

AFRP シート緊張接着 PC 梁の曲げ耐力向上効果に関する基礎的研究

Flexural strengthening effects due to pre-tensioned AFRP sheet bonding for prestressed concrete beams on neutral axis

室蘭工業大学
三井住友建設（株）
室蘭工業大学
室蘭工業大学大学院

フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
○ 学生会員 館 雅春 (Masaharu Tate)

1. はじめに

著者らは、これまで、連続繊維 (FRP) シート接着による鉄筋コンクリート (RC) およびプレストレストコンクリート (PC) 部材の曲げ補強効果をより効率的に発揮させる方法として、アラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを緊張して接着する方法を提案し、その補強効果を把握すべく RC/PC 梁を対象として検討を行ってきた。この工法は、過去に提案されている緊張接着工法¹⁾とは異なり、機械式定着具を用いず接着剤のみでシートに与えた緊張力をコンクリート部材に伝達させる工法である。具体的には、緊張力導入時にシートの両端部に発生する面内せん断応力を分散し、かつその応力勾配を緩和するため、2方向 AFRP シートおよび応力緩和材を用いる方法である (図-1 参照)²⁾。その結果、1) 提案の AFRP シート緊張接着工法により RC/PC 梁の曲げ補強効果を効率的に向上可能であり、その曲げ耐荷性状は断面分割法により大略推定可能であること、2) 緊張接着用シートの付着は RC/PC 梁の最大荷重時まで十分に確保されていること、などを明らかにしている。

なお、一般的な PC 梁の場合には、緊張材が下縁に配置されており梁が上反りしているため、緊張接着用シートを梁下面に確実に密着させるためには、接着面をパテ材等により水平に調整する必要がある。特に、室内実験レベルの小型 PC 梁の場合には、橋梁等で供用されている実 PC 梁の場合よりも大きな曲率で変形しているため、断面高さに対するパテ材の厚さも大きなものとなる。過去の実験では、上記パテ材を使用することでひび割れが集中してシート破断が助長されるなど、曲げ耐荷性状が計算結果と精度良く対応しない場合も見られ、本工法の PC 梁に対する補強効果を適切に評価するに至っていないのが現状である。AFRP シート緊張接着工法の合理的な補強設計法を確立す

るためには、上記の要因を排除し、より単純化された状態で検討することが重要であるものと考えられる。

このような背景より、本研究では、AFRP シート緊張接着工法の PC 梁に対する補強効果の検討を単純かつ適切に行うことを目的として、上反りをなくすために PC 鋼より線を断面高さ方向中央部に配置した PC 梁を対象に本工法の曲げ補強効果を実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、梁高を2種類とし、それぞれ無補強、シート緊張率を0、20、40%の3種類とした4種全8体である。なお、P1 および P2 梁において、PC 鋼材の有効緊張率はそれぞれ49%、60%としている。これは、PC 鋼材の緊張力により断面に作用する圧縮応力レベルを P1、P2 で同等となるようにするためである。表-1 より、無補強・無緊張の場合には両梁ともに初期断面内応力が5 MPa 程度であることが分かる。

表中、試験体名の第1項目は梁高の種類 (P1: 180 mm, P2: 220 mm)、第2項目は曲げ補強の有無 (N: 無補強, T: 補強) を示し、T に付随する数値はシートの目標導入緊張率 (%) を示している。なお、導入緊張率とはシートの保証引張耐力に対する導入緊張力の割合を示している。表には、目標導入緊張率の他、ロードセルより得られた緊張力を基にした各試験体の実測導入緊張率も併せて示している。なお、曲げ補強シートには保証耐力 1,200 kN/m の AFRP シートを用いた。以後、本論文では緊張力導入の有無に関わらず曲げ補強用シートを緊張接着用シートと呼ぶことにする。

図-1 には、本実験に用いた試験体の形状寸法、配筋状

表-1 試験体一覧

試験体名	断面寸法 (mm)	PC 鋼材の有効緊張率 (%)	シートの導入緊張率* (%)	実測初期導入ひずみ (μ)	初期断面内応力 (MPa)	
					上縁	下縁
P1-N	梁幅:300 梁高:180	49	-	-	-4.9	-4.9
P1-T0			0 (0)	0	-4.9	-4.9
P1-T20			20 (21.2)	3521	-2.4	-10.2
P1-T40			40 (36.8)	6215	0.2	-15.8
P2-N	梁幅:300 梁高:220	60	-	-	-5.0	-5.0
P2-T0			0 (0)	0	-5.0	-5.0
P2-T20			20 (20.5)	3387	-2.9	-9.3
P2-T40			40 (36.1)	6346	-0.8	-13.8

* () 内は実測導入緊張率

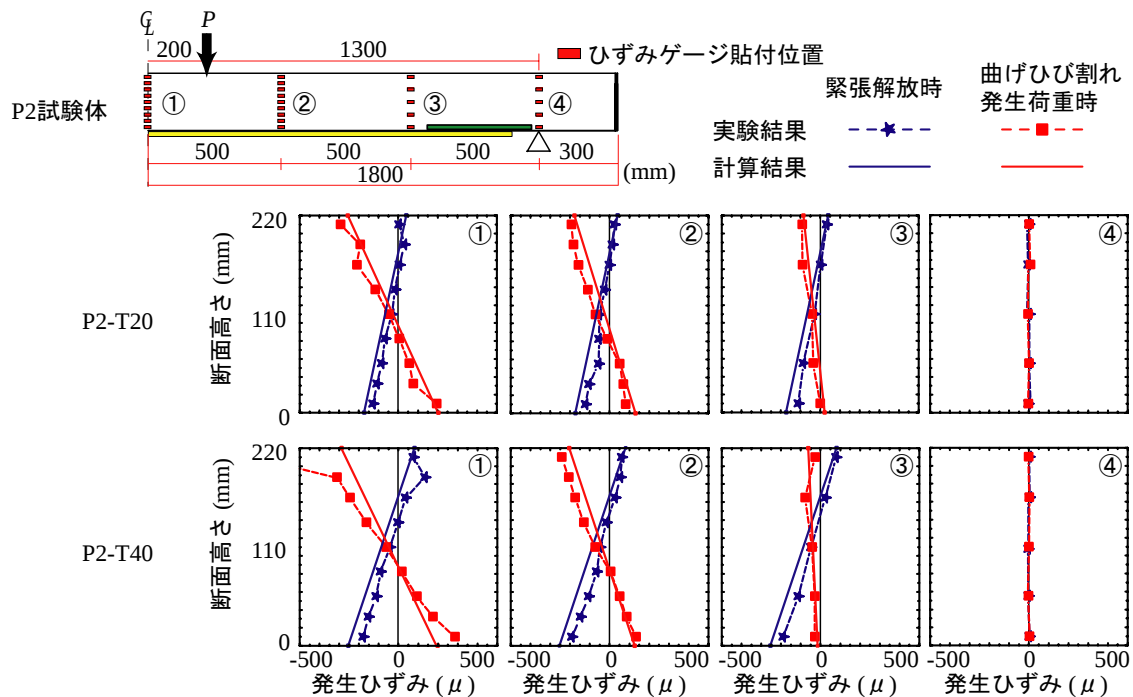
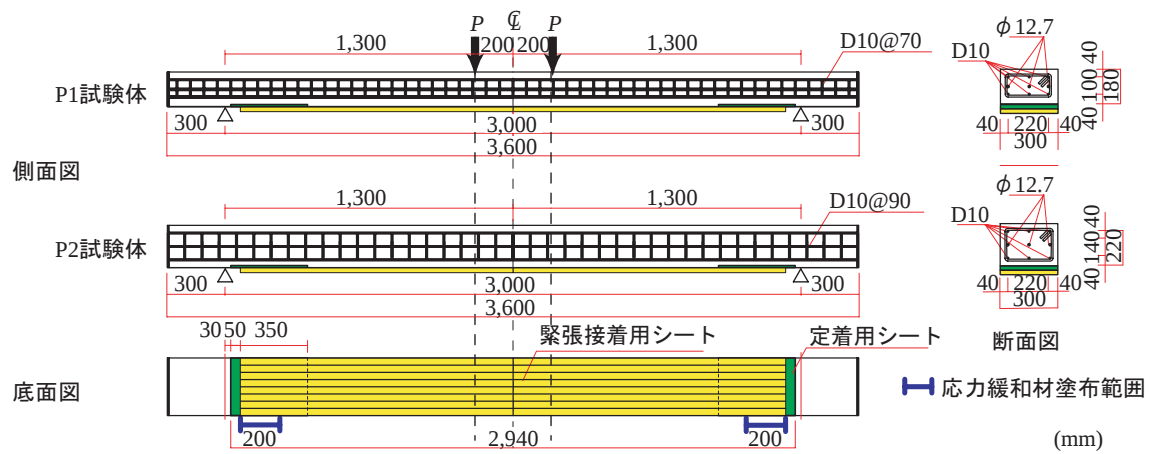
表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

繊維目付量 (g/m ²)	保証耐力 (kN/m)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
830	1,176	0.572	2.06	118	1.75
435/435	588/588	0.286/0.286			

表-3 鋼材の力学的特性値

鋼材名称	材質	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
D10	SD345	356	523	206
φ12.7	SWPR7BN	1783*	1965	194

* 0.2% 永久伸びに対する応力



況および補強概要を示している。試験体は、純スパン長 3.0 m の複鉄筋矩形 PC 梁である。上端鉄筋及び下端鉄筋には、D10 を 3 本ずつ用い、中央部には $\phi 12.7$ の PC 鋼材を 3 本配置し、所定の緊張力を導入している。緊張接着用シートには、幅 300 mm の AFRP シートを用い、梁中央部から両支点の 80 mm 手前までの範囲に接着した。なお、緊張接着用シートの両端部には前述のとおり応力分散用の 2 方向 AFRP シートおよび応力緩和材を使用している。その他、緊張接着工程の詳細については文献 2) を参照されたい。

2.2 実験方法および材料特性値

実験は、容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて 4 点曲げ载荷により行った。測定項目は、载荷荷重、スパン中央部変位 (以後、変位)、緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布である。また、実験時には PC 梁のひび割れおよびシートの剥離・破断状況をデジタルカメラにより逐次撮影している。表-2, 3 には、それぞれ AFRP シートおよび鋼材の力学的特性値を一覧にして示している。また、実験時にお

るコンクリートの圧縮強度は P1 試験体では 75.8 MPa, P2 試験体では 72.5 MPa であった。

3. 実験結果および考察

3.1 PC 梁側面のひずみ分布

図-2 には、1) AFRP シートの緊張力解放時および 2) 静载荷実験の曲げひび割れ発生時における PC 梁側面の軸方向ひずみ分布を示している。なお、ここでは、P2-T20/40 試験体に関する実験結果を計算結果と比較する形で示している。

図より、緊張力解放時における実測ひずみ分布は、シートの導入緊張率にかかわらず、計算結果と良く対応していることが分かる。なお、支点部は、補強範囲外であるため、ひずみが発生していない。これらのことより、本実験においては、提案の AFRP シート緊張接着工法により、PC 梁の補強範囲にプレストレス力が適切に導入されていることが分かる。一方、曲げひび割れ発生時の実測ひずみ分布はス

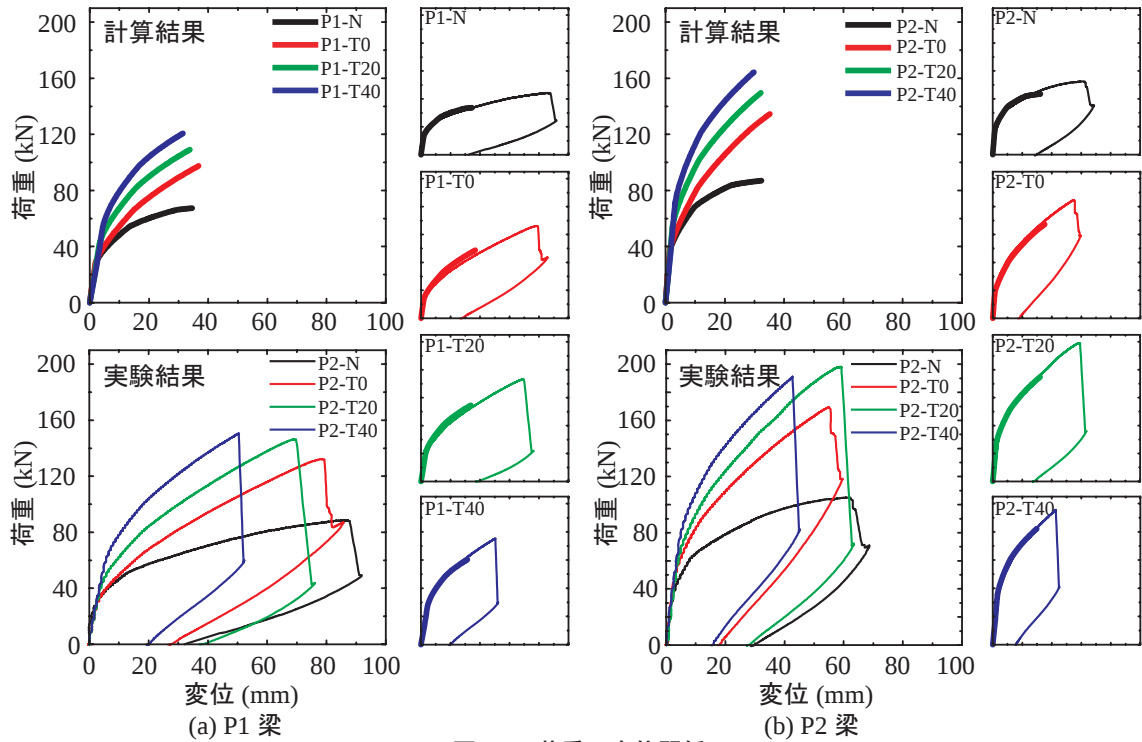


図-3 荷重-変位関係

表-4 計算結果および実験結果の一覧

試験 体名	曲げひび割れ発生時					PC 鋼材降伏時					終局時					実験時の 破壊性状
	計算結果		実験結果		荷重比 P_{ce} / P_{cc}	計算結果		実験結果		荷重比 P_{ye} / P_{yc}	計算結果		実験結果		荷重比 P_{ue} / P_{uc}	
	荷重	変位	荷重	変位		荷重	変位	荷重	変位		荷重	変位	荷重	変位		
	P_{cc} (kN)	δ_{cc} (mm)	P_{ce} (kN)	δ_{ce} (mm)		P_{yc} (kN)	δ_{yc} (mm)	P_{ye} (kN)	δ_{ye} (mm)		P_{uc} (kN)	δ_{uc} (mm)	P_{ue} (kN)	δ_{ue} (mm)		
P1-N	23.8	1.32	23.8	3.00	1.00	54.3	13.5	52.7	14.3	0.97	67.4	34.6	80.6	85.5	1.20	コンクリート圧壊
P1-T0	29.5	1.88	30.7	3.04	1.04	66.3	14.9	66.1	18.6	1.00	97.5	36.8	132.2	78.2	1.36	コンクリート圧壊
P1-T20	37.6	2.32	44.4	4.35	1.18	82.2	15.8	80.4	17.8	0.98	109.1	33.8	146.4	69.0	1.34	圧壊後シート破断
P1-T40	50.9	3.13	51.5	4.51	1.01	98.1	16.8	103.0	19.8	1.05	120.7	31.5	150.3	50.4	1.25	圧壊後シート破断
P2-N	38.5	1.49	41.0	3.07	1.06	68.2	9.8	66.7	11.0	0.98	87.0	32.4	105.1	61.6	1.21	コンクリート圧壊
P2-T0	39.4	1.48	44.7	2.70	1.13	81.9	10.8	84.7	10.3	1.03	134.6	35.2	169.6	54.9	1.26	コンクリート圧壊
P2-T20	53.3	2.49	58.1	4.05	1.09	101.7	11.3	105.2	13.1	1.03	149.6	32.2	198.2	58.7	1.32	圧壊後シート破断
P2-T40	68.6	3.14	75.6	4.51	1.10	121.3	12.0	127.5	15.0	1.05	164.3	29.8	191.1	42.7	1.16	圧壊後シート破断

計算結果の破壊性状は全てコンクリート圧壊

パン中央部において最も大きな勾配を生じており、支点側に向かうほど傾きが小さくなる傾向にあることがわかる。また、これらの実験結果は計算結果とほぼ対応している。

以上のことから、提案の AFRP シート緊張接着工法によって、PC 梁の各断面、各点には計算値と同様なひずみが発生し、プレストレス力が適切に導入されていることが明らかとなった。

3.2 荷重-変位関係

図-3 には、荷重-変位関係に関する実験および計算結果と、各試験体に関する両結果の比較図を P1, P2 梁について示している。また、表-4 には参考のため、曲げひび割れ発生時、PC 鋼材降伏時および終局時における実験および計算結果を一覧にして示している。また、実験時における破壊性状も併せて示している。計算結果は、コンクリート標準示方書³⁾に準拠し断面分割法により算出したものである。

図-3 の実験結果より、P1, P2 梁ともに AFRP シート補強により PC 梁の曲げ耐荷性能が向上し、シートの導入緊

張率が高いほど補強効果が効率的に発揮される傾向にあることが分かる。また、このような傾向は、計算結果においても同様である。

各試験体の実験および計算結果の比較図より、実験結果は計算結果とほぼ同様の曲げ耐荷性状を示し、かつ実測耐力は計算耐力を上回っていることが分かる。また、表-4 より、曲げひび割れ発生時、PC 鋼材降伏時の実験および計算結果は極めて良く対応しており、かつ終局時においては実測耐力 P_{ue} が計算耐力 P_{uc} を 2 割程度以上上回っている。

これらのことより、提案の AFRP シート緊張接着工法により曲げ補強した PC 梁の曲げ耐荷性状は、断面分割法により精度良く推定可能であり、終局耐力については 2 割程度以上の安全余裕度をもって評価可能であることが明らかになった。

3.3 シートのひずみ分布性状

図-4 には、曲げ補強試験体の計算終局変位時における緊張接着シートの軸方向ひずみ分布性状を計算結果と比較して示している。

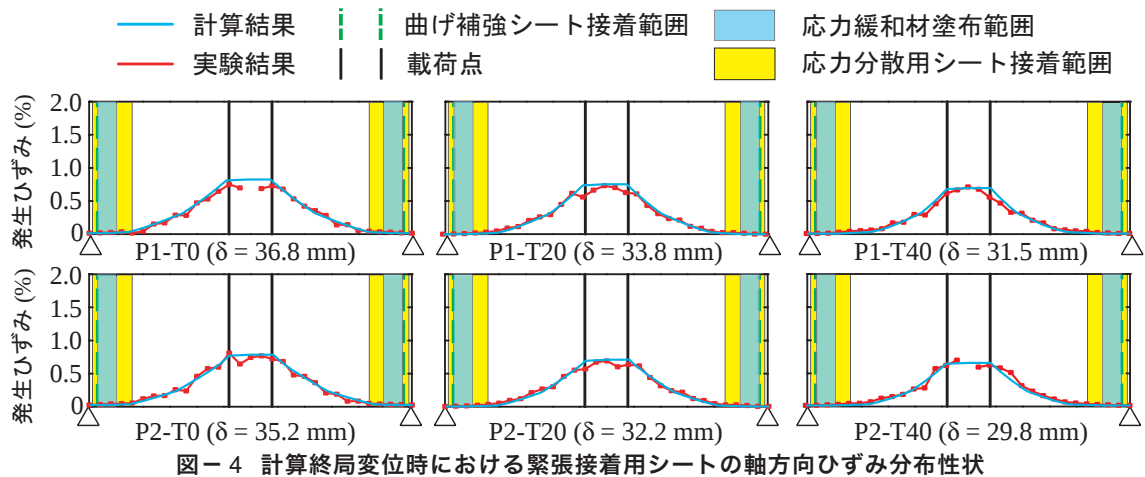


図-4 計算終局変位時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状

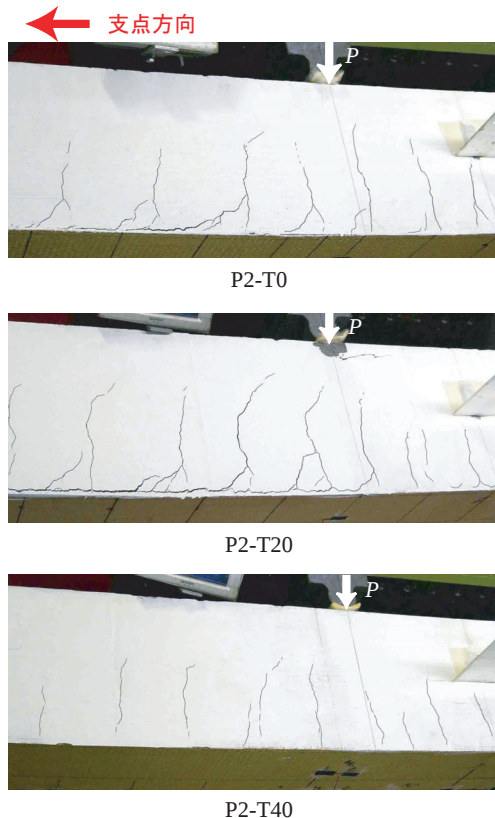


写真-1 AFRP シートの剥離・破断直前のひび割れ性状

図より、いずれの試験体においても、実験結果は計算結果と良く対応していることから、緊張接着用シートとコンクリートとの付着は計算終局変位時まで十分に確保されているものと判断される。また、このことが前述の荷重-変位関係において実験および計算結果が極めて良く対応していることを裏付けているものと考えられる。

3.4 AFRP シート緊張接着 PC 梁のシート剥離状況

写真-1 には、P2-T0/20/40 試験体に関する終局時近傍のひび割れ進展状況を示している。写真より、P2-T0/20 試験体では、荷重点近傍の下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れの先端部がシートを押し下げて引き剥がすピーリング作用による部分剥離が発生していることが分かる。実験時には、P2-T0 試験体は、上縁コンクリートの圧壊に伴って耐力が低下し、P2-T20 試験体は上縁コンクリート圧壊後シート破断に至った。

一方、P2-T40 試験体では、曲げひび割れの発生が見られるものの、P2-T0/20 試験体に見られたピーリング作用によるシートの部分剥離はほとんど見られず、この直後にシート破断により終局に至っている。このように、終局時までシートの部分剥離が見られないのは、AFRP シートの導入緊張率が高いため、かぶり部分に作用する下向きの力（ピーリング力）に対する抵抗（いわゆるダボ効果）が大きいためと考えられる。従って、AFRP シートに緊張力を与えて接着することは、ピーリング作用によるシート剥離の抑制に対しても有効であるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、AFRP シート緊張接着時における PC 梁の曲げ耐力性状や破壊形式を検討することを目的として、AFRP シートを緊張接着した PC 梁の静荷重実験を実施した。本実験により得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) AFRP シート緊張接着時における PC 梁各点の軸方向ひずみ分布は、弾性を仮定した計算値と良く対応する。すなわち、提案した緊張接着工法により PC 梁にプレストレスを適切に導入可能である。
- 2) 提案の AFRP シート緊張接着工法により曲げ補強した PC 梁の曲げ耐力性状は、断面分割法により精度良く推定可能であり、終局耐力については 2 割程度以上の安全余裕度をもって評価可能である。
- 3) AFRP シート緊張接着工法は、曲げ耐力の向上のみならずピーリング作用によるシートの剥離の抑制になしても有効である。

参考文献

- 1) 呉 智深, 松崎 智優, 福沢 公夫, 神口 建: CFRP シート緊張接着した鉄筋コンクリート曲げ部材の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.153-165, 2000.2
- 2) 栗橋 祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 澤田 純之: AFRP シートを緊張接着した PC 梁の曲げ耐力性状に関する実験的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告書, vol.8, pp.257-264, 2008.10
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 (設計編), 2007