

論文 現場打設部を異種強度コンクリートで打設したハーフプレキャスト梁のせん断性能

佐藤 良介^{*1}・小澤 潤治^{*2}

要旨：本論文は、プレキャスト部が高強度コンクリートで、現場打設部が普通強度コンクリートで構成されたハーフプレキャスト梁のせん断性能確認実験について述べるものである。「断面に占める普通強度コンクリートの割合」および「貫通孔の有無」が主たる変動因子として設定された全7体の試験体の実験結果、およびその既往のせん断耐力式との対応に基づき、この種のハーフプレキャスト梁が有するせん断性能の支配因子が「断面に占める普通強度コンクリートの割合」であることが明らかにされている。

キーワード：ハーフプレキャスト梁、有孔梁、逆対称曲げ、せん断性能、コンクリート強度

1. はじめに

著者らはこれまで、現場打設部をプレキャスト部と異なる強度のコンクリートで打ち継いだハーフプレキャスト梁（以下、「強度を打ち分けたハーフ PCa 梁」と呼称する）の構造性能について、実験・解析の双方の側面から報告を重ねてきた^{たとえ1)～3)}。しかしながら、これらの既報はいずれも、この種のハーフ PCa 梁の曲げ挙動・曲げ耐力について述べるものであり、その他の構造性能については触れられていないのが現状である。

梁材の曲げ性能は、当該梁の構造設計を行う際の部材の剛性評価・断面算定に不可欠な知見であるが、梁の設計を完結させるには、さらに「構造上支障のある急激な耐力低下のおそれのある破壊」を回避しなくてはならない。すなわち、梁の靱性に直結する破壊に対し、十分な安全率を確保しながら部材のプロポーシオン・配筋を定める必要がある。また実務上の梁材には、設備配管等との関係から開孔が強いられることが少なくなく、これもまた、部材の靱性に影響することで知られている。したがって強度を打ち分けたハーフ PCa 梁の実用化に際しては、梁材として想定され得る各種の破壊に対し、「一断面が複数のコンクリート強度で構成される」ことが及ぼす影響を明らかにしておくことが不可欠となる。

以上の背景より、強度を打ち分けたハーフ PCa 梁のせん断性能に関する基礎資料の取得を目的に、「せん断破壊に類する破壊形式」が想定された全7体の試験体に対する加力実験を行った。本論文では、強度の打ち分けならびに試験部における開孔の有無が主たる変動因子として設定された矩形断面の試験体の最大耐力等について、種々のせん断耐力式との対比も併せて報告する。

2. 実験概要

2.1 加力システム

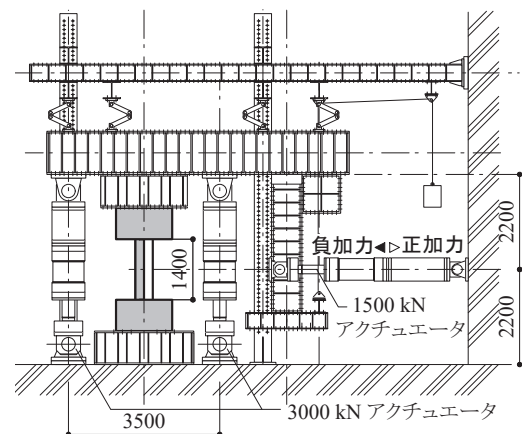
図－1に、本実験で用いた加力システムを示す。本シ

ステムは、曲げ性能を検証した既報^{たとえ1)}と同じ建研式の加力システムであり、2本の3000 kN アクチュエータで、相対するスタブ同士の平行を保ちつつ試験体に軸力が作用しないよう制御しながら1500 kN アクチュエータを伸縮させることで、試験体に逆対称曲げを伴うせん断力を作用させるものである。なお装置の構成上、実験は同図－1のように梁が直立した状態で行ったが、本論文では以後、通常の梁材同様、材軸方向の接合面を「水平接合面」、材軸直交方向の接合面を「鉛直接合面」と呼称する。

2.2 試験体

表－1に試験体一覧を、図－2に試験体の外形、図－3にその配筋図を示す。これらに見るように、全7体の試験体はいずれも矩形断面のハーフ PCa 梁であり、その材長、断面外形および主筋の配置が共通因子となっている。7体のうち4体が無孔試験体であり、残りの3体が、立面中央位置に直径125 mmの円形の貫通開孔が設けられた有孔試験体となっている。無孔試験体相互、有孔試験体相互はせん断補強筋の配置も一致させられており、有孔試験体間は更に、開孔補強金物ならびに孔際補強筋の配筋も同一となっている。

以上を前提に変動因子として設定されているのが、



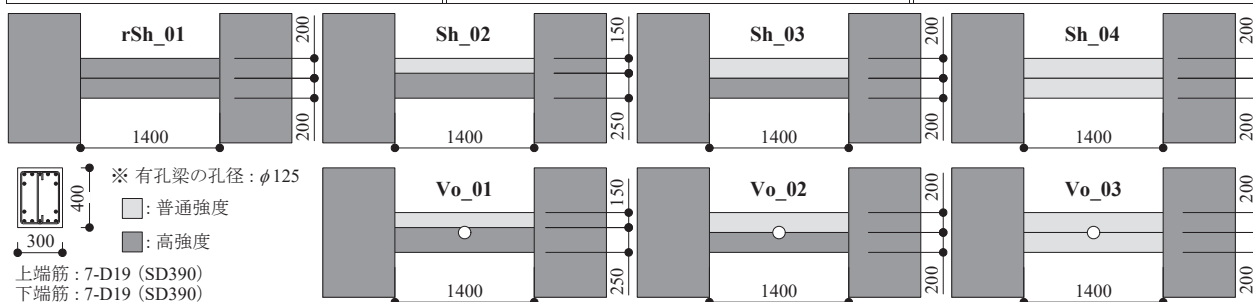
図－1 加力装置

*1 東急建設（株） 技術研究所 博士（工学）（正会員）

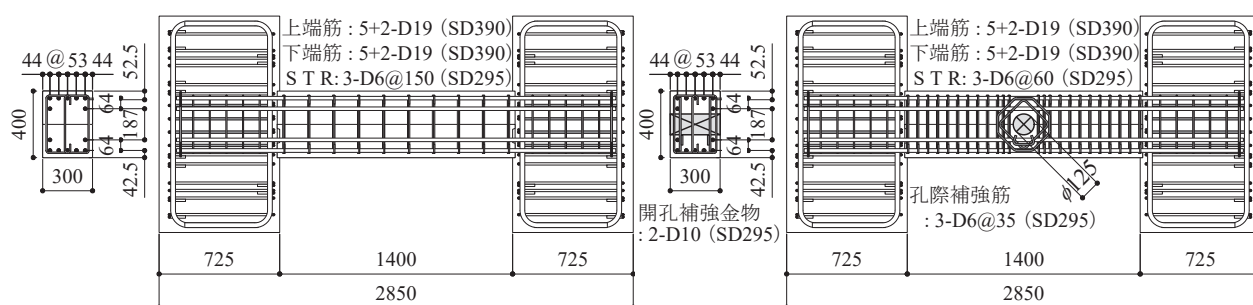
*2 東急建設（株） 技術研究所 工修

表－１ 試験体一覧

試験体		rSh_01	Sh_02	Sh_03	Sh_04	Vo_01	Vo_02	Vo_03
クリアスパン (mm)		1400						
コンクリート 圧縮強度	現場打ち部 (N/mm ²)	54.5	23.0	24.0	24.6	25.4	26.1	26.7
	PCa 部 (N/mm ²)	65.1	58.0	58.7	27.6	69.8	60.3	29.0
コンクリート ヤング係数	現場打ち部 (N/mm ²)	25500	19200	19200	19200	19200	19200	19200
	PCa 部 (N/mm ²)	27800	27200	27300	19500	27300	27300	19700
コンクリート 割裂強度	現場打ち部 (N/mm ²)	3.65	2.33	2.37	2.39	2.42	2.44	2.47
	PCa 部 (N/mm ²)	3.54	4.14	4.18	2.75	4.23	4.25	2.75
断面 (mm×mm)		300 × 400						
断面	現場打ち部高さ (mm)	200	150	200	200	150	200	200
	PCa 部高さ (mm)	200	250	200	200	250	200	200
せん断スパン比		1.75						
主筋	鋼種	SD390 (ネジシ棒鋼)						
	降伏強度 / ヤング係数 (N/mm ²)	438.9 / 191900						
	上端 (現場打ち部) 筋	5-D19 + 2-D19 (1.97 %)						
	下端 (PCa部) 筋	5-D19 + 2-D19 (1.97 %)						
せん断補強筋 (一般部)	鋼種	SD295A(溶接閉鎖形)						
	降伏強度 / ヤング係数 (N/mm ²)	421.2 / 193100						
	配置 (中子筋あり)	3-D6@150 (0.21 %)				3-D6@60 (0.53 %)		
開孔	鋼種					φ125 (材軸中央位置)		
せん断補強筋 (開孔部際)	鋼種					SD295A(溶接閉鎖形)		
	降伏強度 / ヤング係数 (N/mm ²)					421.2 / 193100		
	配置 (中子筋あり)					3-D6@35 (0.91 %)		
開孔補強金物	鋼種					SD295A(溶接閉鎖形)		
	降伏強度 / ヤング係数 (N/mm ²)					358.4 / 185800		
	配置 (中子筋あり)					有効断面積 201.4 mm ² を 2 枚		
破壊形式		せん断				開孔部破壊		



図－２ 試験体の外形



図－３ 試験体の形状と配筋

「PCa 部に対する現場打設部のコンクリート強度の比」と「断面に占める普通強度コンクリートの割合」である。

無孔試験体は、「全断面が高強度コンクリートで構成されたハーフ PCa 梁」としての試験体 rSh_01 と、「全断面が普通強度コンクリートで構成されたハーフ PCa 梁」に相当する試験体 Sh_04 に加え、PCa 部が高強度コンクリート、現場打設部が普通強度コンクリートで構成される試験体 Sh_02 および試験体 Sh_03 が、「強度を打ち分けたハーフ PCa 梁」として位置づけられる。強度を打ち分けた試験体相互は、400 mm と統一された梁せいに対し、試験体 Sh_02 の現場打設高さが 150

mm、試験体 Sh_03 の現場打設高さが 200 mm となっており、結果として「断面に占める普通強度コンクリートの割合」が、rSh_01、Sh_02、Sh_03、Sh_04 の順に、0.00 %、37.50 %、50.00 %、100.00 % となっている。有孔試験体も同様であり、Vo_01、Vo_02、Vo_03 の順に、37.50 %、50.00 %、100.00 % となっている。

なお表－１に示した材料強度等はいずれも材料試験の結果であり、強度が打ち分けられた試験体においては、「PCa 部に対する現場打設部のコンクリート強度の比」がいずれもおよそ 0.4 程度となっている。また試験体 rSh_01 は、加力中のトラブルに伴って再製作された試験

表－２ 無孔試験体の実験結果一覧

試験体			rSh_01		Sh_02		Sh_03		Sh_04	
加力方向			正	負	正	負	正	負	正	負
曲げせん断 ひび割れ	部材変形角 R	(10^{-3} rad)	1.26	-1.26	2.01	-1.65	1.27	-1.28	1.71	-1.69
	せん断力	(kN)	128.93	-132.46	153.93	-136.88	112.65	-112.47	128.99	-130.79
せん断 ひび割れ	部材変形角 R	(10^{-3} rad)	3.26	-3.23	3.50	-5.05	3.51	-1.71	2.54	-3.51
	せん断力	(kN)	217.02	-220.34	200.25	-227.86	196.17	-137.95	145.06	-175.56
せん断補強筋 降伏	部材変形角 R	(10^{-3} rad)	4.99			-4.25	3.79		4.51	
	せん断力	(kN)	270.02			-215.90	201.60		207.62	
最大耐力	部材変形角 R	(10^{-3} rad)	10.00	-8.52	10.00	-10.01	10.03	-10.03	8.52	-5.03
	せん断力	(kN)	379.67	-309.34	294.85	-251.54	278.99	-262.10	246.78	-208.57

体であり、試験体 Sh_02 および試験体 Sh_03 の PCa 部が同一バッチの高強度コンクリートで構成されているのに対し、試験体 rSh_01 の PCa 部のみが別バッチ（調合は同一）の高強度コンクリートとなっている。なおこれらの試験体はすべて、PCa 部の製作後、チッピングによってその水平接合面に 5 mm 程度の凹凸を設けたうえで現場打設部のコンクリートが打設されている。また鉛直接合面には、実務でも用いられる構造設計指針⁴⁾に従い、深さ 15 mm の方形シャキーが設けられている。

3. 実験結果

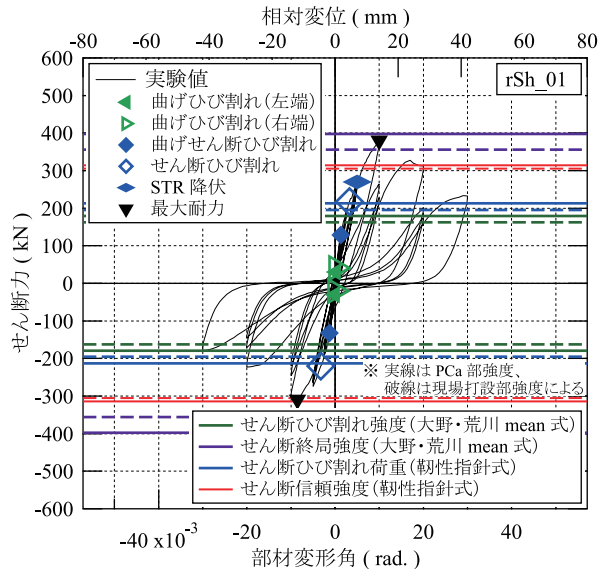
無孔試験体、有孔試験体の順に実験結果を呈示した後に、両者の最大耐力について横断的な検討を加える。

3.1 無孔試験体

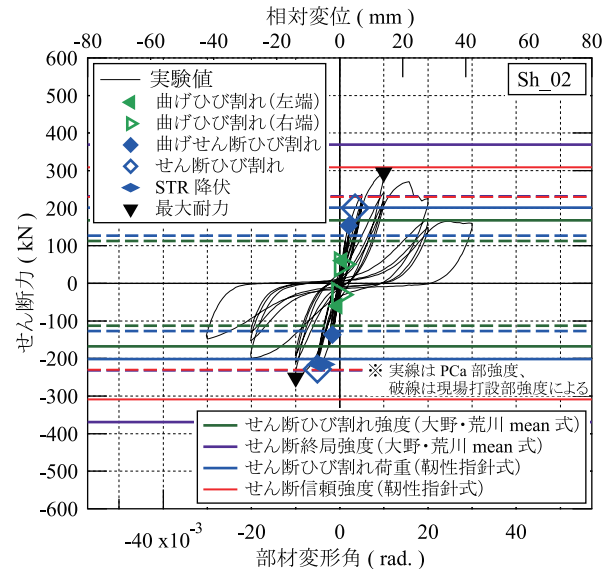
本論文では以降、試験体両端のスタブの相対変位をクリアスパンで除した値を部材変形角 R と呼称する。

(1) 実験結果概要

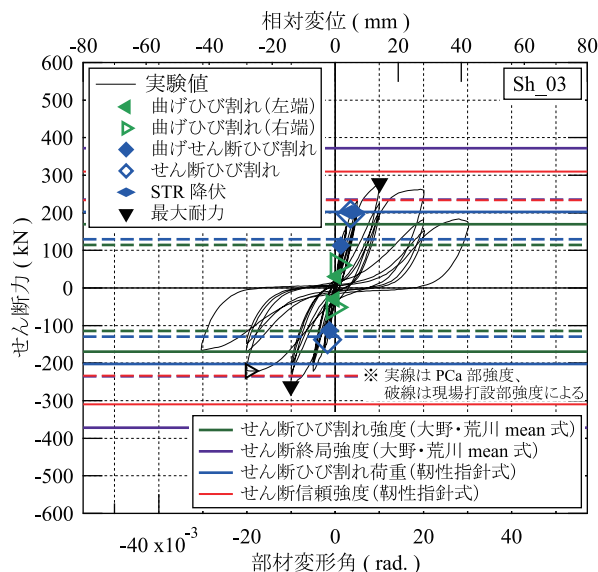
表－２に無孔試験体の実験結果一覧を示す。いずれの試験体においても、曲げひび割れの発生後 $\pm R =$



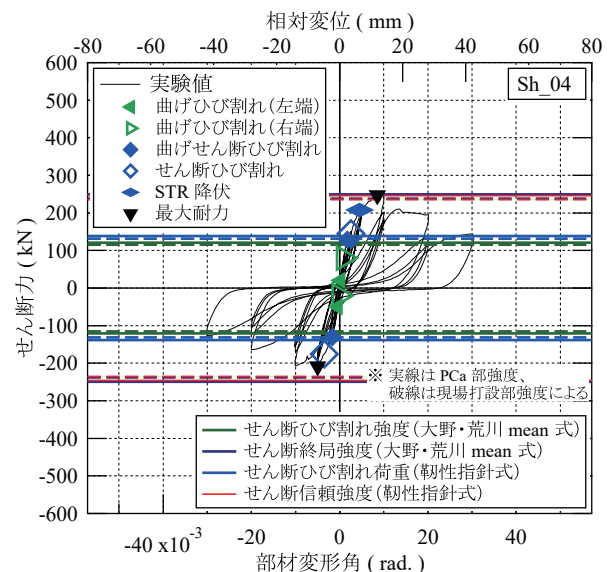
図－４（a）試験体 rSh_01 の荷重－変形曲線



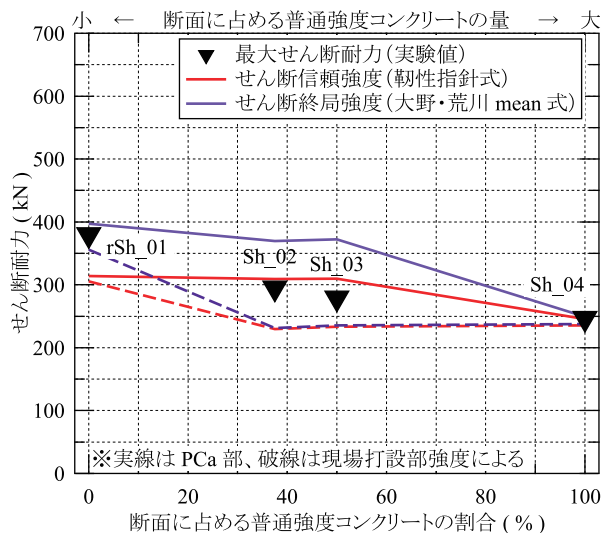
図－４（b）試験体 Sh_02 の荷重－変形曲線



図－４（c）試験体 Sh_03 の荷重－変形曲線



図－４（d）試験体 Sh_04 の荷重－変形曲線



図－５ 無孔試験体の最大耐力と各種評価式の関係

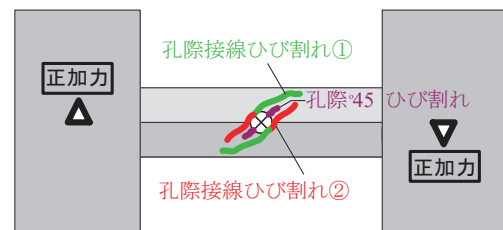
1/500 サイクル内に曲げせん断ひび割れが発生し、その後、せん断ひび割れ、せん断補強筋の降伏を経て± R = 1/100 前後で最大耐力に達している。せん断ひび割れ、せん断補強筋の降伏、最大耐力が、断面に占める普通強度コンクリートの割合の増大に伴って低下する傾向が見られる。

(2) 実験結果と各種評価式との関係

図－４（a）～図－４（d）に、実験の結果得られたせん断力－部材変形角関係に加え、せん断ひび割れ強度（大野・荒川 mean 式⁵⁾）、せん断終局強度（大野・荒川 mean 式⁵⁾）、せん断ひび割れ荷重（靱性指針式⁶⁾）、せん断信頼強度（靱性指針式⁶⁾）を示す水平線を重ね描く。これら各種耐力値は、表－１記載の材料試験結果を用いて算定されており、コンクリート強度として PCa 部を採用した場合に実線、現場打設部を採用した場合に破線として描画されている。

せん断ひび割れに関しては、いずれの式にどちらのコンクリート強度を代入しても安全側に評価できており、特にせん断ひび割れ荷重（靱性指針式⁶⁾）を PCa 部コンクリート強度として求めた場合に、実験値との適合性に優れる結果が得られている。

一方最大耐力に関しては、強度を打ち分けた試験体において、PCa 部コンクリートを採用した場合にはいずれの式であっても過大評価を与え、現場打設コンクリート強度を採用した場合には常に安全側の評価が得られている。図－５に、この最大耐力と各種耐力式の算定値との関係を、「断面に占める普通強度コンクリートの割合」に対応させて示す。既に述べたように、強度を打ち分けた試験体では、現場打設部のコンクリート強度を採用した場合にいずれの耐力式であっても必ず安全側の評価となっているが、その余裕度は、断面に占める普通強度コンクリートの割合が大きくなるにつれて小さくなって



図－６ 開孔部近傍に発生するひび割れの定義

いる。すなわち、梁せいに比して高強度コンクリートの PCa 部の高さが小さく、普通強度コンクリートの現場打設部の高さが大きくなるほど、実験上の最大耐力は低くなって「全断面が普通強度コンクリートで構成された場合の計算値」に近づく傾向にある。

3.2 有孔試験体

有孔試験体はいずれも、加力の進行に伴って図－６のようなひび割れが開孔近傍に発生した。本論文では以降、それぞれのひび割れを図中に示したように呼称していく。

(1) 実験結果概要

表－３に有孔試験体の実験結果一覧を示す。いずれの試験体も、孔際 45° ひび割れ、孔際接線ひび割れ①、孔際接線ひび割れ②の順にひび割れが発生することで開孔部近傍に損傷が集中し、孔際集中補強筋や開孔補強金物の降伏に伴って最大耐力に到っている。孔際接線ひび割れ②と孔際集中補強筋の降伏は、最大耐力に近い同程度の応力レベルで確認される傾向にある。

(2) 実験結果と各種評価式との関係

図－７（a）～図－７（c）に各試験体のせん断力－部材変形角関係を示す。これらのグラフには、前掲図－４（a）～図－４（d）に同様、各種耐力の計算値を示す水平線が、コンクリート強度として PCa 部を採用した場合に実線、現場打設部を採用した場合に破線として描画されている。このうち、せん断ひび割れ強度（大野・荒川 mean 式⁵⁾）、せん断終局強度（大野・荒川 mean 式⁵⁾）、せん断ひび割れ荷重（靱性指針式⁶⁾）は孔のない一般部に対する計算値であり、有孔梁せん断終局強度（広沢修正式⁵⁾）が、開孔部の終局強度を評価した値に相当する。

せん断ひび割れ等は実験上も一般部に生じていたが、いずれの式にどちらのコンクリート強度を代入しても安全側に評価できている点に、無孔試験体との共通点が認められる。

一般部にこのようにせん断ひび割れが生じた一方、開孔近傍では、孔際接線ひび割れ②の発生と孔際集中補強筋の降伏の双方が確認された直後にピークに到る傾向が、すべての試験体から確認されている。この時の最大耐力は、いずれのコンクリート強度を代入して得られる有孔梁せん断終局強度（広沢修正式⁵⁾）よりも高くなっている。

表－３ 有孔試験体の実験結果一覧

試験体			Vo_01		Vo_02		Vo_03	
加力方向			正	負	正	負	正	負
孔際 45° ひび割れ	部材変形角 R	(10^{-3} rad)	1.26	-1.05	0.66	-0.25	0.76	-0.07
	せん断力 (kN)		113.56	-100.07	70.14	-40.32	70.30	-20.40
孔際接線 ひび割れ①	部材変形角 R	(10^{-3} rad)	5.00	-2.51	6.58	-6.86	3.47	-3.23
	せん断力 (kN)		262.78	-165.34	282.68	-261.53	191.41	-180.15
孔際接線 ひび割れ②	部材変形角 R	(10^{-3} rad)	10.03	-6.71	10.04	-6.86	5.01	-5.05
	せん断力 (kN)		363.50	-280.36	344.69	-261.53	229.18	-232.57
孔際集中補強筋 降伏	部材変形角 R	(10^{-3} rad)	8.34		8.55		7.70	
	せん断力 (kN)		340.07		322.03		290.55	
開孔補強金物 降伏	部材変形角 R	(10^{-3} rad)	6.20		19.31		15.05	
	せん断力 (kN)		291.54		231.05		199.04	
最大耐力	部材変形角 R	(10^{-3} rad)	18.60	-10.02	10.04	-10.11	10.01	-10.05
	せん断力 (kN)		368.19	-343.82	344.69	-322.50	311.48	-284.52

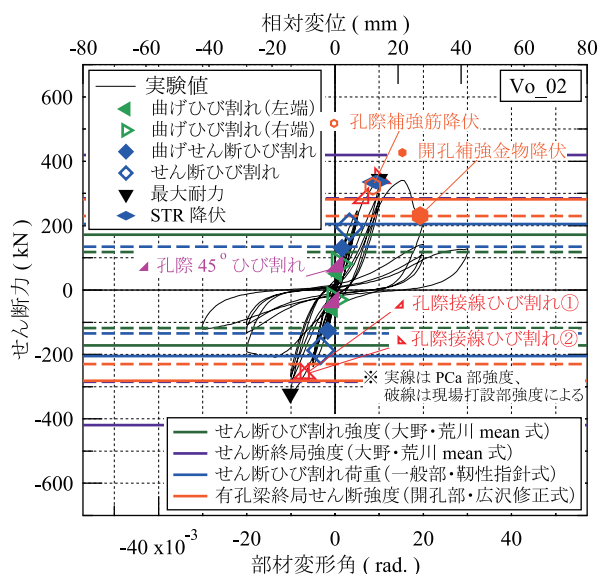
図－８は、この最大耐力と「断面に占める普通強度コンクリートの割合」の関係を、前掲図－５同様の有孔梁せん断終局強度（広沢修正式⁹⁾）の算定値と併せて示したものである。

既に触れたように、いずれの試験体にあっても、有孔梁せん断終局強度（広沢修正式⁹⁾）は、採用されるコンクリート強度の値を問わず実験値よりも安全側の評価を与えている。すなわち、コンクリート強度として PCa 部側の材料試験結果を採用した場合、強度を打ち分けた試験体 Vo_01 と試験体 Vo_02 は高強度コンクリートの梁としての終局せん断強度が算定値となるが、実験上は、その解釈を上回る最大耐力が得られていたことになる。ただしその最大値は、断面に占める普通強度コンクリートの割合が大きくなるほど低下しており、この観点において無孔試験体と同様の傾向が看取されている。

3.3 強度を打ち分けたハーフ PCa 梁のせん断性能

以上に見てきた実験結果のうち、改めて最大耐力のみに注目して、強度を打ち分けたハーフ PCa 梁のせん断性能について考察を加える。

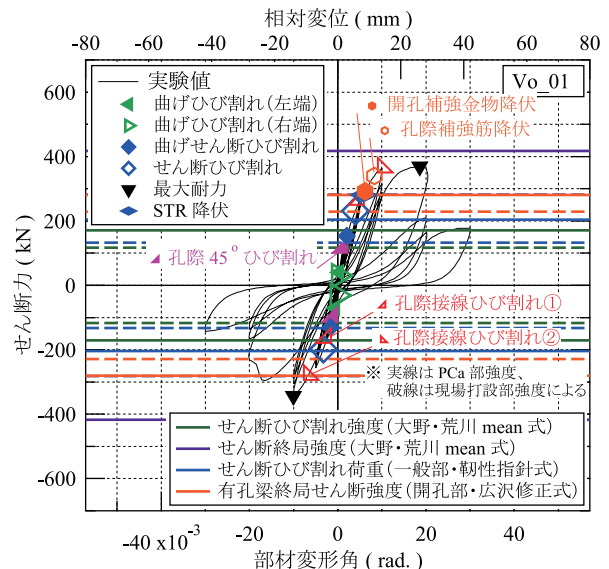
図－９は、前掲図－５および前掲図－８中から実験値



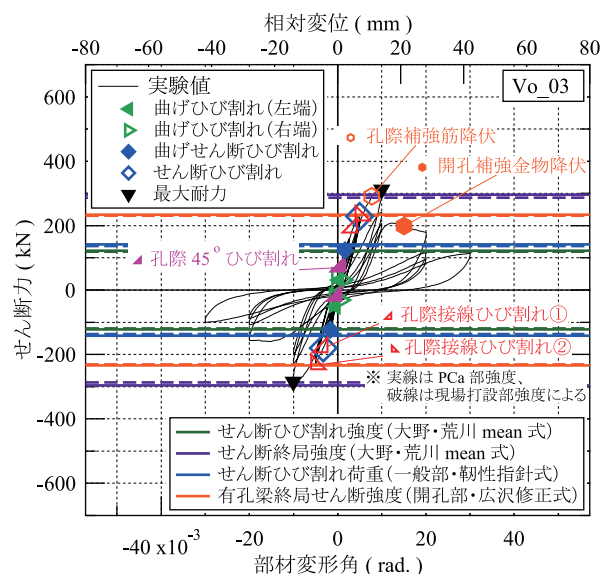
図－７（b） 試験体 Vo_02 の荷重－変形曲線

のみを取り出して重ね描いたものであり、無孔試験体と有孔試験体の最大耐力と断面に占める普通強度コンクリートの割合との関係を、横断的に示したものである。

「断面に占める普通強度コンクリートの割合が増すほどに最大耐力が低減する」傾向が孔の有無に関わらない



図－７（a） 試験体 Vo_01 の荷重－変形曲線



図－７（c） 試験体 Vo_03 の荷重－変形曲線

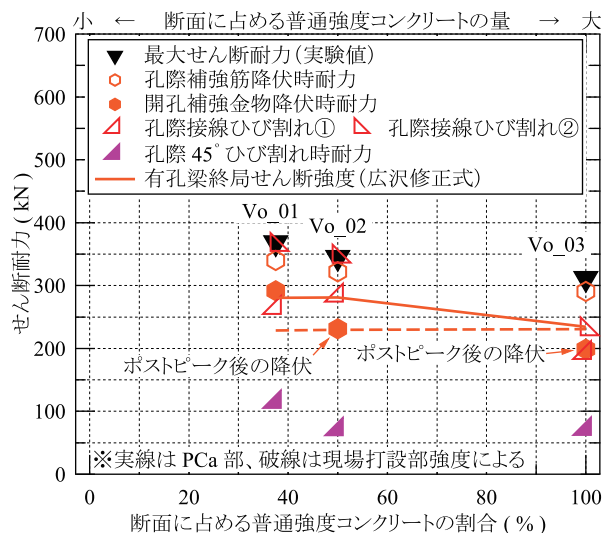


図-8 有孔試験体の最大耐力と各種評価式の関係

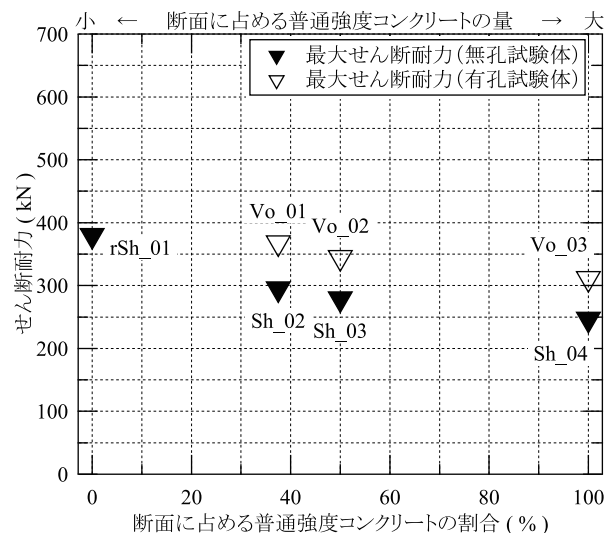


図-9 全試験体の最大耐力相互の関係

ことは既に触れた通りであるが、この図-9は、「その低減傾向も孔の有無を問わず類似する」ことを示している。前掲表-1に示した通り、本実験において強度を打ち分けた試験体の「PCa部に対する現場打設部のコンクリート強度の比」は、いずれもおおよそ0.4程度である。したがって実験結果に及ぼす強度比の貢献は極めて小さく、孔の有無を除けば、支配因子はほぼ「断面に占める普通強度コンクリートの割合」に限定されていたと考えられる。よって、図-9が示す「最大耐力の低減傾向が孔の有無を問わず類似している」との結果は、「強度を打ち分けたハーフPCa梁の最大せん断耐力は、断面に占める普通強度コンクリートの割合によって低減する傾向にあるが、その低減傾向は、無孔の場合であっても有孔の場合であってもほぼ同様である」ことを示唆するものと考えられる。

4. まとめ

現場打設部をPCa部分とは異なる強度のコンクリートで打設したハーフPCa梁のせん断性能の確認実験を行った。「断面に占める普通強度コンクリートの割合」、「貫通孔の有無」が主たる変動因子として設定された矩形断面のハーフPCa梁を模した試験体全7体への加力の結果として得られた知見をまとめると、次のようになる。

- i) 強度を打ち分けたハーフPCa梁のせん断破壊時の最大耐力は、開孔の有無を問わず「全断面が高強度コンクリートの梁」よりも小さく、「全断面が普通強度コンクリートの梁」よりも大きくなる。
- ii) 強度を打ち分けたハーフPCa梁のせん断破壊時の最大耐力は、「断面に占める普通強度コンクリートの割合」と密接な関係を有し、この値が大きくなるほど低減する傾向にある。またこの低減傾向は、有孔梁・無孔梁を問わず類似する。

iii) 強度を打ち分けたハーフPCa梁のせん断強度は、既往のいずれのせん断耐力式であっても、現場打設部コンクリートの強度を代入することで、孔の有無を問わず安全側に評価できる。

実際には、多くの梁材が床スラブと一体的に連続して構築されるため、この場合の現実のせん断強度は床スラブの影響を受けてやや上昇すると考えられる。したがって、本論文で得られた知見に立脚のうえ矩形断面として構造設計された強度を打ち分けたハーフPCa梁は、より安全側のせん断性能を有することになると予測される。

参考文献

- 1) 小澤潤治, 佐藤良介, 渡辺高朗, 阪井由尚: 現場打設部分に異種強度コンクリートを用いたハーフプレキャスト梁の曲げ性能 —その1— 実験計画と実験結果 —, 日本建築学会大会学術講演会梗概集(中国), pp. 449 - 450, 2008. 9
- 2) 佐藤良介, 小澤潤治, 渡辺高朗, 阪井由尚: 現場打設部分に異種強度コンクリートで打ち継いだハーフプレキャスト梁の逆対称曲げ挙動の弾塑性解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 2, pp. 49 - 54, 2008年7月
- 3) 佐藤良介, 小澤潤治, 阪井由尚, 渡辺高朗: 現場打設部分に異種強度コンクリートで打ち継いだハーフプレキャスト梁の逆対称曲げ挙動を模擬する等価1自由度モデル, 構造工学論文集, Vol. 52 B, pp. 277 - 288, 2010. 3
- 4) 日本建築学会: 現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針(案)・同解説(2002), 2002. 10
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010. 3
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1997