

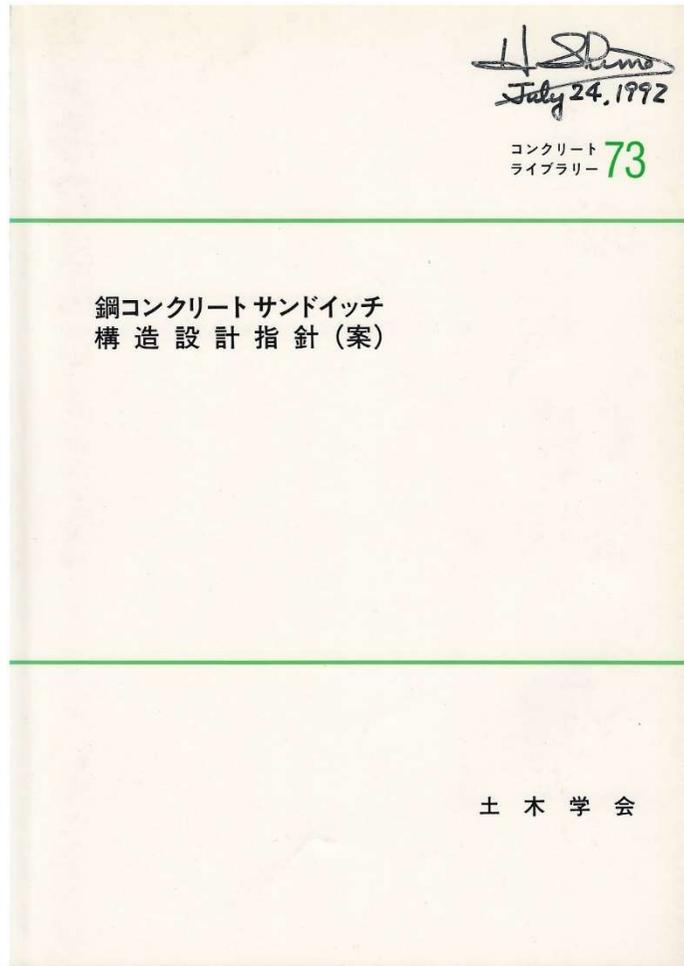
第7回 複合構造セミナー

鋼コンクリート複合構造の弱点

— ずれ止めのすべりとコンクリートの乾燥収縮 —

高知工科大学 島 弘

複合構造との出会い(1990年～1991年)



序

鋼コンクリートサンドイッチ構造は、コンクリート施工に難点があり、その設計施工方法が確立されていないために、鋼構造とコンクリート構造の特徴を上手く生かせる特長があるにもかかわらず、あまり使用されていないのが現状である。しかし、最近、締固め不要のコンクリートが開発されてコンクリート施工上の難点が解消され、鋼コンクリートサンドイッチ構造に関する研究も活発に行われてきており、適切な設計方法があれば、その利用の可能性が大きくなってきている。

このような背景のもとに、土木学会コンクリート委員会（小林一輔委員長当時）では、平成2年、二重鋼殻構造研究会からの研究委託を受け、鋼コンクリートサンドイッチ構造研究小委員会を設置し、その設計指針(案)の作成に関して2年にわたり検討を重ねてきた。この間に、大型供試体による載荷試験を行い、指針(案)中の耐力算定式などの妥当性を検証するとともに、沈埋函に適用した場合を想定した試設計を行い、鋼コンクリートサンドイッチ構造の有用性をも示したのである。

本ライブラリーは、鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)のほかに、これらの調査研究の成果を収録したものである。設計指針(案)と試設計については小委員会ならびにコンクリート委員会常任委員会の審議を経たものであるが、その他の付属資料は各執筆者の責任において書かれたものである。本ライブラリーの発刊が、鋼コンクリートサンドイッチ構造の健全な普及発展に寄与することを期待している。

最後に、角田與史雄副委員長、本ライブラリーの発刊に至るまで献身的な努力を頂いた上田多門幹事、本ライブラリーの付属資料を作成して頂いた園田恵一郎、清宮理、増井直樹、塩屋俊幸、鳥弘の各委員を始めとして委員幹事各位に厚く感謝の意を表します。

平成4年7月

鋼コンクリートサンドイッチ構造研究小委員会
委員長 岡村 甫

複合構造との出会い(1990年～1991年)

私の担当:シアコネクタのせん断伝達耐力

(2) 形鋼をシアコネクタとして用いる場合の設計せん断伝達耐力は、式(7.4.3)により求めてよい(図7.4.1参照).

$$V_{scd} = 17.85 h_{sc} w_{sc} f'_{cd}{}^{1/2} k_1 k_2 k_3 / \gamma_{b1} \dots\dots\dots (7.4.3)$$

ただし、 $V_{scd} > t_{sco} w_{sc} f_{scy d} / \sqrt{3} / \gamma_{b2}$ となる場合は、

$$V_{scd} = t_{sco} w_{sc} f_{scy d} / \sqrt{3} / \gamma_{b2} \text{とする.}$$

ここに、

$$k_1 = 2.2 (t_{sc} / h_{sc})^{2/3} \text{ ただし,}$$

$$k_2 = 0.4 (t_f / t_{sc})^{1/2} + 0.43 \text{ た$$

$$k_3 = (s_{sc} / h_{sc} / 10)^{1/2} \text{ ただし,}$$

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度で、単位は kgf/cm^2 である.

h_{sc} : シアコネクタの高さ

w_{sc} : 作用せん断力と直角方向のシアコネクタの幅

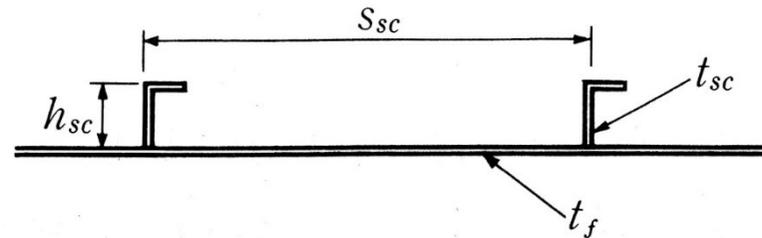
t_{sco} : シアコネクタの溶接部を考慮した厚さもしくはシアコネクタの母材の厚さのうちいずれか小さい方

$f_{scy d}$: シアコネクタの設計引張降伏強度

t_f : シアコネクタがついている鋼板の厚さ

t_{sc} : シアコネクタの厚さ

s_{sc} : 作用せん断力方向のシアコネクタの間隔



複合構造との出会い(1990年~1991年)

形鋼シアコネクタの実験例

横田 弘, 清宮 理: 鋼・コンクリート合成部材での形鋼によるずれ止めの耐荷力, 港湾技研資料, No.595, pp.1-24, Sept. 1987

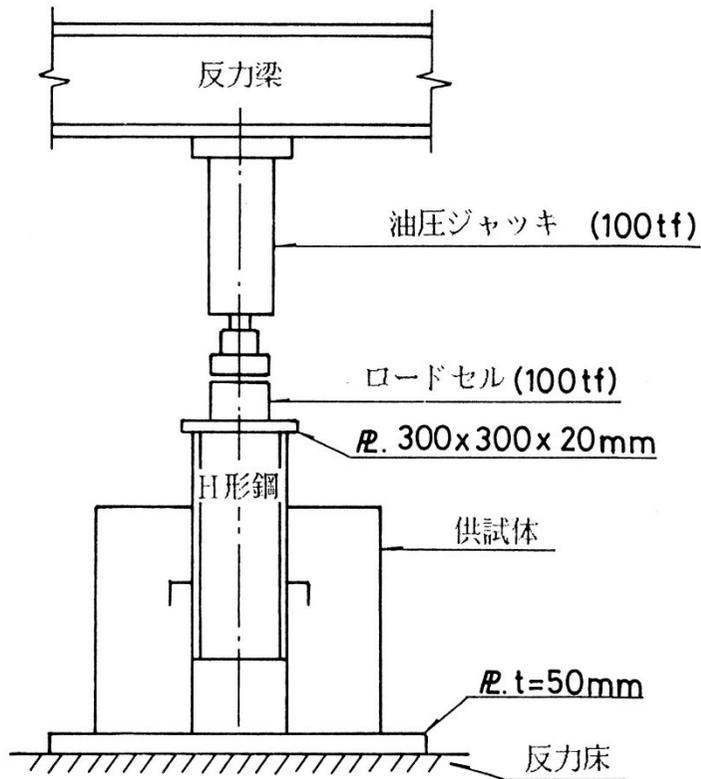
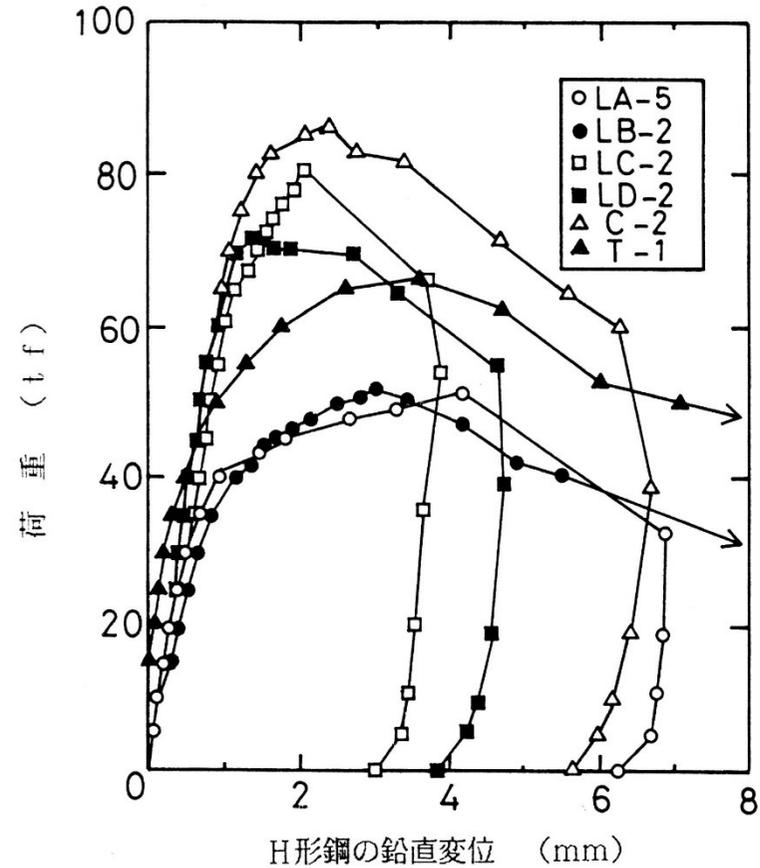


図-7 載荷状況



複合構造との出会い(1990年~1991年)

Chuah, 島, Virach: 鋼コンクリート合成構造における板鋼シアコネクタの荷重-ずれ関係, 土木学会論文集, No.433/V-15, 1991

徳島大学での実験

シアコネクタ間隔が小さいと干渉して弱くなる

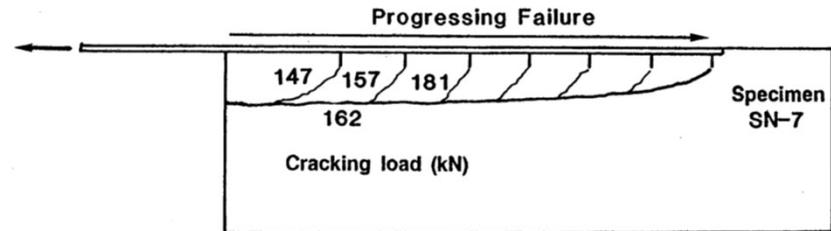
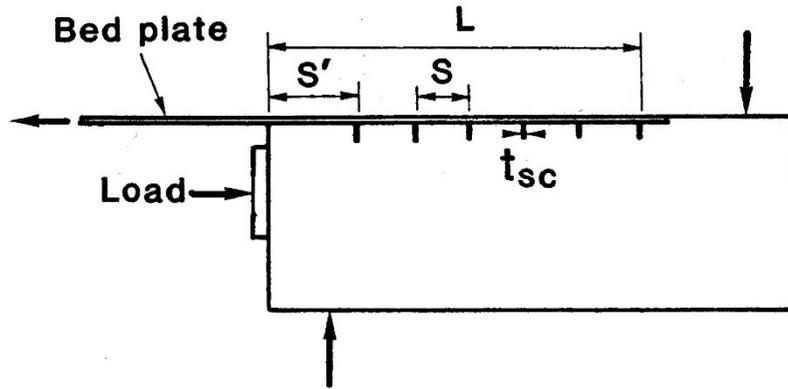


Fig.4 Failure mode of specimens.

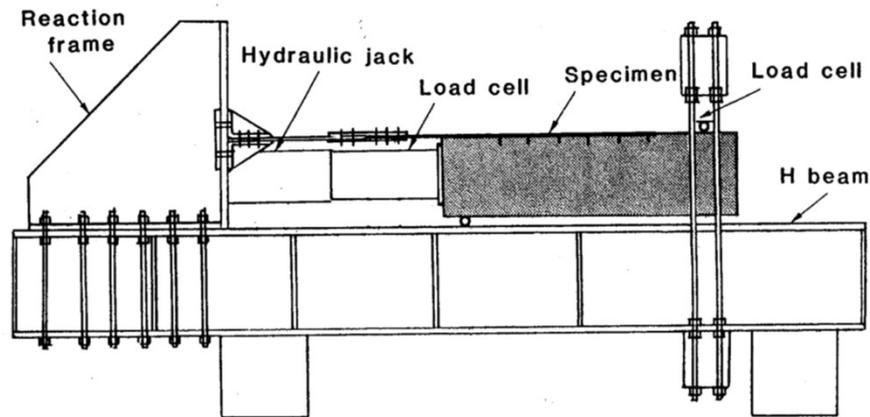


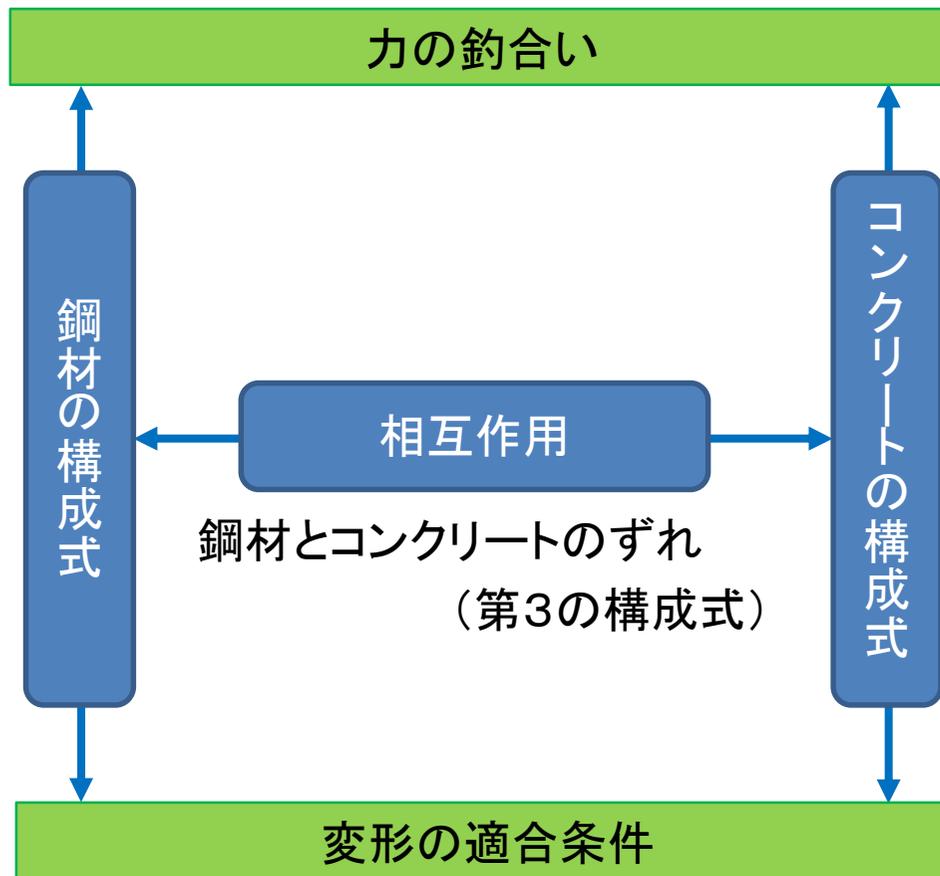
Fig.3 Experimental set-up.

複合構造物の設計

限界状態設計法

構造物の非線形挙動

- ・ 耐震設計
- ・ (有限要素解析)



複合構造物の設計

鋼材の応力-ひずみ式の現状と問題点

単調引張

構造用鋼材 (SS材, SM材)

鋼・合成構造標準示方書 (2007年制定) → 複合示方書

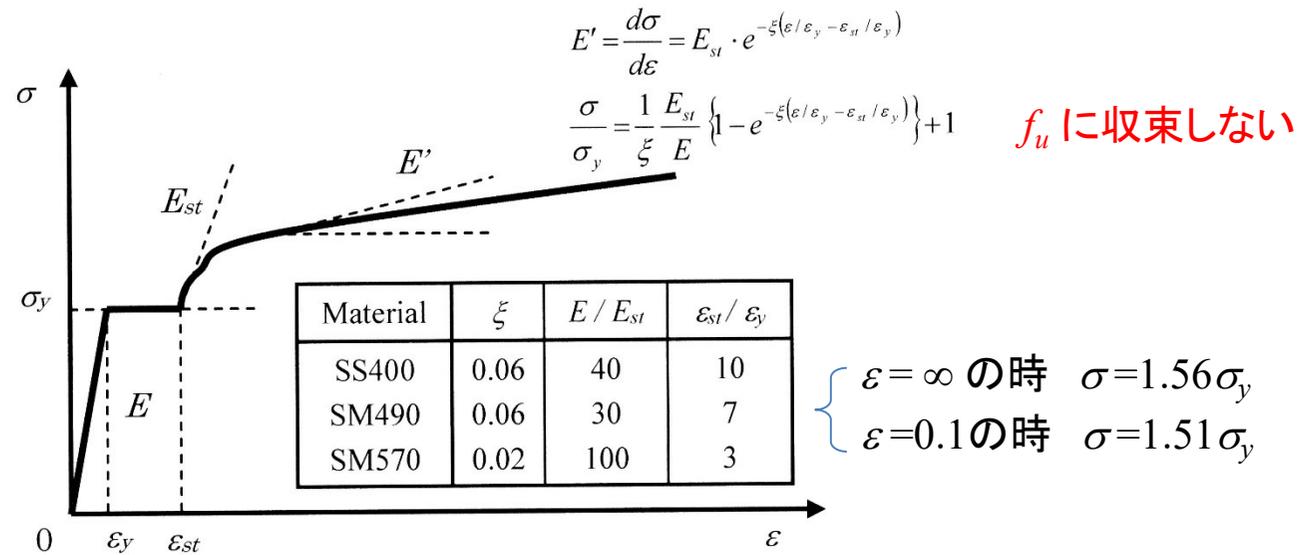
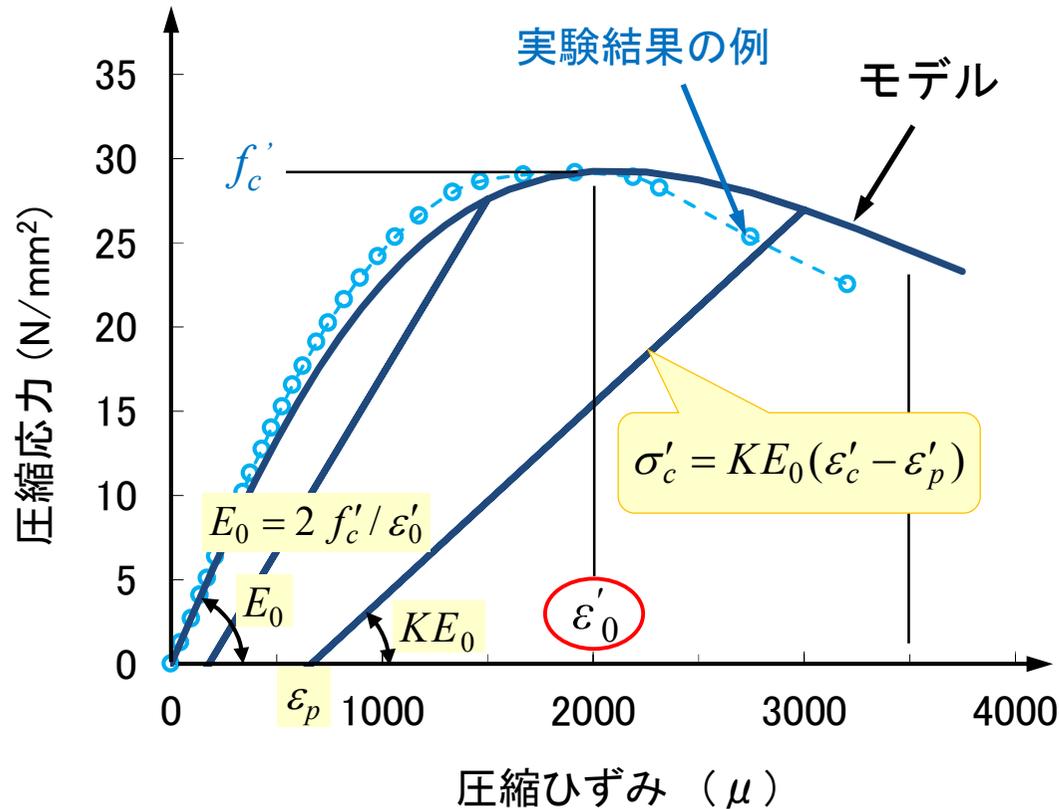


図-解 3.4.1 降伏棚およびひずみ硬化域を有する鋼材の応力-ひずみ曲線 [土木学会, 1996]

複合構造物の設計

コンクリートの応力-ひずみ式の現状と問題点

複合構造標準示方書(2009年制定) → コンクリート標準示方書



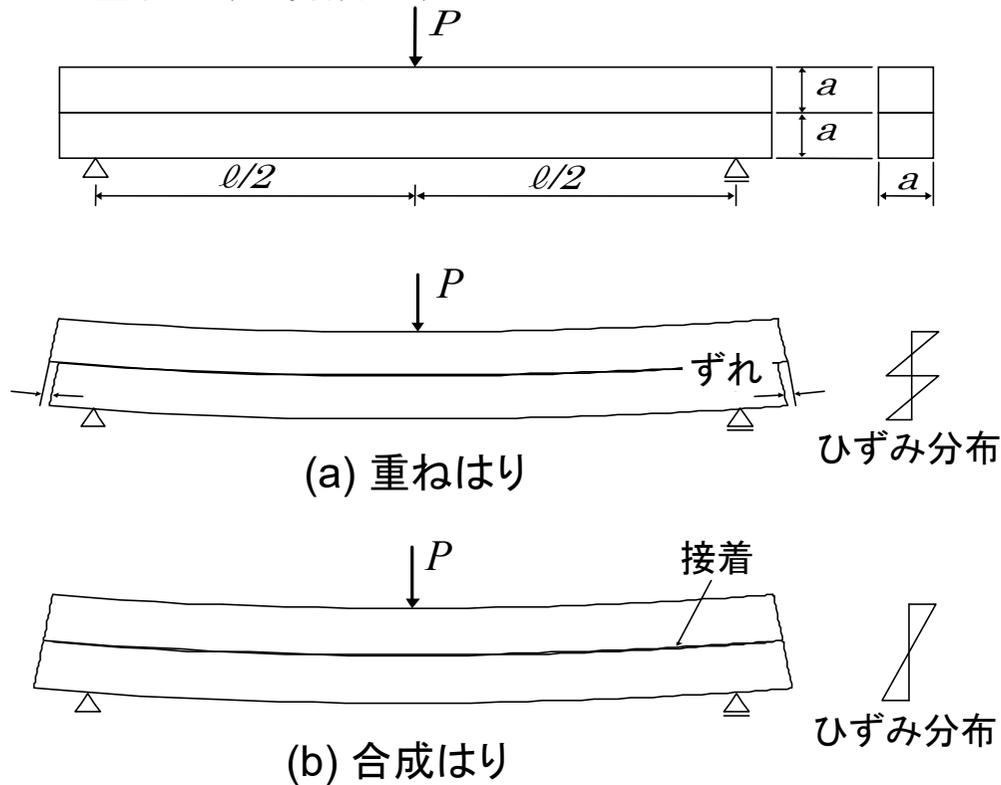
圧縮強度時ひずみ ϵ'_0 ← 一般に 2000μ とし良いとされている

複合構造物の設計

ずれ止めの必要性

引張力が作用する位置や部材に引張に強い鋼材を配置し、圧縮力が作用する位置や部材にコンクリートを配置し、材料間あるいは部材間に生じるせん断力をずれ止め等で伝達させることで、強度や剛性(断面2次モーメント)が大きくなる。

重ねはりと合成はり

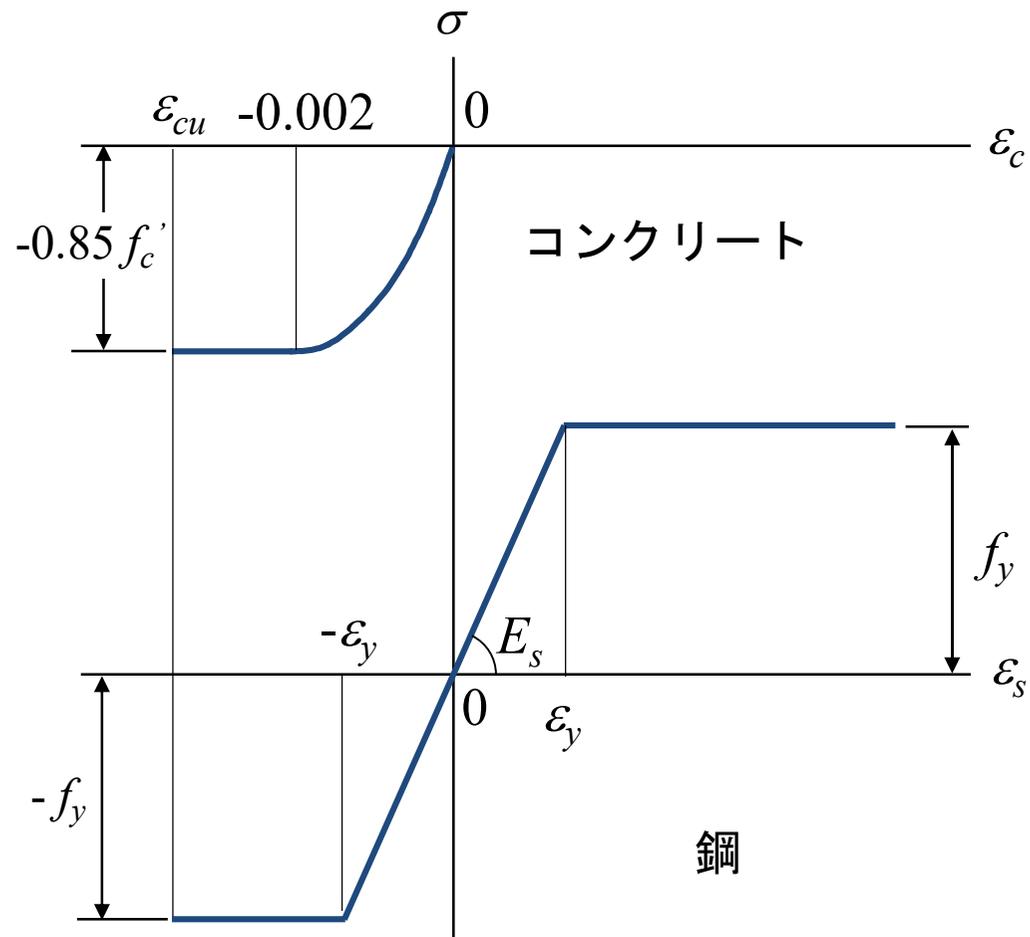


	合成はり	重ねはり	合成／重ね
最大曲げ応力	$\frac{3Pl}{8a^3}$	$\frac{3Pl}{4a^3}$	$\frac{1}{2}$
最大せん断応力	$\frac{3P}{8a^2}$	$\frac{3P}{8a^2}$	1
支間中央たわみ	$\frac{Pl^3}{32Ea^4}$	$\frac{Pl^3}{8Ea^4}$	$\frac{1}{4}$

ちょっとブレイク

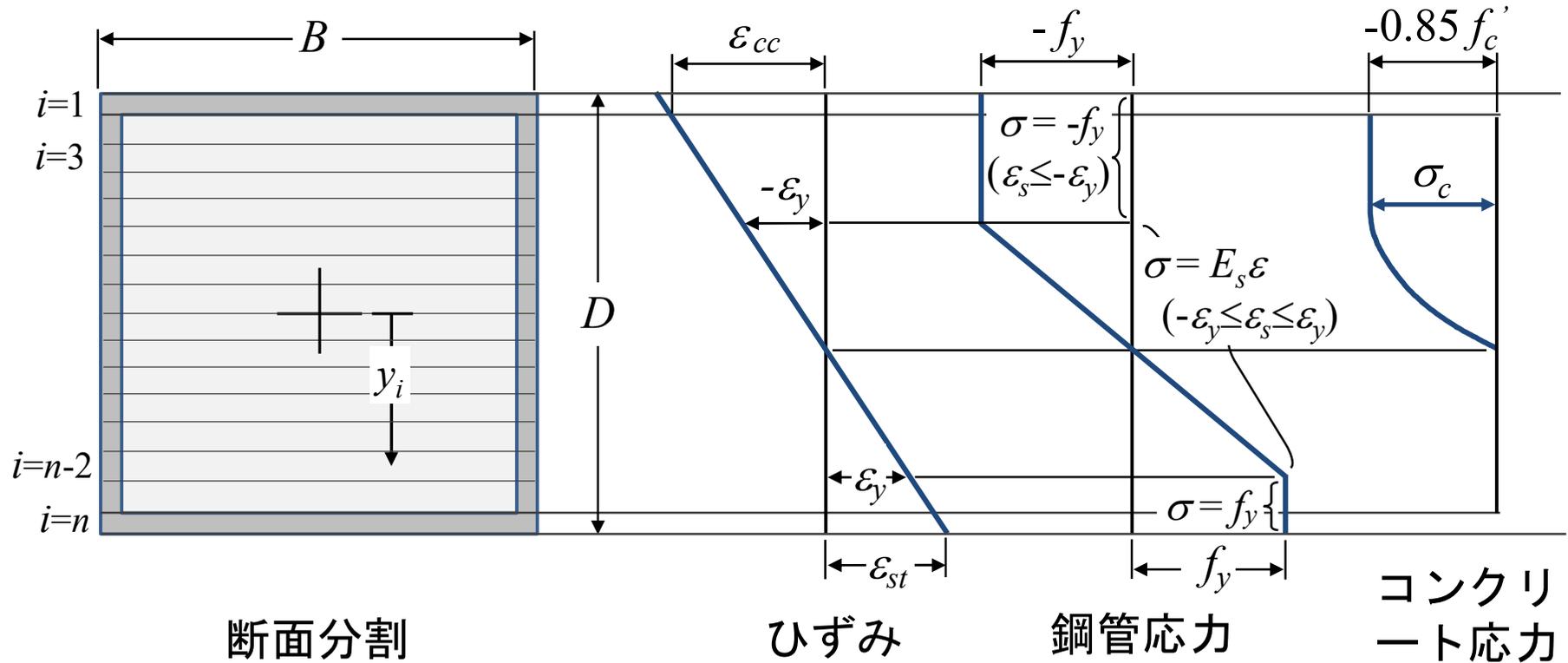
合成断面の曲げ計算

応力-ひずみ関係の例



ちょっとブレイク

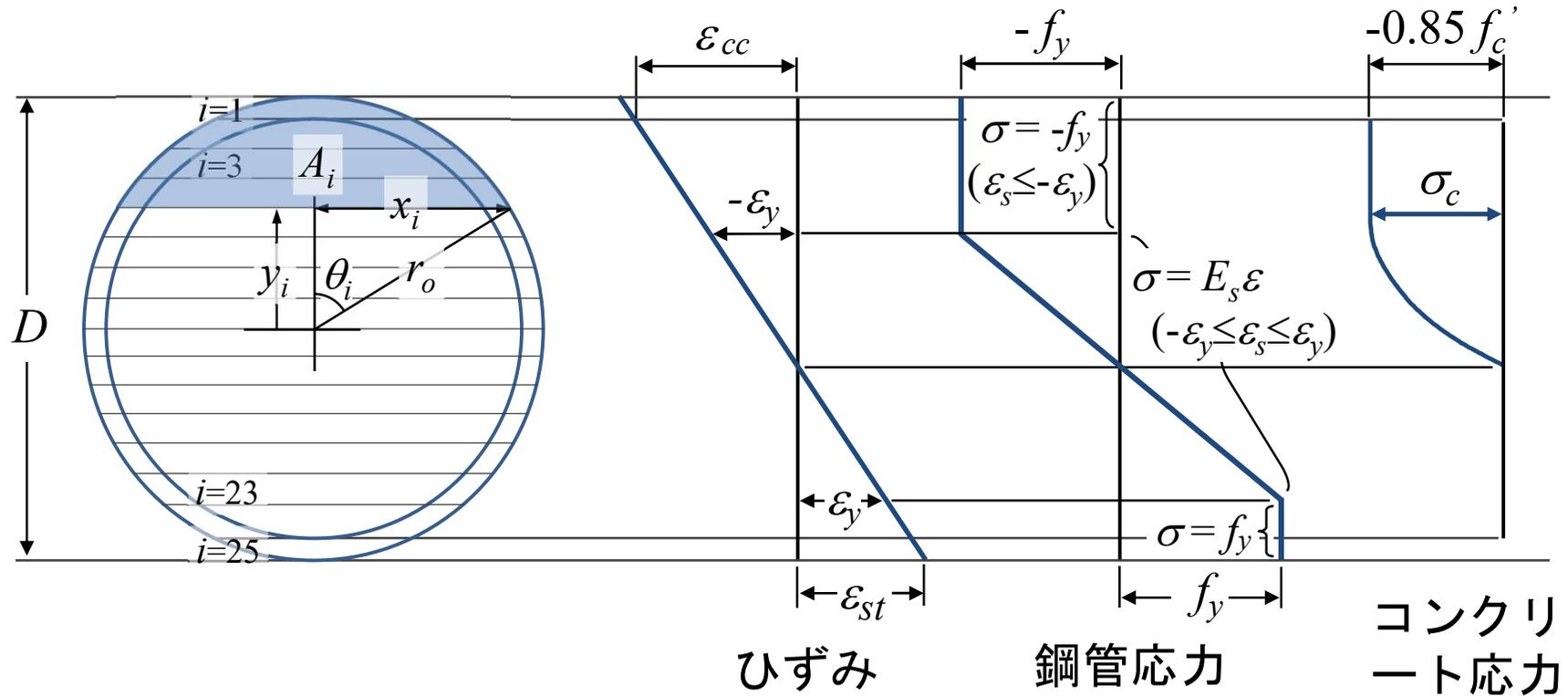
合成断面の曲げ計算



$$\epsilon = \frac{\epsilon_{st} - \epsilon_{cc}}{D - t} \left(y - \frac{D}{2} \right) + \epsilon_{st}$$

ちょっとブレイク

合成断面の曲げ計算

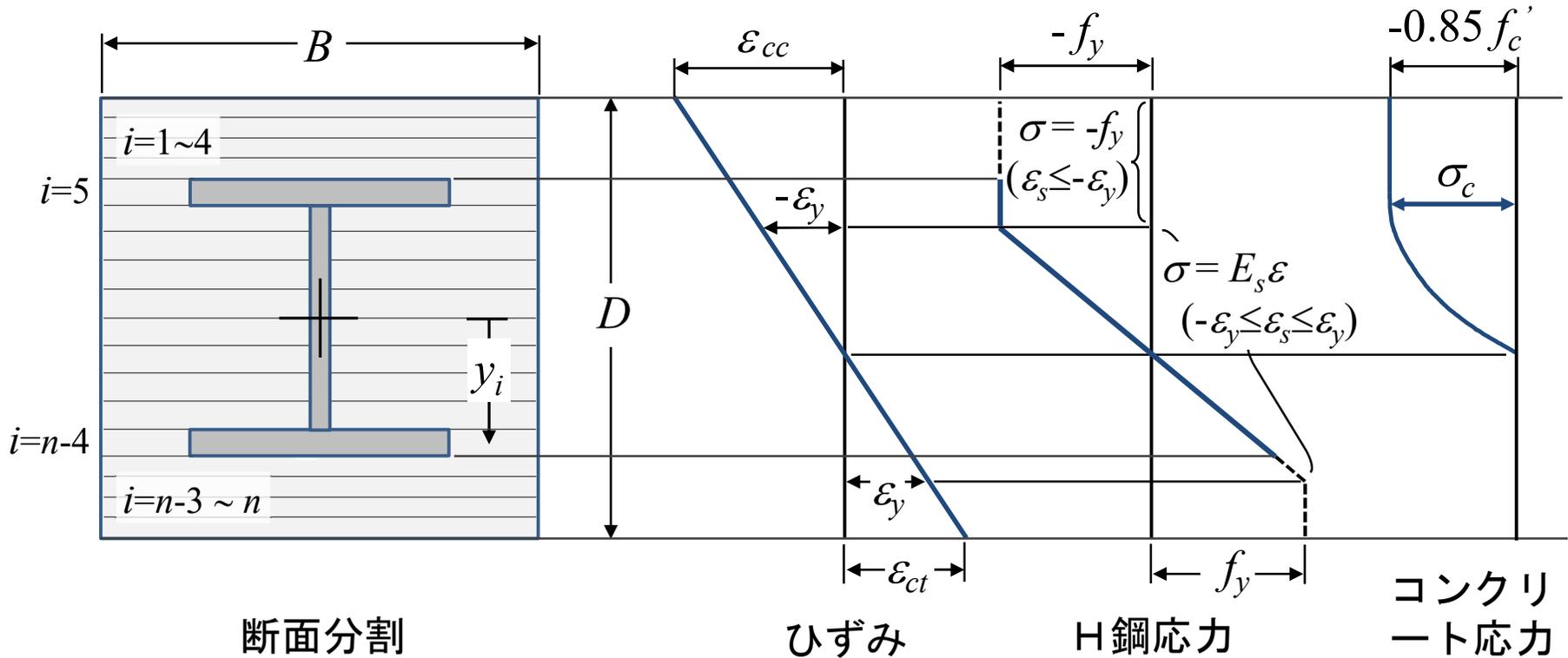


$$\theta_i = \cos^{-1} \frac{y_i}{r} \quad x_i = r \sin \theta_i$$

$$A_i = r^2 \theta_i - x_i y_i \quad \Delta A_i = A_i - A_{i-1}$$

ちょっとブレイク

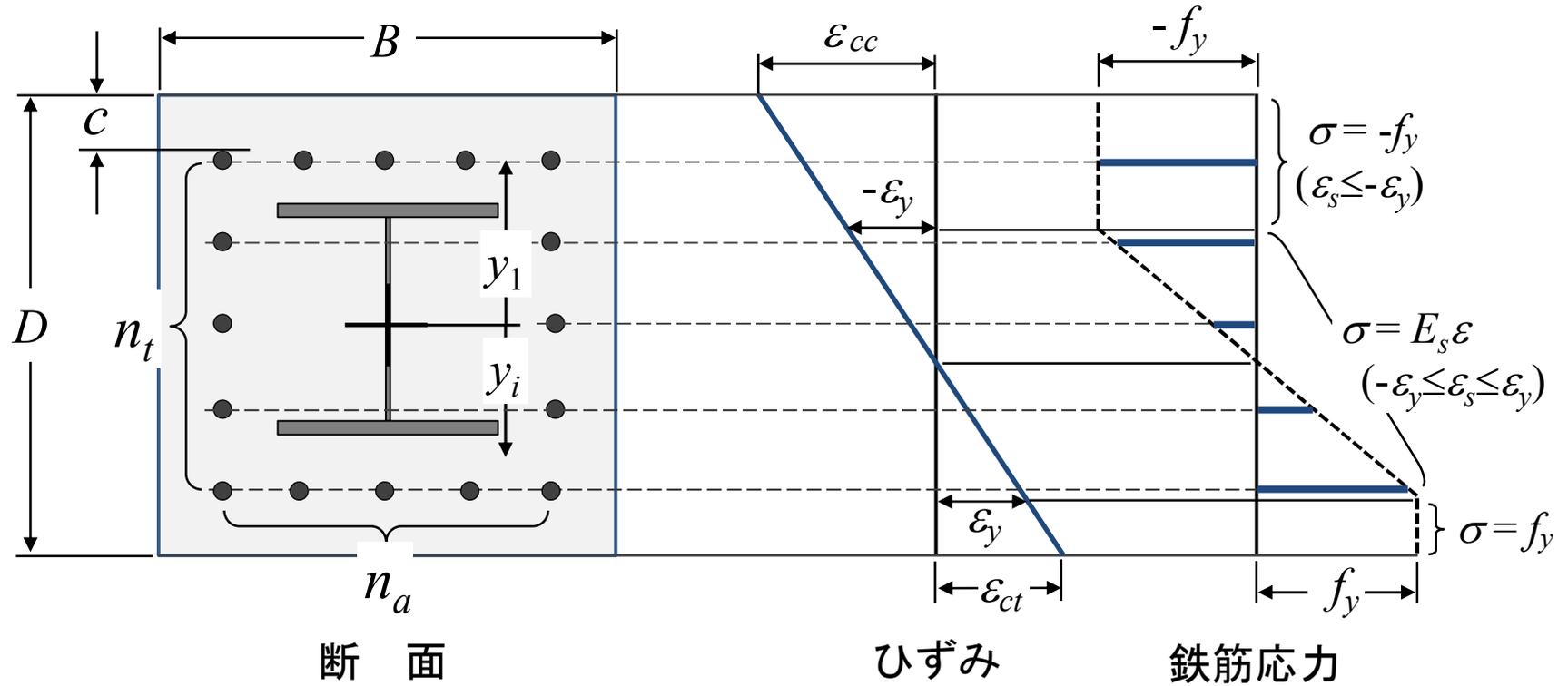
合成断面の曲げ計算



$$\epsilon = \frac{\epsilon_{ct} - \epsilon_{cc}}{D} \left(y - \frac{D}{2} \right) + \epsilon_{ct}$$

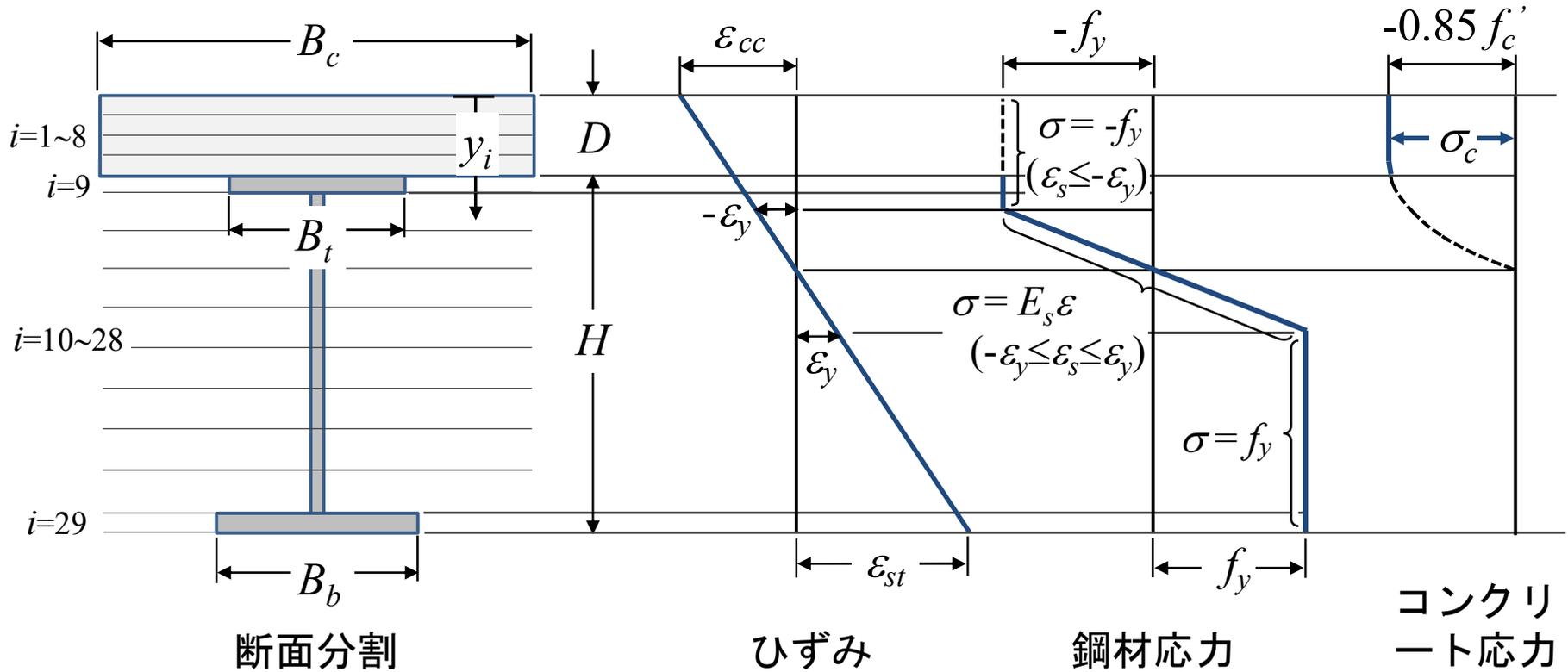
ちょっとブレイク

合成断面の曲げ計算



ちょっとブレイク

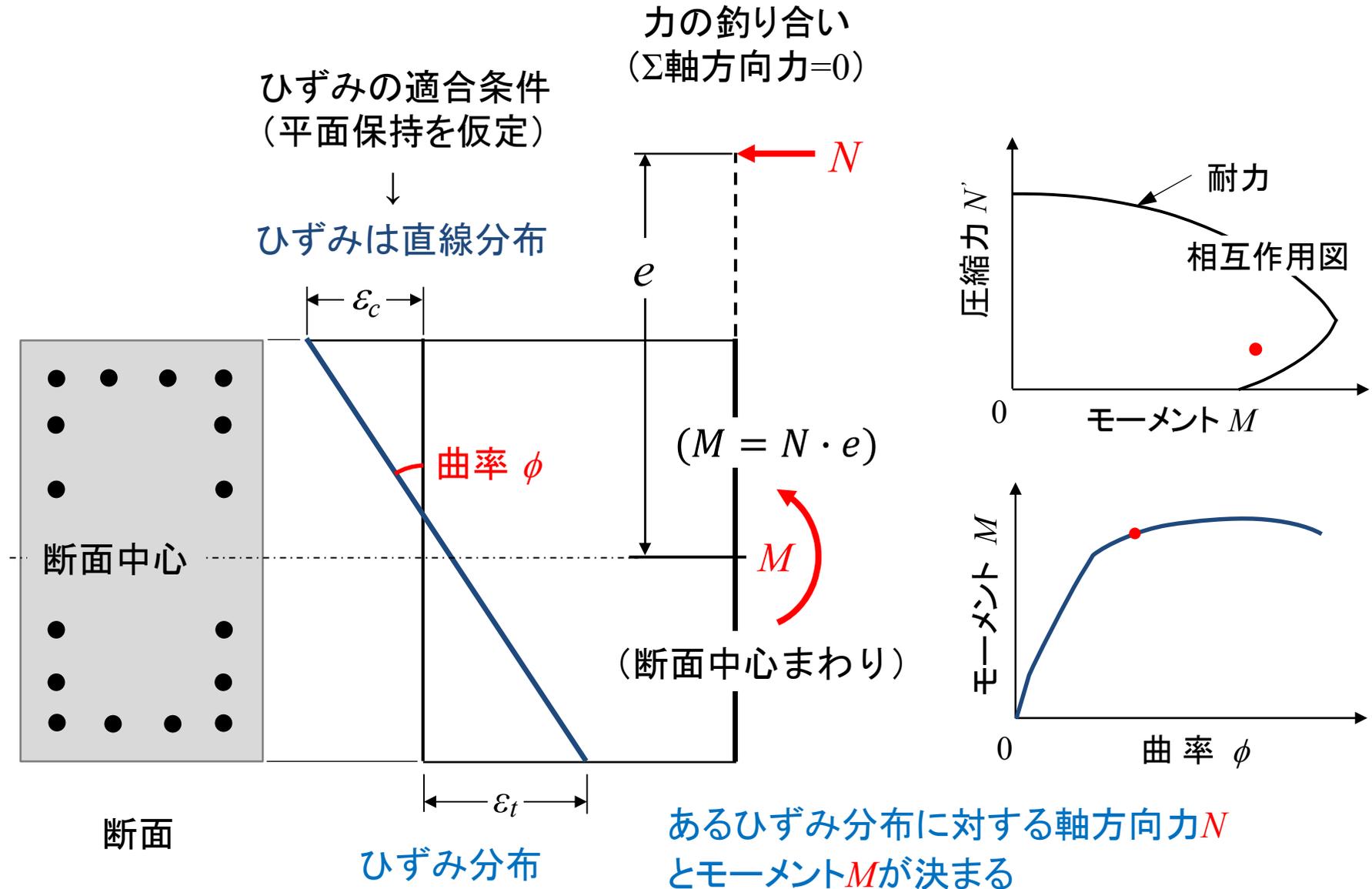
合成断面の曲げ計算



$$\epsilon = \frac{\epsilon_{st} - \epsilon_{cc}}{D + H} y + \epsilon_{cc}$$

ちょっとブレイク

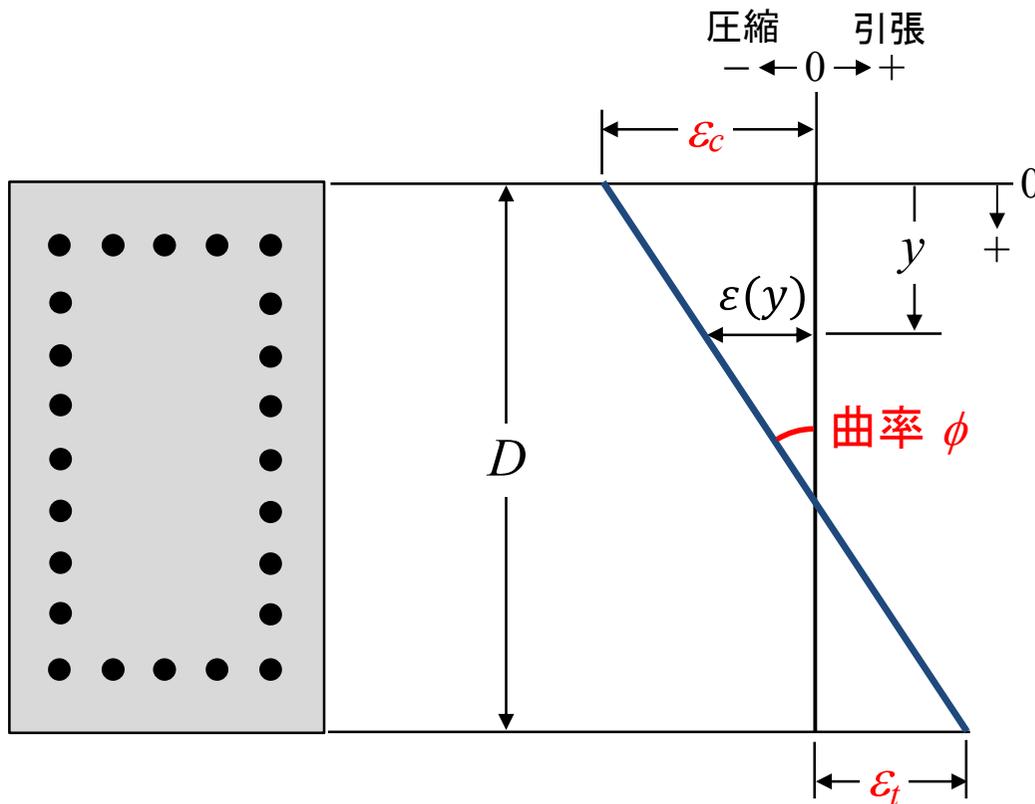
合成断面の曲げ計算



ちょっとブレイク

合成断面の曲げ計算

断面内の曲率とひずみ分布式



ひずみ分布

傾き

$$\phi = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_c}{D} \quad (1)$$

切片

$$\varepsilon(y) = \phi y + \varepsilon_c \quad (2)$$

長方形断面		
設計変数	断面高さ D (mm)	600
	断面幅 B (mm)	300
	鉄筋までの距離 a (mm)	40
	鉄筋直径 (mm)	15.9
	f_y (N/mm ²)	400
	f_c (N/mm ²)	30
鉄筋1本断面積 (mm ²)		198.6
E_s (N/mm ²)		200,000
ε_y		0.002
断面分割数 n		10
dy (mm)		60
計算時の入力セル		
入力	変数 ε_c (μ)	-3,000
	変数 ε_t (μ)	2,500
	曲率 ϕ (1/m)	0.009167
計算結果	Σ 鉄筋力 (kN)	-136
	Σ 鉄筋 M (kN \cdot m)	292
	コンクリート N' (kN)	-2
	コンクリート M (kN \cdot m)	326
	M (kN \cdot m)	618
計算結果出力セル		

鉄筋	鉄筋本数	鉄筋断面積 (mm ²)	y (mm)	ひずみ $\varepsilon(y)$	応力 (N/mm ²)	力 (kN)	中心からの距離 (mm)	モーメント (kN \cdot m)	
			0	0.002000				-300	
	5	993	40			-397	-260	103	
	2	397	105			-159	-195	31	
	2	397	170			-115	-130	15	
	2	397	235			-67	-65	4	
	2	397	300			-20	0	0	
	2	397	365			27	65	2	
	2	397	430			75	130	10	
	2	397	495			122	195	24	
5	993	560			397	260	103		
		600	0.002500				300		
合計						-136		292	
						鉄筋の力		鉄筋のモーメント	
コンクリート	i	$b_i \times \Delta y$ (mm)	y (mm)	ひずみ $\varepsilon(y)$	応力 (N/mm ²)	ΔC (kN)	中心からの距離 (mm)	モーメント (kN \cdot m)	
	1	18000	30			-459	-270	124	
	2	18000	90			-459	-210	96	
	3	18000	150			-443	-150	66	
	4	18000	210			-361	-90	32	
	5	18000	270			-209	-30	6	
	6	18000	330			0	30	0	
	7	18000	390			0	90	0	
	8	18000	450			0	150	0	
	9	18000	510			0	210	0	
10	18000	570			0	270	0		
合計						-1,931		326	
						コンクリートの力		コンクリートのモーメント	

長方形断面			鉄筋本数	鉄筋断面積 (mm ²)	y (mm)	ひずみ $\varepsilon(y)$	応力 (N/mm ²)	力 (kN)	中心からの距離 (mm)	モーメント (kN・m)
設計変数	断面高さ D (mm)	600			0	0.003000			-300	
	断面幅 B (mm)	● ● ● ● ●	5	993	40	-0.002633	←400	-397	-260	103
	鉄筋までの距離 a (mm)	● 40 ●	2	397	105	-0.002038	←400	-159	-195	31
	鉄筋直径 (mm)	● 15.9 ●	2	397	170	-0.001442	←288	-115	-130	15
	f_y (N/mm ²)	● 400 ●	2	397	235	-0.000846	←69	-67	-65	4
	f_c (N/mm ²)	- ● ● ● ● ●	2	397	300	-0.000250	←50	-20	0	0
		● ● ● ● ●	2	397	365	0.000346	→69	27	65	2
鉄筋1本断面積 (mm ²)	● 198.6 ●	2	397	430	0.000942	→88	75	130	10	
E_s (N/mm ²)	● 20,000 ●	2	397	495	0.001538	→308	122	195	24	
ε_y	● ● ● ● ●	5	993	560	0.002133	→400	397	260	103	
				600	0.002500				300	
断面分割数 n	10		合計					-136		292
dy (mm)	60									
			i	$b_i \times \Delta y$ (mm)	y (mm)	ひずみ $\varepsilon(y)$	応力 (N/mm ²)	ΔC (kN)	中心からの距離 (mm)	モーメント (kN・m)
入力	変数 ε_c (μ)	-3,000	1	18000	30	-0.002725	←25.5	-459	-270	124
	変数 ε_t (μ)	2,500	2	18000	90	-0.002175	←25.5	-459	-210	96
	曲率 ϕ (1/m)	0.009167	3	18000	150	-0.001625	←24.6	-443	-150	66
			4	18000	210	-0.001075	→20.0	-361	-90	32
			5	18000	270	-0.000525	→11.6	-209	-30	6
計算結果	Σ 鉄筋 力 (kN)	-136	6	18000	330	0.000025	0.0	0	30	0
	Σ 鉄筋 M (kN・m)	292	7	18000	390	0.000575	0.0	0	90	0
	コンクリート 力 (kN)	-2	8	18000	450	0.001125	0.0	0	150	
	コンクリート M (kN・m)	326	9	18000	510	0.001675	0.0	0	210	
	N' (kN)	134	10	18000	570	0.002225	0.0	0	270	
M (kN・m)	618		合計					-1,931		326

鉄筋の力

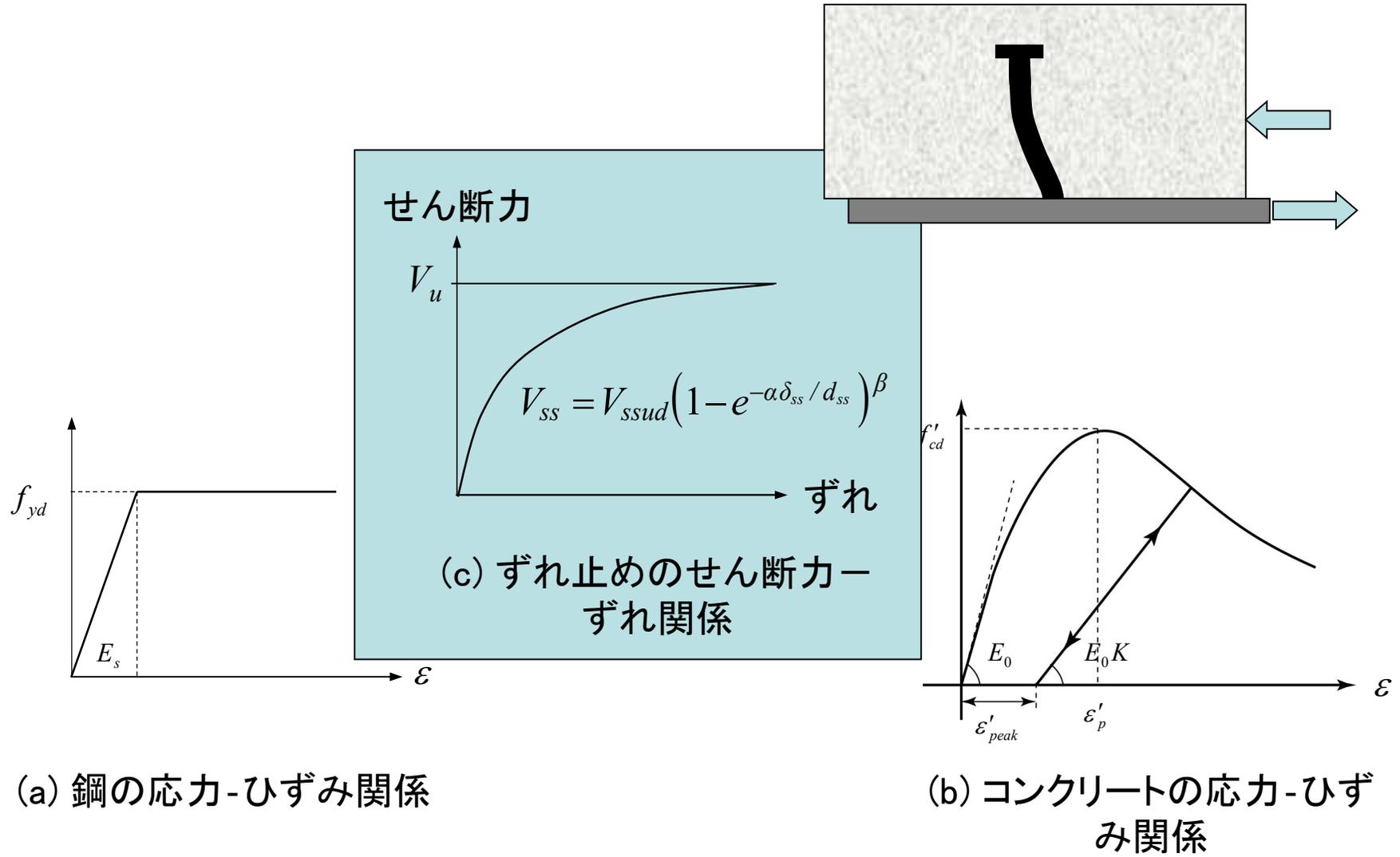
鉄筋のモーメント

コンクリートのモーメント

コンクリートの力

話は戻って ずれ止めのせん断カーズれ変位関係式の現状

頭付きスタッドの例



(a) 鋼の応力-ひずみ関係

(b) コンクリートの応力-ひずみ関係

ずれ止めのせん断力-ずれ変位関係

形鋼シアコネクタ (1991年)

Chuah, 島, Virach: 鋼コンクリート合成構造における板鋼シアコネクタの荷重-ずれ関係, 土木学会論文集, No.433/V-15, 1991

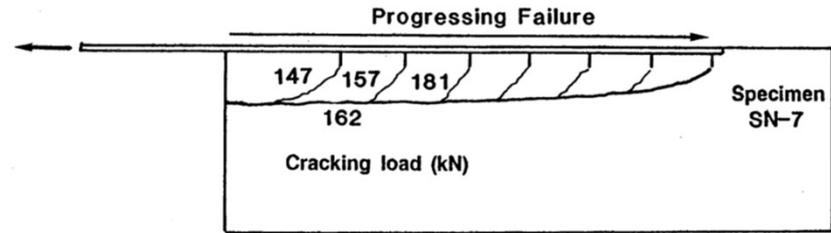
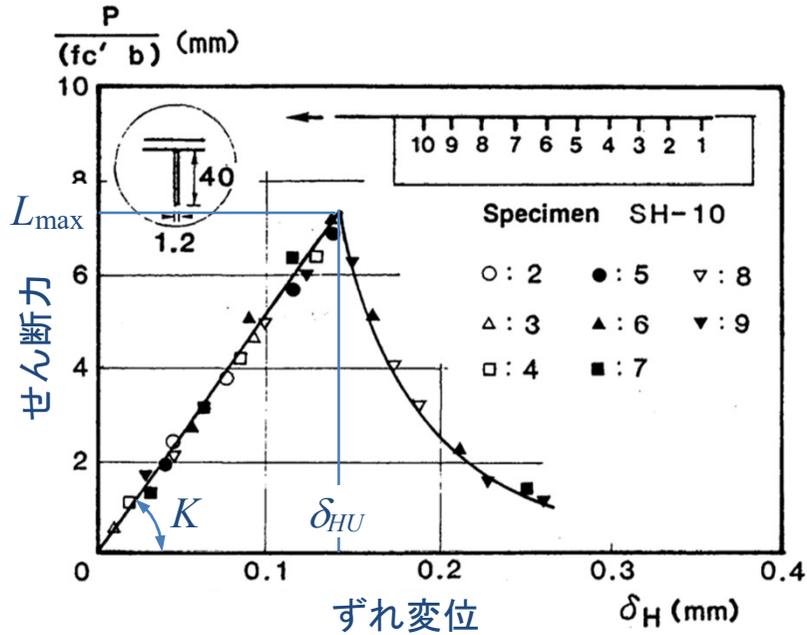


Fig.4 Failure mode of specimens.

$$\left. \begin{aligned} P/(f_c' b) &= K\delta_H && \text{for } \delta_H \leq \delta_{HU} \\ P/(f_c' b) &= L_{max}(\delta_{HU}/\delta_H)^c && \text{for } \delta_H > \delta_{HU} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

where, L_{max} : capacity of single shear connector
 δ_{HU} : longitudinal displacement corresponding to L_{max}
 K, c : constants

Table 2 Parameters of Equation (1)

Specimen	Geometry of Shear Connector			Equation's Parameter			
	t_{sc} mm	h_{sc} mm	S mm	L_{max} mm	δ_{HU} mm	K	c
Series SN	2.3	20	100	7.33	0.09	81	0.9
SS-6	2.3	20	150	9.40	0.09	104	-
ST-10	1.2	20	100	7.33	0.12	61	2.0
SH-10	1.2	40	100	7.33	0.14	52	3.0

ずれ止めのせん断力-ずれ変位関係

形鋼シアコネクタ

徳島大学での部材実験(1992年~1993年)

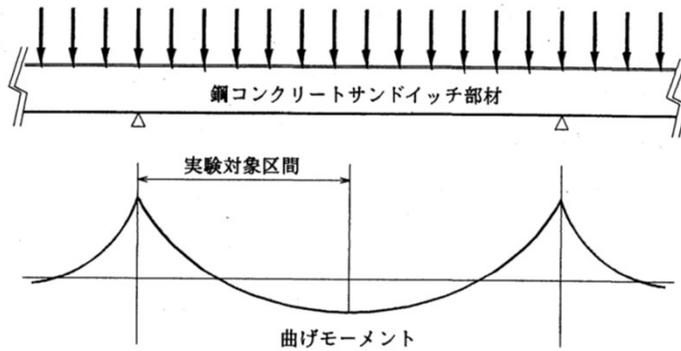


図-1 対象部材

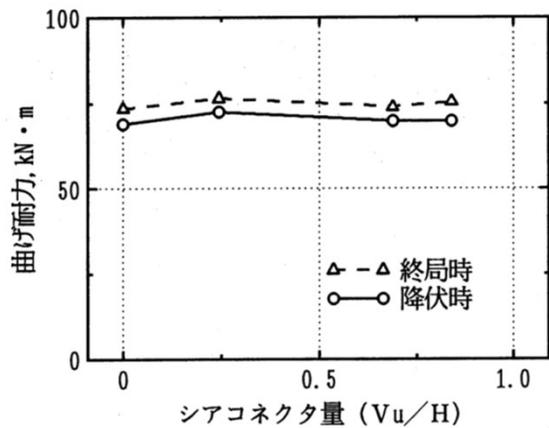
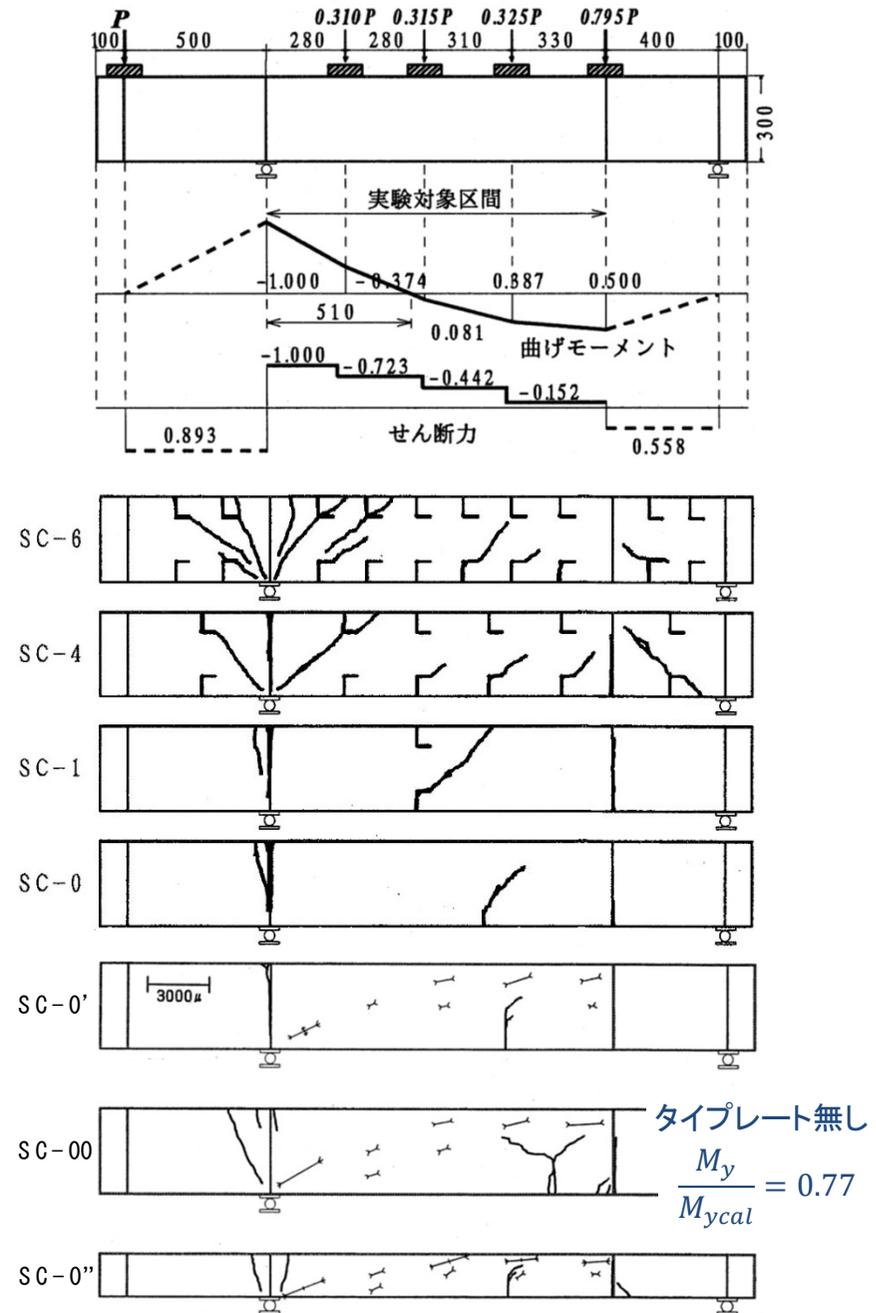


図-6 シアコネクタ量と曲げ耐力との関係



ずれ止めのせん断力-ずれ変位関係

形鋼シアコネクタ

徳島大学での部材実験(1992年~1993年)

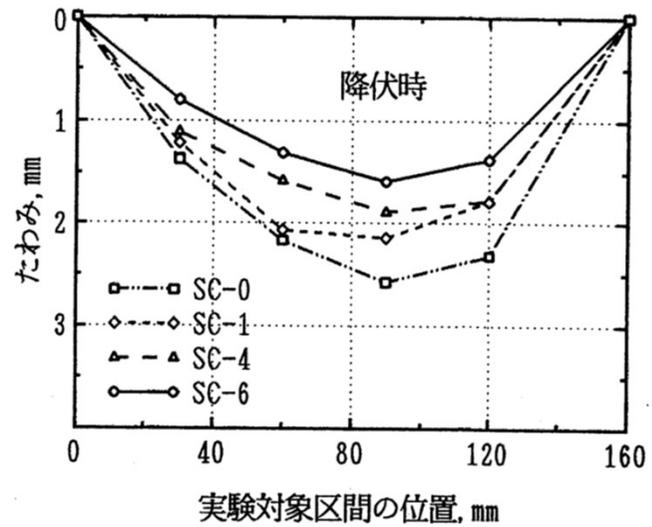


図-8 降伏時におけるたわみ曲線

形鋼シアコネクタの研究は一旦終了

ずれ止めのせん断力-ずれ変位関係

頭付きスタッドとの出会い(1990年 徳島大学)

Chuah, 島, 則武, 熊谷:高強度プレレストコンクリートに埋め込まれた頭付きスタッドの強度と変形, コンクリート工学年次論文報告集, 13(2), 1991

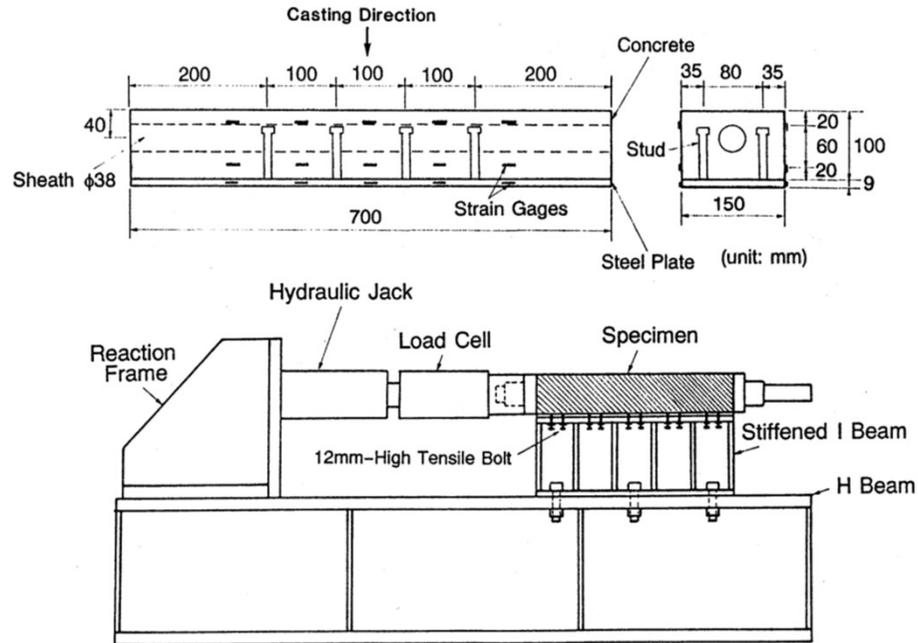
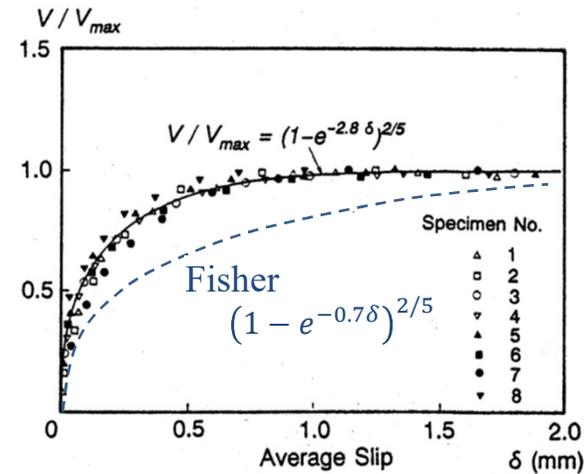
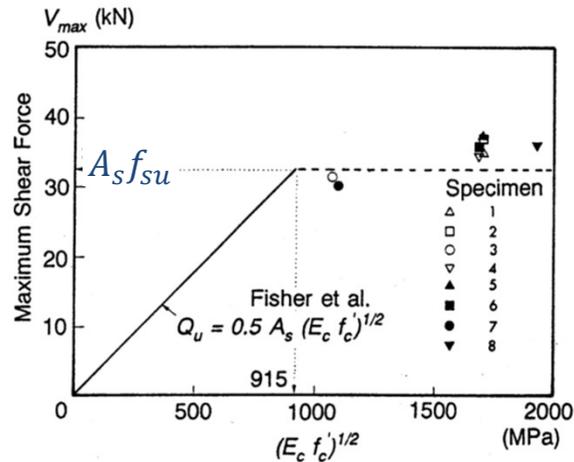


Table 1 Properties of specimens

Specimen No.	f'_c MPa	σ_p / f'_c
1	80	0
2		0.3
3	40	
4	80	0
5		0.3
6		0.4
7	40	0
8	100	0

σ_p : prestress



十数年後 (1997年に高知工科大学に転勤)

土木学会複合構造委員会

2002年 複合構造物の性能照査指針(案)

2005年 複合構造委員会 発足 (上田委員長, 大垣幹事長, 島委員)

2005年 複合構造物の性能照査例 (中島主査, 大垣幹事, 渡辺幹事)

2005年 複合構造物の性能照査指針小委員会 (中村部会長, 中島, 渡辺, 島)
改訂

2009年制定 複合構造標準示方書

頭付きスタッドのせん断力-ずれ変位曲線の提示

2009年~2013年 複合構造委員会 ずれ止め研究小委員会 (中島委員長, 渡辺幹事長)

2014年制定 複合構造標準示方書

頭付きスタッド式に鋼板との摩擦の影響を導入

形鋼シアコネクタの圧縮斜材に対するせん断力-ずれ変位関係

頭付きスタッドの定式化 (2007年 高知工科大学)

島, 渡部:頭付きスタッドのせん断カーズれ関係の定式化, 土木学会論文集A, 64(4), 2008

試験体番号	試験体名 ($\phi-h-f_{su}-f'_c$)	スタッド軸径 mm	スタッド高さ mm	スタッドの高さ/軸径	スタッド引張強度 N/mm ²	コンクリート強度 N/mm ²	せん断耐力		式(2)/式(1)
							式(1) kN	式(2) kN	
No.1	19-120-437-20	19	120	6.32	437	19.5	107.5	123.9	1.15
No.2	19-120-437-31	19	120	6.32	437	31.4	133.8	123.9	0.93
No.3	19-120-437-53	19	120	6.32	437	52.5	170.0	123.9	0.73
No.4	19-120-623-18	19	120	6.32	623	18.3	104.5	176.6	1.69
No.5	19-120-623-28	19	120	6.32	623	27.7	126.3	176.6	1.40
No.6	19-120-623-52	19	120	6.32	623	52.3	169.7	176.6	1.04
No.7	19-80-623-29	19	80	4.21	623	28.4	106.1	176.6	1.66
No.8	19-150-623-29	19	150	7.89	623	28.5	141.8	176.6	1.25
No.9	25-150-449-31	25	150	6.00	449	30.9	217.2	220.4	1.01

Ollgaard and Fisherの式

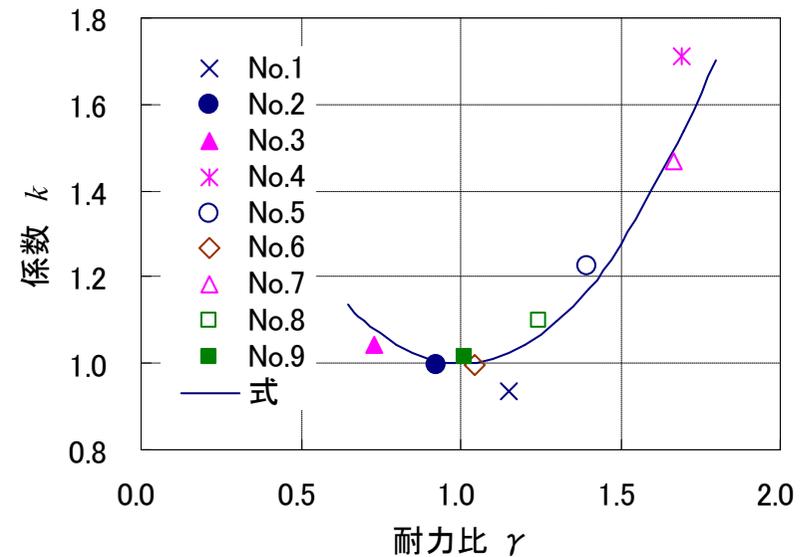
$$V = V_u(1 - e^{-0.7\delta})^{2/5}$$

$$V = V_u(1 - e^{-\alpha \delta/\phi})^{2/5}$$

$$\alpha = 11.5 \left(\frac{f'_c}{f'_{c0}} \right) \{ 1.1(\gamma - 1)^2 + 1 \}$$

$$\gamma = \frac{A_s f_{su}}{31 A_s \sqrt{\frac{h}{\phi} f'_c} + 10000}$$

平城らの耐力式



2009年制定 複合構造標準示方書

序

複合構造委員会では 2005 年に「複合構造物の性能照査例」を刊行した後、「複合構造物の性能照査指針（案）」を改訂するために、複合構造物の性能照査指針小委員会を設立しました。この委員会では、旧指針（案）に対して、まず共通編では、①構造計画の新設、②材料構成則の取込み、③ずれ止めの規定の深度化、さらに、④混合構造編に替わる異種部材接合部編の新設、⑤それに対応して、複数の編に分かれていた各種合成部材を、合成部材編としてまとめ、（注）など技術の進展に伴う見直しや内容の更新を行いました。この委員

2009 年 12 月

土木学会複合構造委員会
複合構造標準示方書小委員会
委員長 上田 多門

2009年制定 複合構造標準示方書

6.2 頭付きスタッド

(1) 頭付きスタッドを用いた接合部に作用する力と変形との関係は、検討の目的に応じて適切に仮定しなければならない。

(2) 頭付きスタッドを用いた接合部のせん断力-ずれ変位関係は、検討の目的に応じて適切に仮定しなければならない。

(3) 鋼板とコンクリートの接触面における直圧縮応力の影響を無視できない場合には、鋼板とコンクリート間の摩擦の影響を適切に考慮しなければならない。

(4) 一方向荷重に対するせん断力-ずれ変位関係は、一般に図 6.2.1 に示したモデル化された曲線を用いてよい。

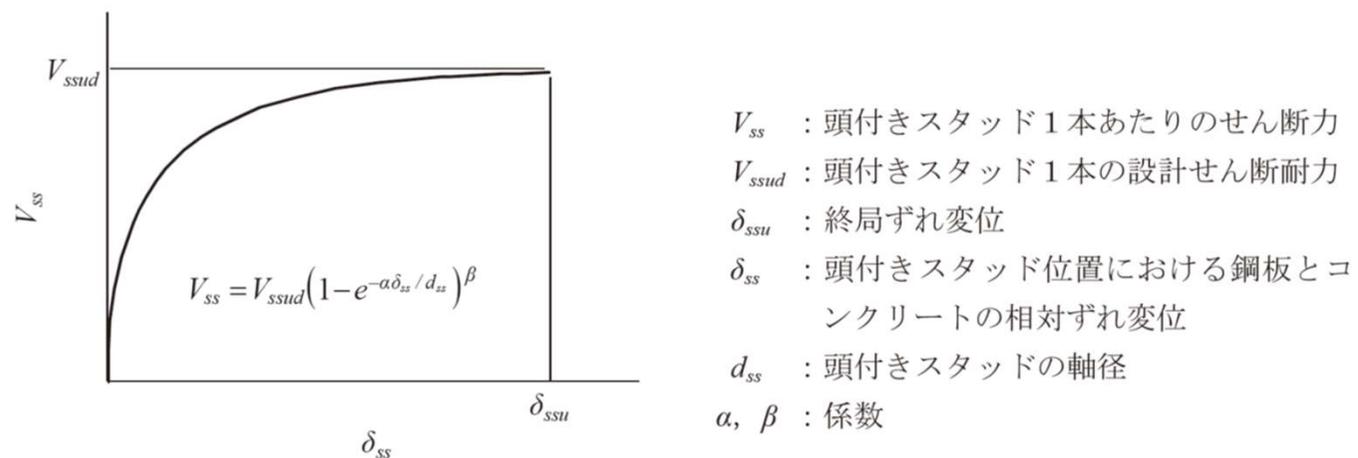


図 6.2.1 頭付きスタッドのせん断力-ずれ変位曲線

2009年制定 複合構造標準示方書

【解説】

スタッドの直径が 19～25mm, 高さが 80～150mm, 引張強度が 400～623N/mm², コンクリートの圧縮強度が 18～53N/mm², h_{ss}/d_{ss} が 4～8, 接合面に直角方向に作用する圧縮力をスタッドの断面積で除した応力が 120 N/mm² 程度以下の場合の頭付きスタッドの終局ずれ変位および係数 α および β は, 式 (解 6.2.3) から式 (解 6.2.5) に示す式を用いて算定してよい (A タイプ, スタッドのタイプは解説図 6.2.1 による).

$$\delta_{ssu} = 0.3 d_{ss} \quad (\text{解 6.2.3})$$

ここに,

δ_{ssu} : スタッドの終局ずれ変位 (mm)

d_{ss} : スタッドの軸径 (mm)

$$\alpha = 11.5 \left(f'_{cd} / f'_{c0} \right) \left\{ 1.1(\eta - 1)^2 + 1 \right\} \quad (\text{解 6.2.4})$$

$$\beta = 0.4 \quad (\text{解 6.2.5})$$

ここに,

$$f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_c$$

f'_{ck} : コンクリートの圧縮強度の特性値 (N/mm²)

γ_c : コンクリートの材料係数

$$f'_{c0} = 30 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

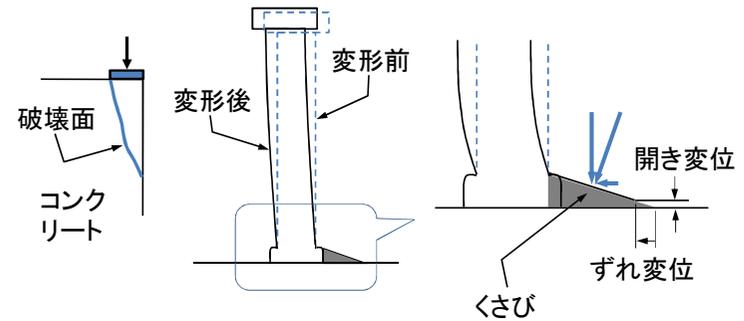
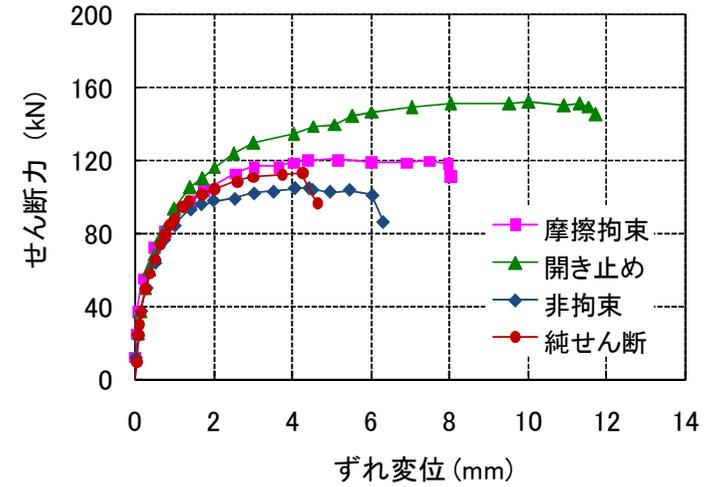
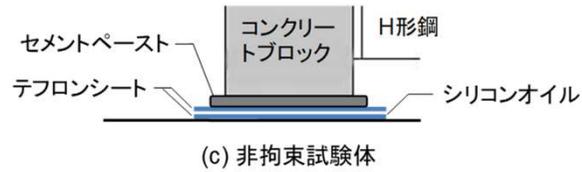
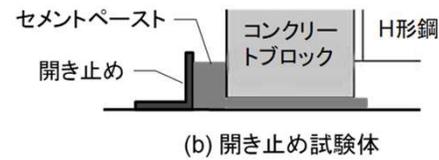
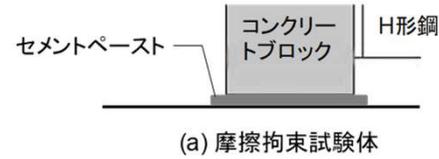
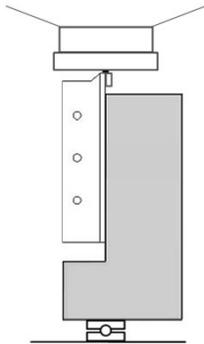
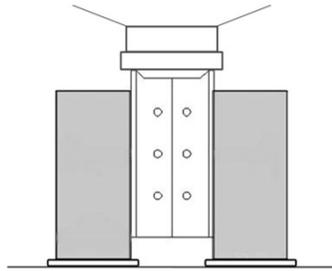
η : 破壊モードに関する係数で, 式 (解 6.2.2) の

値に対する式 (解 6.2.1) の値の比

ずれ止め実験における拘束の影響

試験方法の影響(2011年)

島 弘: 頭付きスタッドのせん断力とずれ変位およびスタッド軸方向挙動との関係に及ぼす試験方法の影響, 土木学会論文集A1, 67(2), 2011



ずれ止め実験における拘束の影響

軸方向圧縮力の影響(2014年)

平, 渡辺, 齊藤, 溝江, 島, 中島: 制御されたせん断力と軸方向圧縮力を受ける頭付きスタッドのせん断耐力とせん断力-ずれ変位関係, 土木学会論文集A1, 70(5), 2014

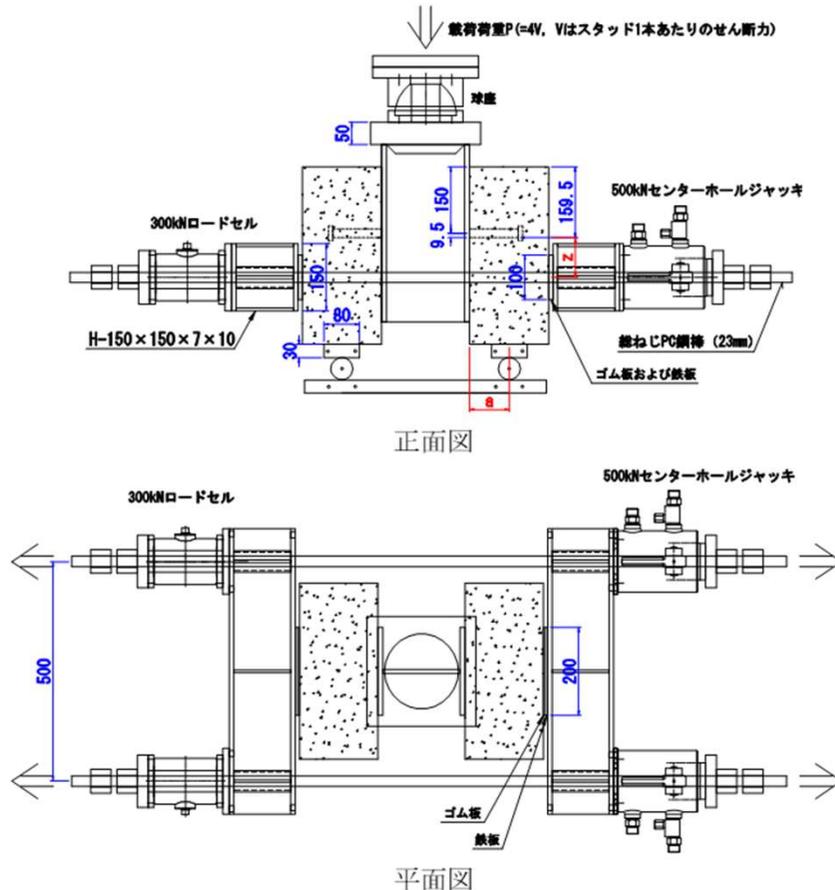
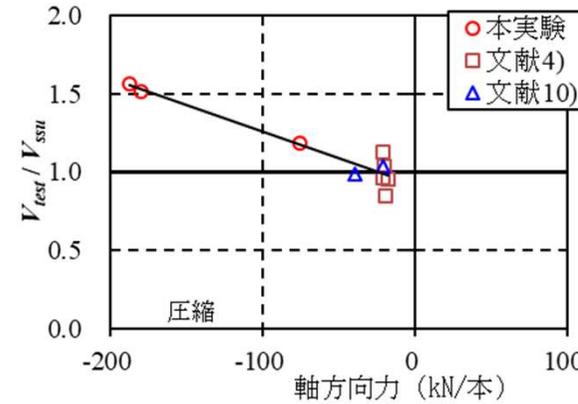


図-2 試験体設置状況



$$V_{NSSU} = (-0.0034N + 0.92)V_{SSU}$$

せん断力-ずれ変位関係に及ぼす影響は不明

事前質問1

ずれ止めの実験では、拘束の影響が大きいことは理解しましたが、標準的な実験方法はあるのかどうか、ご教示ください。また、この方面の検討課題などがあれば、ご教示ください。

回答

1996年に日本鋼構造協会が「頭付スタッドの押抜き試験方法(案)」を提示しています。

検討課題のひとつは、拘束力の測定と制御だと思います。

頭付スタッドの押抜き試験方法(案), JSSC テクニカルレポート, No.35,
 (社)日本鋼構造協会, pp.1-24, 1996.11

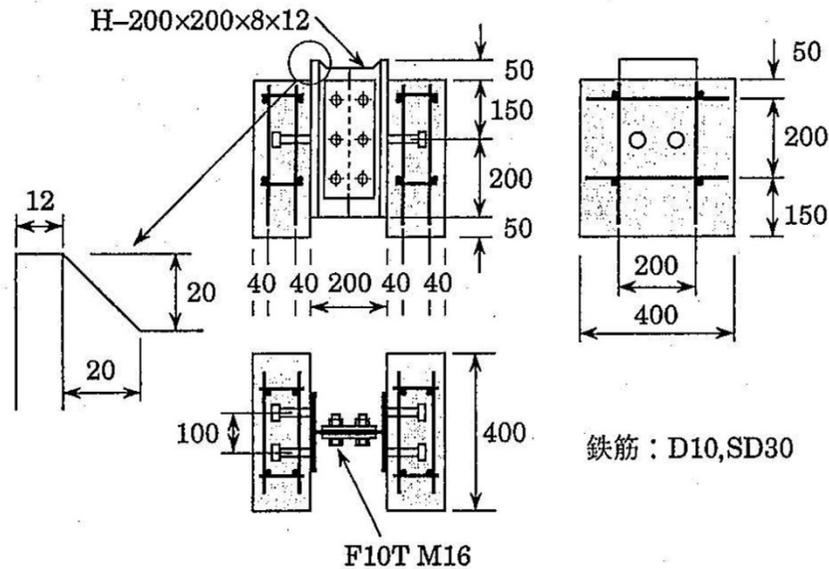


図1 押抜き試験体

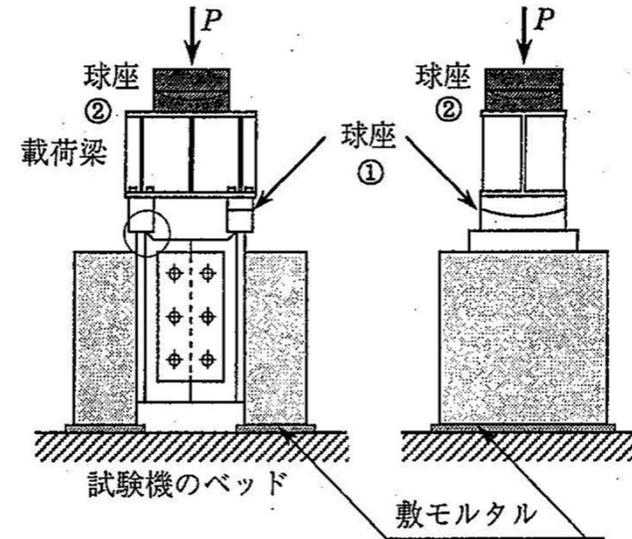


図2 押抜き試験体の据付けと载荷装置

4. 押抜き試験方法

4.1 試験体の据付けと試験装置

- (1) 試験体を試験機にセットする際には、**コンクリートブロックの下にモルタルあるいは石膏を敷き**, 左右への傾きを無くし, かつ, **コンクリートブロックの全底面を試験機のテーブルに密着させなければならぬ**.
- (2)
- (3) **開止めは原則として使用しなくてよい**.

事前質問2

押し抜き試験の拘束の影響を考えた場合、試験体の支持条件はどのようにするのが理想的と考えられますか？

回答

理論的には、ローラー(ピン)による単純支持として開き止めで拘束力を制御するのが良いと思います。ただし、実際には色々と難しいことがあるようです。

ずれ止め実験における拘束の影響

高橋, 齊藤, 中島, 島: 単純支持と開き止めを併用した押抜き試験における頭付きスタッドの耐荷挙動, 土木学会論文集A1, 71(1), 2015

開き止めで軸方向力を制御する試験方法(2015年)

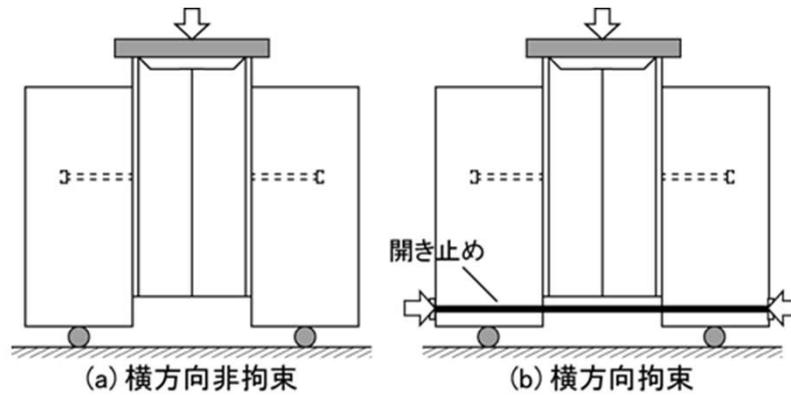
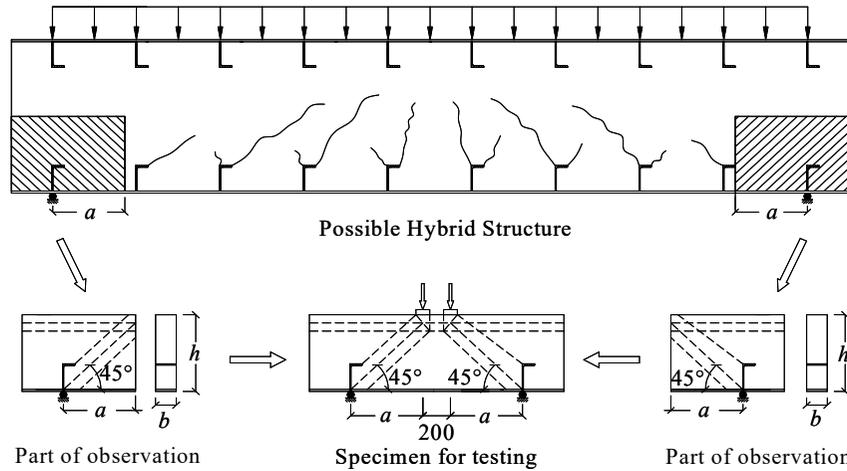


図-3 単純支持を用いた押抜き試験方法⁶⁾

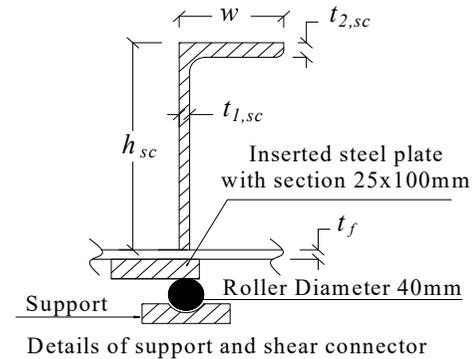
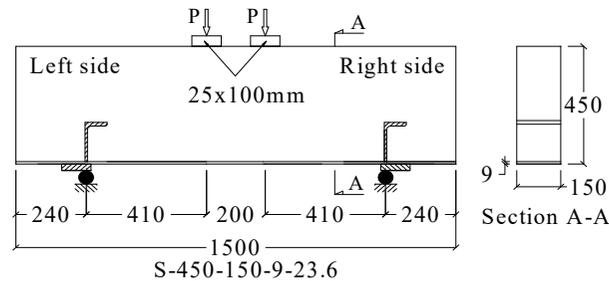
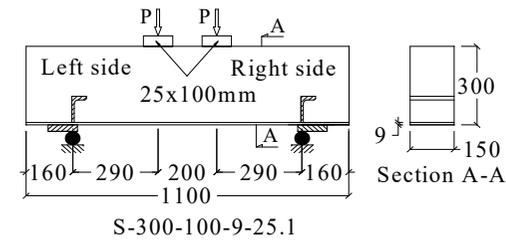
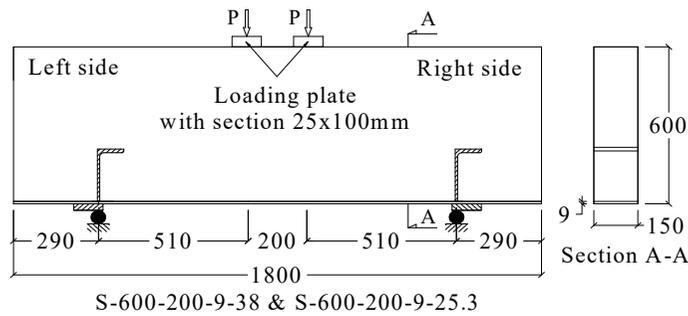
形鋼シアコネクタのせん断カーズれ変位関係

シアコネクタの実際に近い実験(2010年)

Ros, 島: 鋼コンクリート合成構造におけるストラット力を受けるL形鋼シアコネクタのせん断カーズれ変位関係, 土木学会論文集A, 66(4), 2010



Sizes of shear connectors (mm)			
h_{sc}	w	$t_{1,sc}$	$t_{2,sc}$
200	90	9	14
200	90	9	14
150	75	9	14
100	50	9	14



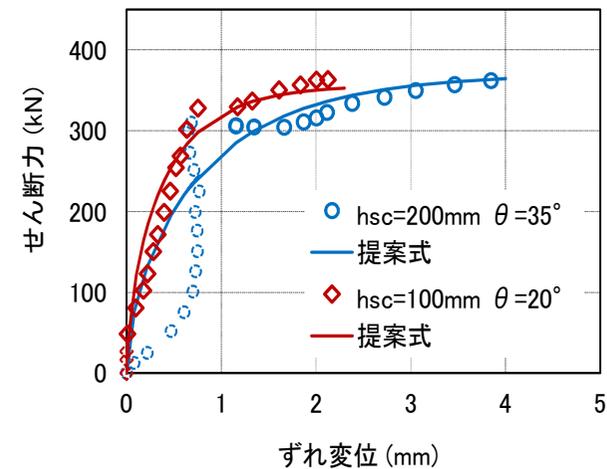
形鋼シアコネクタのせん断力-ずれ変位関係

定式化(2014年)

島, 古内, 上田, 齊藤: せん断力と垂直圧縮力が同時に作用する時の山形鋼を用いた形鋼シアコネクタのせん断耐力式およびせん断力-ずれ変位曲線式, 土木学会論文集A1, 70(3), 2014

$$V_u = 1.45 \left(\frac{f'_c}{30} \right)^{1/2} \left(\frac{t_{sc}}{5} \right)^{1/3} \left(\frac{h_{sc}}{100} \right)^{1/4} \left(\frac{t_f}{10} \right)^{1/5} b_{sc} \cos \theta$$

$$V = V_u \left(1 - e^{-180 \delta / h_{sc}} \right)^{0.6}$$



試験体は大きいもので!

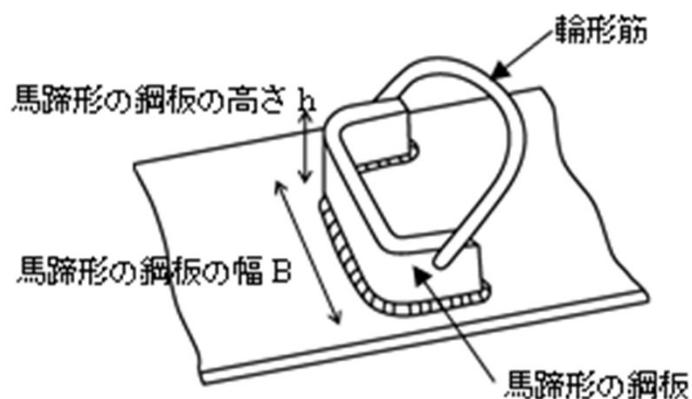
事前質問3

鉄道橋では、頭付きスタッドの他に、馬蹄形ジベルや孔あき鋼板ジベルがありますが、これら構造について、見直すべき点があれば、教えていただけませんか。

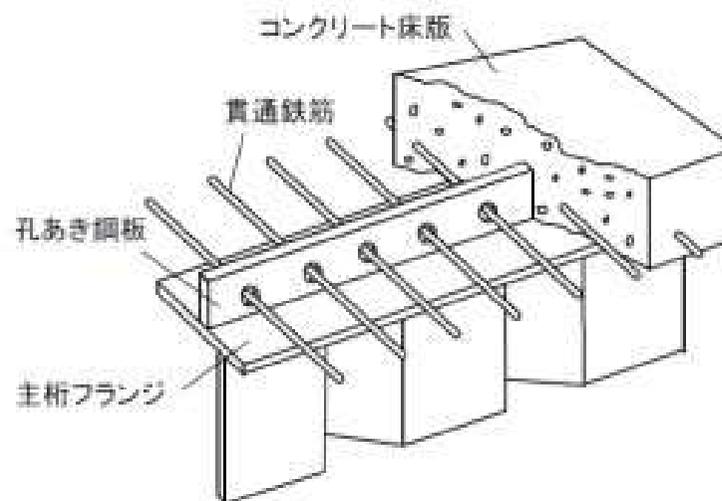
回答

ずれ止めの種類については、「頭付きスタッド」と「形鋼シアコネクタ」の他に、「ブロックジベル」や「孔あき鋼板ジベル」などがあり、複合示方書ではこれらの4種類を記載してます。

ただし、私は「馬蹄形ジベル」や「孔あき鋼板ジベル」については研究したことがないので、見直すべき点等については考えが及びません。



示方書 解説 図5.4.1 ブロックジベルの構造の概要



孔あき鋼板ジベル（北大古内研HP）

事前質問4

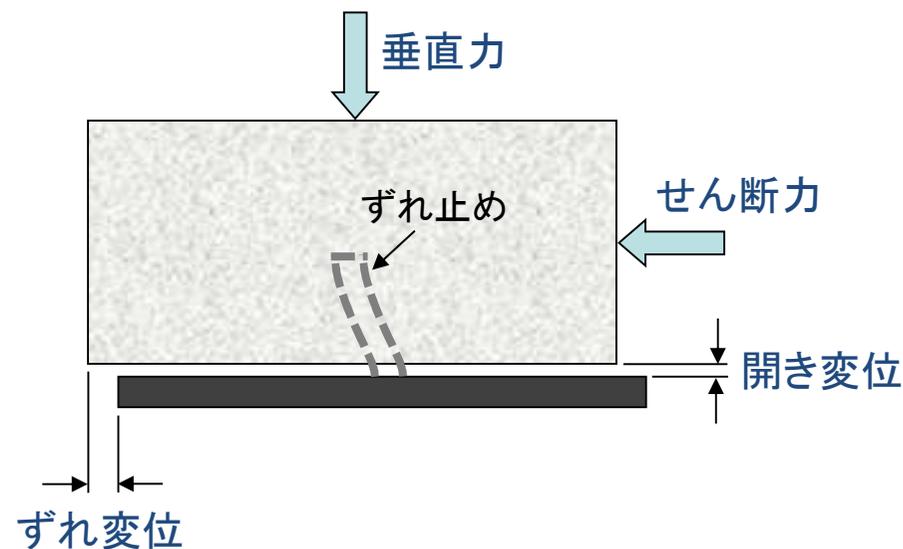
ずれ止め実験は、ずれ止めの種類によって破壊形態が異なりますが、統一的な試験方法をご提案されるとすれば、どのようなことが課題になるとお考えでしょうか。

回答

せん断力－ずれ変位－垂直力－開き変位 の4パラメータの関係が測れるのが良いと思いますが、うまくいく方法はあるでしょうか。

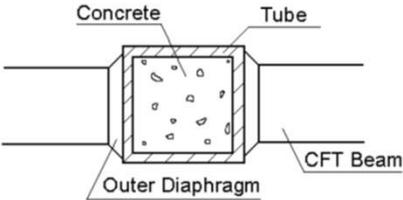
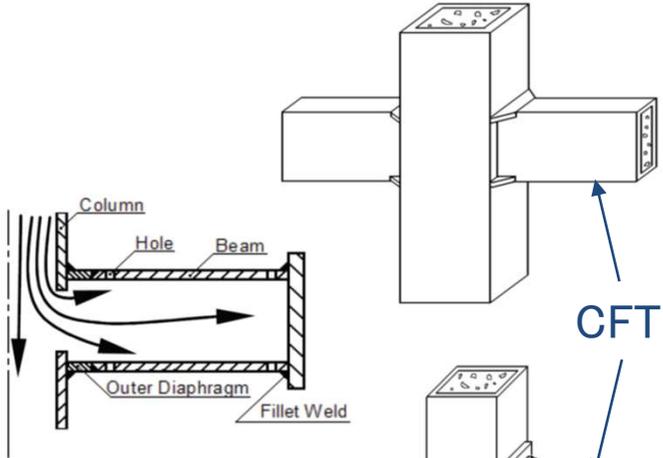
なお、せん断力と垂直力の比がコンクリートの斜め圧縮力の角度になります。

$$\begin{Bmatrix} \text{せん断力} \\ \text{垂直力} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{ずれ変位} \\ \text{開き変位} \end{Bmatrix}$$



New CFT Structure using SCC (2003~2005高知工科大学)

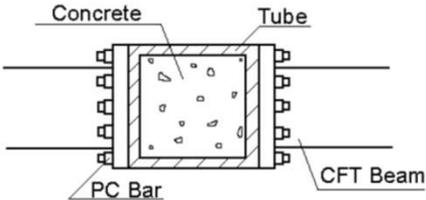
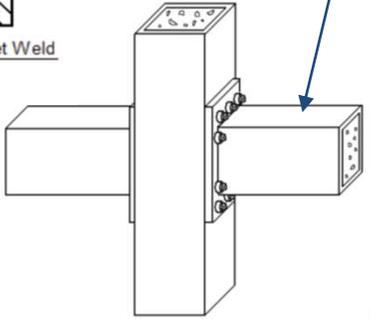
Y.Wang, etc: Seismic Behavior of New CFT Structure using Self-Compacting Concrete, International Conference on Structural and Road Transportation Engineering, 2005



(a) CDF



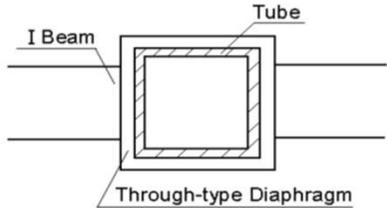
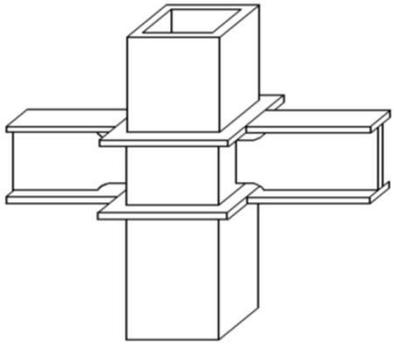
Weld fracture in specimen CDF



(b) CPP, CPP₁



Weld fracture in specimen CPP



(c) SDP₁

話は変わって 鋼とコンクリートの組合せについて

1. 温度応力

物体: 熱を受けると体積が膨張する性質がある

膨張ひずみ → 線膨張係数 × 温度差

鋼とコンクリートは線膨張係数がほぼ同じ値 (約 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)



構造物の温度が昇降する時の両者の熱による応力の差を考える必要がない。

2. 鋼材の保護

鋼材をコンクリート中に配置した場合 → 鋼材とコンクリートが助け合うことが多い

- 鋼材は座屈しやすいが、コンクリート中に埋めることで座屈しにくくなる。
- 熱によって著しく強度が低下してしまう鋼を火から守る。
- コンクリートはアルカリ性であるために、鋼材が錆びるのを防ぐ。

3. 注意点

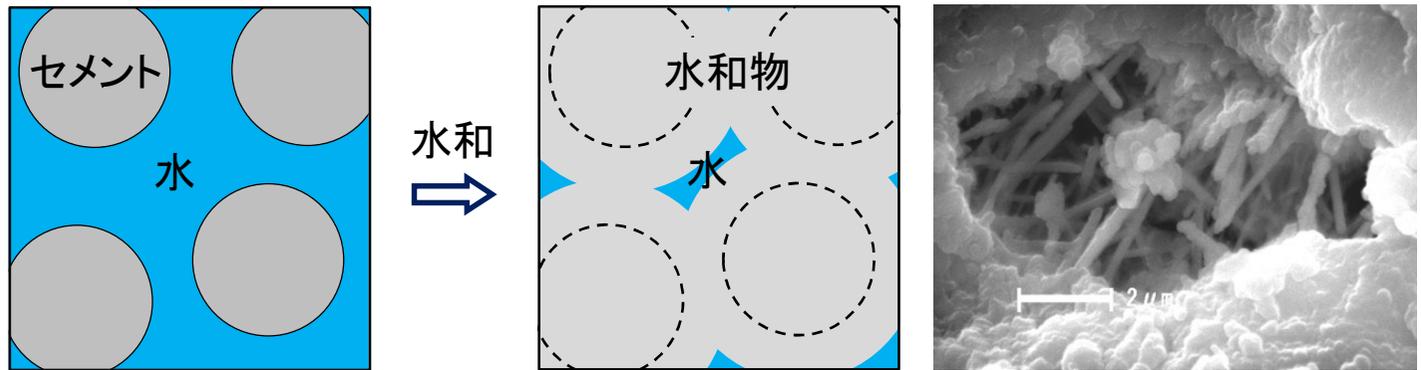
ただし、コンクリートには

- ・ 乾燥収縮
- ・ クリープ

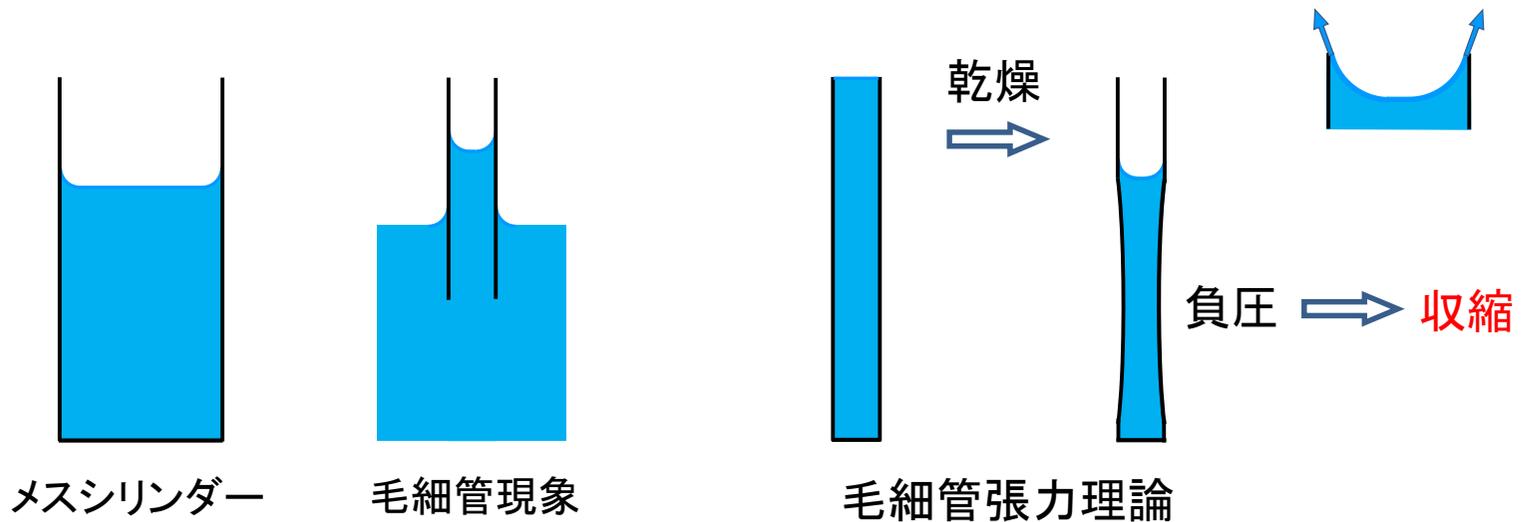
といった鋼にはない特性があり、時間の経過とともに鋼材とコンクリートに余分な応力が生じるようになる。

コンクリートの乾燥収縮の原因

セメント硬化体中の細孔に存在していた水分(空隙水)が乾燥で減る



毛細管空隙



コンクリートの乾燥収縮の原因

セメントの化学反応式



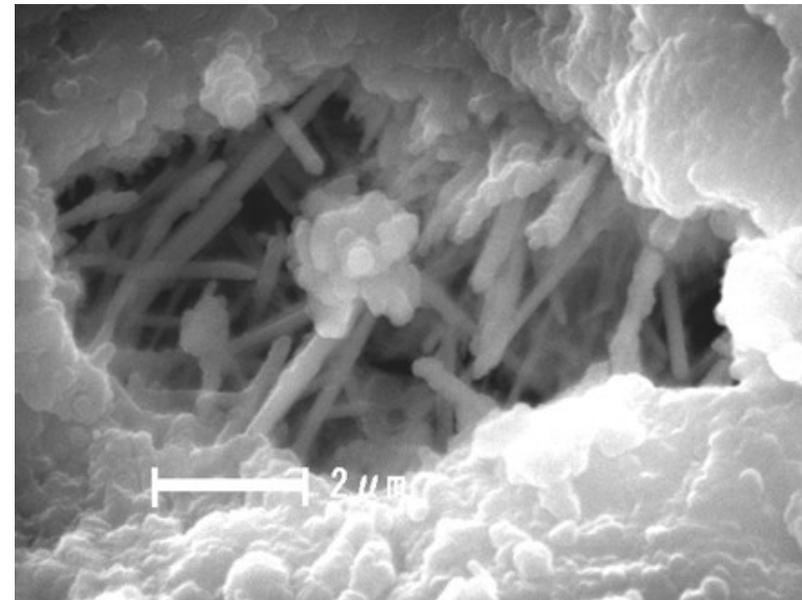
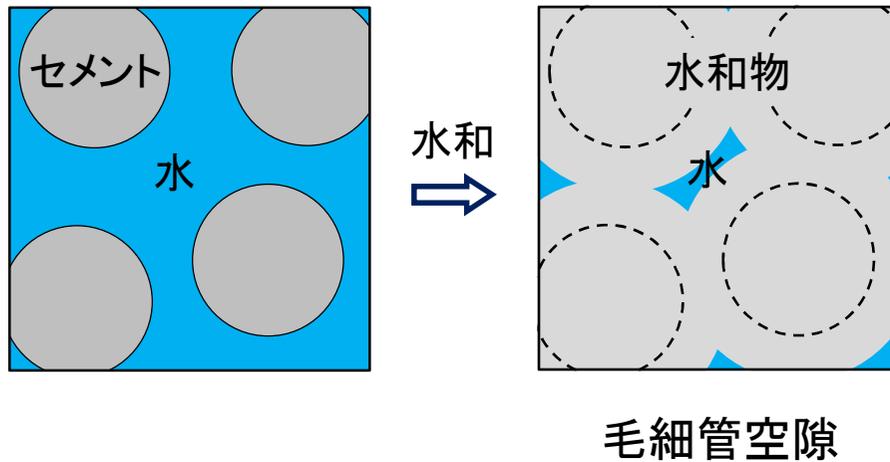
水セメント比

24%

21%

28%

26%



乾燥収縮予測式の現状

コンクリートの乾燥収縮ひずみに骨材特性が影響を及ぼす

1900年代初頭から言われている

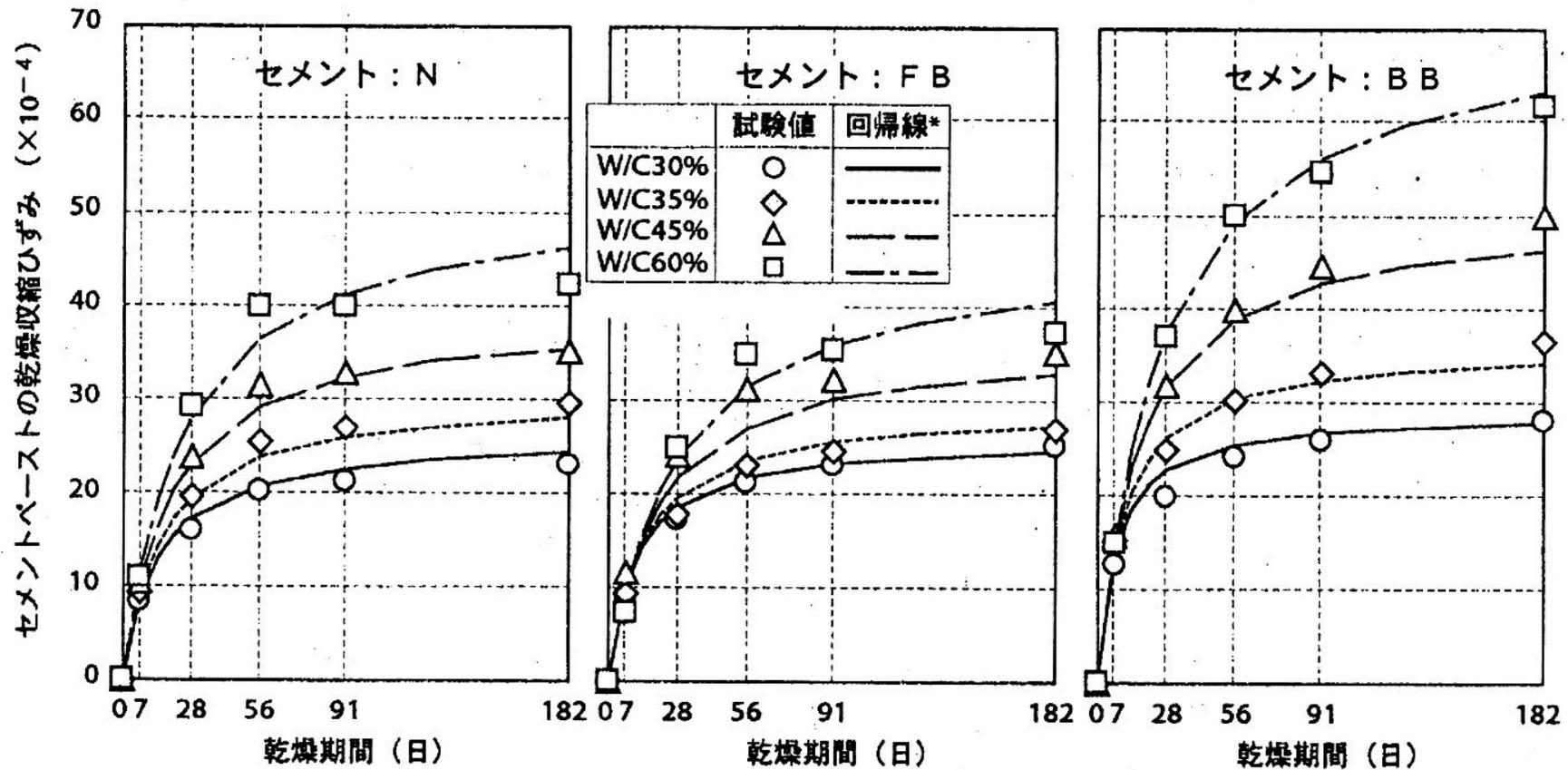
土木学会 コンクリート標準示方書[設計編]

建築学会 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)

骨材特性の影響は取り入られていない

建築学会指針(案)の付録に複合則(粗骨材
と細骨材の特性が考慮できる)

セメントペーストの乾燥収縮ひずみ(江口ら, 2002)



コンクリート収縮に対する骨材の影響

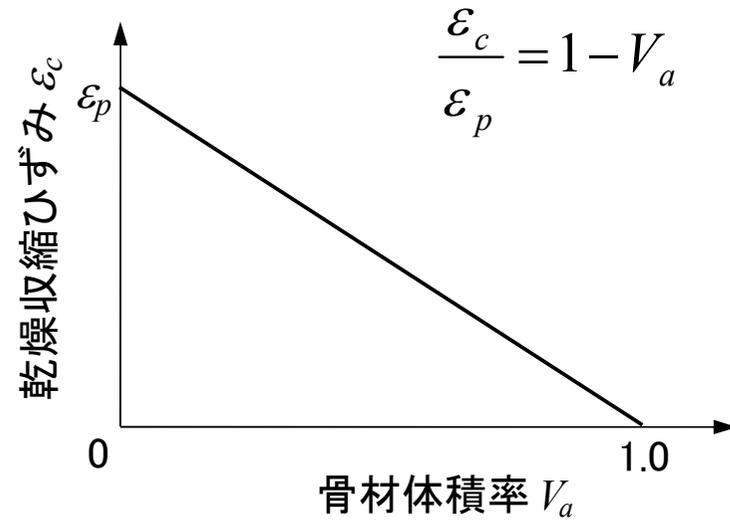
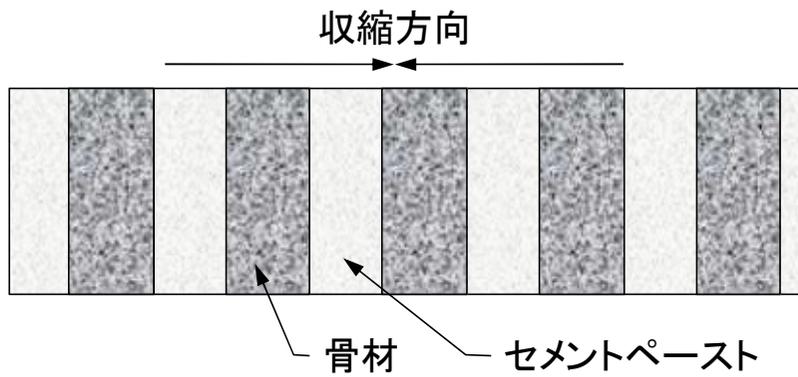
(1) 骨材効果の種類

コンクリート：骨材とセメントペースト硬化体

- コンクリートの乾燥収縮：セメントペーストの収縮特性＋骨材の影響が大
 - 骨材の存在：乾燥速度を遅らせたりするが、この影響は二次的
 - 骨材の効果：セメントペースト硬化体の乾燥収縮を抑制する
 - ① セメントペースト硬化体の乾燥収縮ひずみを「うすめる」こと
 - ② セメントペースト硬化体の収縮に対して骨材が圧縮応力を負担して収縮に抵抗すること

コンクリート収縮に対する骨材の影響

(2) 単位骨材容積の影響



直列複合則

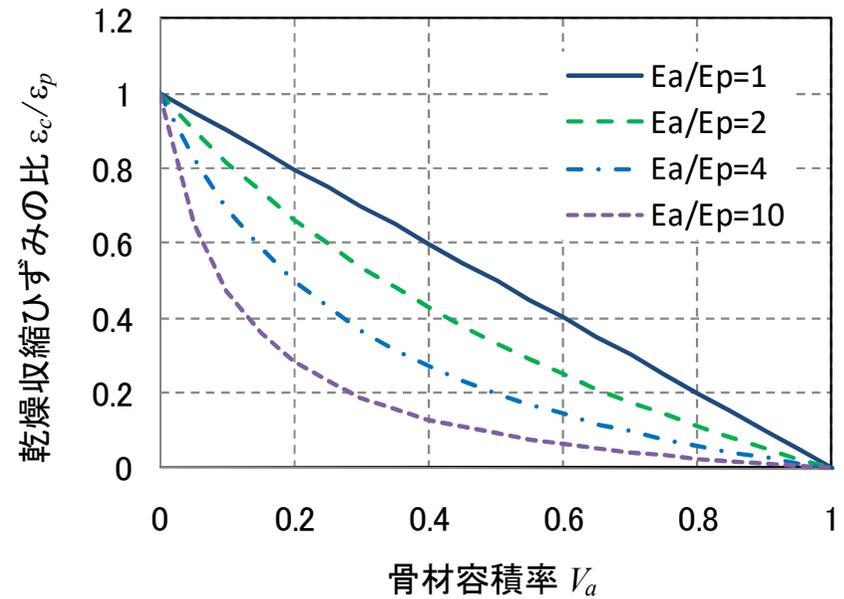
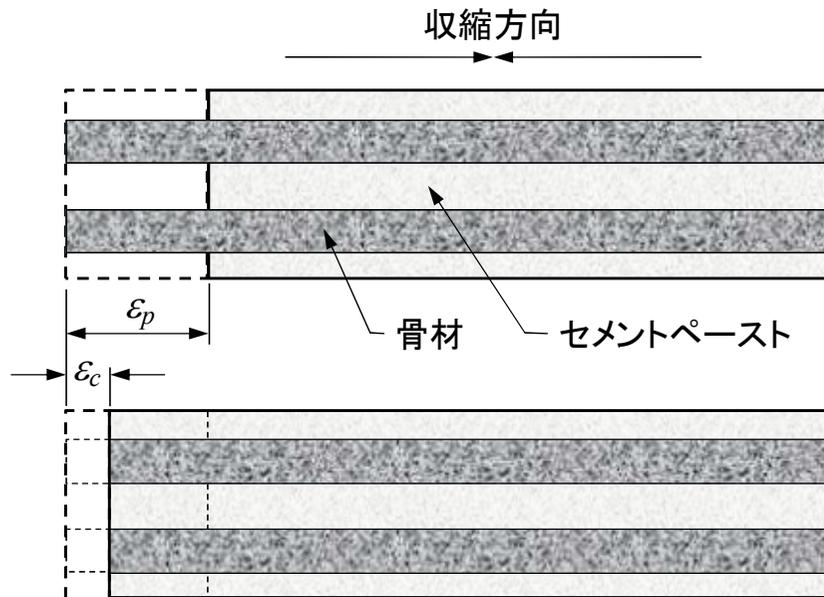
コンクリート収縮に対する骨材の影響

(3) 骨材特性の影響

a) ヤング係数

$$E_a \varepsilon_c V_a = E_p (\varepsilon_p - \varepsilon_c)(1 - V_a)$$

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{1 - V_a}{1 + (E_a / E_p - 1)V_a}$$

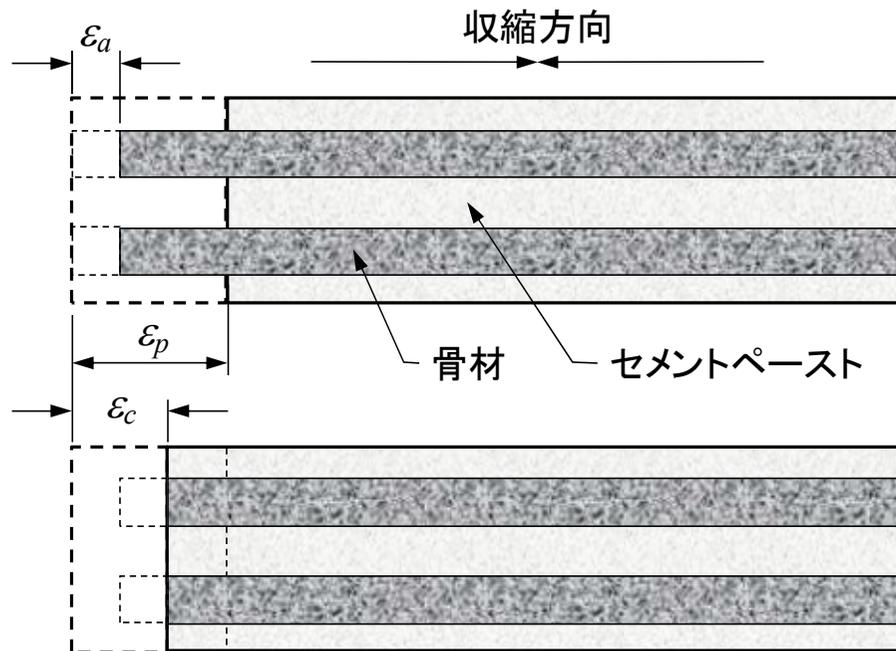


並列複合則

コンクリート収縮に対する骨材の影響

(3) 骨材特性の影響

b) 乾燥収縮



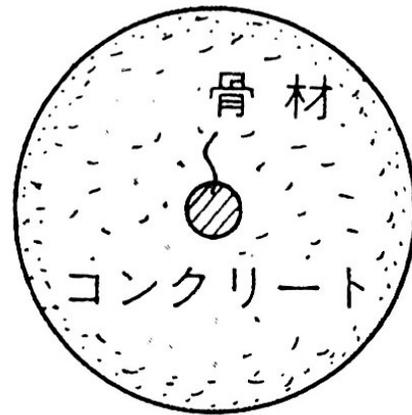
$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{1 + \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_p} \frac{E_a}{E_p} - 1 \right) V_a}{1 + \left(\frac{E_a}{E_p} - 1 \right) V_a}$$

$$E_a (\varepsilon_c - \varepsilon_a) V_a = E_p (\varepsilon_p - \varepsilon_c) (1 - V_a)$$

骨材の収縮を考えた並列複合則(大野・1953)

球殻モデル

(1) ひずみ拘束モデル



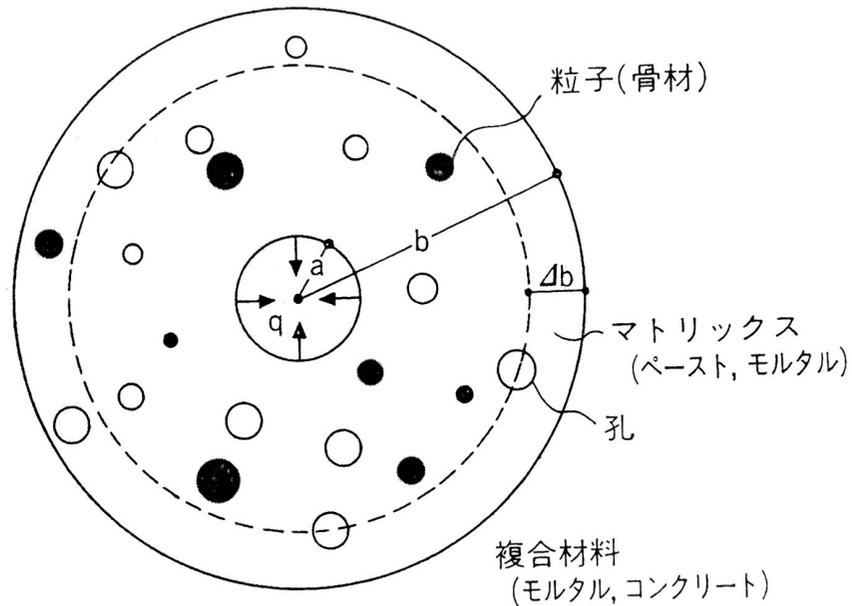
$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = (1 - V_a)^\alpha + \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_p}$$

$$\alpha = \frac{3(1 - \mu_c)}{1 + \mu_c + 2(1 - 2\mu_a)E_c / E_a}$$

ひずみ拘束モデル(Pickett・1956)

球殻モデル

(2) 毛細管張力モデル



$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_p} \frac{E_a}{E_p}\right) V_a}{E_c / E_p}$$

$$\frac{E_c}{E_p} = \frac{\frac{E_a}{E_p} + 1 + \left(\frac{E_a}{E_p} - 1\right) V_a}{\frac{E_a}{E_p} + 1 - \left(\frac{E_a}{E_p} - 1\right) V_a}$$

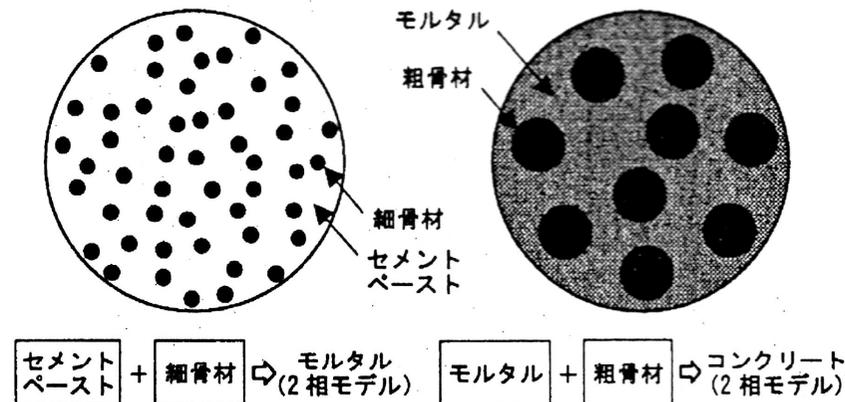
$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{\{1 - (1 - m \cdot n) V_a\} \{n + 1 - (n - 1) V_a\}}{n + 1 + (n - 1) V_a}$$

毛細管張力モデル(岸谷・馬場 1975)

$$\Delta\varepsilon = \Delta b / b = \frac{3(1-\mu)}{2E} \frac{\Delta V_p}{1-\Delta V_p} q \quad \Delta V_p = a^3 / b^3 < 1 \quad \Delta\varepsilon = \frac{3(1-\mu)}{2E} \Delta V_p \cdot q$$

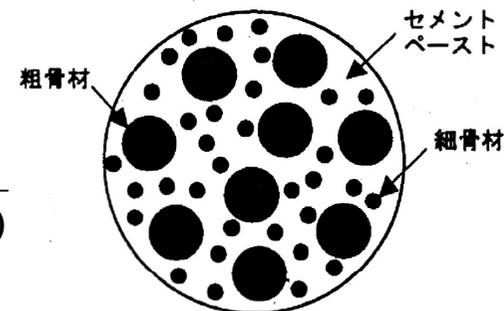
三相複合モデル(セメントペースト+細骨材+粗骨材)

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_p} \frac{E_s}{E_p}\right) V_s - \left(1 - \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_p} \frac{E_g}{E_p}\right) V_g}{E_c / E_p}$$



(a) 2相モデル式

$$\frac{E_c}{E_p} = 1 + \frac{2(n_s - 1)V_s}{n_s + 1 - (n_s - 1)(V_s + V_g)} + \frac{2(n_g - 1)V_g}{n_g + 1 - (n_g - 1)(V_s + V_g)}$$



(b) 3相モデル式

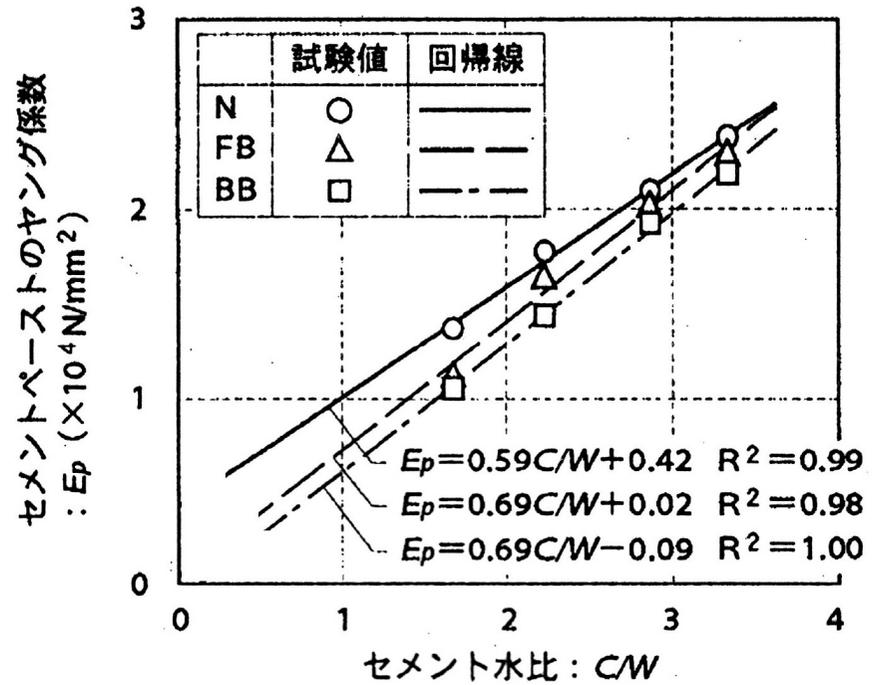
三相複合モデル(寺西・佐藤 2006)

セメントペースト

(1) ヤング係数(江口ら, 2002)

$$E_p = \frac{100}{W/C} \gamma + \eta$$

セメントの種類	γ	η
N	5.9	4.2
FB	6.9	0.2
BB	6.9	-0.9



事前質問5

コンクリートの乾燥収縮におけるセメントペーストと骨材の相互作用について、既往の複合モデルを挙げられています。これらでは、いずれも骨材、セメントペーストを弾性体とすることを基本としていると思います。しかし、セメントペーストを弾性体とした場合、並列状態では乾燥収縮が拘束された結果骨材近傍のセメントペーストに大きな引張応力が発生することになります。実際には、セメントペーストの微視的破壊か塑性変形によりそのような引張応力は発生しないので、それをセメントペーストの応力-ひずみ関係に反映する必要があると思います。これについてお考えをお聞かせください。

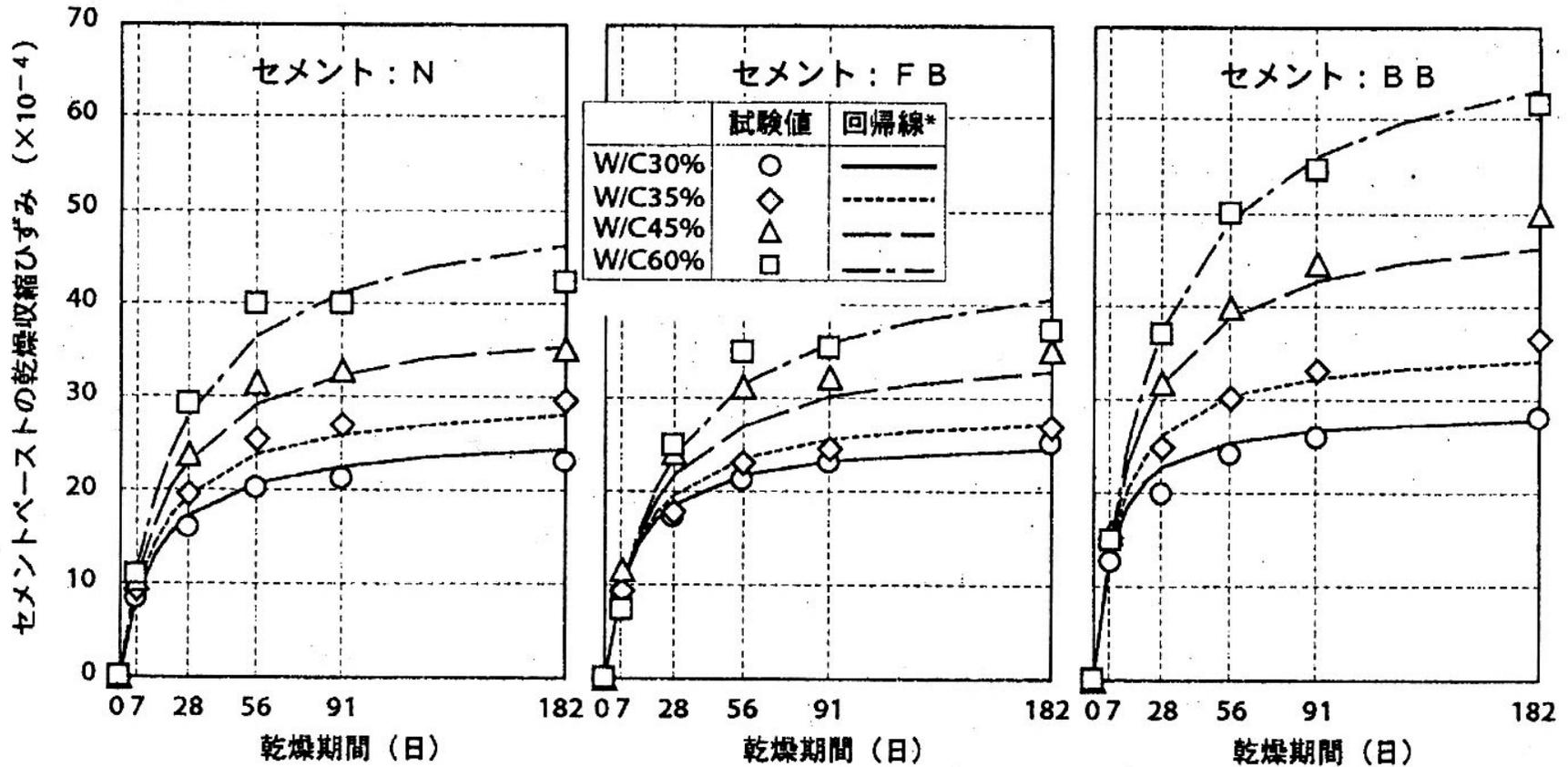
回答

その通りです。並列モデルでの仮定は、骨材とセメントペーストは弾性体で、それらの界面は剛結しています。

球殻モデルにおいても、セメントペーストの非線形性、特に引張クリープの影響がどれくらい有るのかを検討する必要があると思います。

セメントペースト

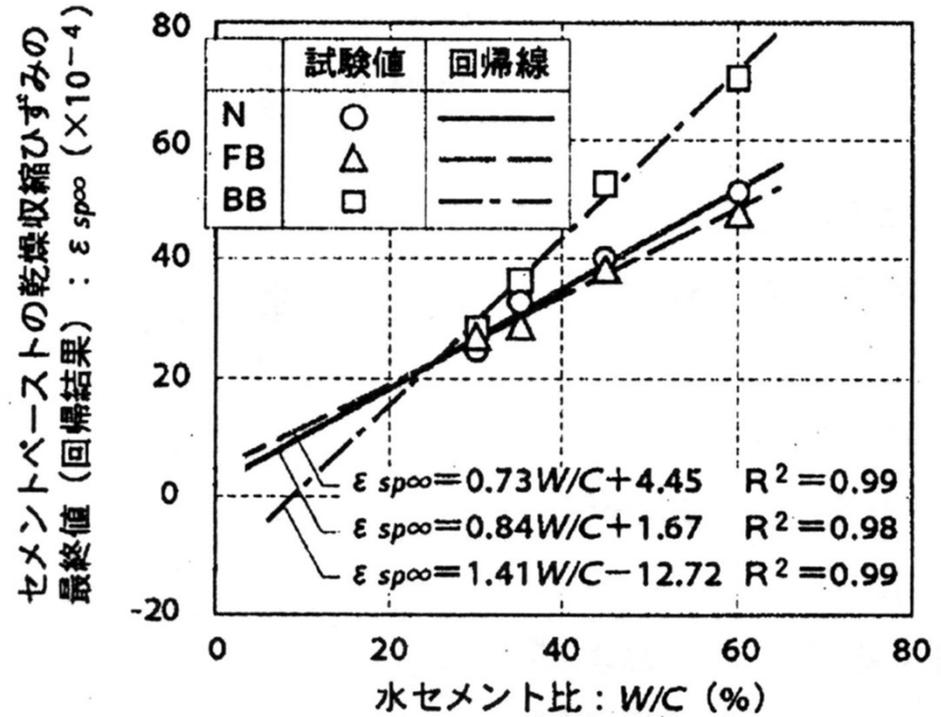
(2) 乾燥収縮ひずみ (江口ら, 2002)



セメントペースト

(2) 乾燥収縮ひずみ (江口ら, 2002)

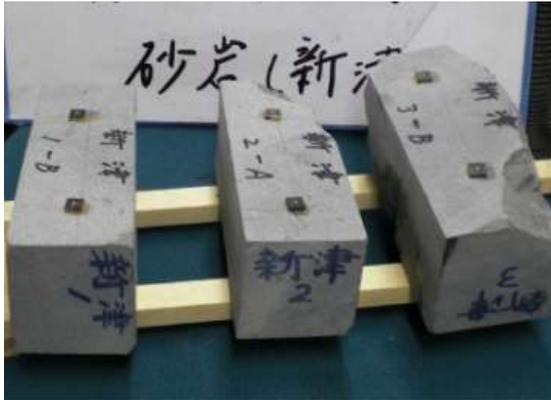
$$\varepsilon_{p\infty} = \lambda W/C + \delta$$



セメントの種類	λ	δ
N	86.3	54
FB	67.8	581
BB	143.7	-1408

骨材のヤング係数

実験



複合則

$$E_s = - \frac{\frac{E_m}{E_p} - 1 + \left(\frac{E_m}{E_p} + 1 \right) V_s}{\frac{E_m}{E_p} - 1 - \left(\frac{E_m}{E_p} + 1 \right) V_s} E_p$$

$$E_g = - \frac{\frac{E_c}{E_m} - 1 + \left(\frac{E_c}{E_m} + 1 \right) V_g}{\frac{E_c}{E_m} - 1 - \left(\frac{E_c}{E_m} + 1 \right) V_g} E_m$$

骨材のヤング係数

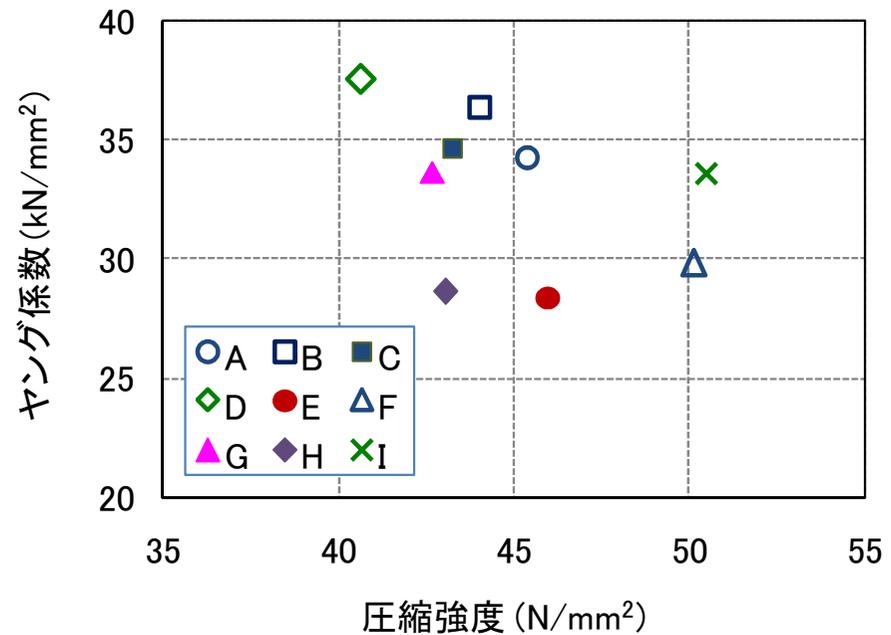
複合則

$$E_g = -\frac{\frac{E_c}{E_m} - 1 + \left(\frac{E_c}{E_m} + 1\right) V_g}{\frac{E_c}{E_m} - 1 - \left(\frac{E_c}{E_m} + 1\right) V_g} E_m$$

- ・モルタルのヤング係数(実験結果)

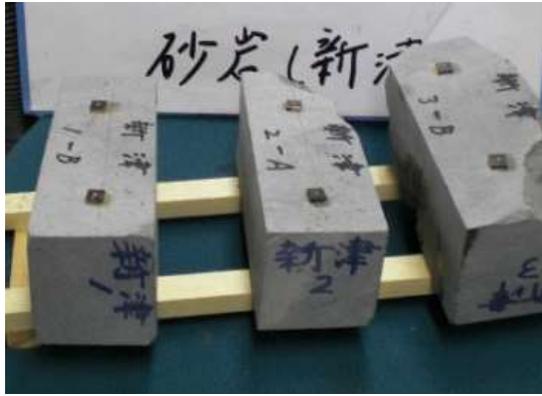
$$E_m = 34.2 \text{ kN/mm}^2$$

- ・コンクリートのヤング係数

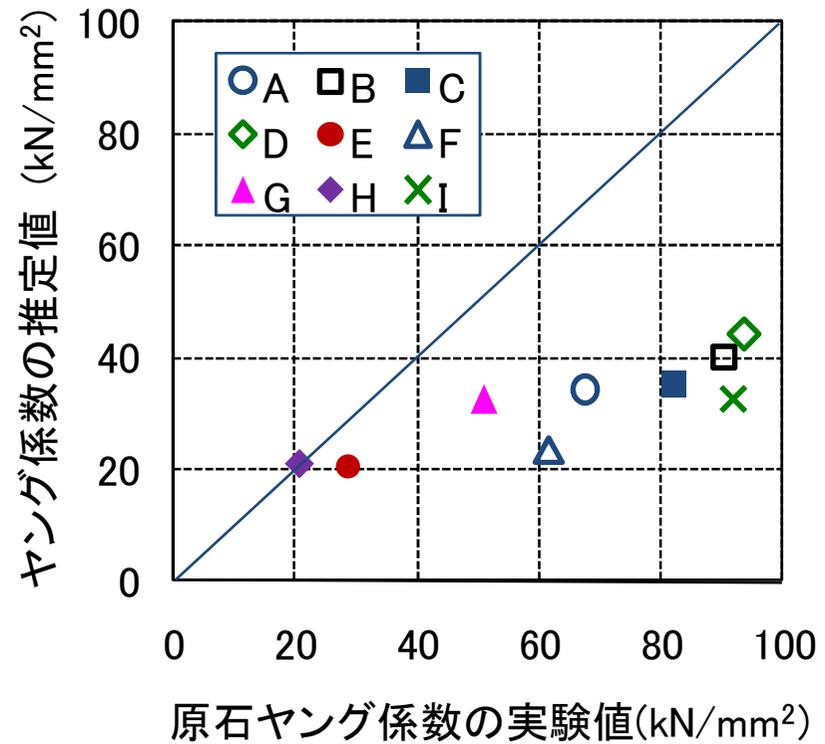


骨材のヤング係数

原石と砕石(複合則)



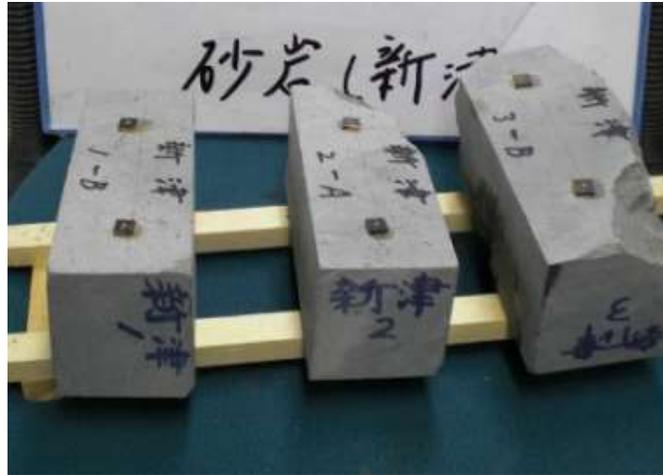
複合則



セメントペーストの引張クリープを考慮(ヤング係数を小さく)すれば推定値は実験値に近くなる?

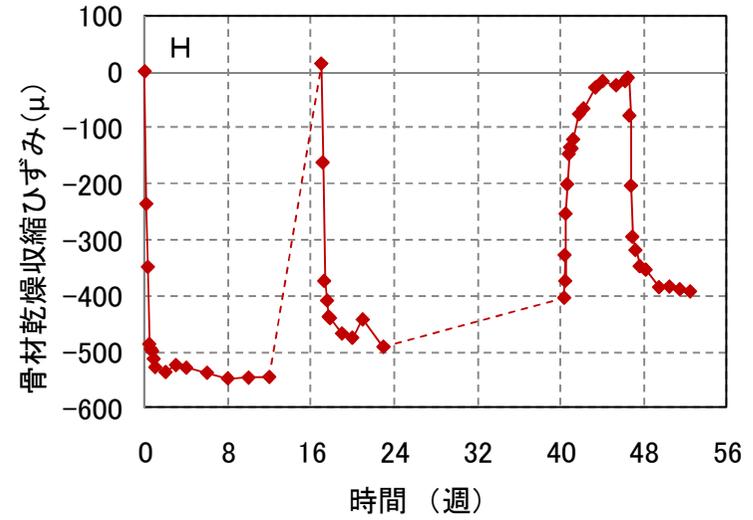
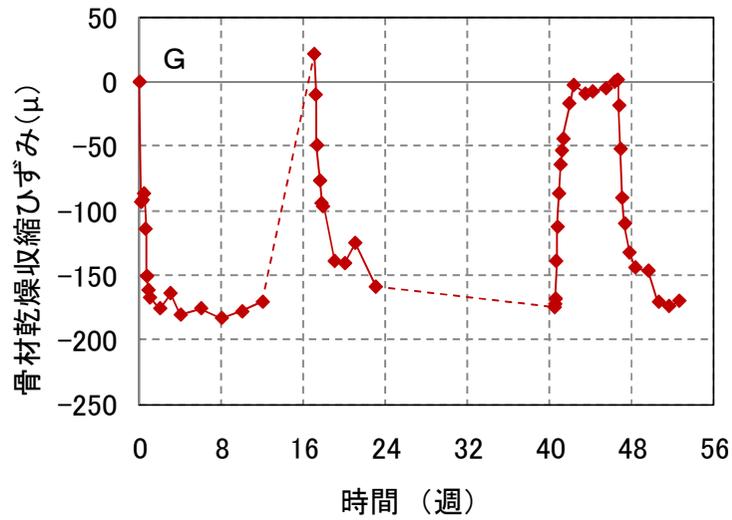
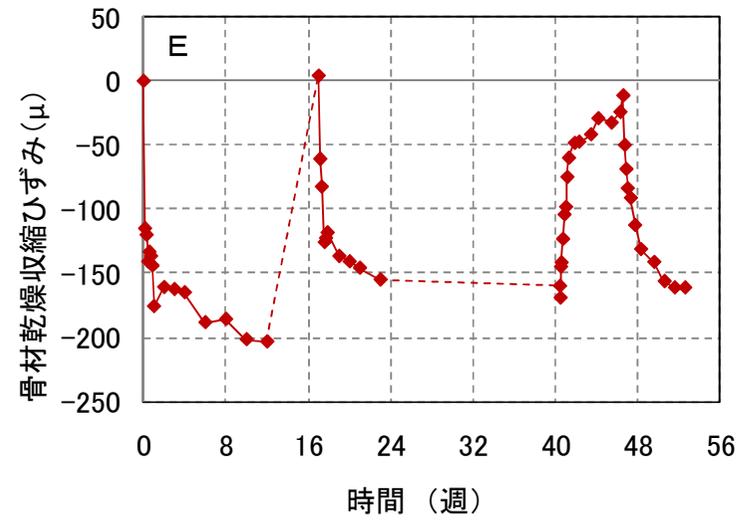
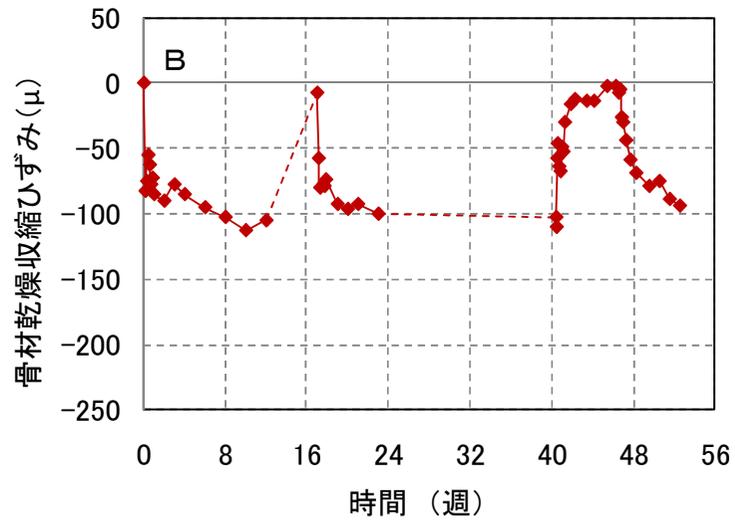
骨材の乾燥収縮ひずみ

(1) 粗骨材原石の水中浸漬・乾燥実験

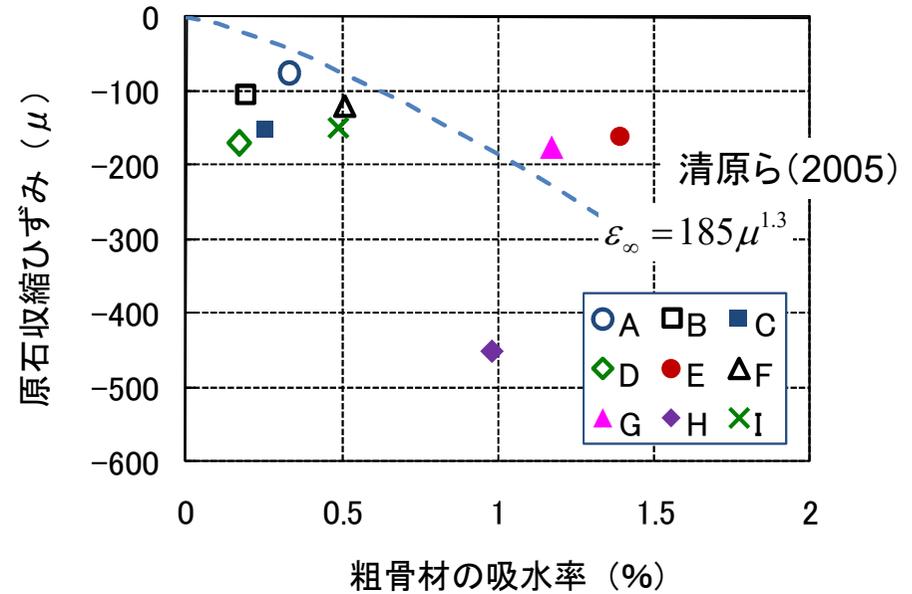


(1) 粗骨材原石の水中浸漬・乾燥実験

・ 結果

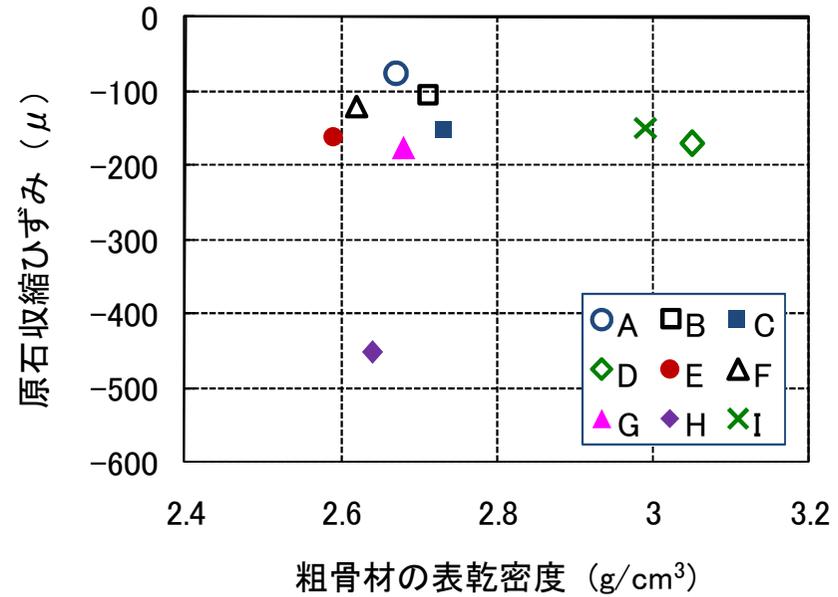


骨材の乾燥収縮ひずみ

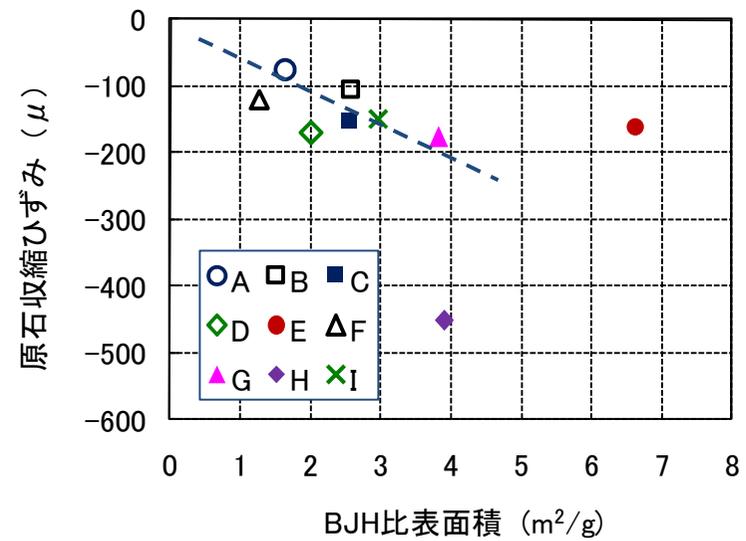
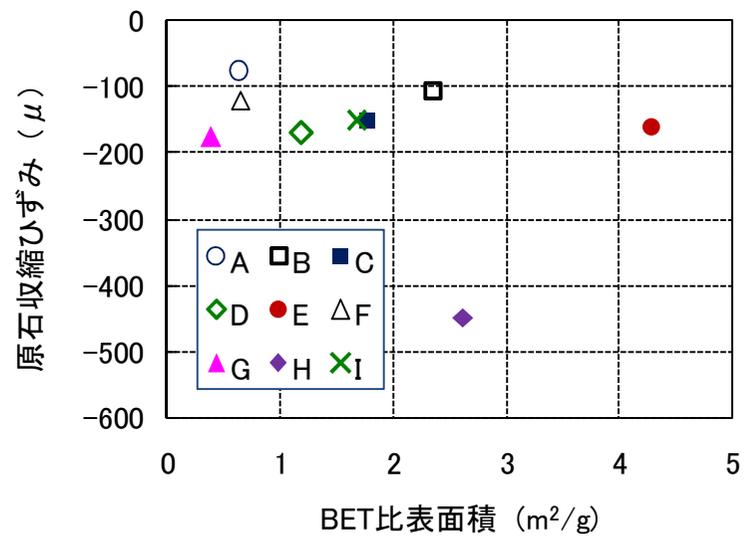


何と関係がある

- 吸水率？
- 密度？
- 内部空隙比表面積(BET値)？



(3) 粗骨材の内部空隙比表面積(窒素ガス吸着試験)



予測モデルの検証結果

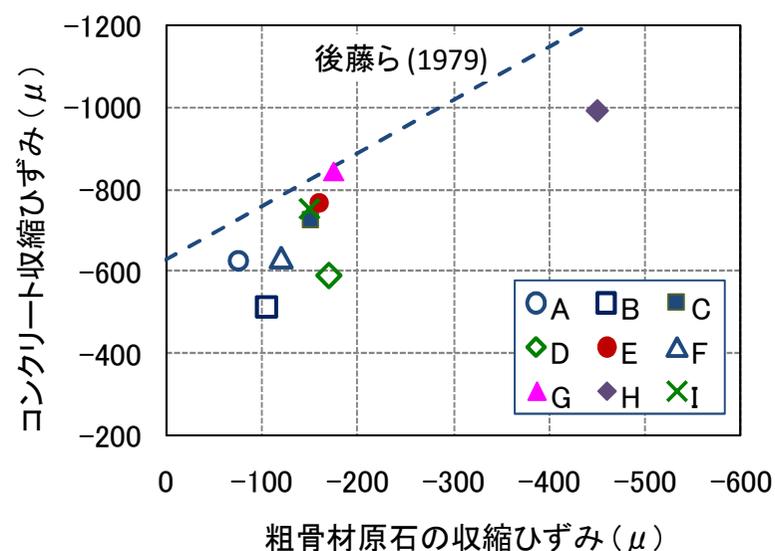
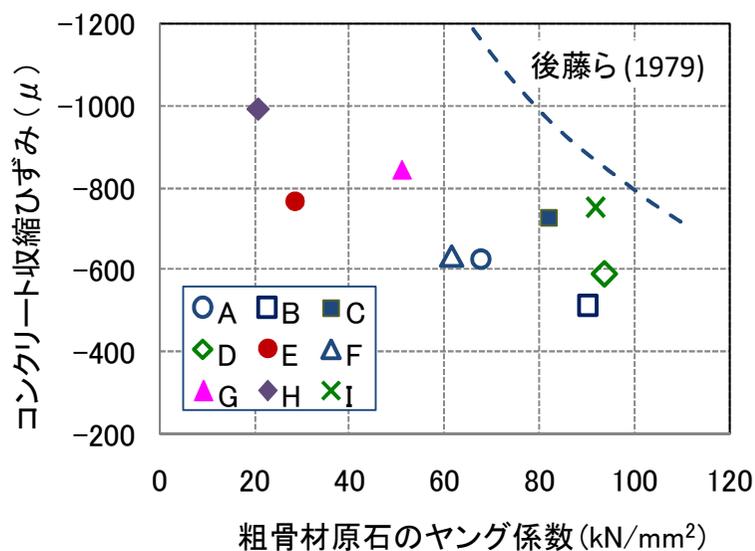
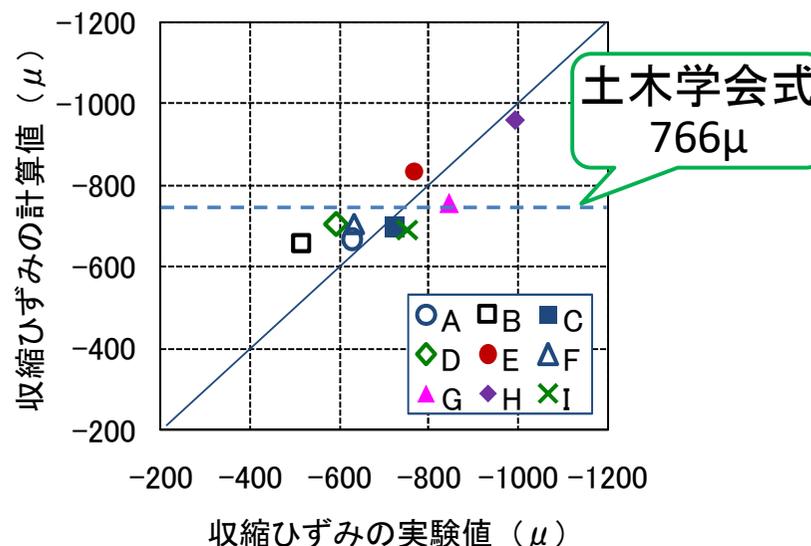
入力値:

配合要因として,

- ・セメントの種類
- ・水セメント比
- ・細骨材および粗骨材の単位容積比

骨材の特性として,

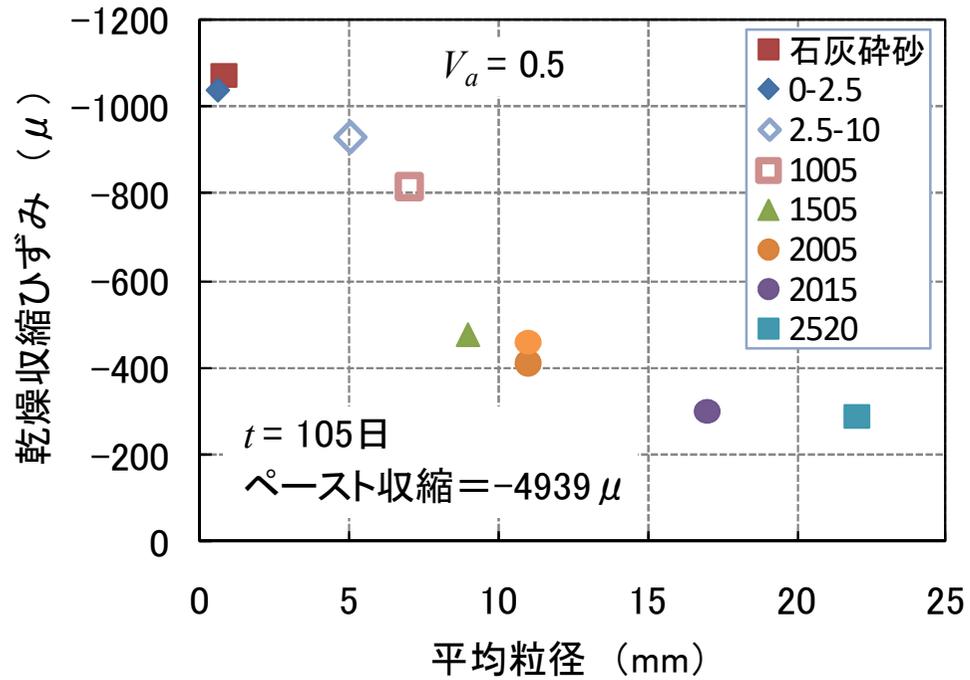
- ・細骨材および粗骨材のヤング係数
- ・細骨材および粗骨材の乾燥収縮ひずみ



複合則の問題点

骨材粒径の影響

二相材料(セメントペースト+骨材)の乾燥収縮試験



- ・ コンクリートのヤング係数 ← 骨材のヤング係数を取り入れること
- ・ コンクリートの乾燥収縮 ← 骨材のヤング係数と乾燥収縮を取り入れること

事前質問6

複合構造のずれ止めとコンクリートの乾燥収縮の二つの話題をお話しただけでしたが、これらが相互に関係する問題についてコメントいただけたらと存じます。たとえば、複合構造においてコンクリートの乾燥収縮が生じた場合の問題などです。

回答

たとえば、ずれ止めの初期剛性の制御はどうでしょうか。ゴム支承は、温度による変位を吸収できるせん断剛性です。ずれ止めの初期剛性を小さくして、乾燥収縮によるひび割れを防止できないでしょうか。

ご覧いただき有難うございました。皆様の活躍をお祈りしております。