

新技術「孔内局部載荷試験」を用いた コンクリート構造物の劣化診断手法

NETIS登録 KT-090056-A

川崎地質株式会社

皿井剛典

発表内容

1. はじめに — 新技術開発の背景・経緯
2. 孔内局部載荷試験の概要 — 装置、試験方法
3. 室内実験の結果 — 試験装置開発時の検討結果
4. 実構造物での試験事例紹介 — 樋門、堰堤、海岸堤防
5. まとめ と 今後の展開

1. はじめに

■コンクリート構造物の健全度

建設後長期間の使用により、ひび割れや鉄筋腐食等の劣化が発生することで低下

■港湾構造物では

海水の影響による鉄筋腐食、波浪による表層劣化

■東北地方の特徴

冬期の凍結融解作用により『凍害』が発生

コンクリート表面の断面欠損

→ 進行し、鉄筋位置まで到達 → 鉄筋腐食の原因となる

1. はじめに

凍害などによりコンクリート表面から劣化が進行した構造物の補修・補強を行う際には、劣化の“**深さ**”や“**範囲**”を的確に把握する必要がある

“最適な”補修・補強
スペックの決定

補修・補強を最小限とすることが可能
例えば、はつり深さを最小とすることができれば、補修コストを縮減できる

環境面への配慮...

建設廃棄物の発生をより少なくすることができる



1. はじめに

【凍害による構造物の劣化深さや程度の診断手法】

従来の方法

超音波伝搬速度測定(コア孔内、採取コア、コンクリート表面)

微細ひび割れや細孔径分布測定(採取試料)

改良プルオフ法(現地)

小径コア等による強度測定(採取コア試料)

従来法の問題点

定量的な評価が難しい

深度方向の評価が深さ数cmの平均としての評価となる

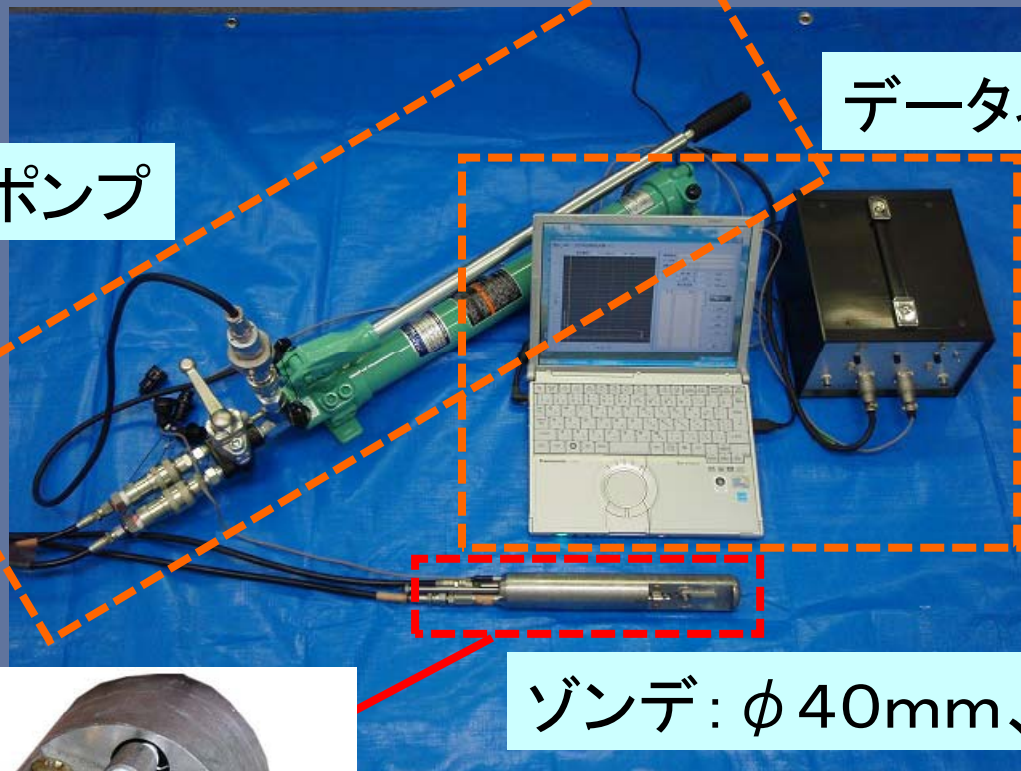


構造物の深さ方向のコンクリート強度が測定可能な「**孔内局部載荷試験**」(KT-090056-A)を開発し、劣化診断手法としての活用について検討した

2. 孔内局部載荷試験の概要 ①試験装置

加圧ポンプ

データ収集装置



ゾンデ: $\phi 40\text{mm}$ 、 $L270\text{mm}$

載荷先端



ファイバースコープ

総重量: 15kg程度

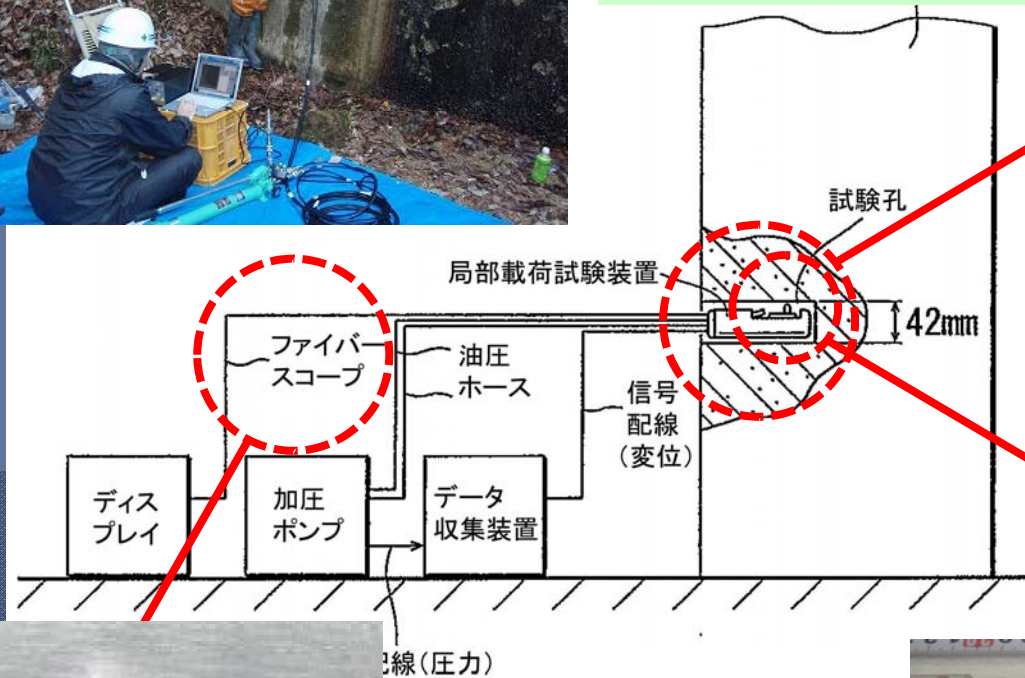
2. 孔内局部載荷試験の概要 ②試験手順

作業範囲: 1.5m × 1.5m程度



① φ42mmで試験孔を削孔

② 試験孔(コア孔)へ試験装置を挿入

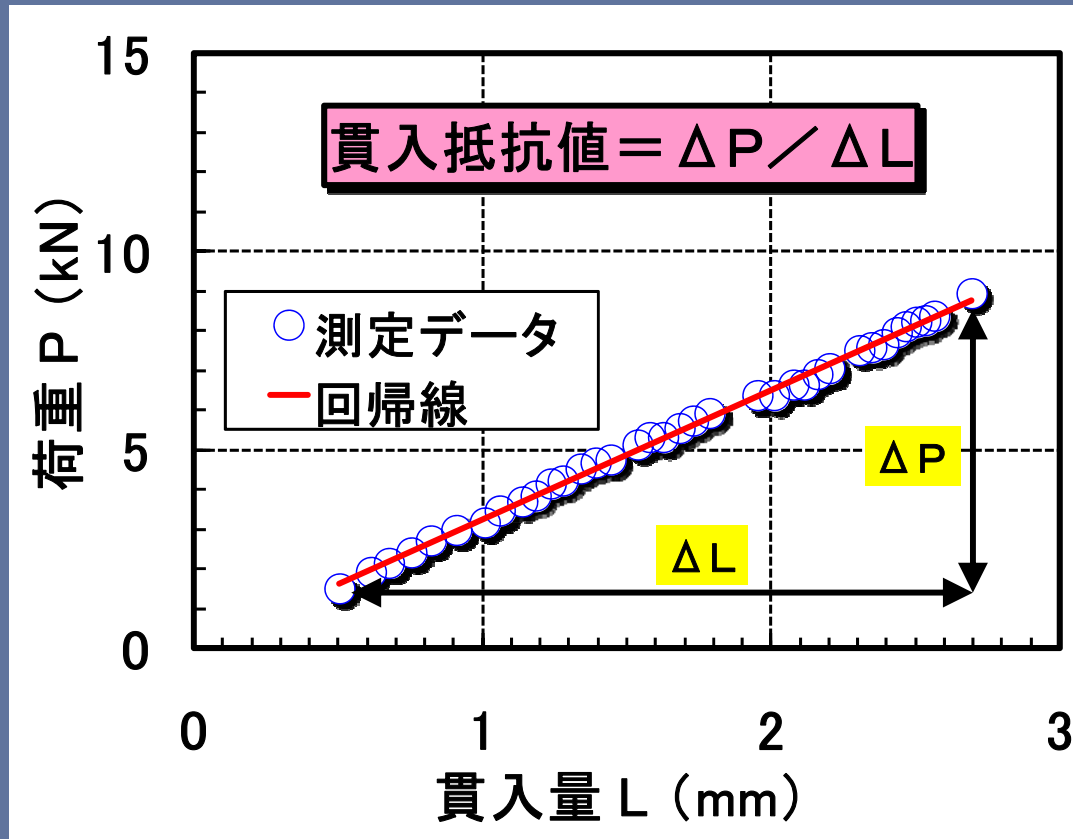


③ 加圧し、孔壁面に
載荷先端を貫入



② ファイバースコープで孔壁を確認、
載荷位置を選定

2. 孔内局部載荷試験の概要 ③強度推定



荷重－貫入量曲線

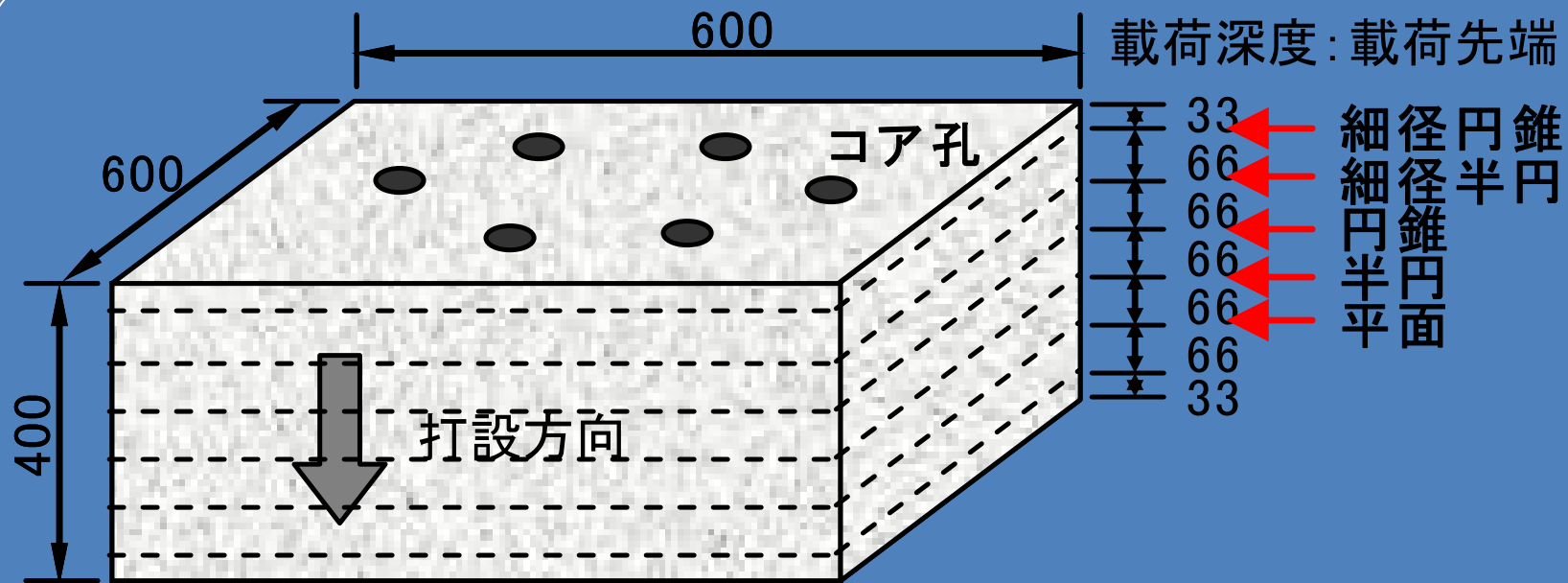


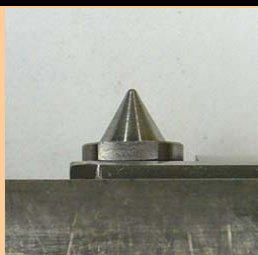
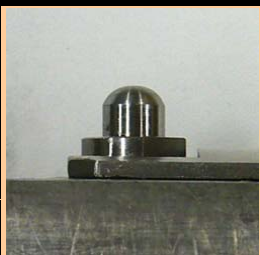


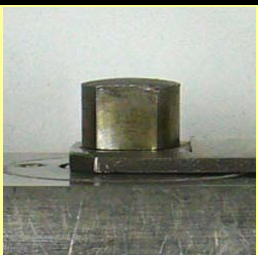
曲線の傾きから
“貫入抵抗値”を算出



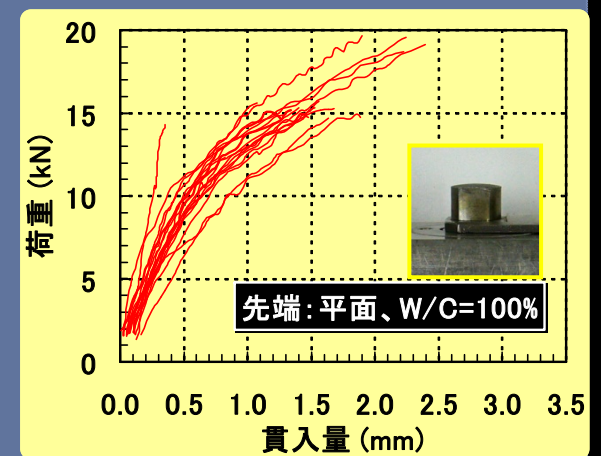
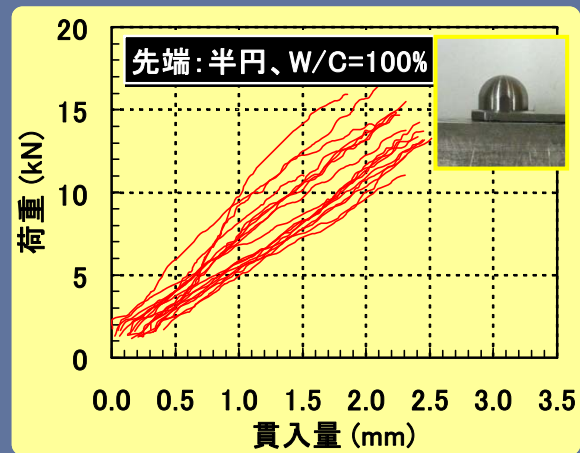
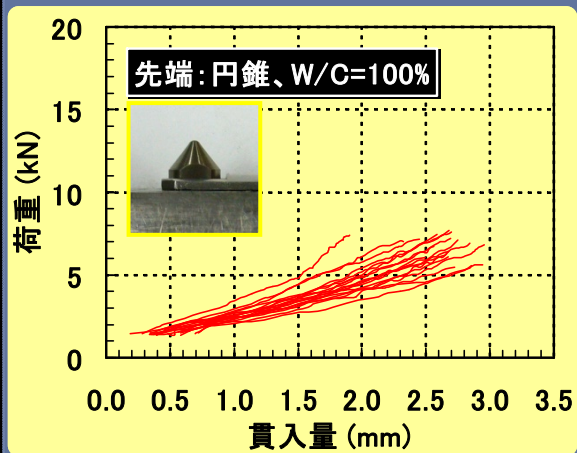
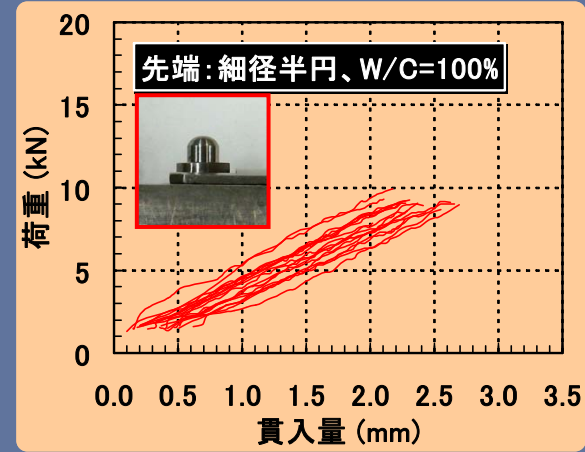
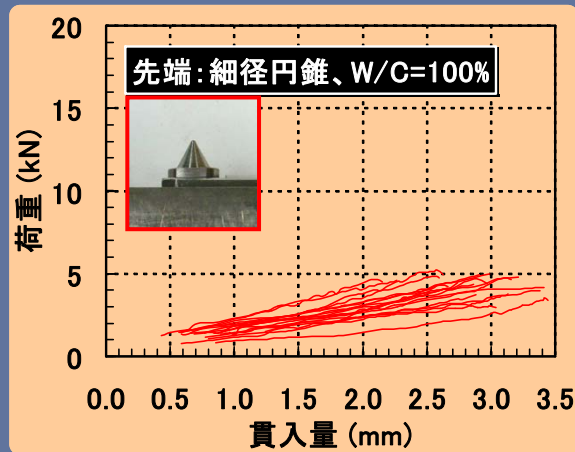
コンクリート強度を推定

3. 室内実験の結果 ①モルタル供試体



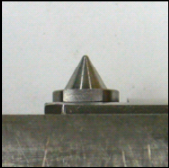
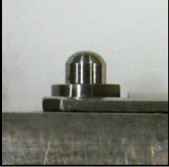
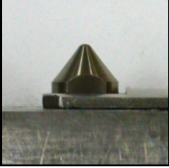


φ 6mm		φ 10mm		
細径円錐	細径半円	円錐	半円	平面
				

3. 室内実験の結果 ①モルタル供試体



3. 室内実験の結果 ①モルタル供試体

載荷先端形状の検討

先端形状		使用性 試験にかかる時間 載荷位置の選定	耐久性 先端の破損	データ再現性 結果のばらつき	最終評価
細径円錐		○	×	○	△
細径半円		○	△	○	○
円錐		○	△	○	○
半円		△	△	△	△
平面		×	○	×	×

○:良い、△:普通、×:劣る

3. 室内実験の結果 ①モルタル供試体 まとめ

モルタル供試体による性能確認試験の結果、以下の知見が得られた。

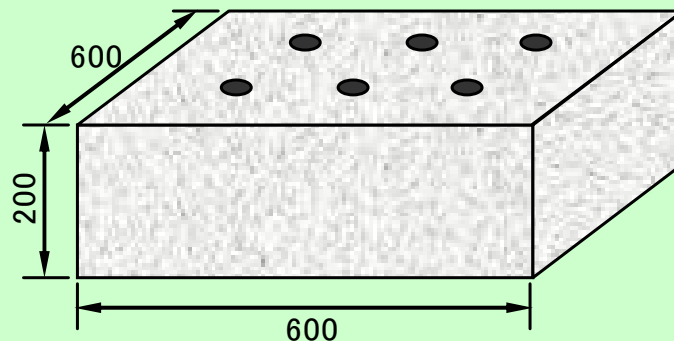
- 孔内局部載荷試験装置は、載荷先端の違いにより生ずる荷重と貫入量の関係の違いを、捉えることができる。
- 「細径半円」や「円錐」を用いると、ばらつきが小さく、再現性のよい値を得ることができる。



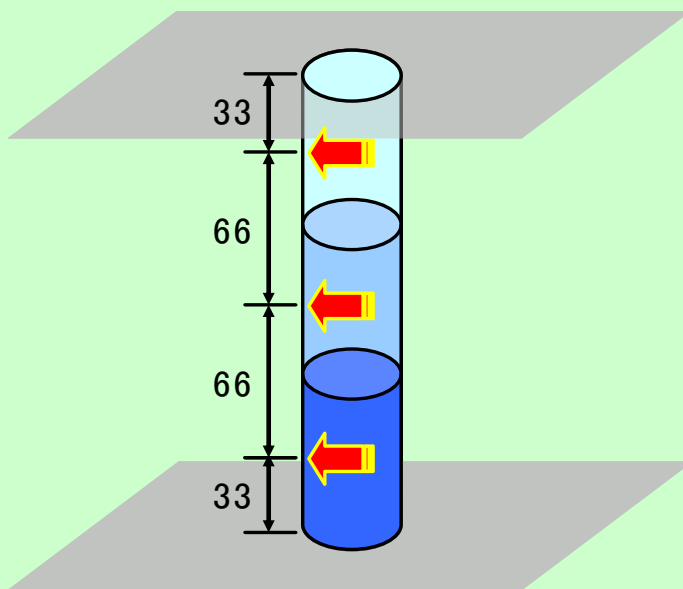
- 孔内局部載荷試験により、強度変化を捉えることが可能である。

3. 室内実験の結果 ②コンクリート供試体

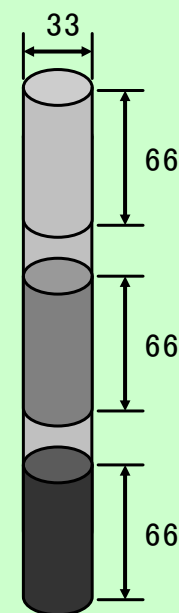
(1) 粗骨材・空隙の影響確認試験－供試体A



孔内局部載荷試験

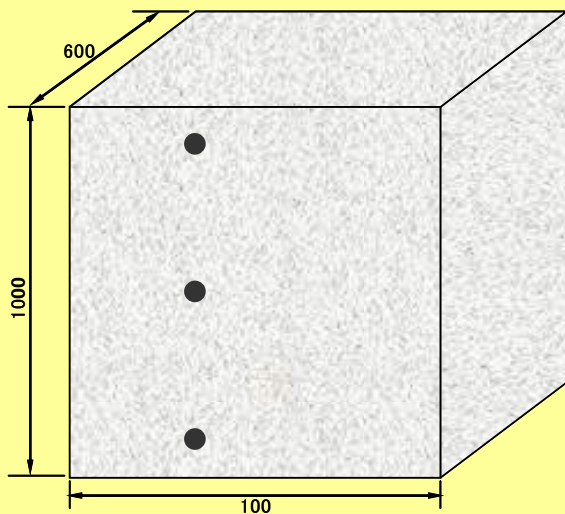


圧縮強度試験

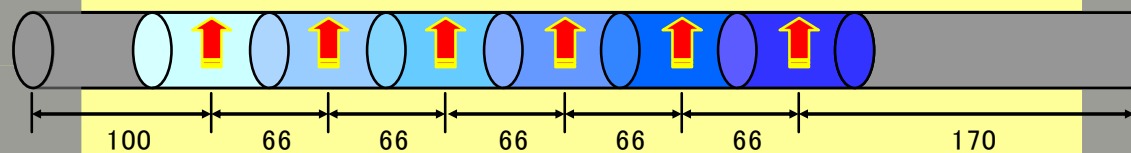


3. 室内実験の結果 ②コンクリート供試体

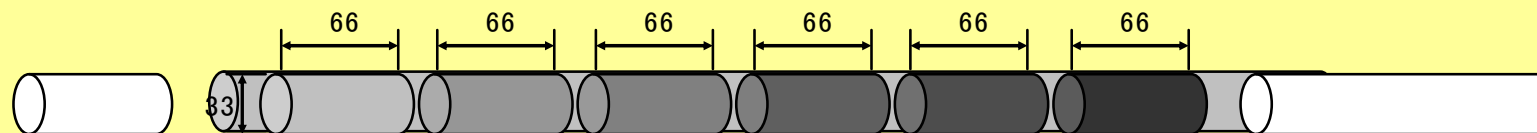
(2) 大型供試体による載荷試験－供試体B



孔内局部載荷試験



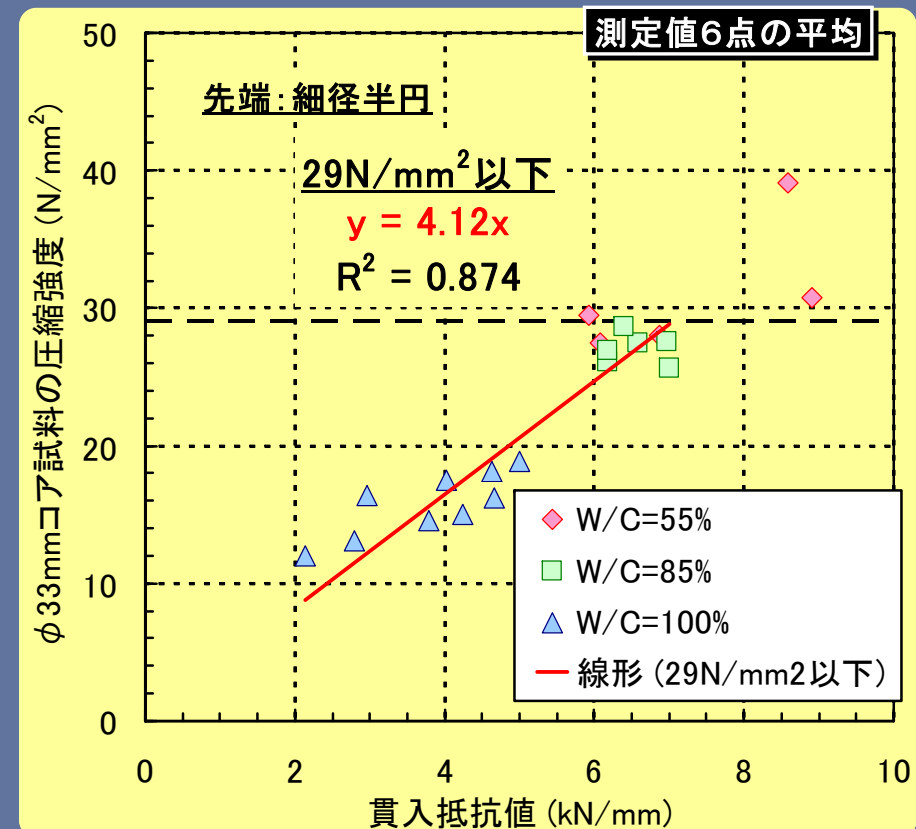
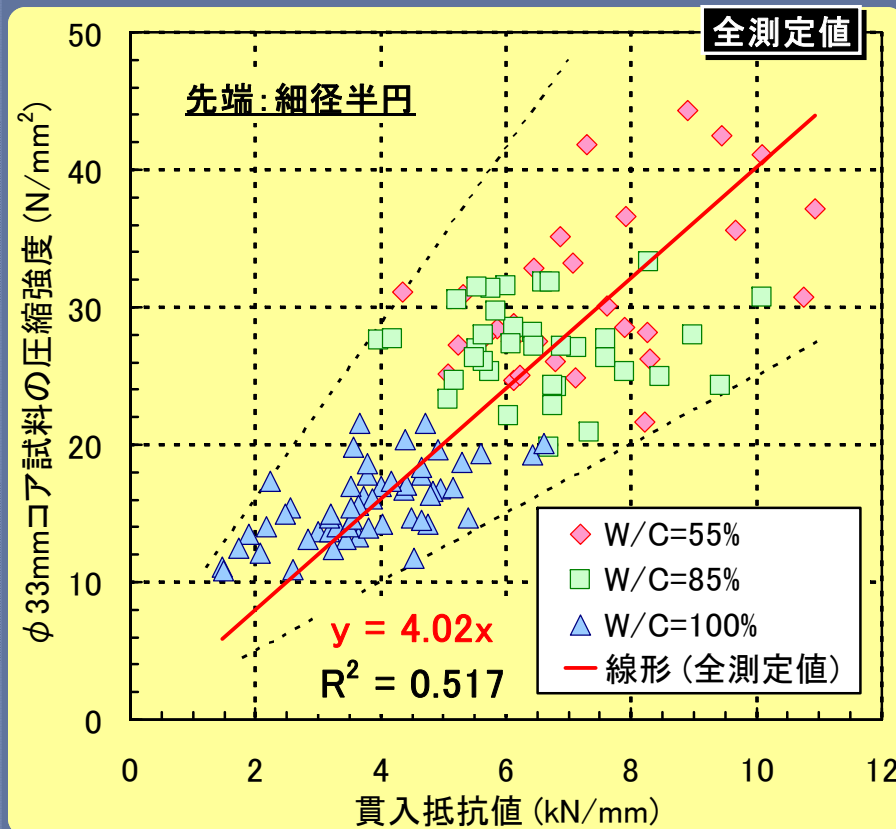
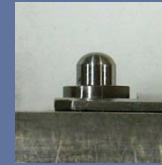
圧縮強度試験



3. 室内実験の結果 ②コンクリート供試体

(2) 大型供試体による载荷試験－供試体B

< 細径半円 >



3. 室内実験の結果 ②コンクリート供試体 まとめ

コンクリート供試体による適用性検討試験の結果、以下の知見が得られた。

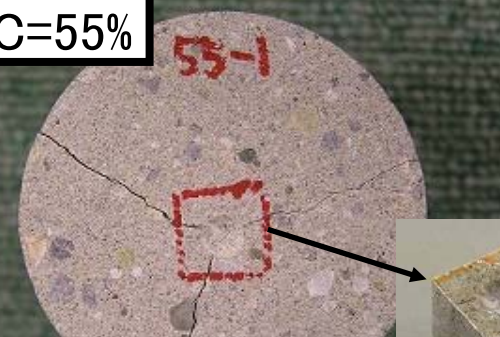
- 「細径半円」を用いた場合、コンクリート強度が $29\text{N}/\text{mm}^2$ 以下であれば、同条件の6点の貫入抵抗値を測定することにより、圧縮強度の推定が可能である。
- 「細径半円」による載荷試験では、貫入抵抗値を約4倍した値が、載荷点付近のコンクリート強度と推定できる。
- 載荷点近傍の粗骨材や空隙は、異常値発生の原因となる。

3. 室内実験の結果 ③影響範囲の検討

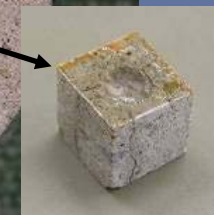
破壊挙動の観察：観察用試料の作製



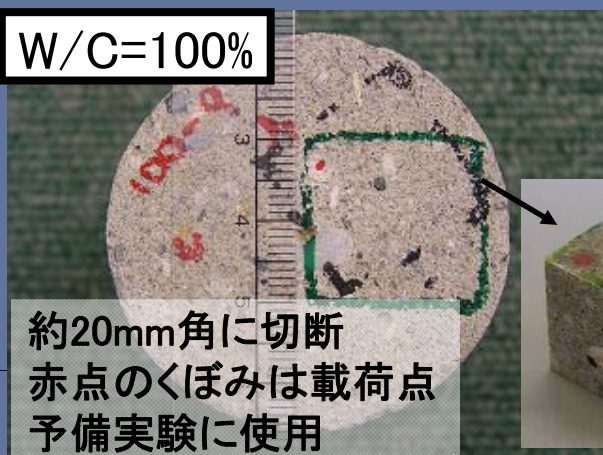
W/C=55%



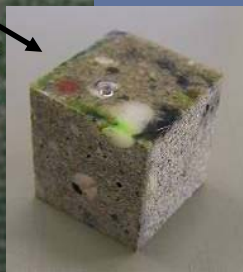
約10mm角に切断
中央のくぼみは載荷点



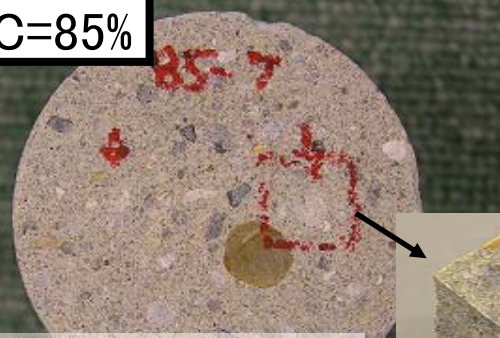
W/C=100%



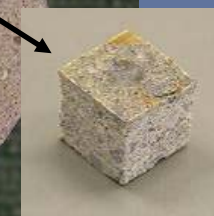
約20mm角に切断
赤点のくぼみは載荷点
予備実験に使用



W/C=85%



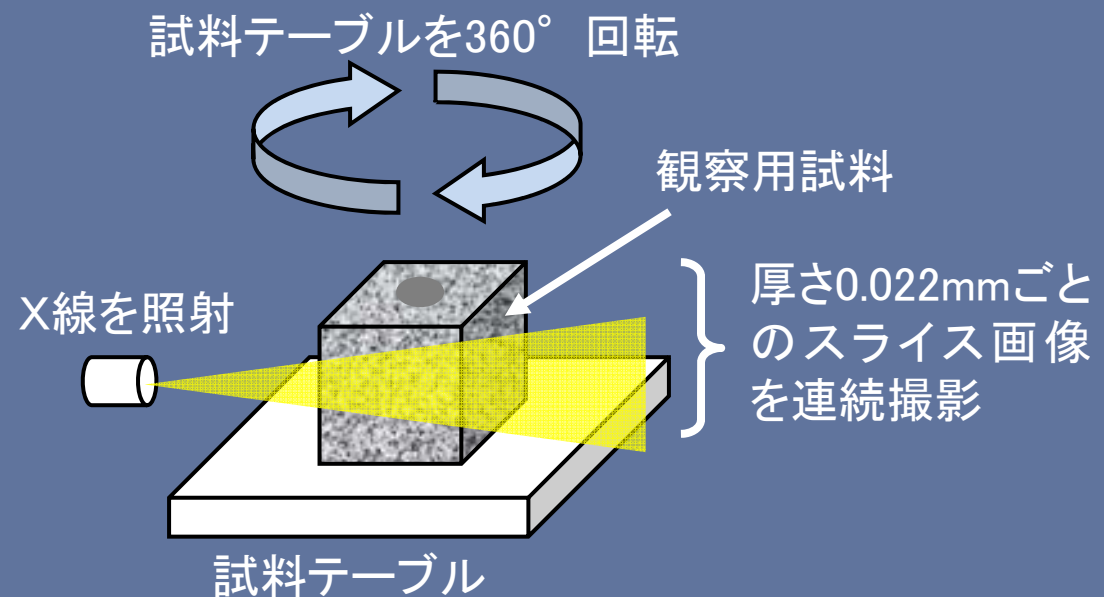
約10mm角に切断
中央のくぼみは載荷点



3. 室内実験の結果 ③影響範囲の検討

破壊挙動の観察：X線CT装置による観察

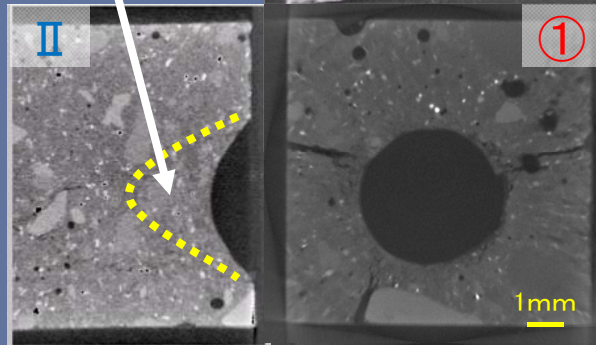
試料中の物質の密度の違いを色の濃淡で表現できる



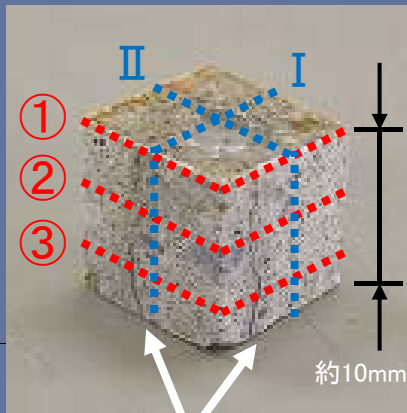
3. 室内実験の結果 ③影響範囲の検討

W/C=55%

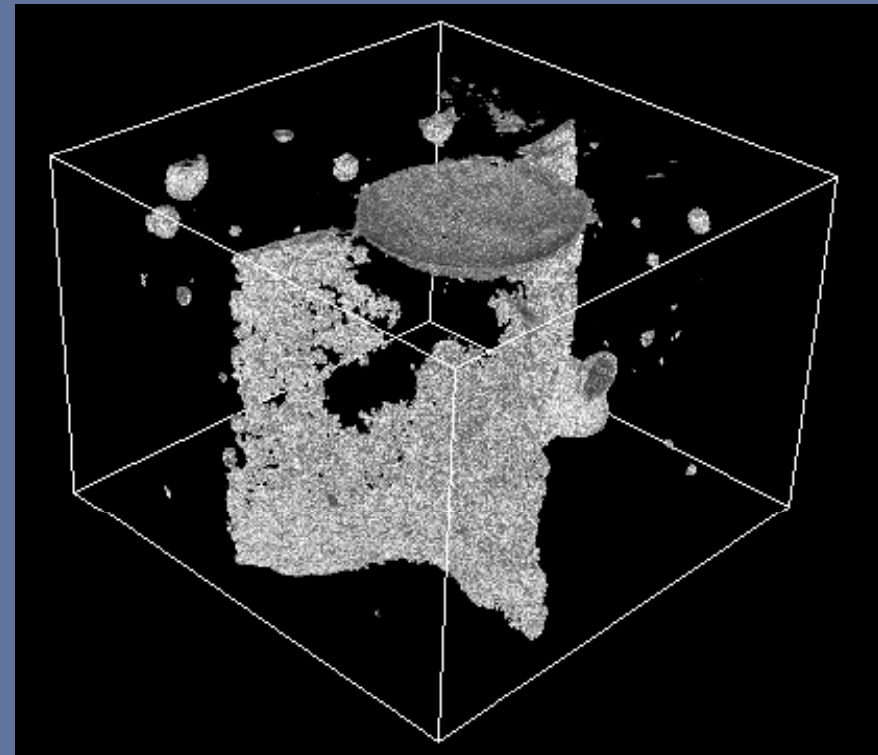
周囲と異なり
気泡が無い



ひび割れ部分が
押し潰されている



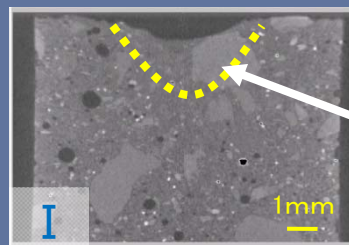
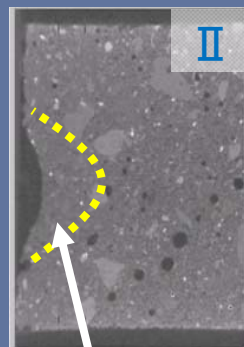
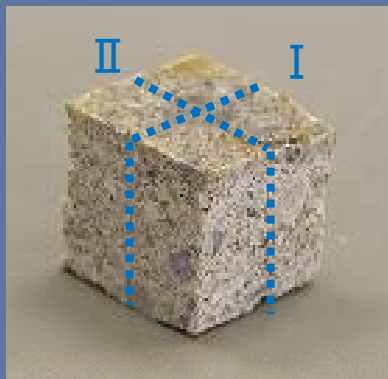
ひび割れ



白色部—気泡、ひび割れ

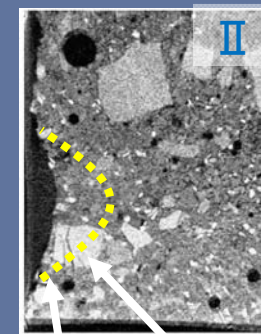
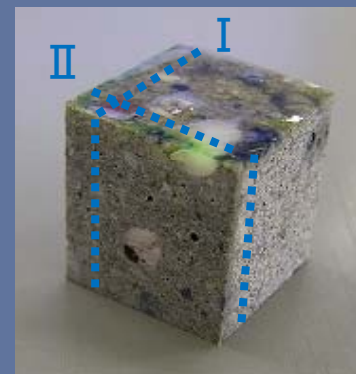
3. 室内実験の結果 ③影響範囲の検討

W/C=85%

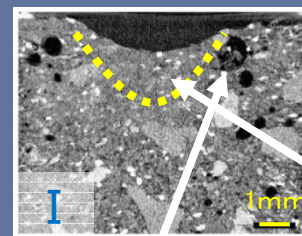


周囲と異なり
気泡が無い

W/C=100%



骨材中の
ひび割れ



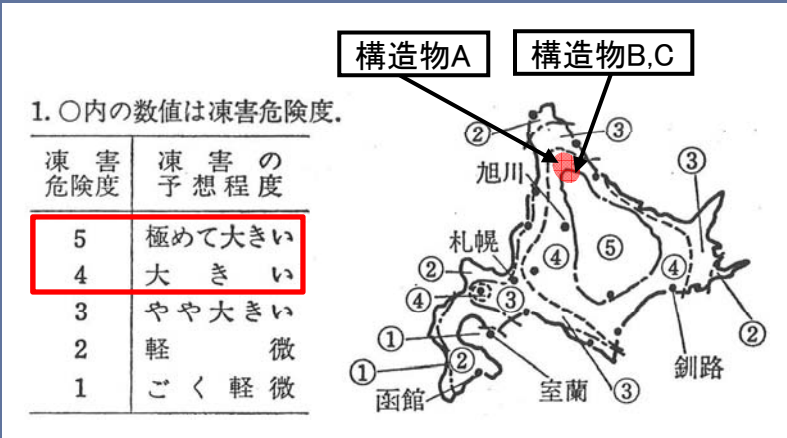
気泡の潰れ

周囲と異なり
気泡が無い

3. 室内実験の結果 ③影響範囲の検討 まとめ

- X線CT装置を用いた観察により、孔内局部載荷試験による載荷点直下に、くさび形の圧密領域が確認された。
- くさび形の圧密領域は、載荷点直下にのみ存在し、載荷点周辺への拡がりはない。
- 孔内局部載荷試験による影響範囲は、非常に狭いと言える。

4. 実構造物での試験事例紹介 ①北海道・樋門



4. 実構造物での試験事例紹介 ①北海道・樋門



構造物A: 右岸擁壁・中間部、左岸擁壁・上部および喫水部

構造物B: 右岸擁壁・喫水部、左岸擁壁・中間部

構造物C: 右岸擁壁・喫水部、左岸擁壁・上部

4. 実構造物での試験事例紹介 ①北海道・樋門



- ・載荷点は孔内状況に応じて5~8点(方向)に設定
- ・深度を変えて測定を実施



構造物A: 3箇所 × 4深度 = 12測点

構造物B: 2箇所 × 3深度 = 6測点

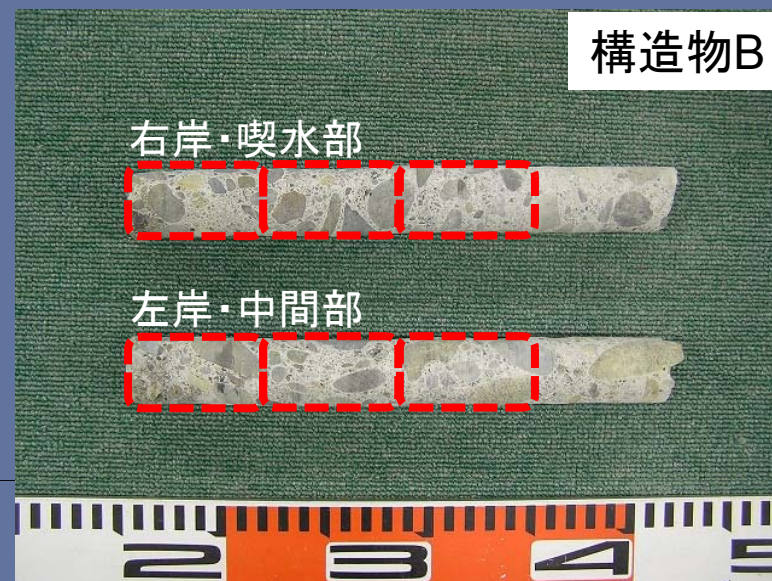
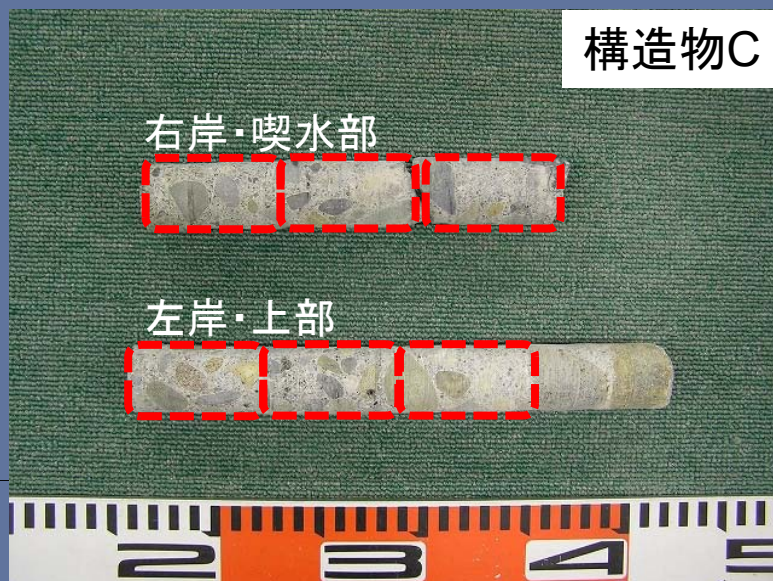
構造物C: 1箇所 × 5深度 + 1箇所 × 3深度 = 8測点

4. 実構造物での試験事例紹介 ①北海道・樋門

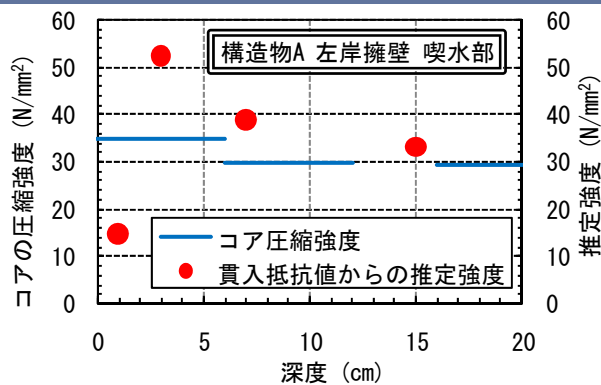
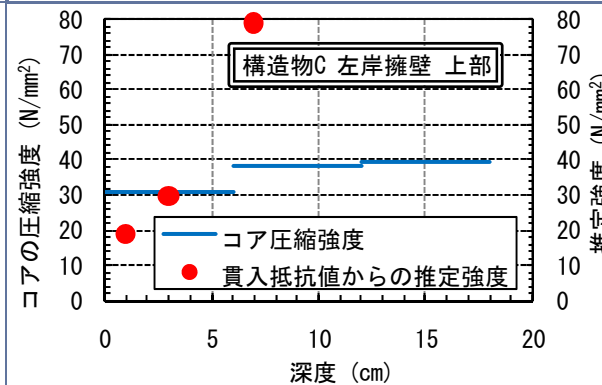
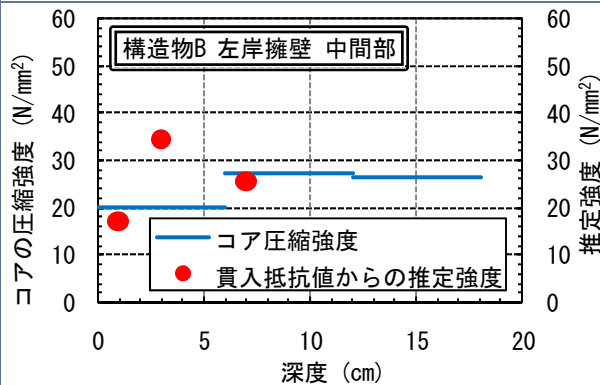
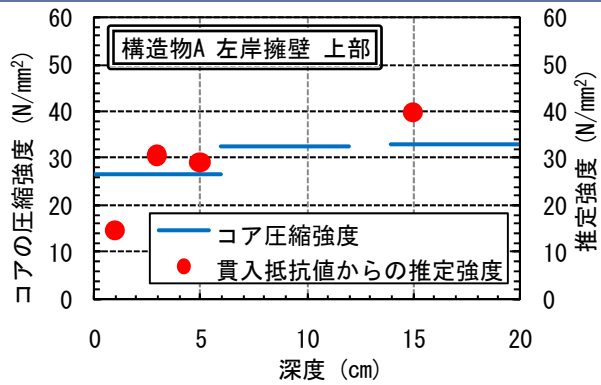
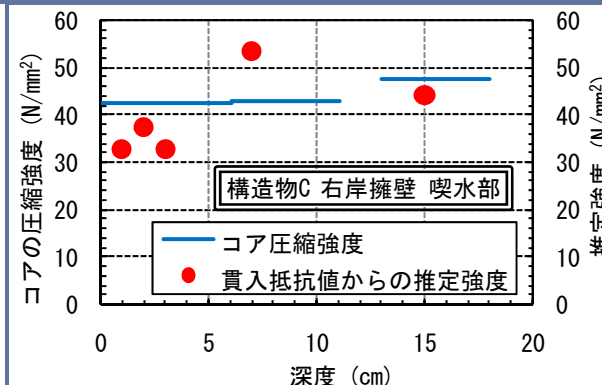
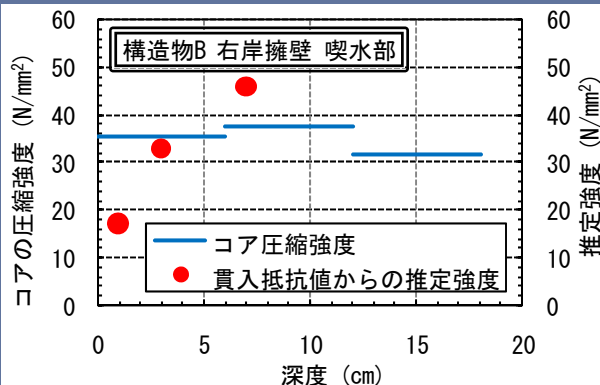
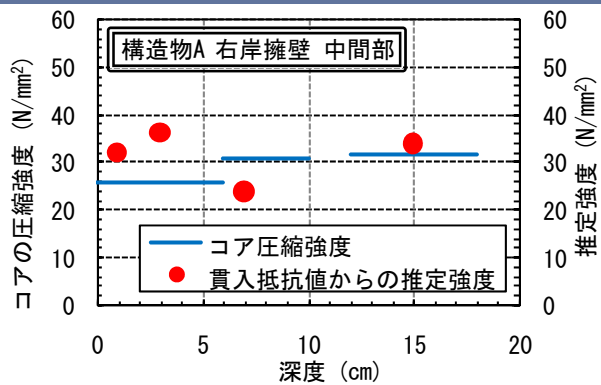
構造物表面から約6cmずつに切断し、
1箇所につき3～4本のコア試料を作成

↓
圧縮強度試験を実施

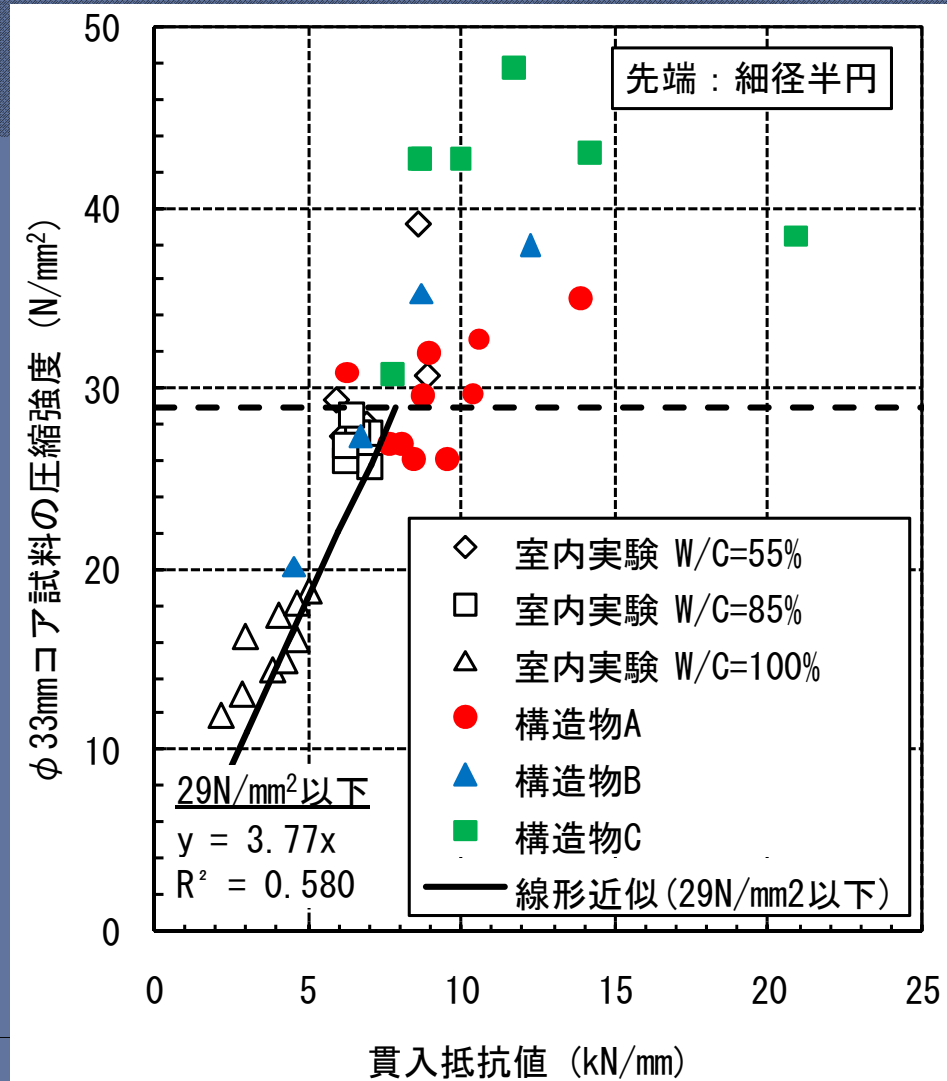
↓
貫入抵抗値との比較



4. 実構造物での試験事例紹介 ①北海道・樋門



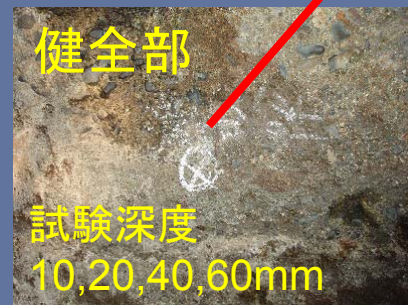
4. 実構造物での試験事例紹介 ①北海道・樋門



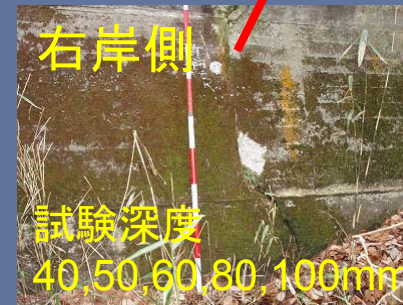
構造物	擁壁	部位	コア試料の 圧縮強度試験		孔内局部 載荷試験		<参考> 圧縮強度 の推定値 $3.77 \times K$ (N/mm ²)	
			深度 (cm)	圧縮 強度 (N/mm ²)	試験 深度 (cm)	貫入 抵抗値 K (kN/mm)		
A	右岸	中間	0~6	26.1	1	8.513	32.1	
					3	9.604	36.2	
			6~10	31.0	7	6.330	23.9	
				12~18	31.9	15	9.013	34.0
	左岸	上	0~6	26.9	1	3.865	14.6	
					3	8.125	30.6	
					5	7.692	29.0	
				6~12	32.8	-	-	-
				14~20	32.9	15	10.514	39.6
左岸	喫水	0~6	34.9	1	3.903	14.7		
				3	13.894	52.4		
				7	10.309	38.9		
			16~22	29.5	15	8.770	33.1	
B	右岸	喫水	0~6	35.4	1	4.564	17.2	
					3	8.713	32.8	
					7	12.197	46.0	
				12~18	31.8	-	-	-
	左岸	中間	0~6	20.3	1	4.515	17.0	
					3	9.105	34.3	
				7	6.730	25.4		
			12~18	26.3	-	-	-	
C	右岸	喫水	0~6	42.6	1	8.659	32.6	
					2	9.922	37.4	
					3	8.647	32.6	
				6~11	43.0	7	14.187	53.5
				13~18	47.7	15	11.742	44.3
	左岸	上	0~6	30.7	1	4.963	18.7	
					3	7.827	29.5	
				7	20.919	78.9		
			12~18	39.4	-	-	-	

4. 実構造物での試験事例紹介 ②関西地方・堰堤

堰堤A



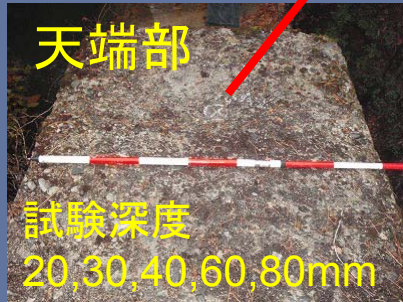
堰堤B



堰堤C

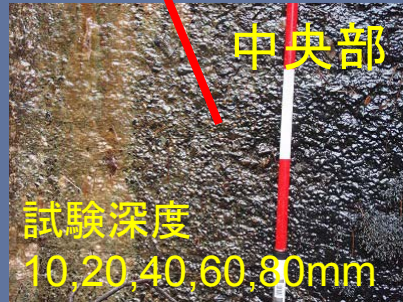


天端部



試験深度
20,30,40,60,80mm

中央部

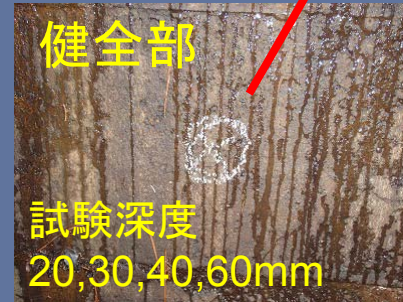


試験深度
10,20,40,60,80mm

堰堤D

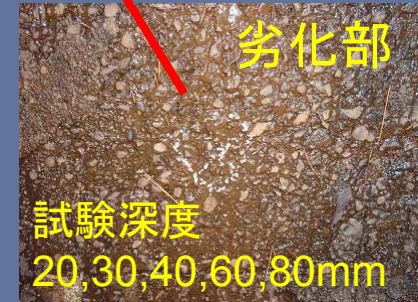


健全部



試験深度
20,30,40,60mm

劣化部



試験深度
20,30,40,60,80mm

堰堤E

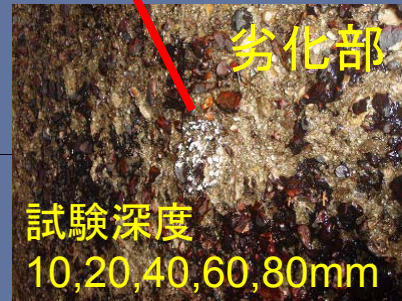


健全部



試験深度
10,20,40,60,80mm

劣化部



試験深度
10,20,40,60,80mm

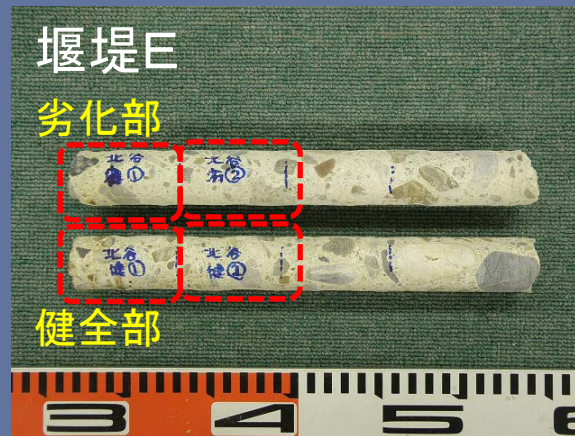
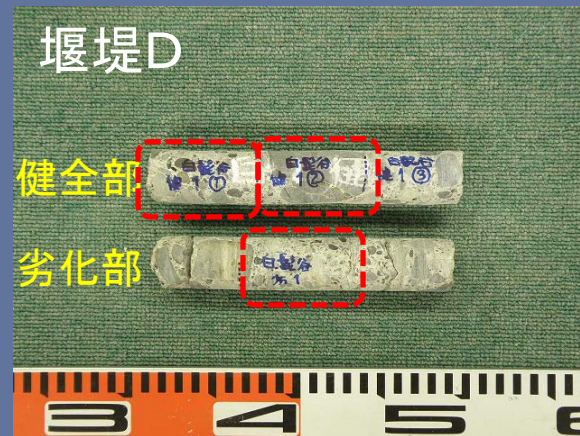


水通し部で流水
の凍結を確認

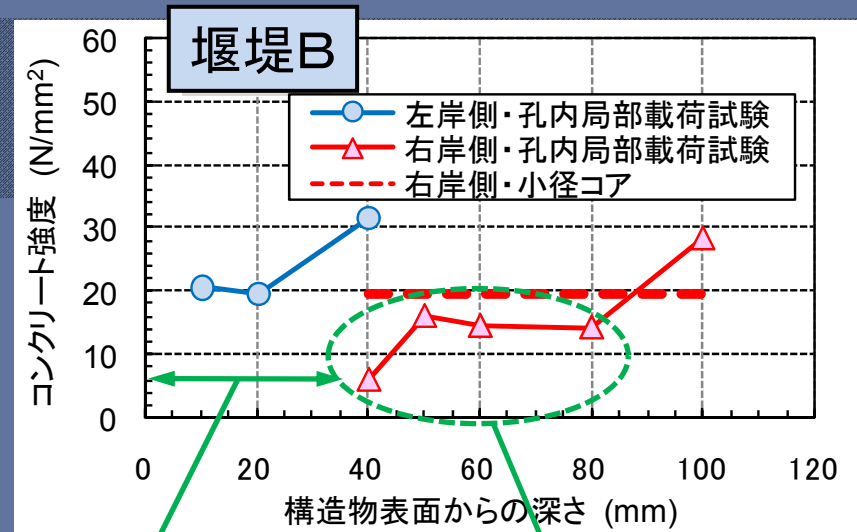
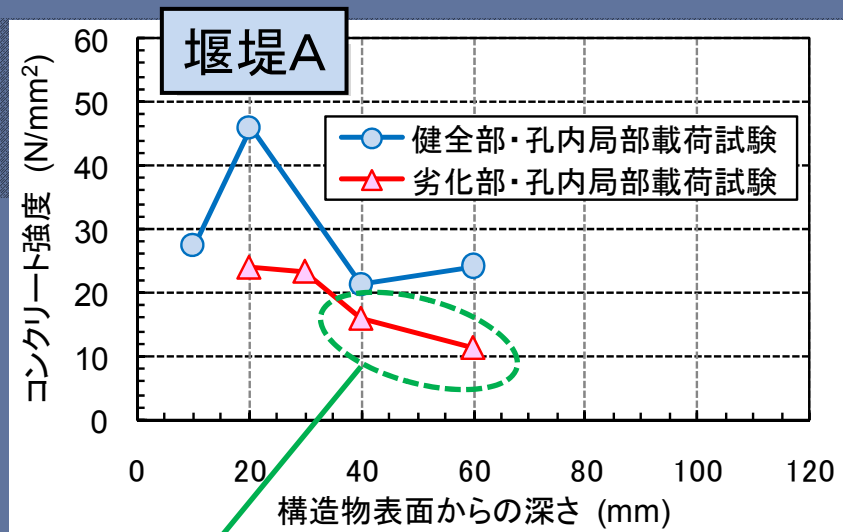
2010.1.19

4. 実構造物での試験事例紹介 ②関西地方・堰堤

 : 圧縮強度試験実施位置



4. 実構造物での試験事例紹介 ②関西地方・堰堤



ジャンカ部の締固め程度の違いによる部分的な強度低下

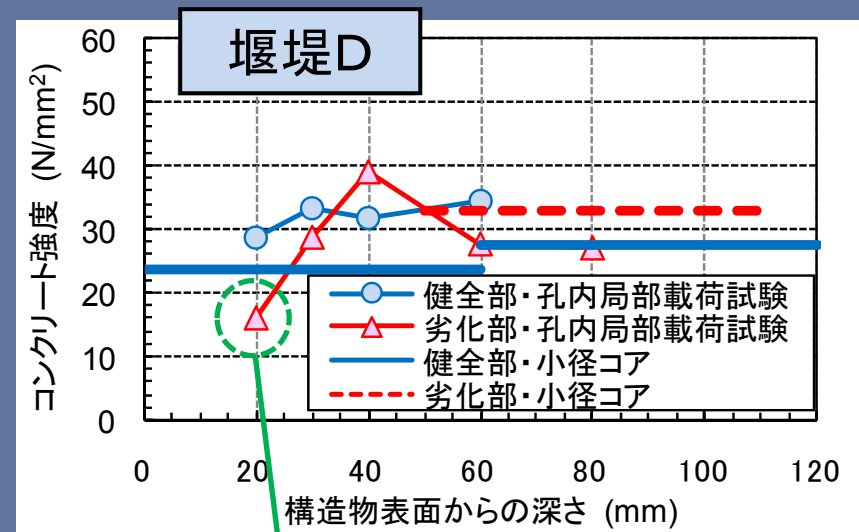
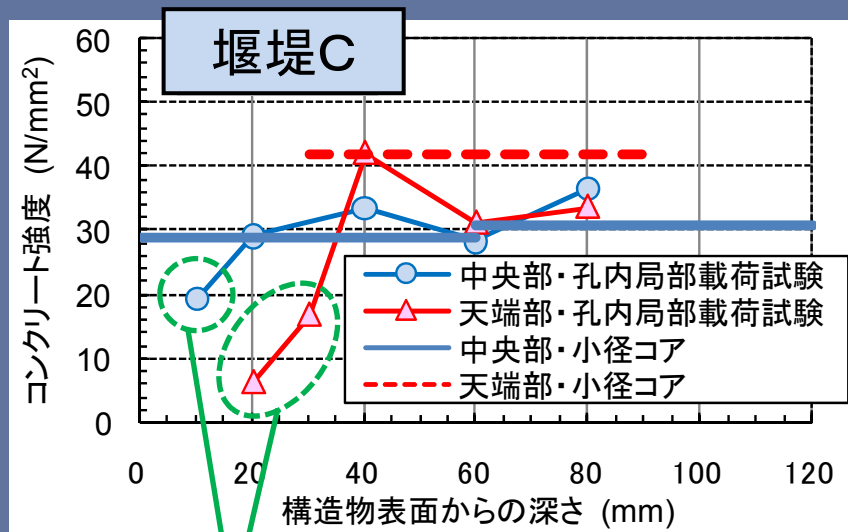


削孔時に欠損

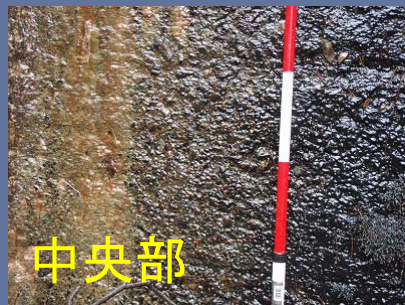


コアの圧縮強度試験では分からない、深さ10mmごとの強度変化を捉えている

4. 実構造物での試験事例紹介 ②関西地方・堰堤



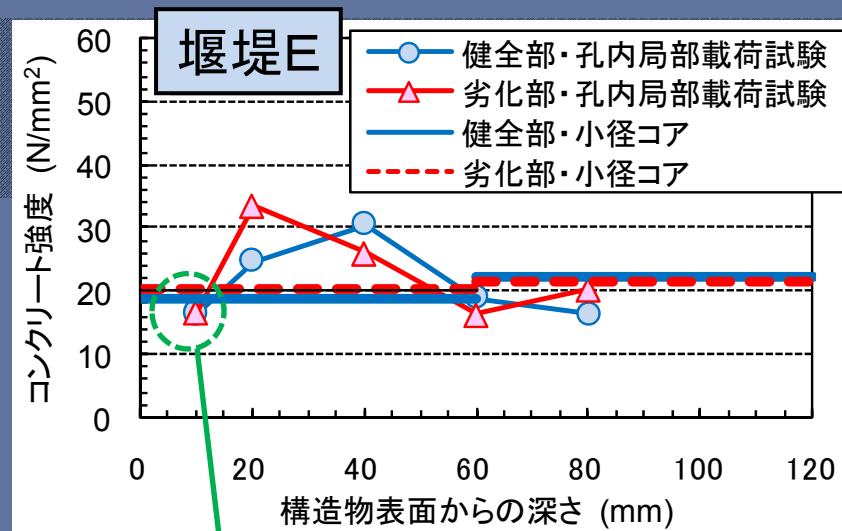
外観上の劣化が同程度でも、強度の低下深さは異なる



凍害劣化の進行を窺わせる



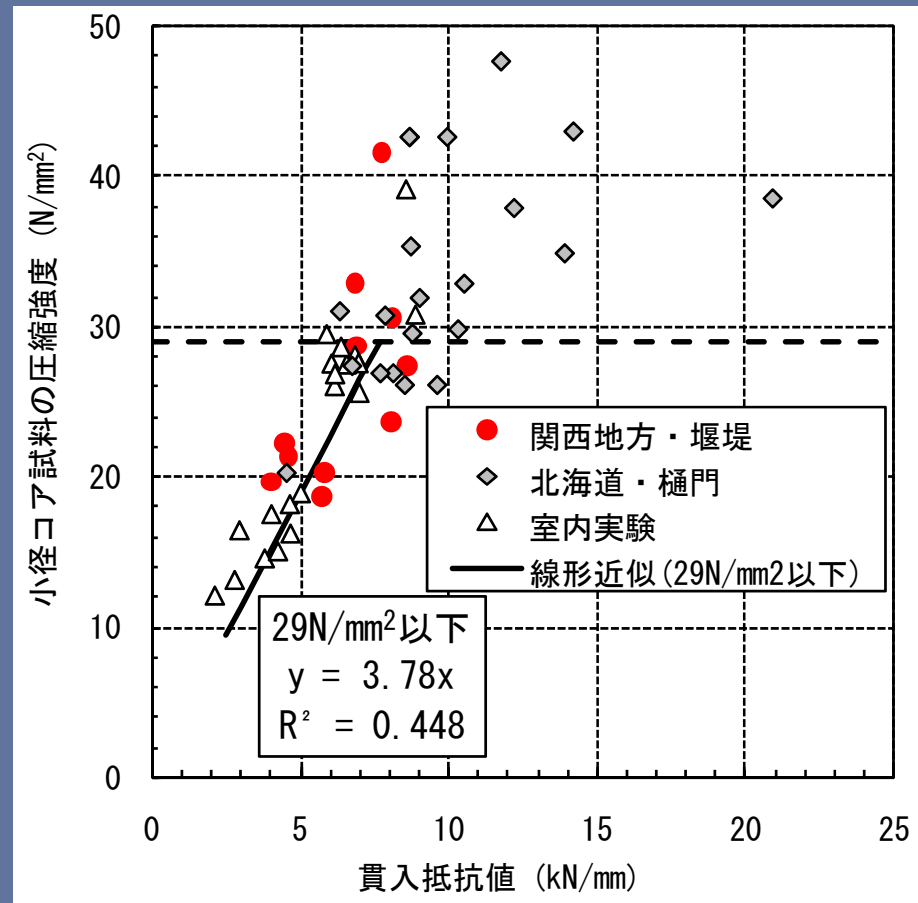
4. 実構造物での試験事例紹介 ②関西地方・堰堤



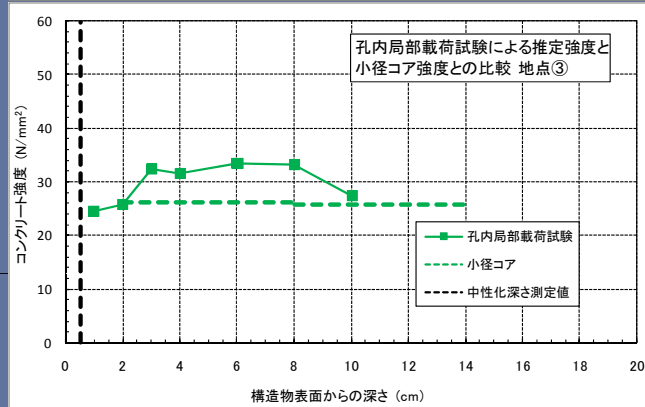
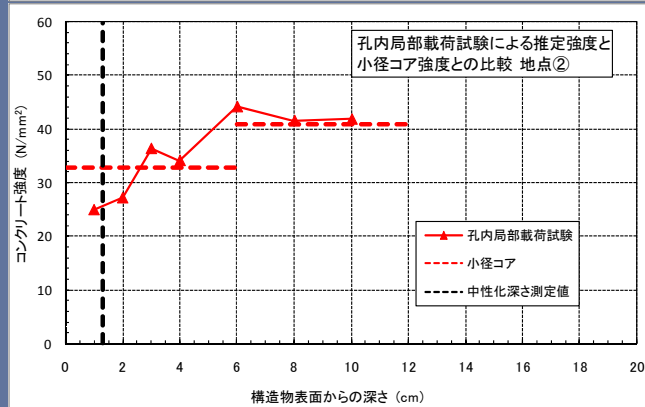
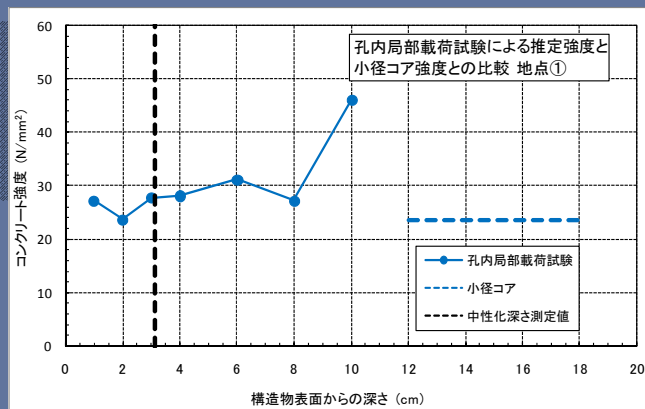
- ・表層の強度低下が生じており、凍害劣化の進行を窺わせる
- ・外観上健全な部位でも、表層の強度低下が生じている



4. 実構造物での試験事例紹介 ②関西地方・堰堤



4. 実構造物での試験事例紹介 ③四国・海岸堤防



5. まとめ と 今後の展開

「孔内局部載荷試験」による室内実験および実構造物での試験の結果、以下のことが言える。

- 深さ10mmごとの試験が実施可能であり、コンクリート構造物の深さ方向の強度変化を測定でき、強度の低下範囲(強度の変化点)を詳細に捉えることができる。
- 外観上の“健全”・“劣化”の判断だけでは分からない、コンクリート構造物のごく表層の強度低下を捉えることができる。
- 孔内局部載荷試験は、コンクリート構造物の劣化深さ評価のための有効な調査手法と言える。

5. まとめ と 今後の展開

今後の活用に関して...

- ▼コンクリート表面からの劣化の進行が認められる構造物における、『劣化深さ』、『コンクリート強度低下深さ』の診断
- ▼コンクリート劣化により、室内試験用コア試料の採取が困難な場合のコンクリート強度の把握
- ▼ ϕ 100mmなど大孔径のコア採取や複数のコア採取ができない場合の微破壊調査手法として
- ▼はつり深さの設定など、補修スペックの決定の際の事前調査として

5. まとめ と 今後の展開

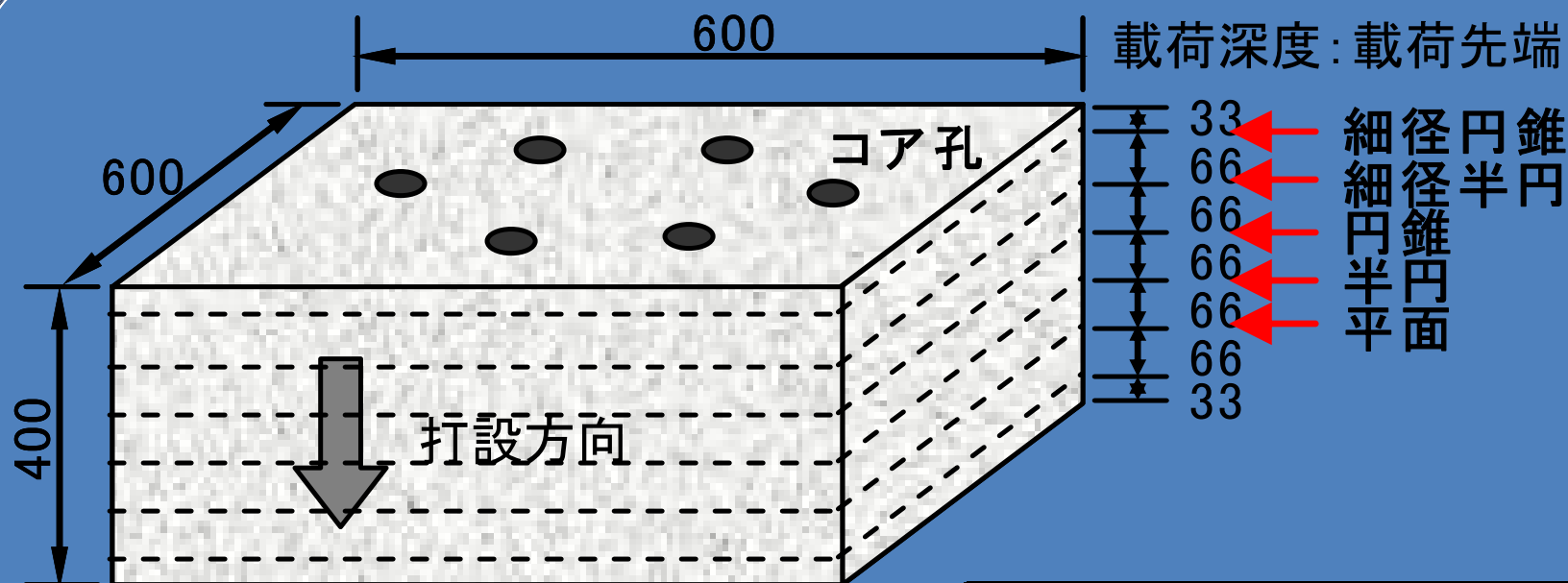
はつり深さに着目すると...

- ①劣化深さの詳細な把握により、補修時の**はつり深さ**をより詳細に設定することが可能
- ②試験により、はつり深さを最小とすることができるため、はつり・断面修復などの**補修コストの縮減**に役立つ
- ③はつり深さを最小とすることで、**建設廃棄物の発生を最小限**におさえることができる
- ④小径削孔での試験のため、構造物への影響が小さくて済む

4. 実構造物での試験事例紹介 ②関西地方・堰堤

堰堤	部位	項目	コンクリート強度 (N/mm ²) ※ ()内は貫入抵抗値								平均値
			測定深度 (mm)								
			10	20	30	40	50	60	80	100	
A	健全部	孔内局部載荷試験	27.5	45.9		21.4		24.3			29.8
	劣化部	孔内局部載荷試験		24.2	23.5	16.0		11.4			18.8
B	左岸側	孔内局部載荷試験	20.7	19.8		31.4					24.0
	右岸側	孔内局部載荷試験				6.0	16.2	14.6	14.3	28.6	15.9
		小径コア				15.9 (3.98)					—
C	中央部	孔内局部載荷試験	19.1	29.0		33.3		28.2	36.5		29.2
		小径コア	27.4 (6.85)				32.4 (8.10)				—
	天端部	孔内局部載荷試験		6.3	16.8	42.0		31.2	33.7		26.0
		小径コア	30.9 (7.73)								—
		小径コア	41.7								41.7
D	健全部	孔内局部載荷試験		28.8	33.3	31.7		34.4			32.1
		小径コア	32.1 (8.03)				34.4 (8.60)				—
	劣化部	孔内局部載荷試験		16.0	28.7	38.9		27.6	27.0		27.6
		小径コア	27.3 (6.83)								—
E	健全部	孔内局部載荷試験	16.5	24.8		30.6		18.9	16.4		21.4
		小径コア	22.7 (5.68)				17.7 (4.43)				—
	劣化部	孔内局部載荷試験						33.0			33.0
		小径コア	18.7								20.5
		孔内局部載荷試験	16.7	33.4		25.9		16.3	20.3		22.5
小径コア	23.1 (5.78)				18.3 (4.58)				—		
小径コア	20.3								20.9		

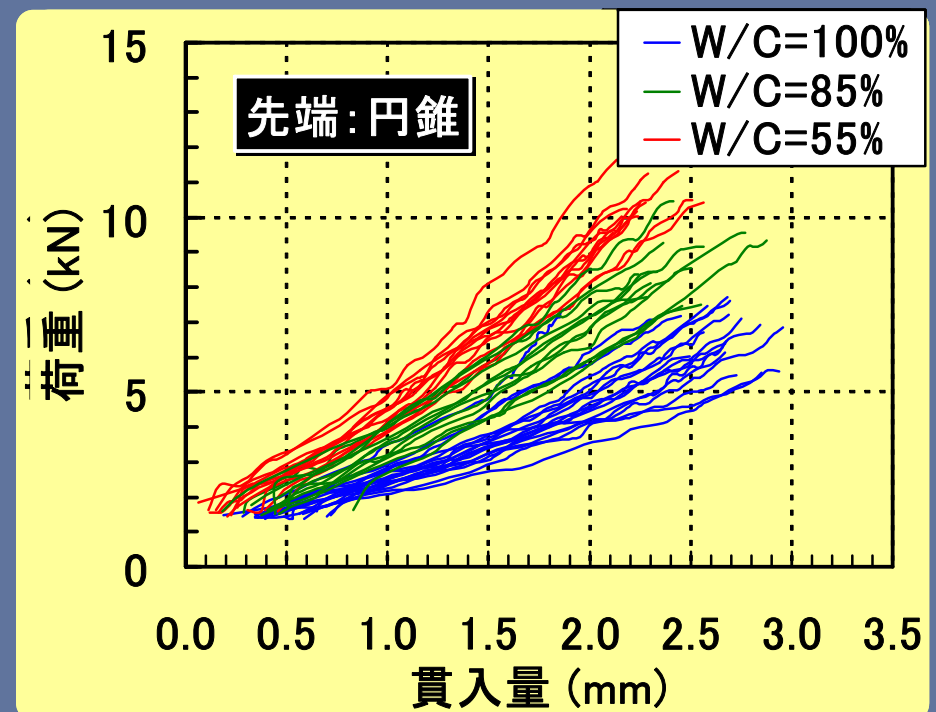
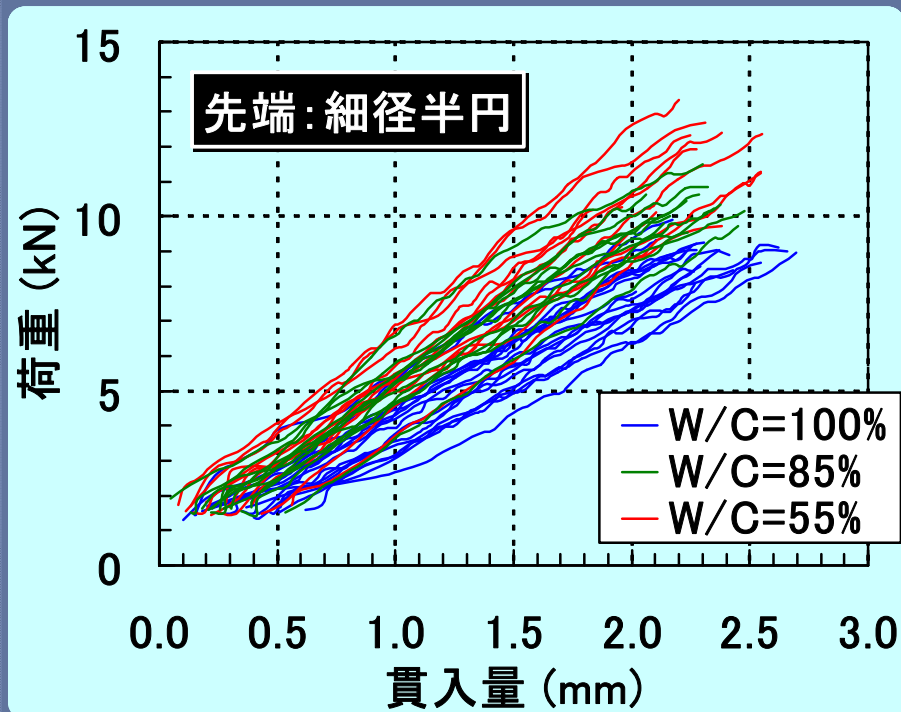
モルタル供試体による性能確認試験



材料名	種類	産地・品名	密度
セメント	普通	太平洋セメント(株)	3.16
水	地下水	つくば市	1.00
細骨材	陸砂	外浪逆浦産(70%)	2.60
	砕砂	葛生産(30%)	2.67

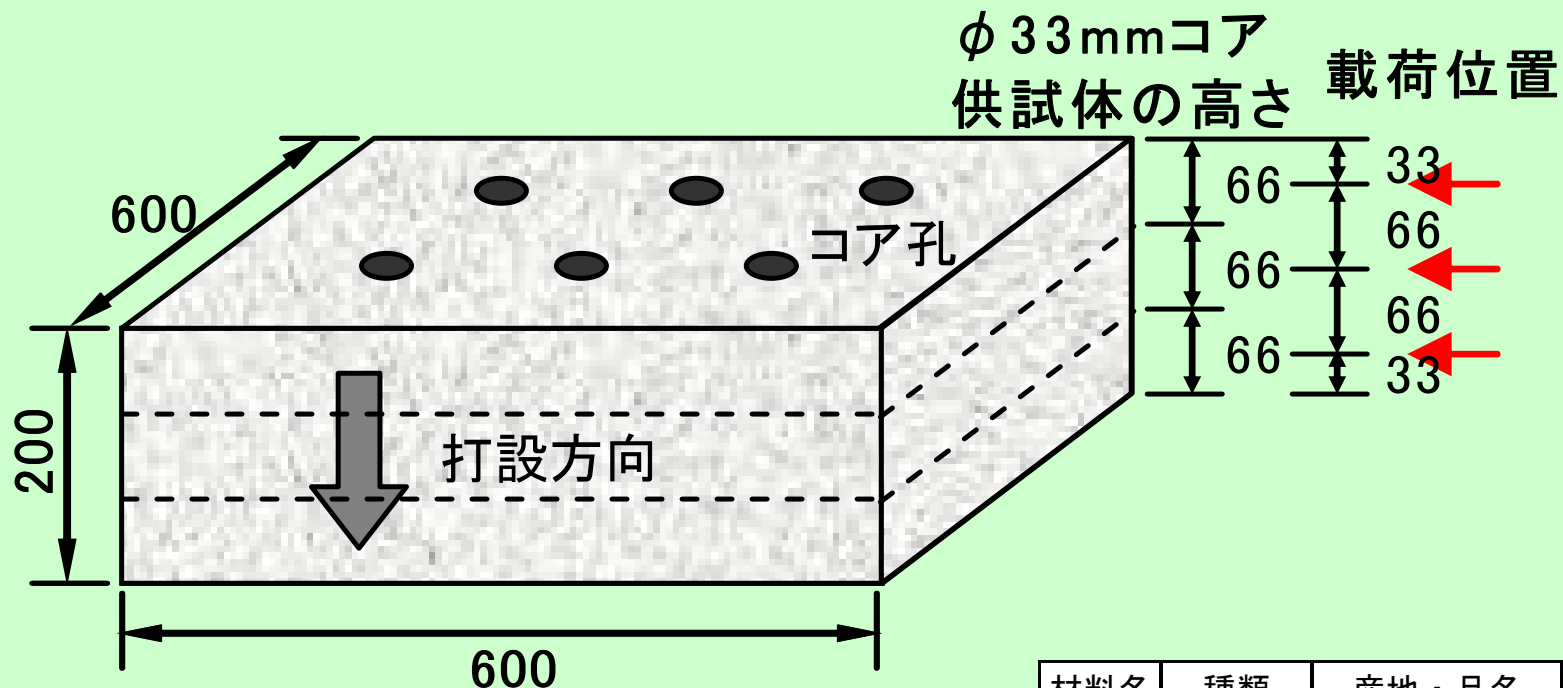
水セメント比 (%)	単位量 (kg/610リットル)			
	セメント	水	細骨材	
			陸砂	砕砂
100	170	170	621	273
85	200	170	604	266
55	309	170	541	238

モルタル供試体による性能確認試験



コンクリート供試体による適用性検討試験

(1) 粗骨材・空隙の影響確認試験－供試体A

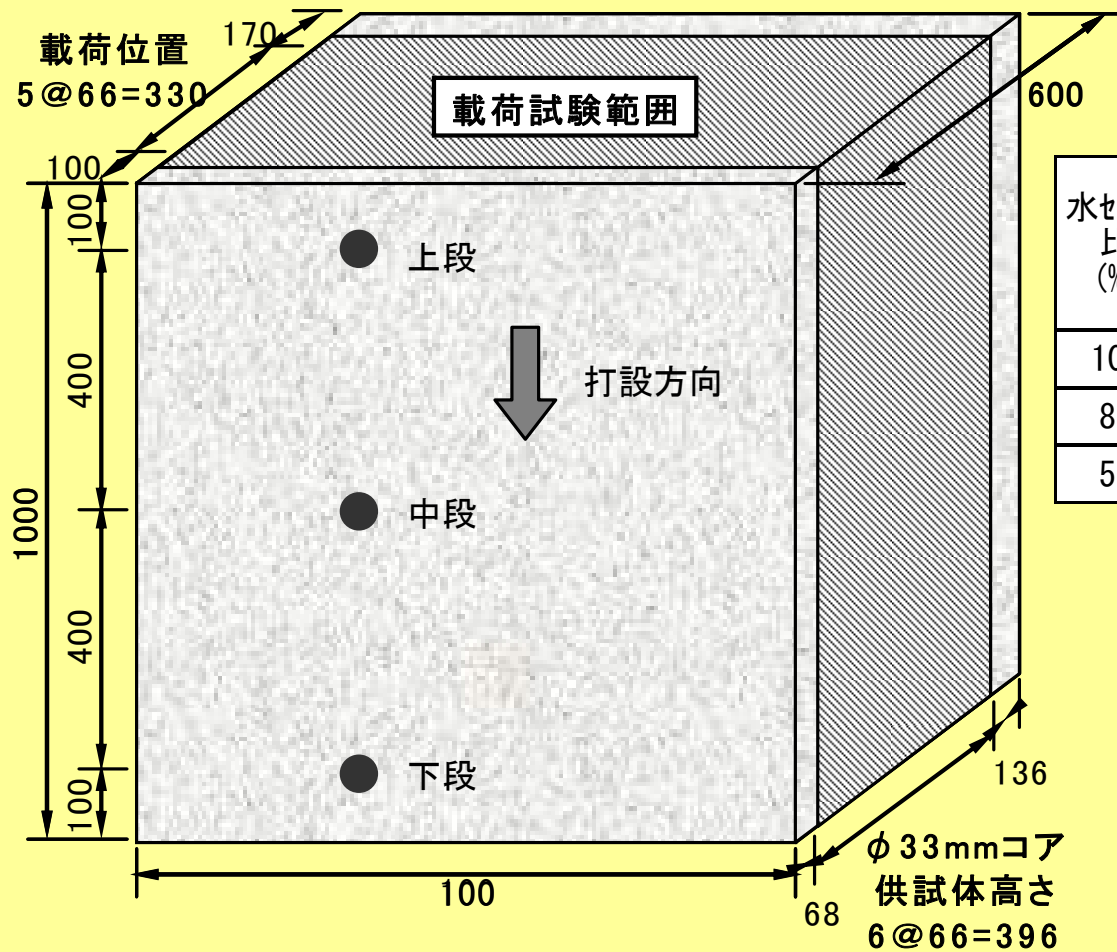


水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 AE (C×%)
	セメント	水	粗骨材	細骨材		
				陸砂	砕砂	
100	170	170	1041	621	273	1.00
85	200	170	1041	604	266	1.00
55	309	170	1041	541	238	1.00

材料名	種類	産地・品名	密度
セメント	普通	太平洋セメント(株)	3.16
水	地下水	つくば市	1.00
細骨材	陸砂	外浪逆浦産 (70%)	2.60
	砕砂	葛生産 (30%)	2.67
粗骨材	砕石	石岡市染谷産	2.67
混和剤	AE減水剤	ホゾリスNo. 70	1.00

コンクリート供試体による適用性検討試験

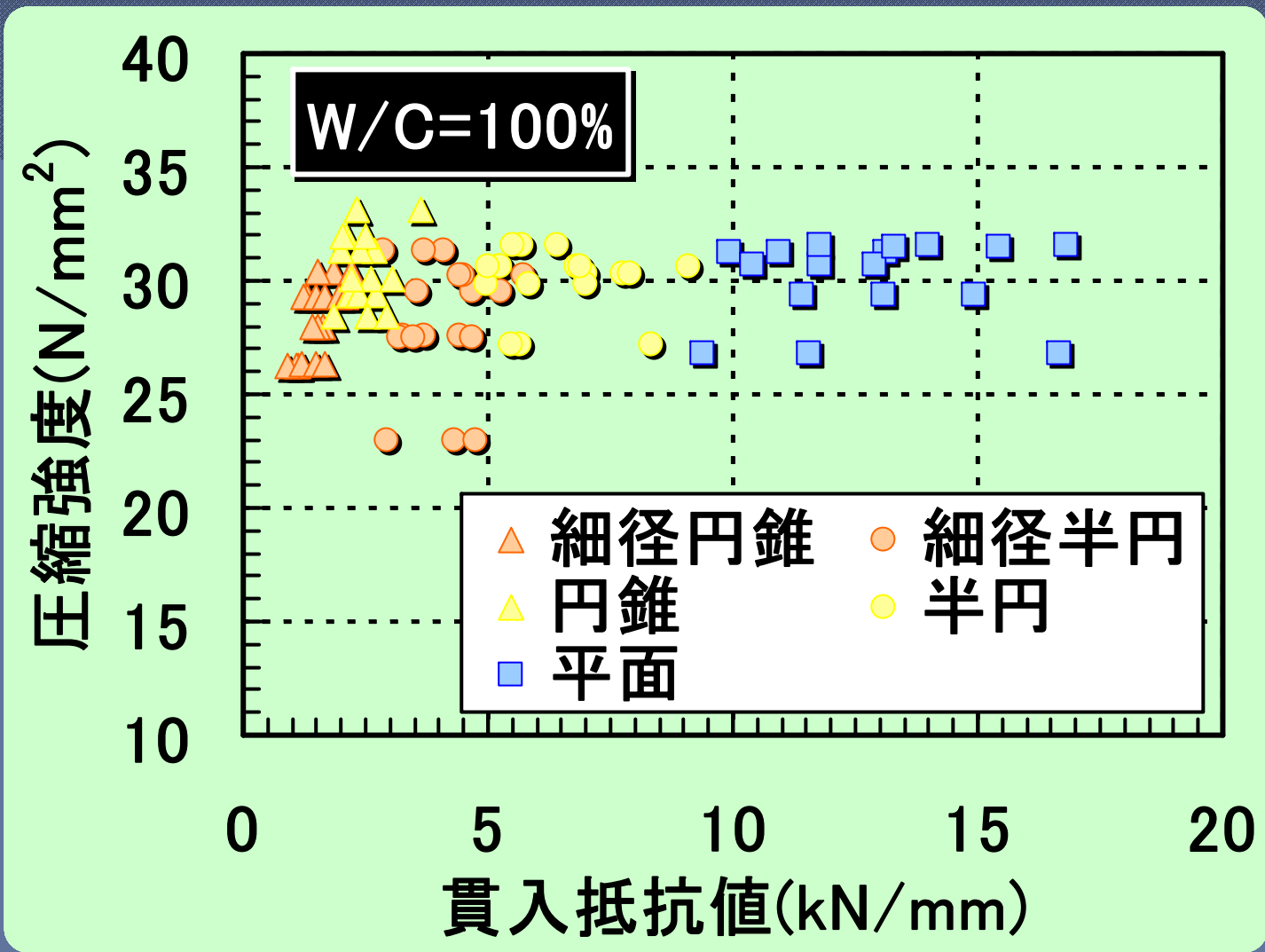
(2) 大型供試体による載荷試験－供試体B



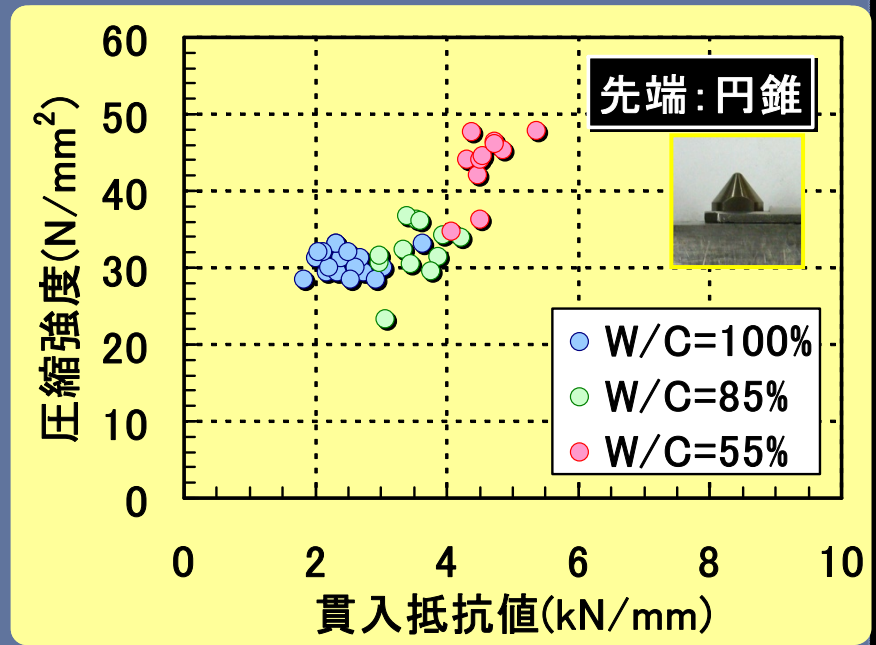
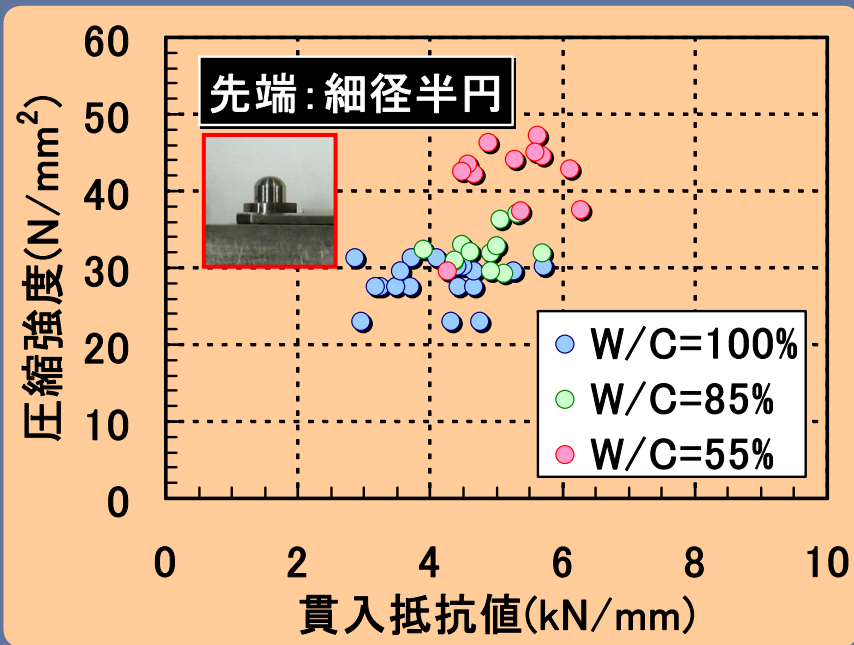
水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 AE (C×%)
	セメント	水	粗骨材	細骨材		
				陸砂	砕砂	
100	170	170	1041	621	273	1.00
85	200	170	1041	604	266	1.00
55	309	170	1041	541	238	1.00

材料名	種類	産地・品名	密度
セメント	普通	太平洋セメント(株)	3.16
水	地下水	つくば市	1.00
細骨材	陸砂	外浪逆浦産(70%)	2.60
	砕砂	葛生産(30%)	2.67
粗骨材	碎石	石岡市染谷産	2.67
混和剤	AE減水剤	ホヰリスNo. 70	1.00

モルタル強度と貫入抵抗値の関係



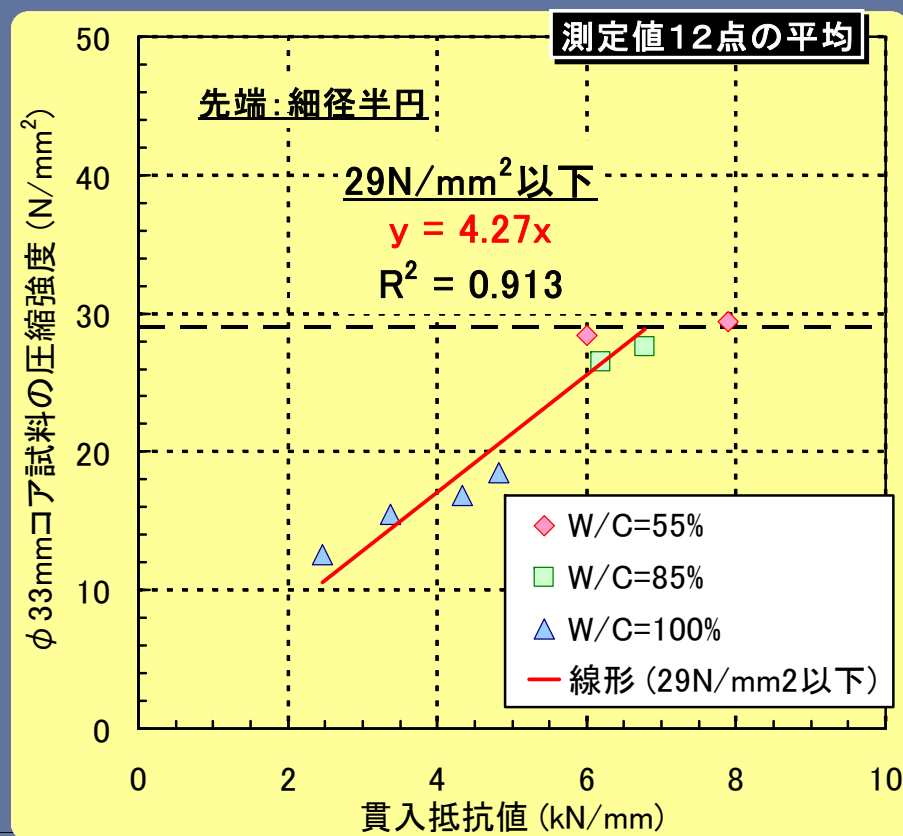
モルタル強度と貫入抵抗値の関係



コンクリート供試体による適用性検討試験

(2) 大型供試体による載荷試験－供試体B

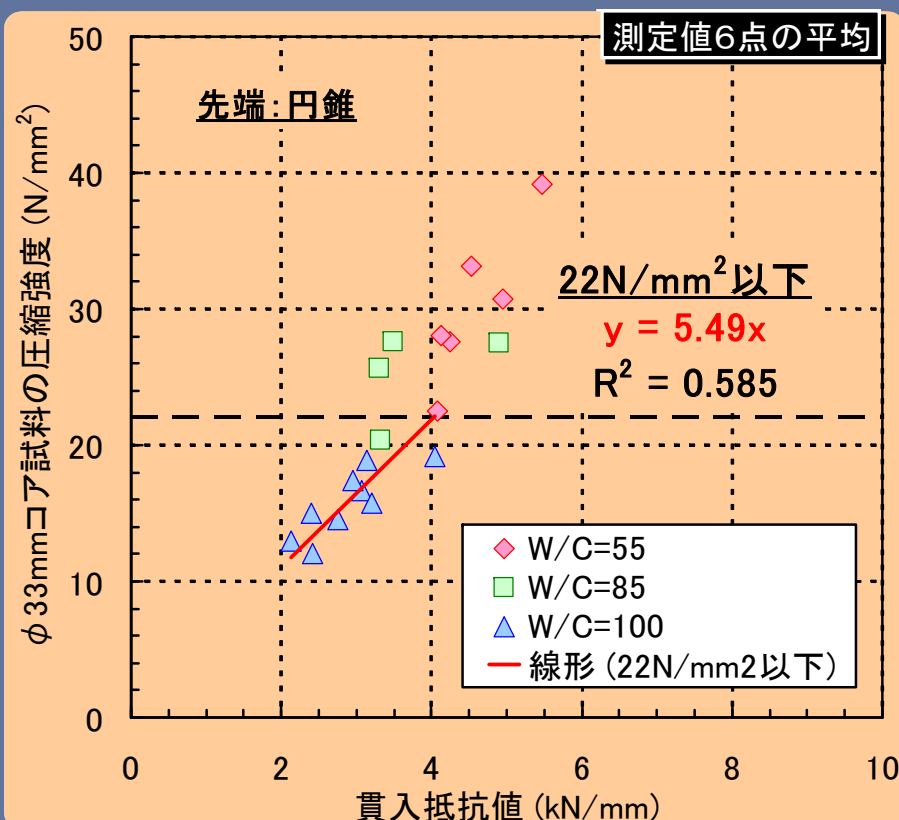
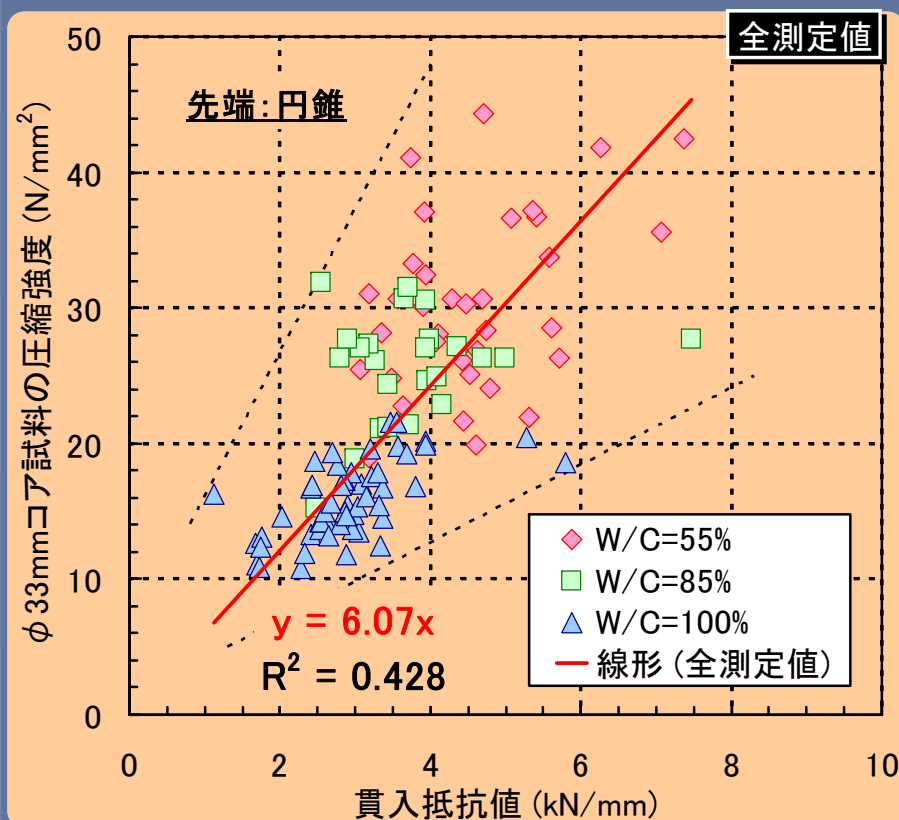
< 細径半円 >



コンクリート供試体による適用性検討試験

(2) 大型供試体による載荷試験－供試体B

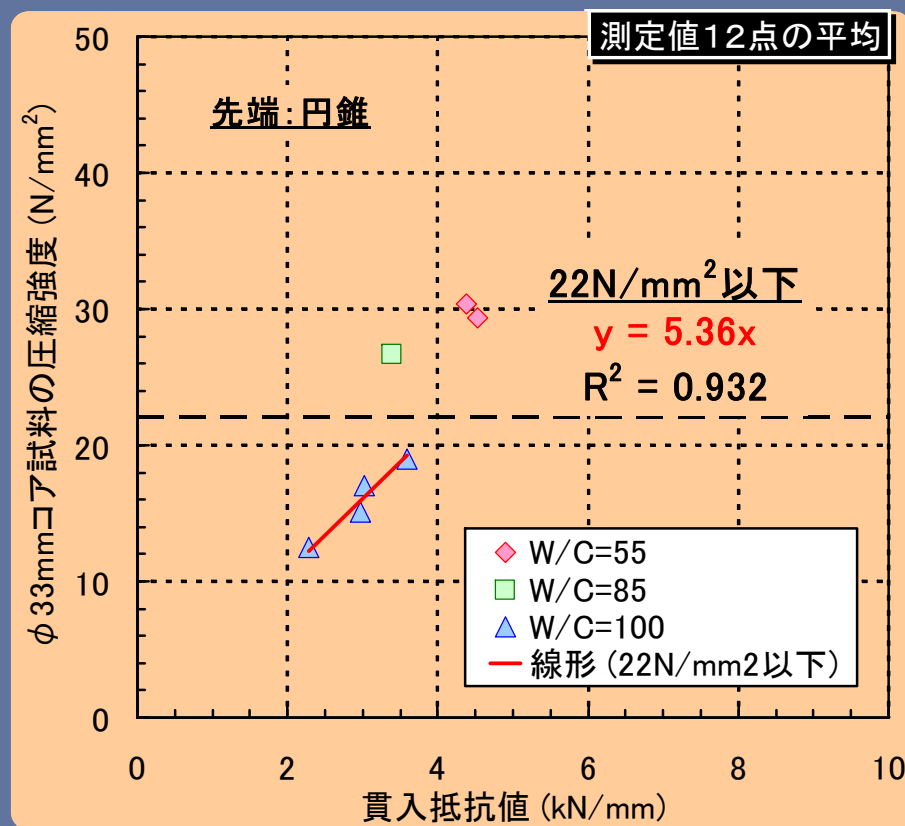
< 円錐 >



コンクリート供試体による適用性検討試験

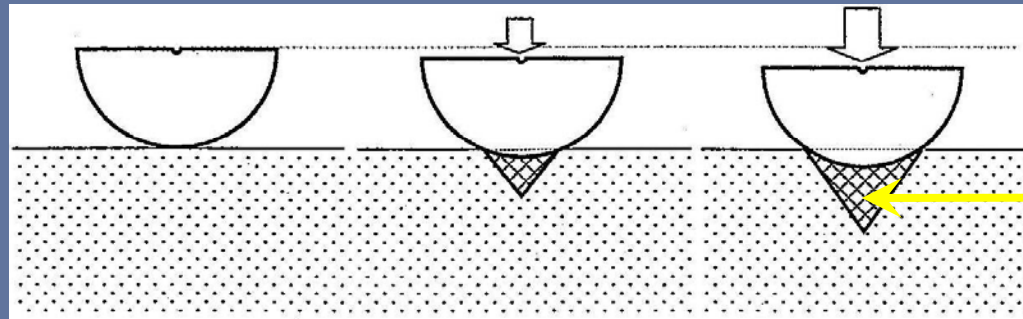
(2) 大型供試体による載荷試験－供試体B

< 円錐 >



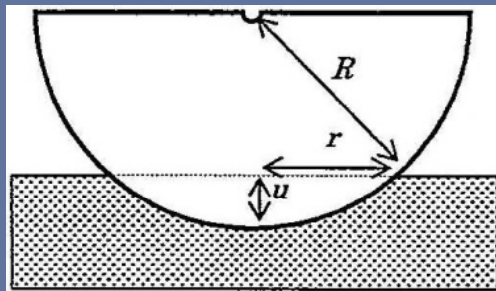
②考察－貫入抵抗値とコンクリート強度の関係

載荷先端の貫入とコンクリート状態変化



貫入に伴い
塑性域が拡大

載荷先端と貫入量



「細径半円」の場合...

載荷領域半径は $r^2 = R^2 - (R - u)^2 = 2Ru - u^2$

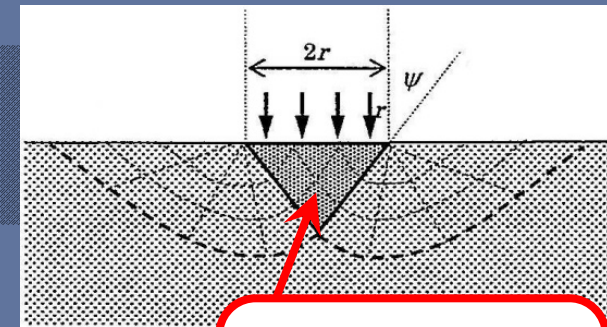
載荷面積は $A = \pi r^2 = 2\pi Ru \left(1 - \frac{u}{2R}\right)$

ここで $\frac{u}{2R} \ll 1$ であれば $A \cong 2\pi Ru$

支持力図

◆ 塑性挙動する固体の耐力を求める問題

ポンチ打ち込みの支圧力問題
土質力学における基礎の支持力問題



X線CT装置で
観察されたのは
この領域か？

◆ 本稿では、**基礎の支持力問題**の考え方を採用

Terzaghiは、基礎の極限支持力を $q_u = \alpha c N_c(\phi)$ で与えている。

ここで、 c : 粘着力、 α : 形状係数、 $N_c(\phi)$: 支持力係数

Terzaghiは、 $\psi = \phi$ として $N_c(\phi) = \cot \phi \left[\frac{\exp\{(3\pi/2 - \phi)\tan \phi\}}{1 - \sin \phi} \right]$ を与えたが

現在ではPrandtlの、 $\psi = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$ と仮定した、

$N_c(\phi) = \cot \phi \left[\exp(\pi \tan \phi) \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right]$ が妥当とされている。

ここで、コンクリート強度（一軸圧縮強度）は、 $c = \xi(\phi)S_c$ 、 $\xi(\phi) = \frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi}$ で

表され、極限支持力 q_u を圧縮強度で表すと $q_u = \alpha \xi(\phi) N_c(\phi) S_c$ となる。

◆ 荷重と貫入量

載荷領域範囲では、コンクリートは降伏して塑性釣り合い状態にあり、支持力が極限支持力で与えられると仮定すると、全荷重は $P = q_u A$ となり

$$P = (\alpha \xi(\phi) N_c(\phi) S_c) (2\pi R u) \left(1 - \frac{u}{2R}\right) = Ku \left(1 - \frac{u}{2R}\right)$$

但し、 $K = 2\pi \alpha R \xi(\phi) N_c(\phi) S_c$ であり、 $\frac{u}{2R} \ll 1$ であれば、 $P \cong Ku$ となる。

これは、貫入量が載荷先端半径に対して小さい範囲では、荷重－貫入量曲線が直線となること、貫入量が大きくなると上に凸の曲線となることを示している。

◆貫入抵抗値とコンクリート強度

孔内局部載荷試験

- ①荷重－貫入量曲線の勾配から貫入抵抗値を算出
- ②貫入抵抗値からコンクリート強度を推定

貫入抵抗値は、貫入量が小さい範囲(2mm程度)から求めているので

$$S_c = \frac{1}{2\pi\alpha R\xi(\phi)N_c(\phi)} K$$

「細径半円」はR=3mmなので

$$S_c = \frac{1}{6\pi\alpha\xi(\phi)N_c(\phi)} K$$

ϕ	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
N_c	30.1	32.7	35.5	38.6	42.2	46.1	50.6	55.6	61.4	67.9	75.3
$\xi(\phi)$	0.29	0.28	0.28	0.27	0.27	0.26	0.25	0.25	0.24	0.24	0.23
K	4.7	4.4	4.1	3.9	3.6	3.4	3.2	2.9	2.7	2.5	2.3

試験データの棄却

小径コア試験による強度測定で用いられている「Grubbs法」により棄却検定を行う

Grubbs法とは

得られたデータの最大値 X_n あるいは最小値 X_1 について、大きさ n の標本における最大偏差と標本の標準偏差の比を用いて検定する方法

実際の検定手順

- ・最小値 X_1 に対して式(1)が成立する場合、危険率 $\alpha=10\%$ で異常値として棄却する

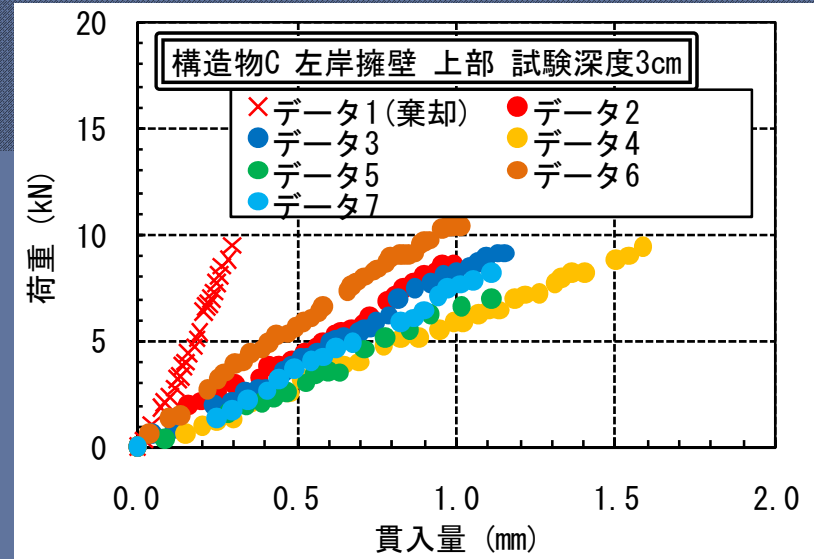
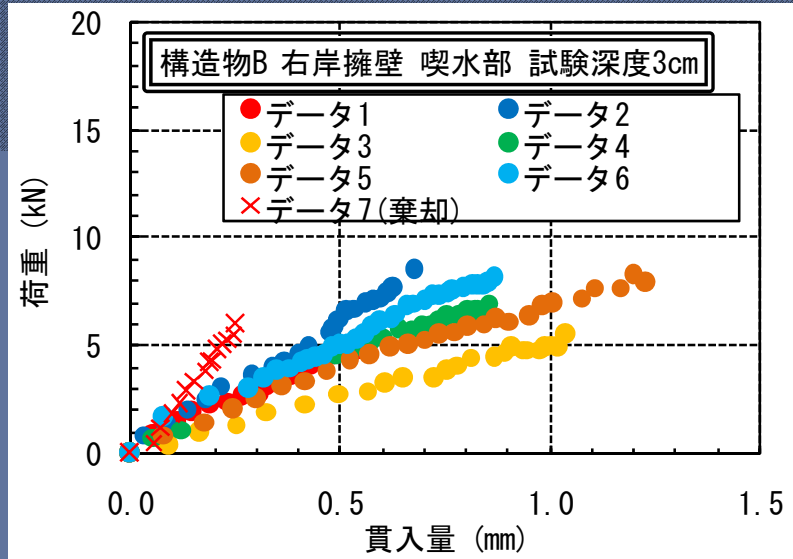
$$T_1 = (X_a - X_1) / s > T_\alpha \quad (1)$$

- ・最大値 X_n に対して式(2)が成立する場合、危険率 $\alpha=10\%$ で異常値として棄却する

$$T_n = (X_n - X_a) / s > T_\alpha \quad (2)$$

ここで、 X_a : 平均値、 T_α : 棄却判定の有意点、 α : 危険率(10%)であり、データ数 $n=7$ の時、有意点 $T_\alpha=1.828$ となる。

試験データの棄却



構造物	擁壁	部位	試験深度 (cm)	データ No.	貫入抵抗値						
					試験値 Kn (kN/mm)	平均値 Ka (kN/mm)	標準偏差 s	Grubbs法による棄却検定			棄却後 K (kN/mm)
								最大・最小値の検定	有意点	判定	
B	右岸	喫水	3	1	9.464	10.664	5.634	0.975	1.828	棄却せず	8.713
				2	12.340						
				3	5.169						
				4	8.347						
				5	7.059						
				6	9.900						
				7	22.370						
C	左岸	上	3	1	28.890	10.836	8.133	0.612	1.828	棄却せず	7.827
				2	8.708						
				3	8.048						
				4	5.858						
				5	6.235						
				6	10.840						
				7	7.270						