

AIで施工記録データベースを分析して 得られる知見と今後の展望

横浜国立大学 細田 暁

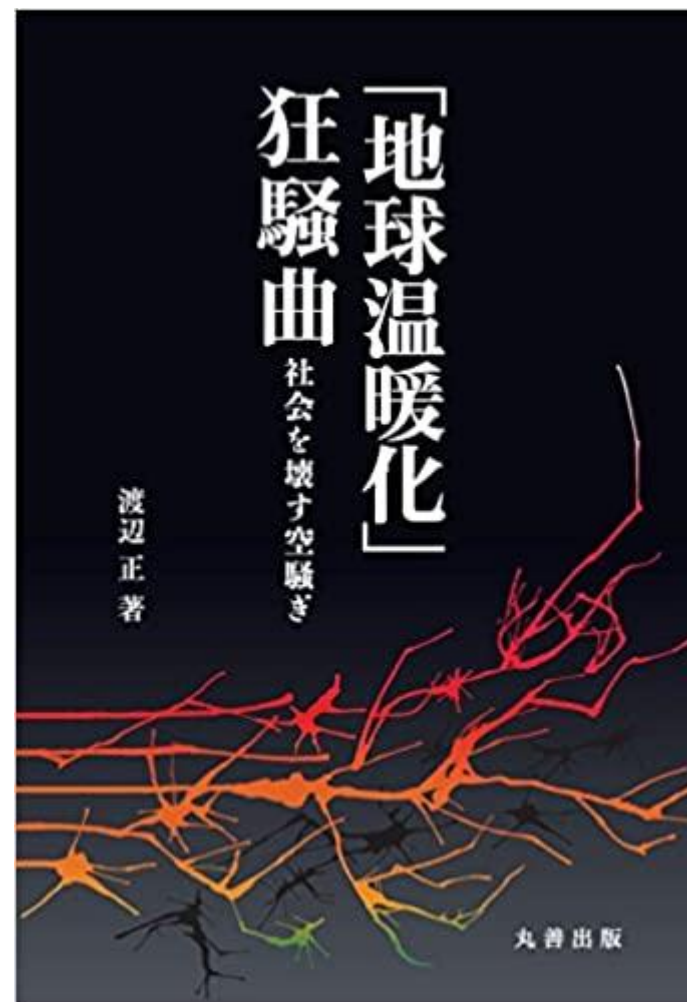
2021.10.18

山口県 技術講習会 第15回 コンクリートの品質確保

本当に必要なのは？

- 温暖化を防ぐ？
- その主要因であるCO₂を削減？
- 資源が枯渇？
(1970年ごろにも石油が数十年で枯渇すると言ってましたが・・・)

本当ですか？



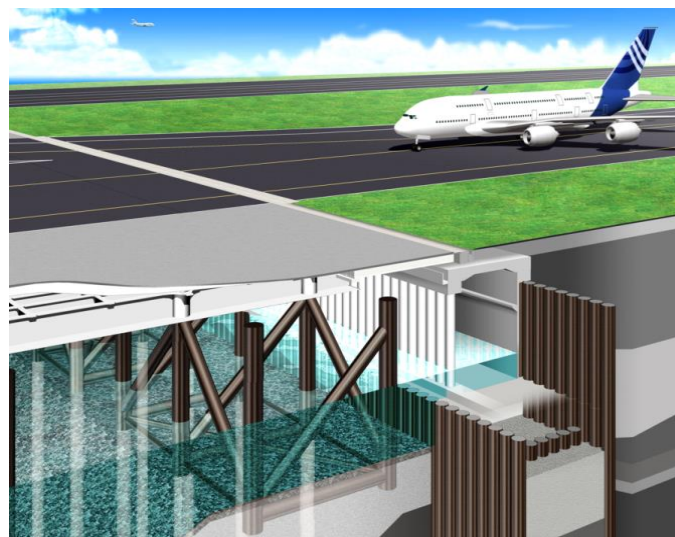
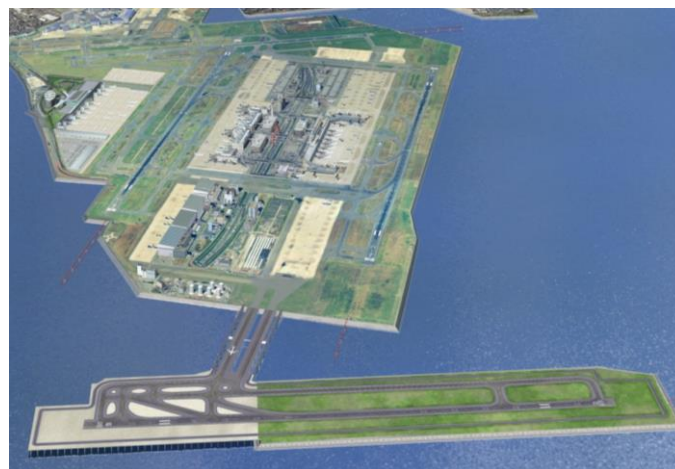
本当に必要なのは？

- 生産性向上
- 限られたマンパワー，資源，時間で最大限の効果を得る
- すなわち，効率的な投資

効率的な投資ができているかの
チェックのための指標として
“CO₂”を使うのであればよし。

- 効率的な投資を**積み重ねる**
(削減してはいけない)
- 幸せな社会を築く

羽田のD滑走路の事例



コンクリート構造物の建設における生産性向上の例

生コンの製造・運搬

スランプ保持性能の高い
化学混和剤を標準化すべき



特に暑中コンに
おいては、
施工不良の低減に
大きく寄与。

コンクリート構造物の施工

確度の高い、
効果的なひび割れ抑制対策



本日の話題

残コンの革新的な
活用



残コンは、
Ca(OH)₂を豊富に含む
貴重な資源と考えて
技術開発



近い将来の
話題

戻りコンから製造した
回収骨材（スラッジもすべて含む）

機械学習を用いた研究の動機 1)

(1) AIは今後の人類の社会に不可欠な技術となるでしょう。現在、研究室を共同で運営している前川宏一教授の研究の中にもAIを使ったものがあり、研究室ゼミ等でときどきAIとの付き合い方などについての解説を聴く機会がありました。**土木技術者はAIを上手に使いこなす必要がある**と思っていますが、やはりAIを使った研究に実際に取り組んでみて、**本質が何なのかを体感してみたい**、というのが最も大きな理由でした。何事も、実践してから、というのが私の信条。

(2) もう一つの理由は、**マスコンクリートの温度ひび割れのひび割れ幅を予測することが非常に難しい**ことでした。**特に山口県の橋台のように鉄筋比の比較的小さい条件においては、ひび割れの分散の仕方によってもひび割れ幅は大きく変化する**ため、JCIや土木学会の規準類で示されている有限要素法によるひび割れ指数を用いた最大ひび割れ幅の予測手法の精度は高くない、と以前から考えていました。最初は、学会の予測手法の延長線上で改善することを考えていましたが、良い手法が思いつかず、機械学習で実構造物の「最大ひび割れ幅」を予測する研究を開始することにしました。

Prediction of maximum thermal crack width of RC abutments and investigation on influential factors using artificial neural networks

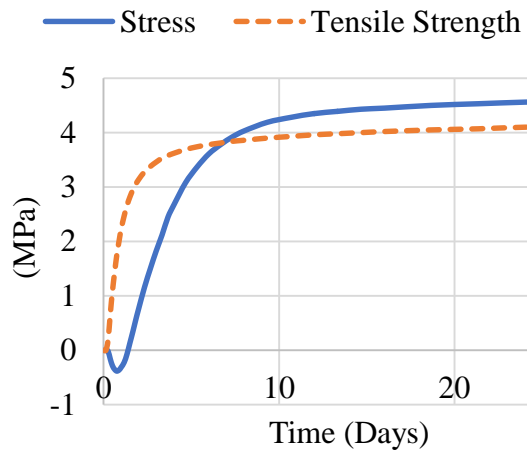
(人工ニューラルネットワークを用いたRC橋台の温度ひび割れの最大ひび割れ幅の予測と影響要因の分析)

博士号を取得した研究者: Mehboob Rasul (2019年10月修了)
(パキスタンからの文部科学省国費留学生)

Advisor:

Prof. Akira HOSODA
Graduate School of Urban Innovation
Yokohama National University

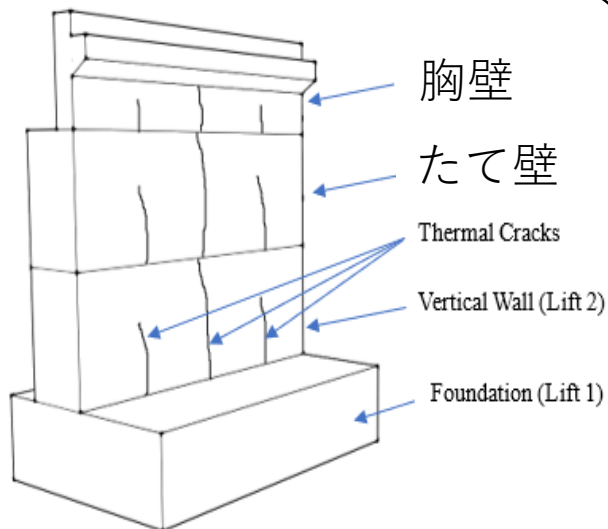
背景：橋台の外部拘束による温度ひび割れ



温度応力と引張強度の発言



Example of Thermal Cracks in a RC wall



橋台の模式図と温度ひび割れ

- ひび割れは、耐久性、漏水、美観に影響を与えるだけでなく、建設マネジメント的にも多くの課題がある。
- 温度ひび割れの最大ひび割れ幅を既存の方法を使用して精度よく予測するのは困難。

• 主な目的

1. RC橋台の外部拘束温度ひび割れの発生の予測
2. RC橋台の外部拘束温度ひび割れの最大ひび割れ幅の予測
3. 最大ひび割れ幅に影響を与える要因の調査

用いた手法：

- 実施工データ（山口県データベース）

データの特徴：

- 構造物の基本的な幾何学的特性
- 材料特性，鉄筋比
- 周囲の環境条件
- 施工条件

使用方法：

- 人工ニューラルネットワーク（ANN）

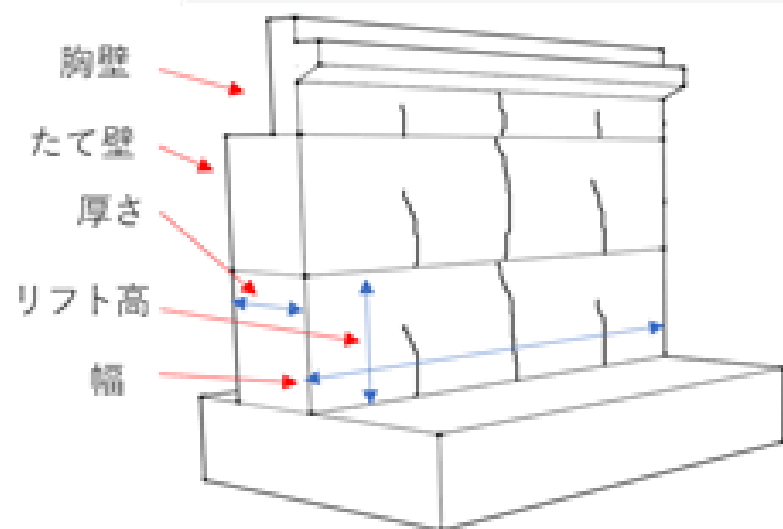
最終的な目標：

- RC橋台等の有害な温度ひび割れを抑制するための設計施工ガイドライン等への貢献。

山口県データベースの特徴

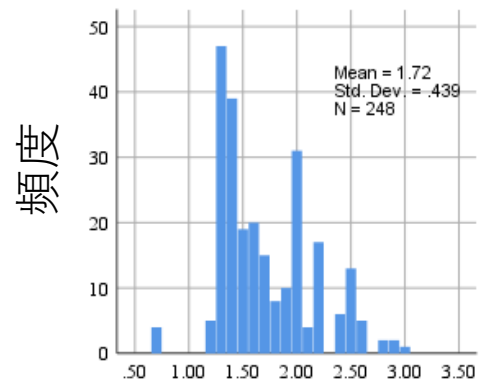
建造物の総リフト数	1555
リフト数 (たて壁)	248
リフト数 (胸壁)	114

部位	ひび割れの発生したリフト数	ひび割れの発生しなかったリフト数
たて壁	96	152
胸壁	23	91

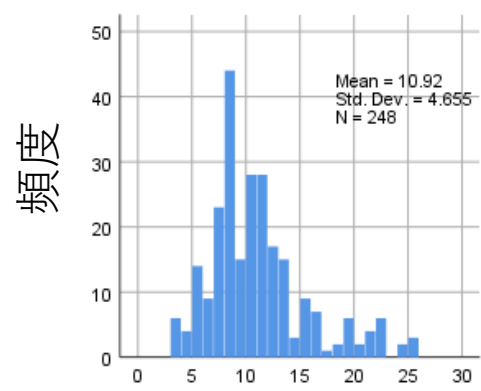


特徴	たて壁		胸壁	
	有効	データ欠損	有効	データ欠損
ひび割れの状況	248	0	114	0
厚さ	248	0	114	0
幅	248	0	114	0
リフト高	248	0	114	0
鉄筋比	247	1	107	7
水セメント比	242	6	111	3
単位セメント量	233	15	107	7
膨張材	248	0	114	0
スランプ	228	20	104	10
空気量	228	20	112	2
打込み温度	247	1	114	0
外気温	247	1	104	9
28日強度	235	13	100	14
打継間隔	235	13	111	3
最高温度	200	48	78	36
最高温度時間	198	50	81	33
脱型した材齢	238	10	107	7
養生期間	232	16	102	12

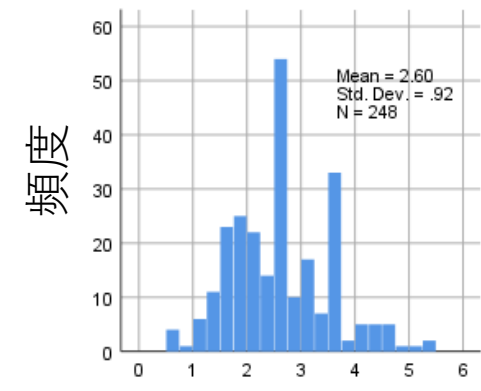
たて壁のデータの特徴



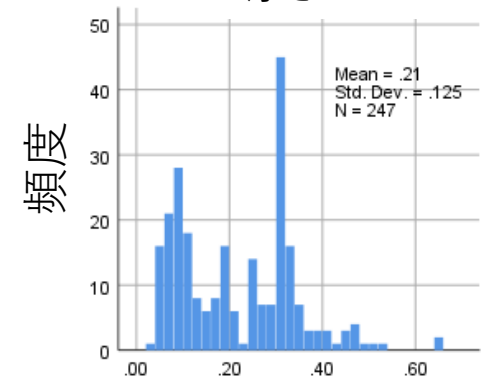
厚さ



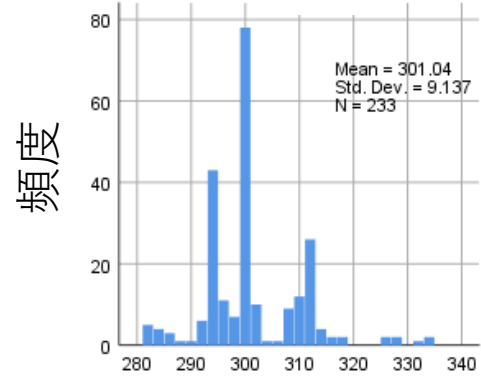
幅



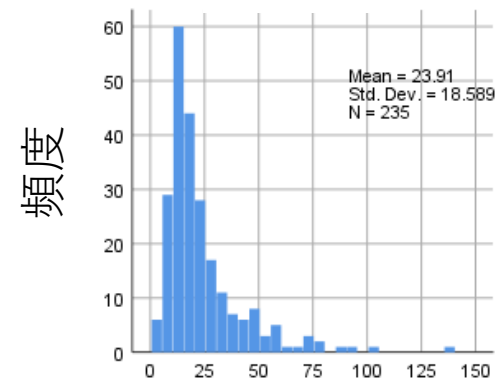
リフト高



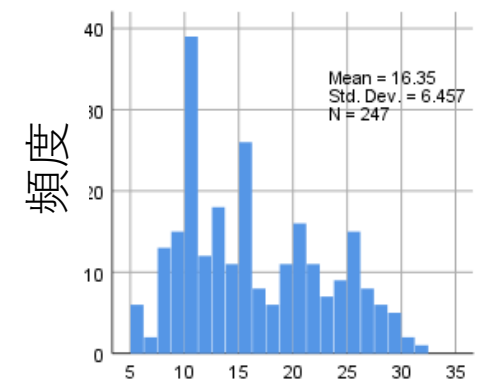
鉄筋比



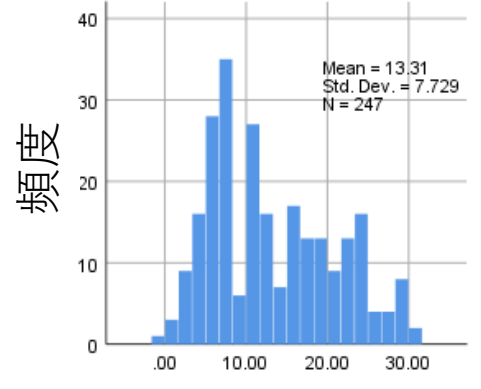
単位セメント量



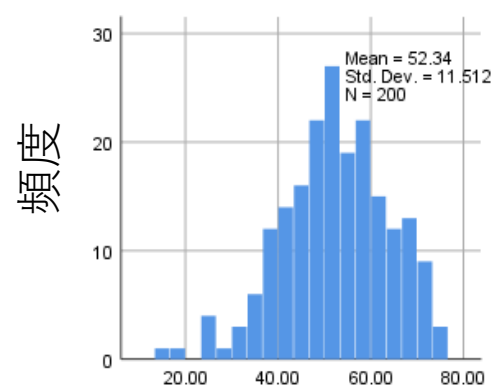
打継間隔



初期温度

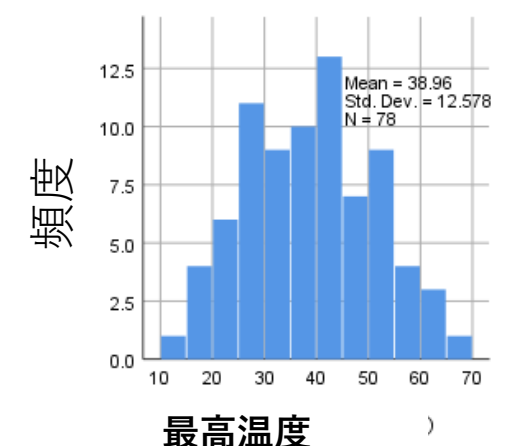
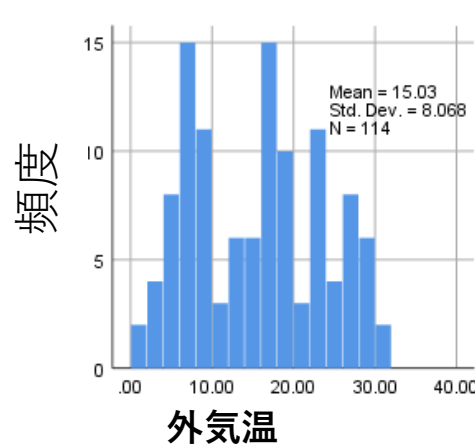
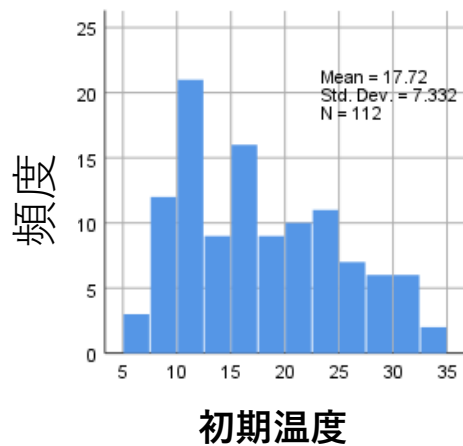
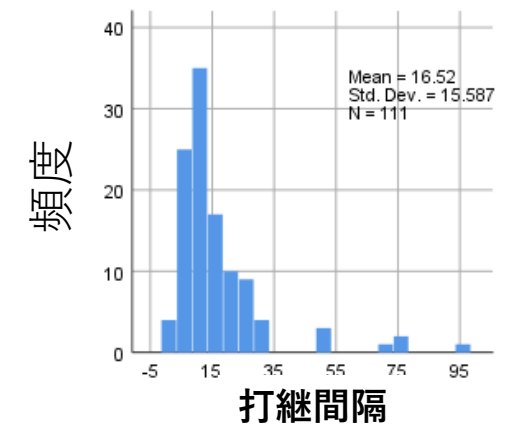
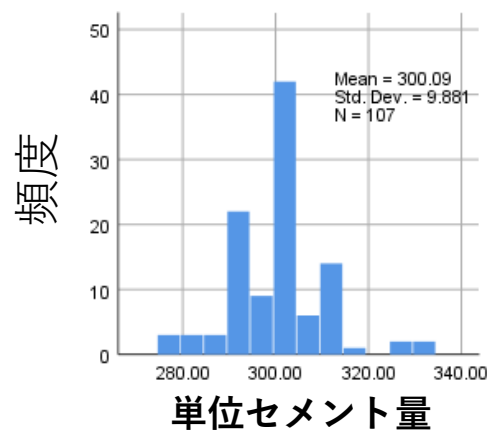
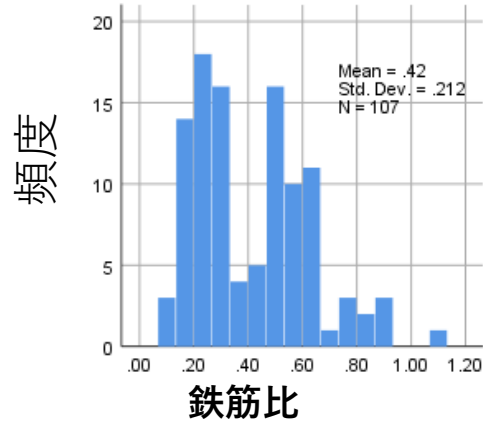
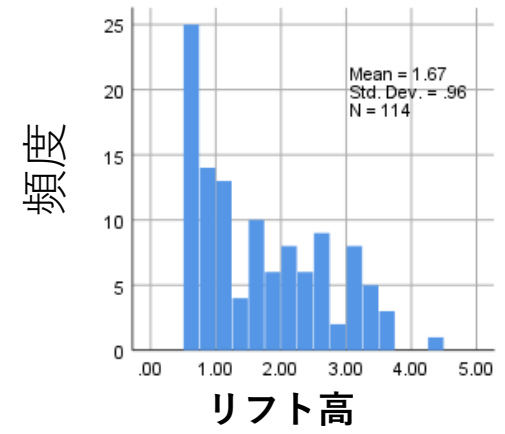
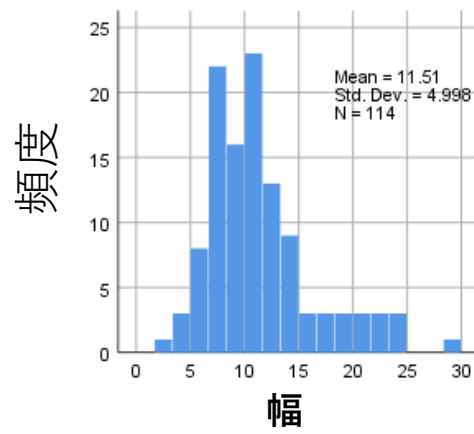
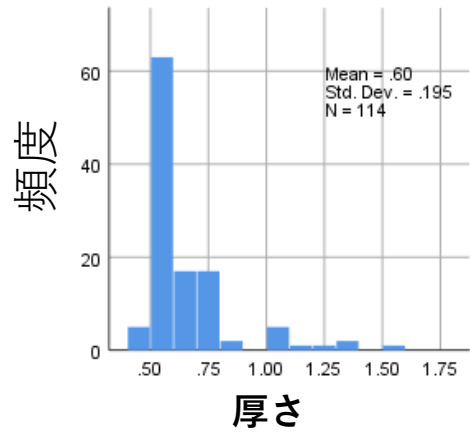


外気温



最高温度

胸壁のデータの特徴



熱膨張係数の測定 (CTE)

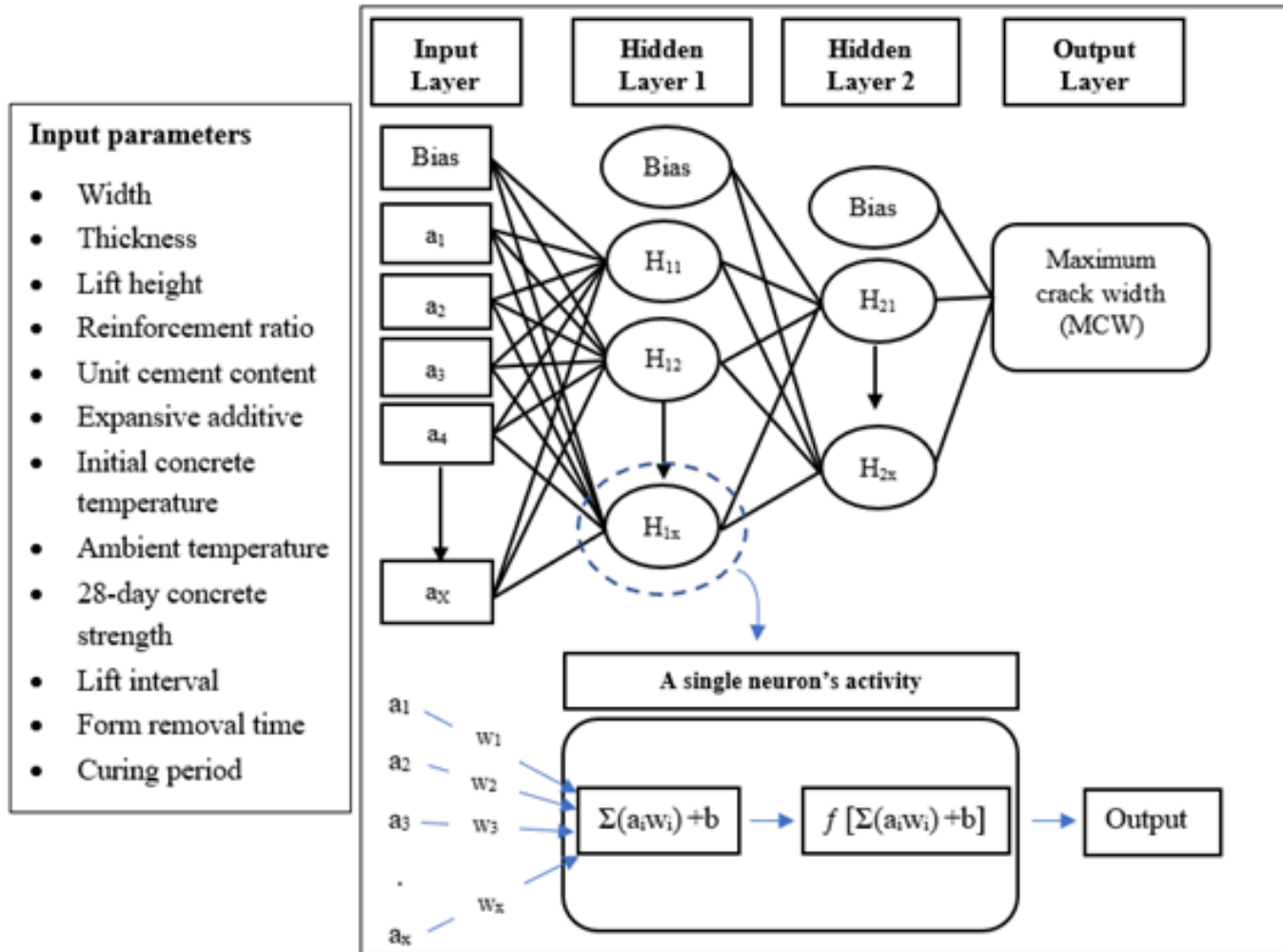
山口県21生コン工場から得られたコンクリート試料の熱膨張係数を測定することにより熱膨張係数を詳細に調べた。

熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)			
Ready-Mix Plant	No.	各値	平均値
A	1	6.46	6.39
	2	6.32	
B	1	7.00	6.93
	2	6.85	
C	1	6.31	6.36
	2	6.41	
D	1	7.59	7.51
	2	7.42	
F	1	7.17	7.38
	2	7.58	
G	1	5.89	5.98
	2	6.06	
H	1	5.87	5.90
	2	5.93	
I	1	6.16	5.88
	2	5.60	
J	1	6.84	6.90
	2	6.95	
K	1	6.38	6.39
	2	6.39	
L	1	7.07	6.92
	2	6.76	

熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)			
Ready-Mix Plant	No.	各値	平均値
M	1	8.12	8.11
	2	8.10	
N	1	5.97	5.86
	2	5.75	
O	1	6.88	6.78
	2	6.68	
P	1	7.01	6.88
	2	6.75	
Q	1	6.86	6.70
	2	6.54	
R	1	6.79	6.66
	2	6.52	
S	1	6.68	6.77
	2	6.85	
T	1	7.58	7.70
	2	7.83	
U	1	5.77	5.76
	2	5.75	
V	1	6.24	5.95
	2	5.65	

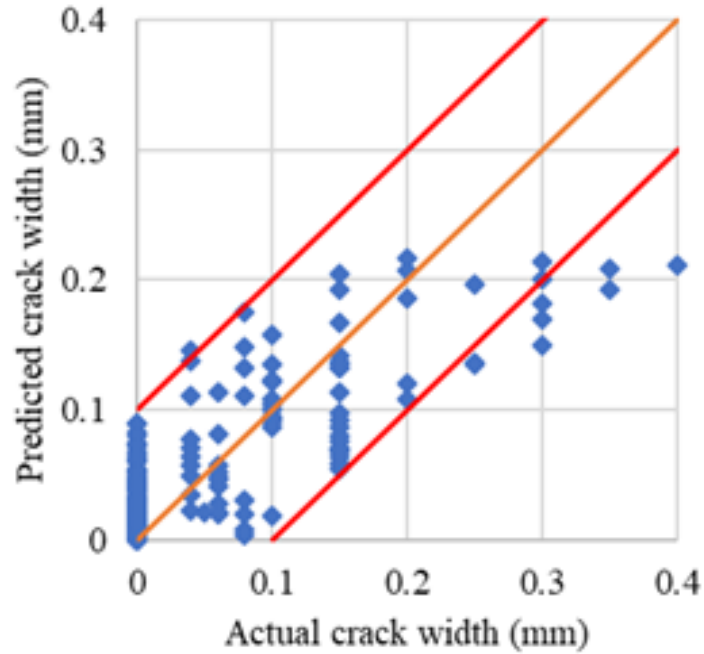
最大ひび割れ幅を予測するための人工ニューラルネットワークの構造

No. of nodes in hidden layer 1 = 6, No. of nodes in hidden layer 2 = 3



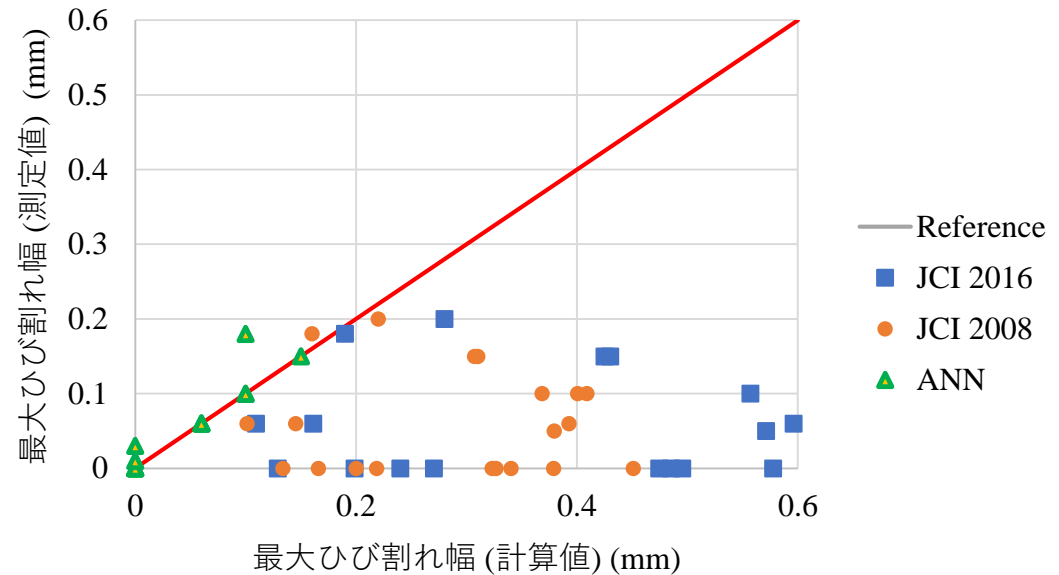
- 最大ひび割れ幅の予測を目標に設定。
- 試行錯誤の末、隠れ層は2層が適切と判明。

結果：入力パラメータの数を絞って作成した機械（たて壁）



Statement about confidence on present ANN

- 検討した範囲で最良の機械は、0.1mmの誤差を許容すると、188リフトのうち178リフトにおいて、最大ひび割れ幅を正しく予測することができた。
- 予測誤差が±0.1 mmを超えるリフトのほとんどが2007年から2009年にかけて建設された。



JCI指針（2016年版，2008年版）に示された、ひび割れ指数とひび割れ幅の関係式を用いて算出した計算値（最小ひび割れ指数をそのまま入力）

**“Improving Thermal Crack Control system for RC
abutments using Artificial Neural Networks”**

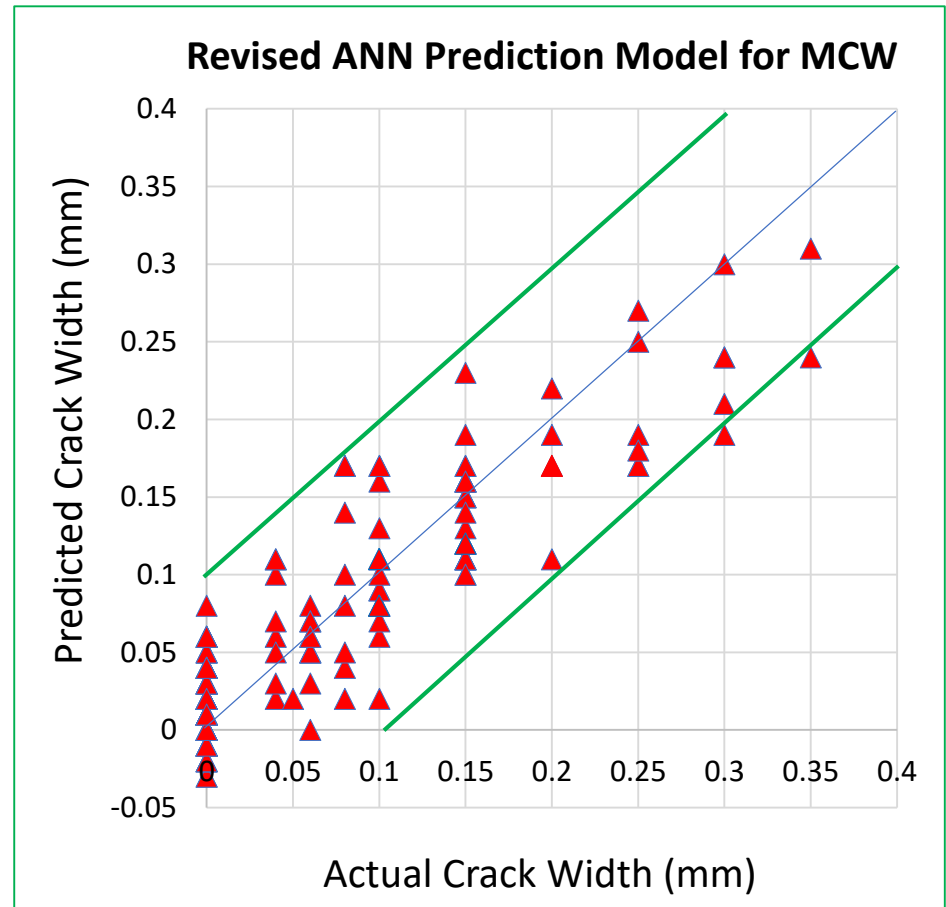
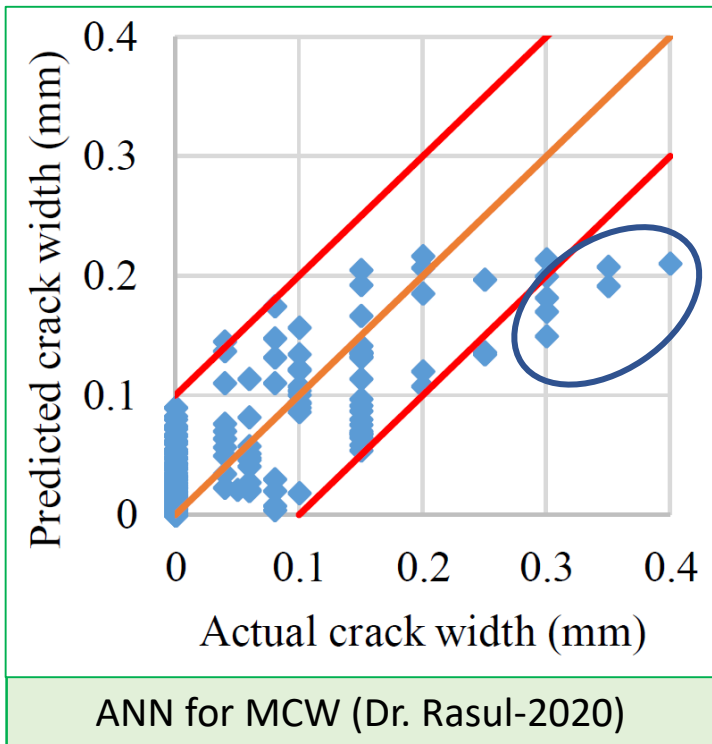
Student: AKMAL ADNAN

Supervisor: Prof. Akira HOSODA

Co-supervisor: Dr. Muhammad Saleem

2021年度の最新研究成果

2021年の研究による機械の予測精度向上



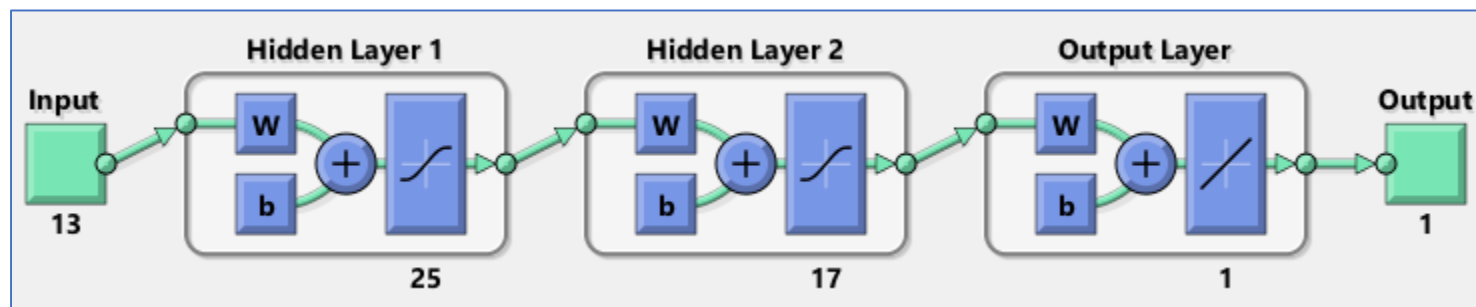
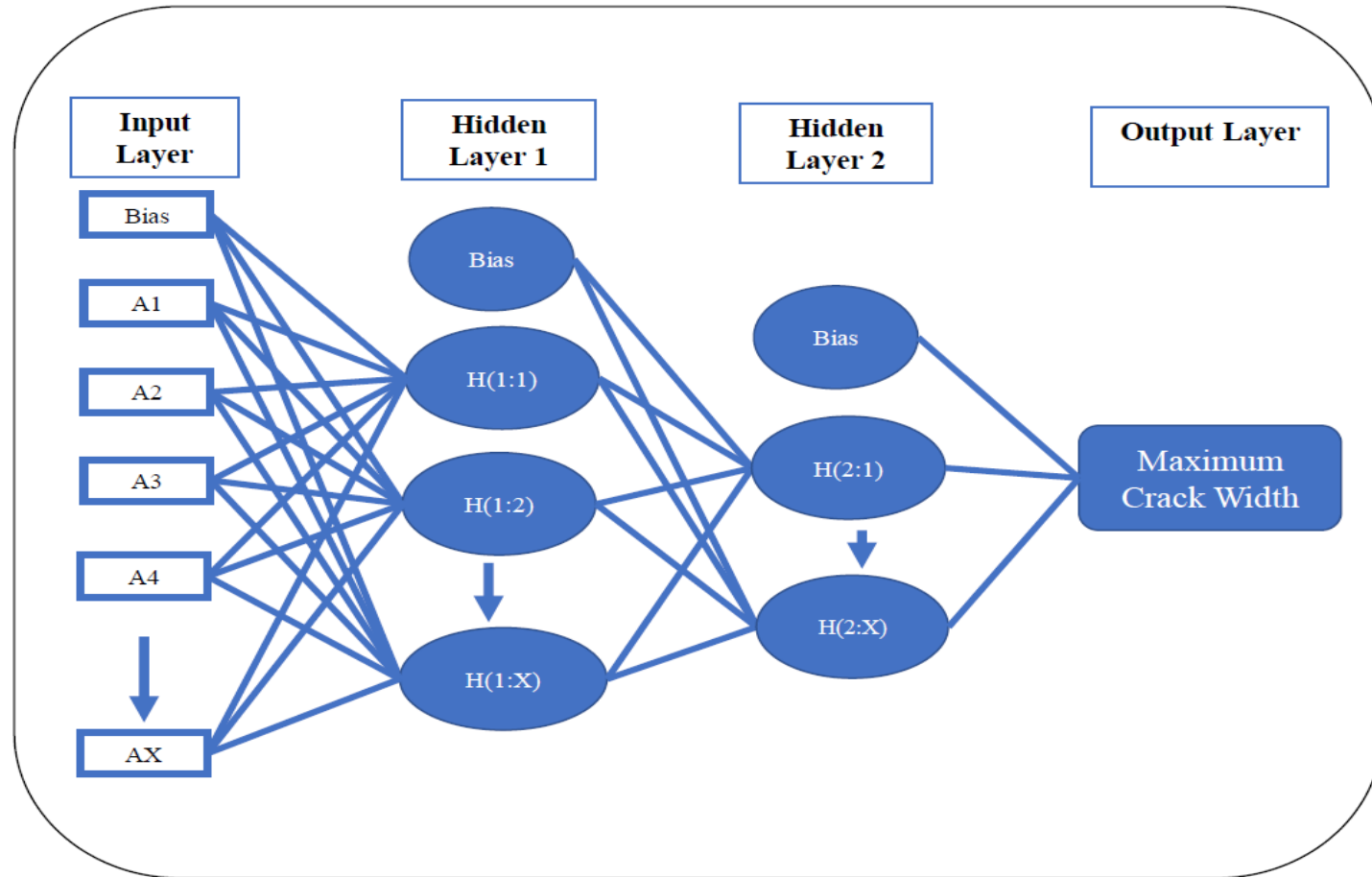
Model Performance	ANN -2020 (188 Lifts)	REV. ANN (161 Lifts)
Error ± 0.10 mm	95%	99.0%
Error ± 0.05 mm	79%	88.0%

温度ひび割れリスクの極めて小さいデータ等を教師データから除外

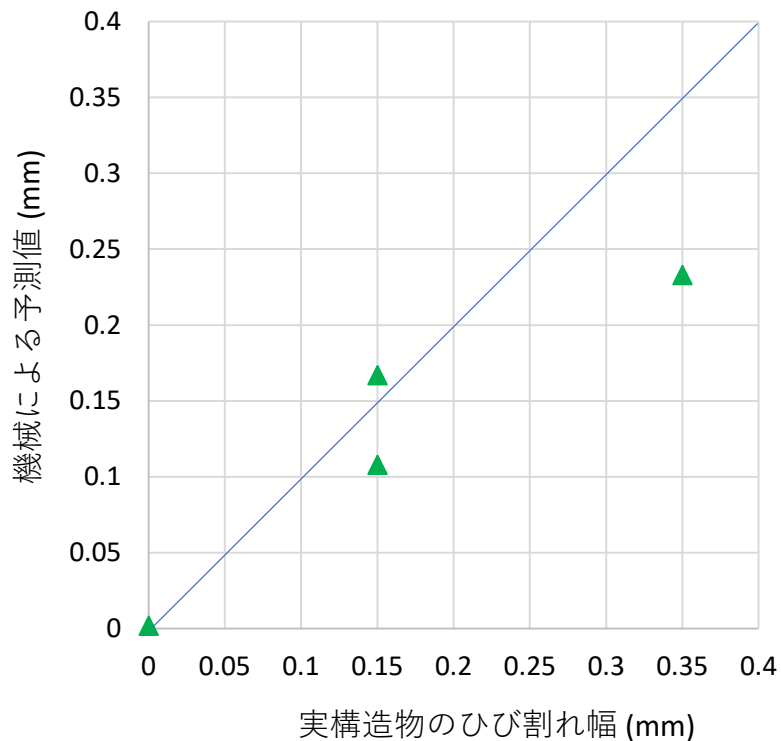
Data Groups based on CI of vertical wall lifts							
Group	ひび割れ指数 (CI) の範囲	ひび割れが発生したリフト		ひび割れなし 山口	除外したリフト		Total
		山口	群馬		ひび割れあり	ひび割れなし	
Group-0	No Data	16	5	21		21	21
Group-1	0.5 < CI < 0.60	5		0			5
Group-2	0.6 < CI < 0.65	5		6			11
Group-3	0.65 < CI < 0.7	7		5			12
Group-4	0.7 < CI < 0.75	5		6			11
Group-5	0.75 < CI < 0.8	12		12			24
Group-6	0.8 < CI < 0.85	7		6	1		12
Group-7	0.85 < CI < 0.9	3		11			14
Group-8	0.9 < CI < 0.95	7		9	1		15
Group-9	0.95 < CI < 1.0	4		6			10
Group-10	1.0 < CI < 1.25	11		16	1		26
Group-11	1.25 < CI < 1.5			7		7	
Group-12	1.5 < CI < 2.0			4		4	
	Total=	79	5	106	3	32	161

ニューラルネットワークの構造の修正

Type of Artificial Neural Networks Used: Feedforward Back Propagation



膨張コンクリートを使用したたて壁



山口県のたて壁において、鉄筋比が0.19%程度の場合、膨張材（20kg/m³）によるひび割れ抑制効果はほとんどないと言ってよいと思われる。



次の4枚のスライドに示すように、胸壁では効果が大きいようである。

鉄筋比

打継ぎ間隔

Lift Ref.	T	L	H	DGR	SVR	RBR	UCC	CONT	AMBT	CCS	CTIL	FRT	CURP	MCW	MCW (NN)
H18-A-011-02	2	11.5	3.5	52.58	1.29	0.19	282	12	8	36.7	16	21	10	0.35	0.24
H18-A-011-03	2	11.5	3.5	88.72	1.29	0.19	282	16	13	36.3	27	27	7	0.15	0.17
H18-A-011-04	2	11.5	1.7	94.71	1.59	0.19	282	19	15	33.9	14	16	7	0	0.01
H18-A-013-03	2	11.6	4.6	262.27	1.22	0.19	294	28	26	35.6	104	8	12	0.15	0.11

ひび割れ抑制設計の事例

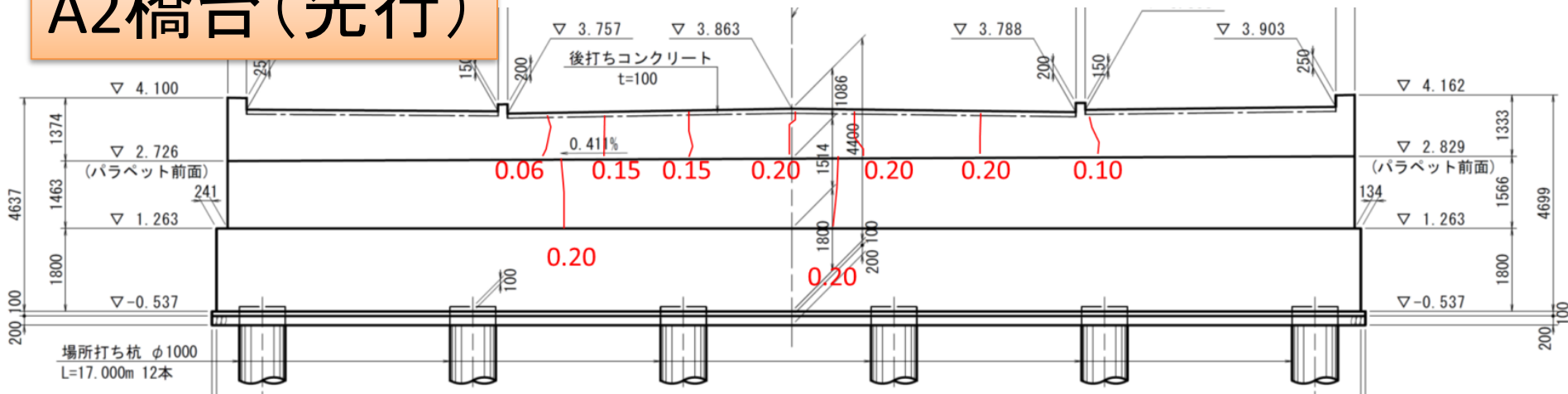
(二宮 純 博士論文)

A2橋台(先行)

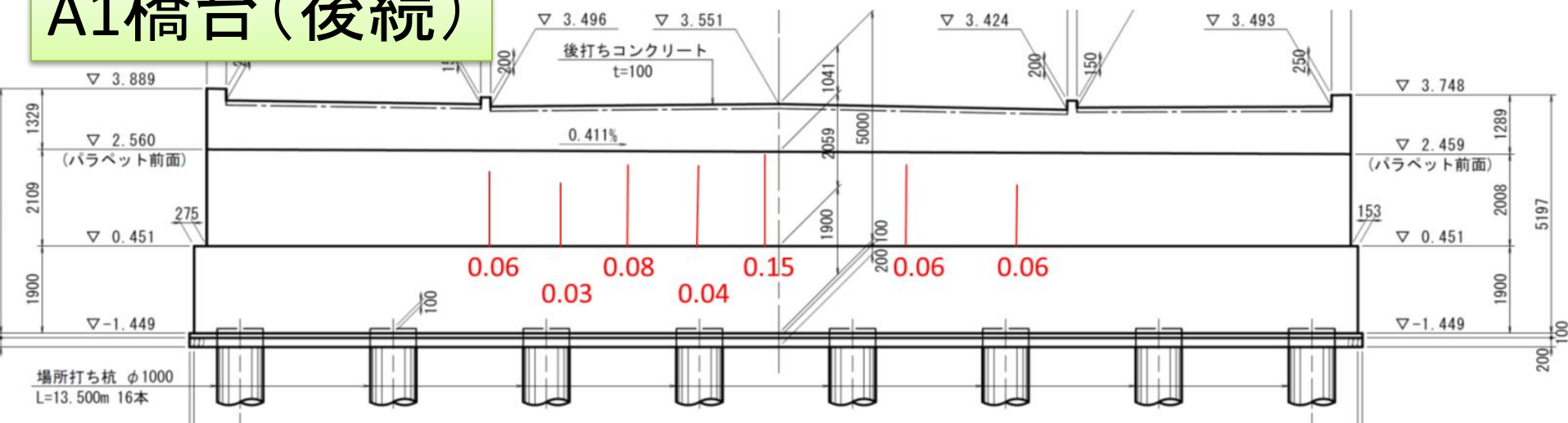
A1橋台(後続)

ひび割れ発生状況

A2橋台(先行)



A1橋台(後続)



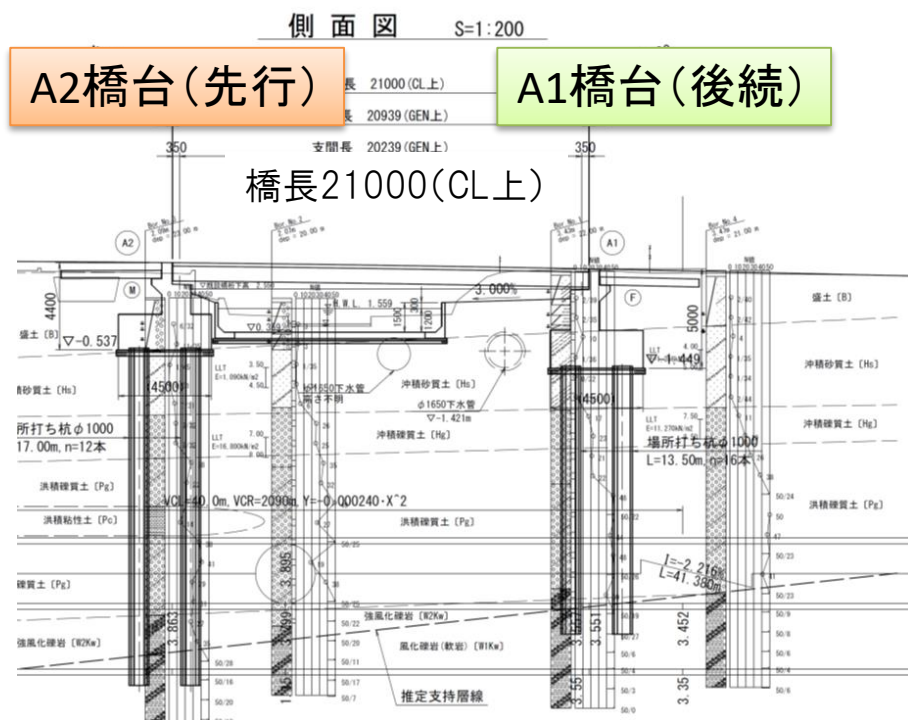
[先行] A2橋台

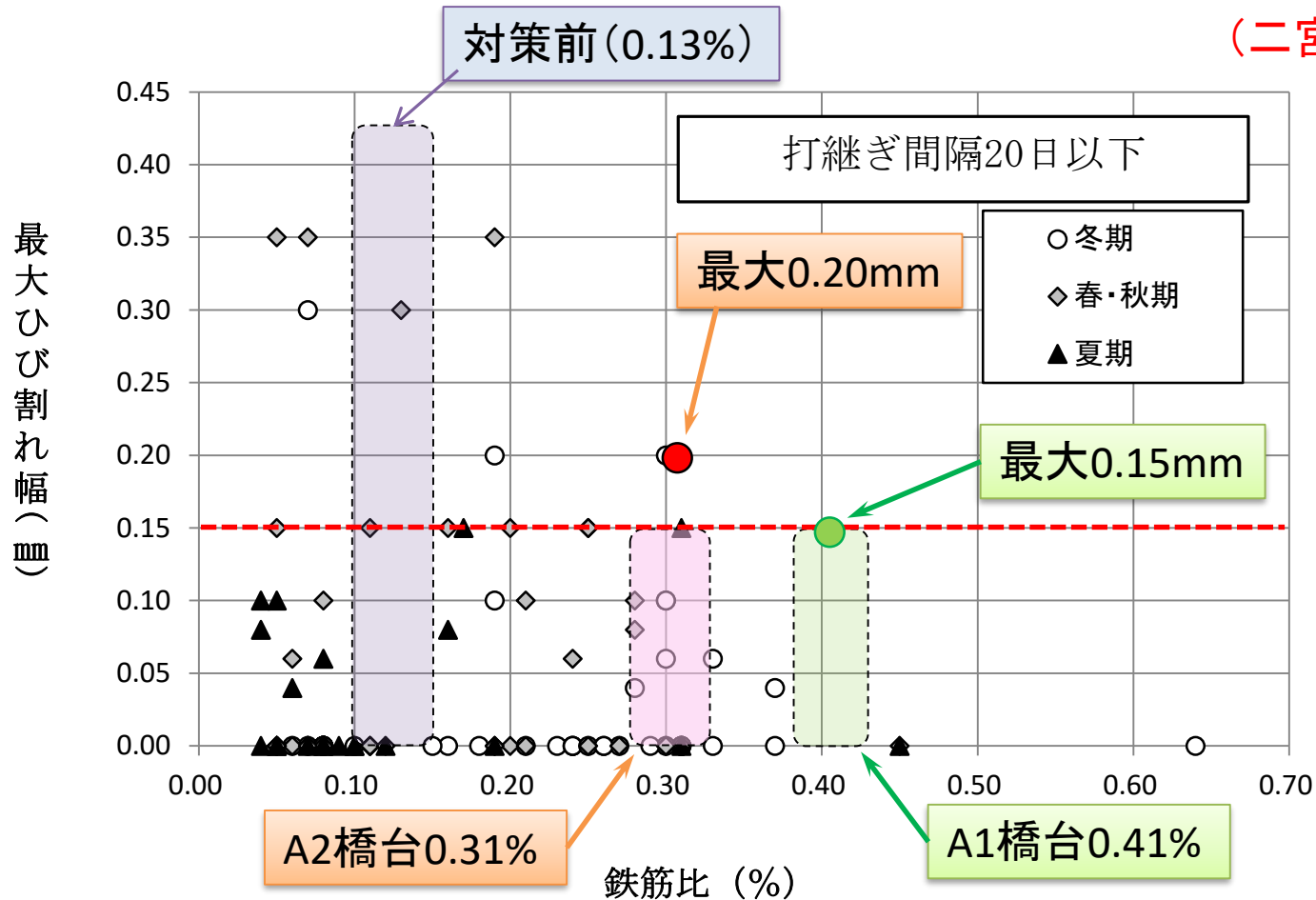
補強鉄筋によるひび割れ抑制対策を計画。H27.4～5月にコンクリート打込み。
⇒たて壁，胸壁に補修基準を上回る最大0.20mmのひび割れ発生。

[後続]A1橋台

たて壁の補強鉄筋比:0.31%を**0.41%**に見直し。胸壁には**膨張材**を使用。
⇒たて壁にひび割れが7本発生し，そのうち最大は0.15mmが1本。
⇒胸壁にはひび割れが発生していない。

構造物名		A2橋台		A1橋台	
部位		たて壁	胸壁	たて壁	胸壁
打込み年月		H27.4.22	H27.5.1	H27.11.10	H27.11.16
寸法	幅	24.6m		24.8m	
	リフト高	1.49m	1.0m	2.03m	1.0m
	厚さ	1.4m	0.50m	1.4m	0.50m
ひび割れ抑制対策	補強材料	補強鉄筋	補強鉄筋	補強鉄筋	補強鉄筋+膨張材
	対策前	0.13%	0.29%	0.13%	0.29%
	当初対策	0.31%	0.50%	0.31%	0.50%
	見直し対策	—	—	0.41%	0.50%
最大ひび割れ幅		0.20mm	0.20mm	0.15mm	無
ひび割れ本数		2本	7本	7本	0本





・鉄筋比が0.13%では、幅0.15mm以上のひび割れ発生事例が多く、0.3%以上であれば、割れ発生事例が少ない。

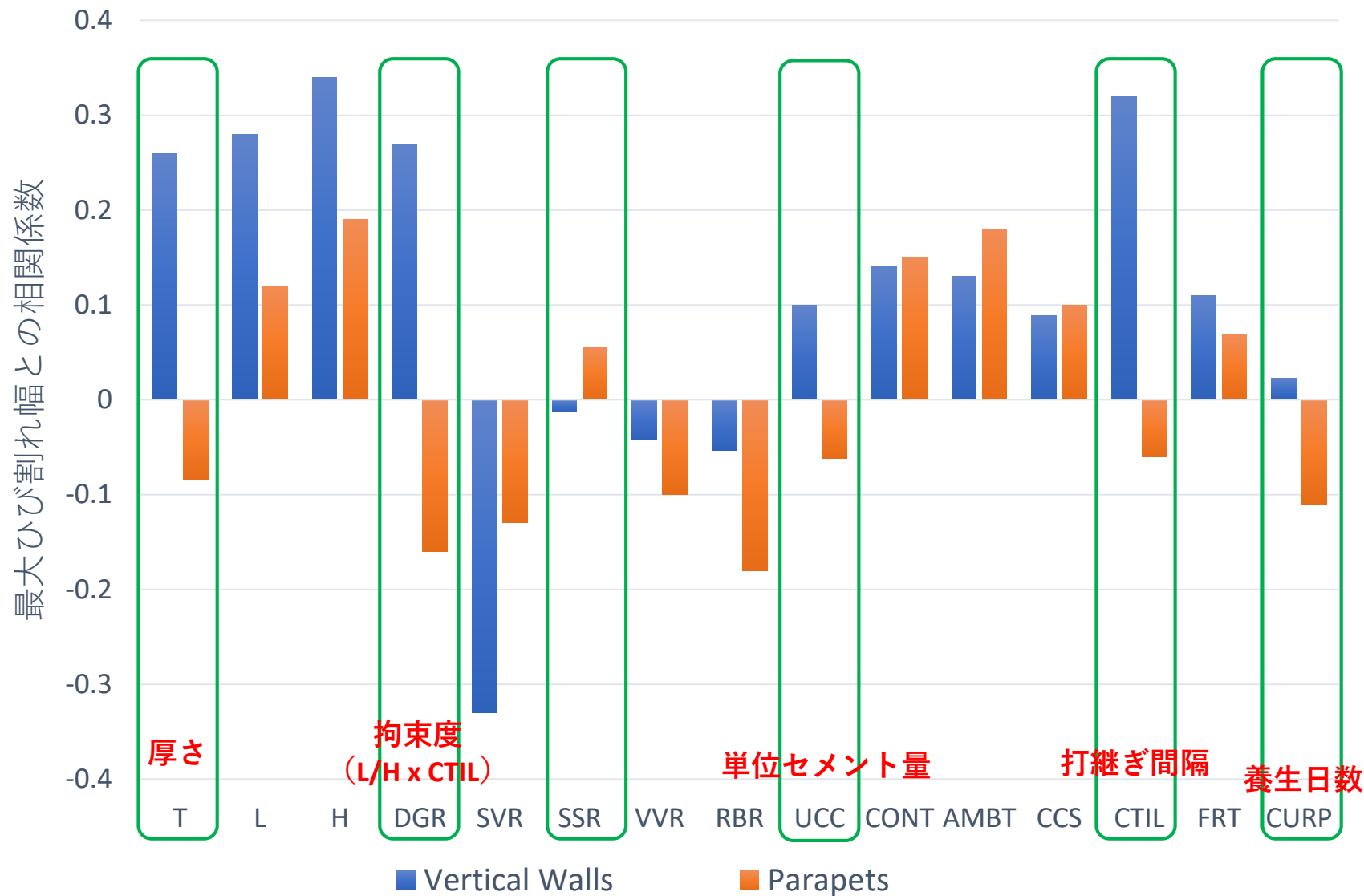
A2橋台で鉄筋比を0.3%確保

→ 最大0.20mm (0.15~0.20mm) の2本のひび割れが発生

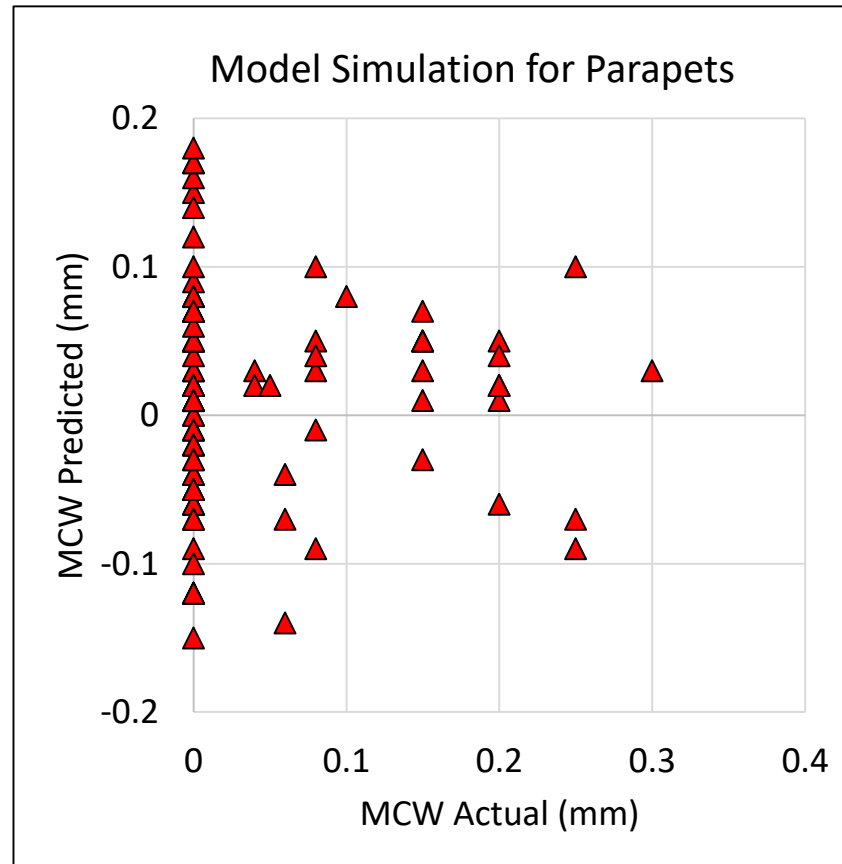
A1橋台で鉄筋比を0.4%確保

→ 最大0.15mm (0.03~0.15mm) の7本のひび割れが発生

たて壁と胸壁で、いくつかの要因と最大ひび割れ幅の相関が正負逆

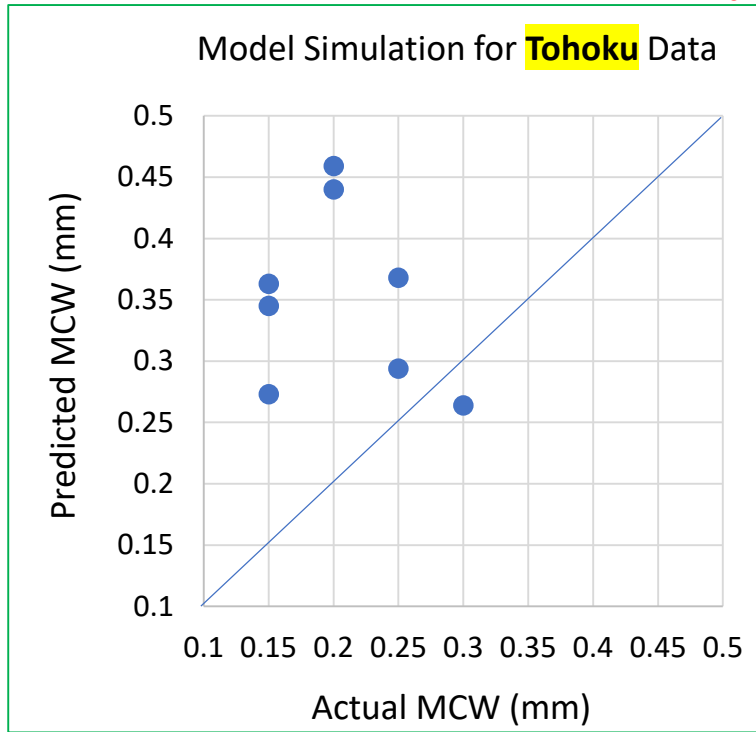


たて壁のモデルでと胸壁の最大ひび割れ幅を予測すると、 全く上手くいかない



The model is not predicting accurately
for the parapets

東北地方の構造物は、山口県の構造物よりもひび割れのリスクが小さい可能性があるが、慎重に精査を重ねている最中です。



Average range of parameters for lifts with MCW 0.15 – 0.30 mm	Yamaguchi	Tohoku
L	14 m	14 m
T	1.8 m	2.0 m
H	3.1 m	4.5 m
RBR	0.22 %	0.20%
CONT	18°C	17°C
AMBT	16°C	12°C

Lift Ref.	T	L	H	DGR	SVR	RBR	UCC	CONT	AMBT	CCS	CTIL	FRT	CURP	MCW	MCW (NN)
TH-01	2	14.596	4.5	84.4	1.23	0.189	293	21	20	33.8	26	30	28	0.3	0.264
TH-02	2	14.596	4.329	97.8	1.24	0.189	293	15	8	33.6	29	30	28	0.15	0.345
TH-03	2	14.632	5.4	81.3	1.19	0.211	293	16	15	34	30	30	28	0.15	0.363
TH-04	2	14.632	4.2	118.5	1.24	0.211	293	12	2	35.8	34	30	28	0.25	0.368
TH-05	1.7	14.42	5.781	134.7	1.35	0.107	321	12	2	31.5	54	17	16	0.2	0.459
TH-06	2.3	12.67	3.8	56.7	1.14	0.177	297	24	17	28.8	17	40	12	0.2	0.44
TH-07	2.3	12.67	3.5	68.8	1.16	0.177	296	16.6	13	32.1	19	40	15	0.15	0.273
TH-08	1.6	14.8	4.5	52.7	1.48	0.37	297	20.7	19.3	28.1	16	7	7	0.25	0.294

機械学習の活用法や注意点のいくつか

細田が、山口県のデータベースを機械学習で分析してみて体感したこと

- 例えば、膨張材のひび割れ抑制効果があるのかを分析できる。
- 山口と東北など、地域を比較することでひび割れリスクの違いを知ることができるかも。ひび割れ対策にも強弱を付けられるかも。
- ひび割れ発生やひび割れ幅への影響要因の抽出。
- 開発した機械をひび割れ抑制設計実務に使うことも悪くはない（コンサルタントがやればよいと思うが、地道な研究とタイアップすべき）。
- 教師データが重要。機械の適用範囲が極めて重要。

- 1) 細田 暁：シリーズ「コンクリート構造物の品質確保物語」No.38, 「山口県のコンクリート施工記録をAI（機械学習）で分析した研究」, 道路構造物ジャーナルNET
- 2) 二宮 純：地方自治体が建設するコンクリート構造物の品質確保システムの構築に関する研究, 横浜国立大学博士学位論文, 2016.3
- 3) Mehboob Rasul, Akira Hosoda, Koichi Maekawa: Prediction of maximum thermal crack width of RC abutments utilizing actual construction data and study on influential parameters using neural networks, Construction and Building Materials, Volume 260, 10 November 2020, 120477