$f_c = 6.733 \times 10^{-30} \times V_p^{8.489}$
CUS60	$f_c = 8.230 \times 10^{-31} \times V_p^{8.732}$

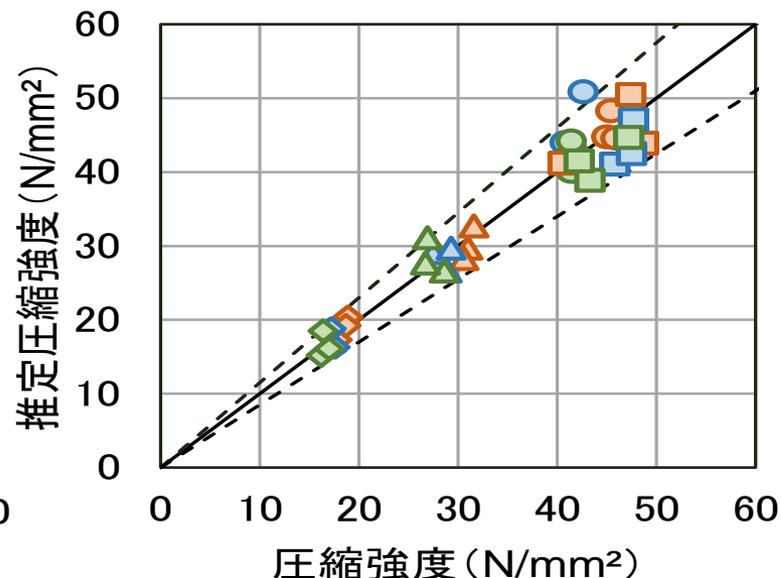
- 衝撃弾性波法と同じ係数にはならない。これは、計測原理の違い（衝撃：多重反射，超音波法：透過）の違いや周波数の影響と思われる。



衝撃弾性波法



超音波法



- 弾性波速度から圧縮強度を推定する場合，計測条件に依存するが，今回の試験結果での条件（速度分解能）においては，おおよそ±15%の精度を持つことが分かった

弾性波法による蒸気養生を受けたコンクリートの
強度推定手法に関する検討

－プレキャスト製品への応用－

- 現場打ちコンクリートよりも**品質が安定**する
- 出荷を早めるため**蒸気養生**（促進養生）を行う
- 照査指標として**曲げ強度**が規定されている

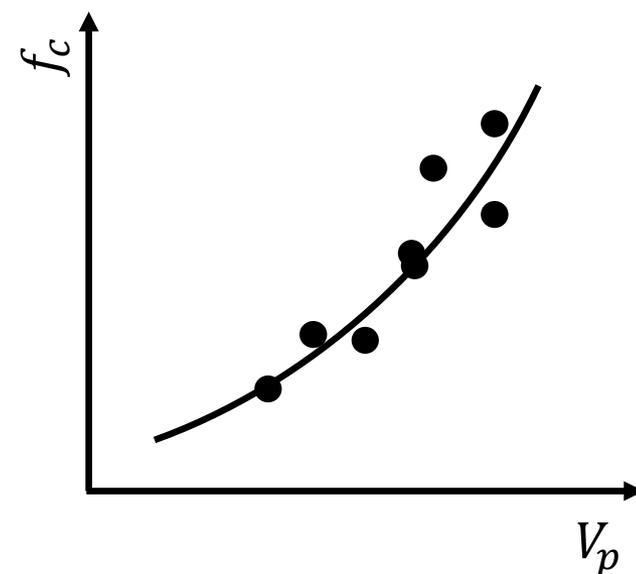


《コンクリートの圧縮強度評価方法》

$$f_c = \beta \times V_p^\alpha$$



プレキャスト製品の品質管理へ適用



検討
内容

蒸気養生を模擬した供試体による
圧縮強度および曲げ強度の推定手法に関する検討

－供試体概要－

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				SL	Air	混和剤 (C×%)	
		W	C	S	G			AEA	SP
30	45	165	550	707	864	11.5	6.0	0.0050	1.4
40			413	757	925	13.5	5.0	0.0040	1.2
50			330	787	962	12.0	5.7	0.0025	1.0

プレキャスト製品を想定し、
高強度コンクリートを作製

目標スランプ：12±2.5cm
目標空気量：4.5±1.5%

■ 材齢：3日・7日・28日・56日

■ 養生方法：模擬蒸気養生

■ 形状：円柱供試体(Φ100×200mm)

■ 後養生方法：気中養生

角柱供試体(100×100×400mm)

—模擬蒸気養生—

養生方法

- 打設後、供試体をビニールで包み水に浸す
- **温度履歴**を与え蒸気養生を模擬する
- 20時間後に脱型し、**20℃**環境で気中養生を行う

ビニール

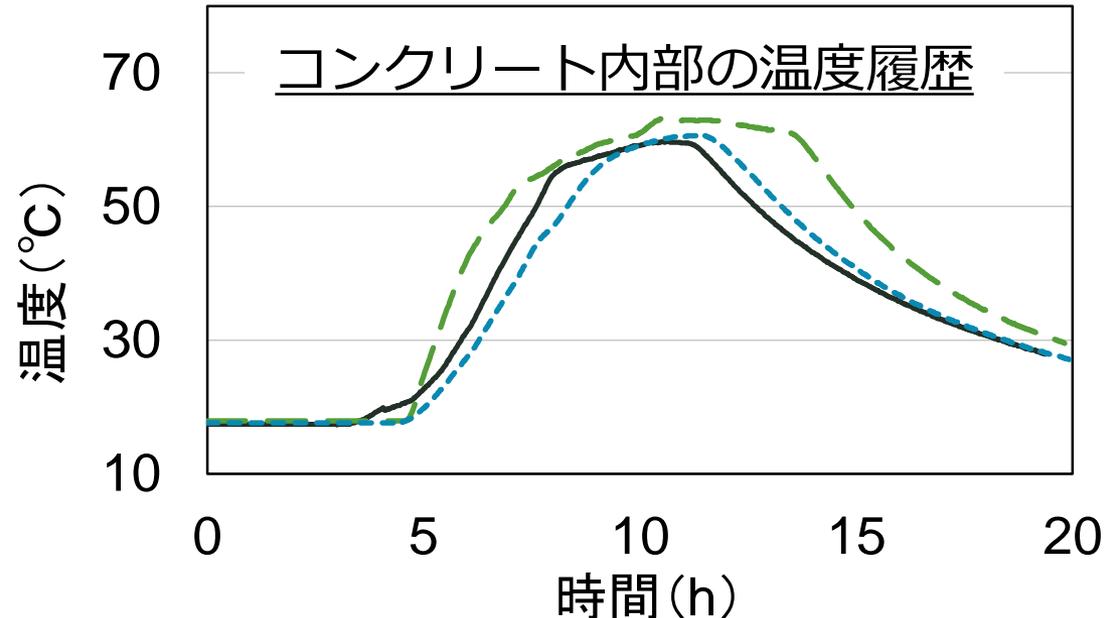


コンクリート練り舟

養生水の温度履歴

前置時間	4.5h
昇温速度	7~10℃/h
最高温度	60±5℃
最高温度保持時間	3h
降温速度	4~5℃/h

— W/C30% - - W/C40% - - - W/C50%



-強度評価式-

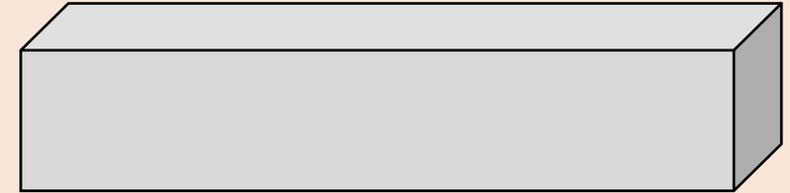
圧縮強度の評価

円柱供試体
($\phi 100 \times 200\text{mm}$)



圧縮強度 f_c を測定

曲げ強度の評価



角柱供試体 ($100 \times 400 \times 400\text{mm}$)

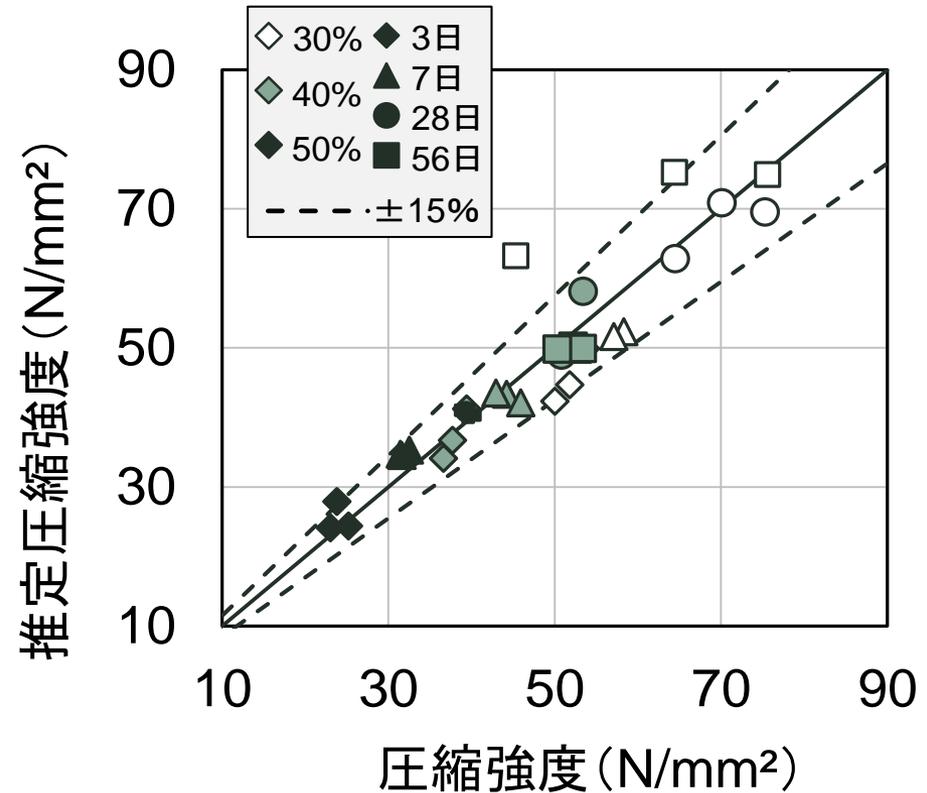
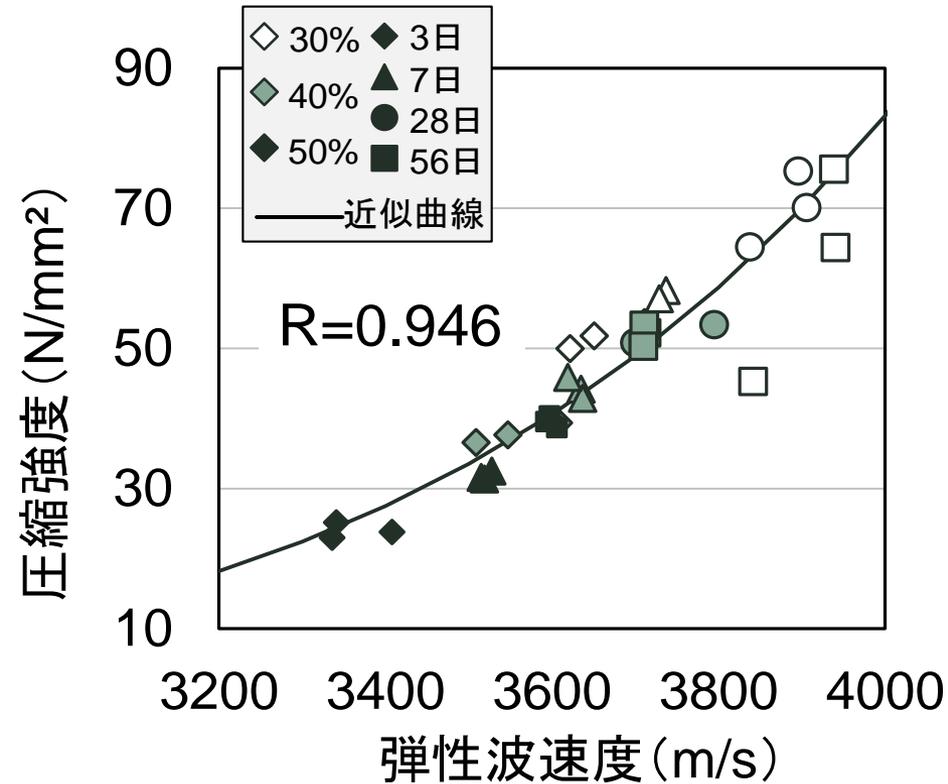
曲げ強度 f_b を測定

それぞれの供試体から得られた
弾性波速度 V_p と各強度 f_c , f_b の結果から強度評価式を算出

$$f_c = \beta \cdot V_p^\alpha \quad (\alpha, \beta: \text{定数})$$

$$f_b = y \cdot V_p^x \quad (x, y: \text{定数})$$

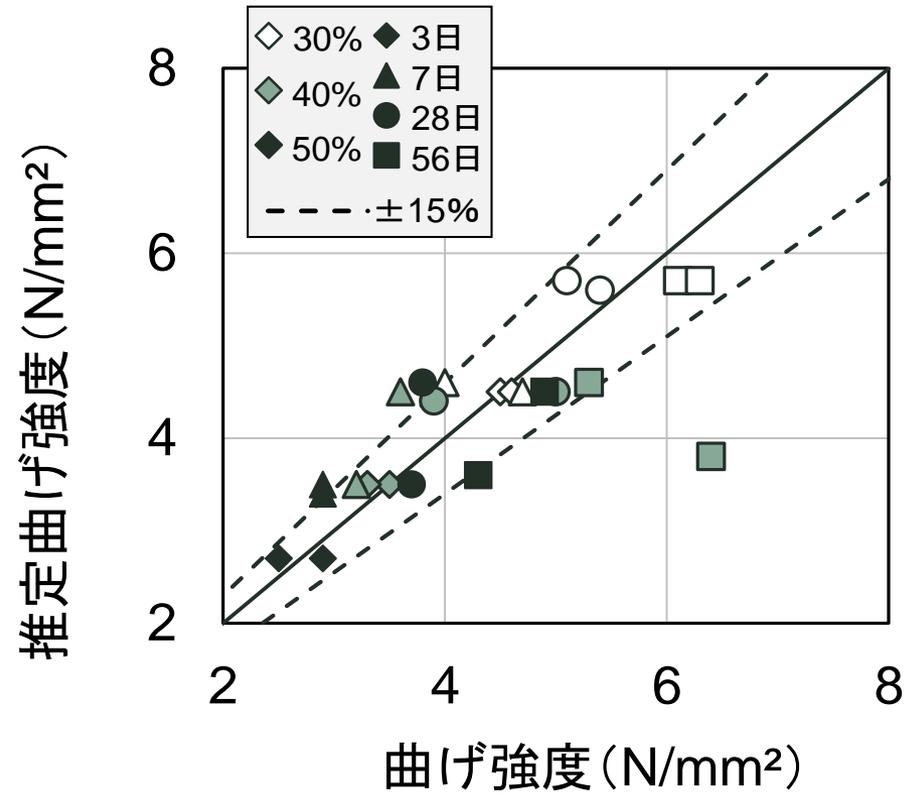
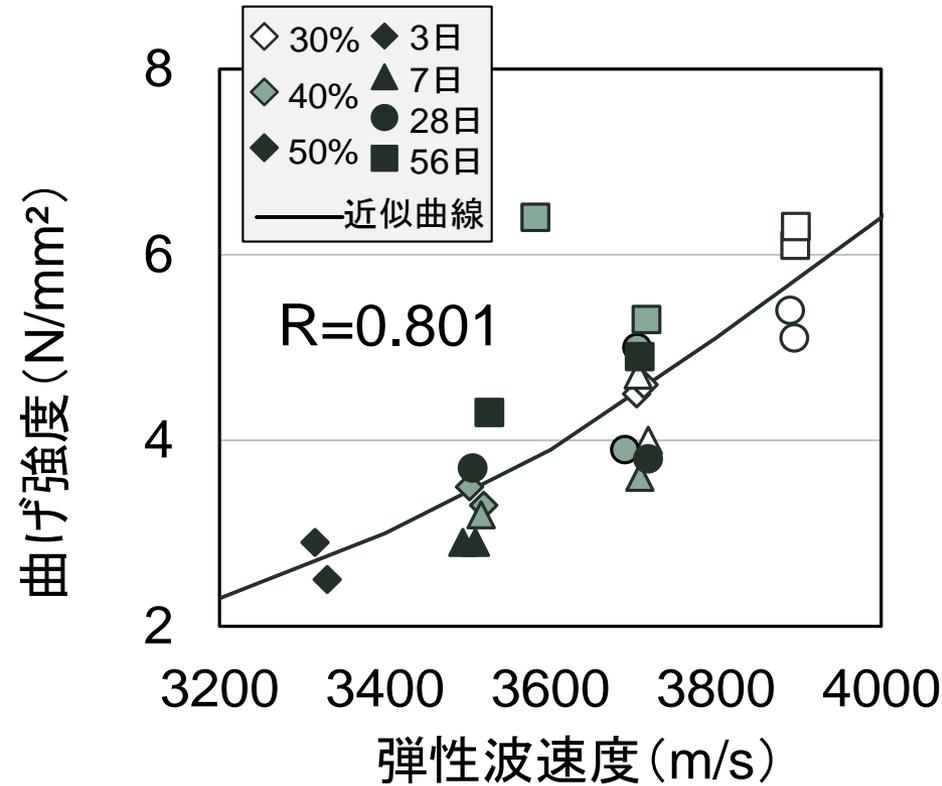
-圧縮強度推定結果-



■ 圧縮強度評価式： $f_c = 2.260 \times 10^{-23} \times V_p^{6.820}$ ($f_c = \beta \cdot V_p^\alpha$)

■ 圧縮強度**60N/mm²以上**の推定も可能

—曲げ強度推定結果—



■ 曲げ強度の増加率に対する弾性波速度の変化が大きい



曲げ強度は圧縮強度より狭い範囲に分布している

- 圧縮強度の推定誤差は概ね**±15%**
- **60N/mm²以上**の圧縮強度の場合でも推定は可能
- 曲げ強度の推定にも応用可能
- プレキャスト製品への品質管理に適用できる可能性を示した

今後の課題

(非破壊試験を管路の維持・品質管理へ活用するためには?)

□初期の物性は耐久性に大きな影響を与える。

⇒非破壊試験による品質評価・管理の提案

強度・弾性係数(今回紹介した手法のメインターゲット)

物質移動抵抗性(打撃試験・弾性波速度など⇔吸水試験・透気試験など)

⇒管路劣化を想定した、簡易的な促進試験, その評価試験の確立

□管路品質の評価への非破壊試験の適用のあるべき姿とは?

⇒戦略的な適用の重要性, 現場ニーズとの研究シーズのマッチング

劣化・機能スクリーニングをはじめとする維持管理システムやPDCAサイクルへの貢献

⇒維持管理上の要求を整理⇔どのような非破壊試験を適用するか

⇒弾性波パラメータと劣化コンクリートの物性との関係性の整理

(データベースの構築)