

論文 付着割裂試験法によるコンクリート打継ぎ面の接着性能評価

鶴田 真一*1・河野 進*2・角 徹三*3

要旨: コンクリート強度と打継ぎ面の処理方法が, 新旧コンクリート間の打継ぎ面の応力伝達に与える影響を定量化する目的で, コンクリート強度 (30MPa-100MPa) と打継ぎ面の処理方法を実験変数にし, Schmidt-Thrö型簡易付着試験体 57 体を用いて実験を行った。この結果, 応力伝達は, 新旧コンクリートのうち強度が弱いコンクリートに依存すること, 打ち継ぎ面の処理方法はコンクリート強度より影響が大きいことを確かめた。さらに実験では得られない破壊進行状況を追跡する目的で, 分布ひび割れモデルを用いた数値解析を行い, 実験結果の予想が可能であることを確認した。

キーワード: コンクリート打継ぎ面, 高強度コンクリート, ひび割れ, 破壊力学

1. はじめに

既存鉄筋コンクリート (以下 RC) 構造物に劣化が発生した場合の補修・補強方法として, 劣化したコンクリートを主筋位置まで除去し, 新コンクリートを増厚する方法がある。この場合, 新旧コンクリート間の接着性能の良否が, 補修した構造物の力学的挙動を左右する因子として重要となる。ここで接着とは, 新旧コンクリート間の 2 つの応力伝達, つまり垂直応力とせん断応力を総合的に表わす言葉として用いる。接着性能に関しては, RC 部材の主筋位置に打継ぎ面を設定し, この位置で付着割裂破壊を生じさせることで, 打継ぎ面の接着性能評価を行う試み¹⁾ が過去に行われた。しかし, 試験体作製に手間がかかり, 様々に変数を変えて多くの実験を行うことが困難であった。そこで図-1のように, 柱の一部を理想化した Schmidt-Thrö型簡易付着試験体を用い, 新旧コンクリートの接着性能を評価する方法が考案された^{2) 3)}。

本研究では, 新旧コンクリートの強度と打継ぎ面の処理が新旧コンクリート間の応力伝達に与える影響を定量化する目的で, Schmidt-Thrö型試験体を用いた実験を行った。さらに, 実験では得られない破壊の進行状態を追跡する目的で, 有限要素法を用いたモデル化を行った。

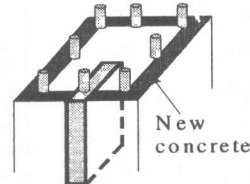


図-1 柱部材の一部を仮定して理想化された Schmidt-Thrö型試験体の形状

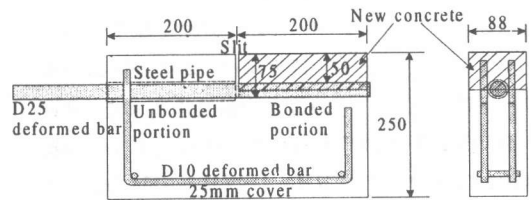


図-2 試験体寸法 (mm)

2. 実験概要

本実験で用いた試験体は, Schmidt-Thrö型簡易付着試験法に用いられるものと同様のものであり, その試験体寸法を図-2に示す。試験体のコンクリートは, 母体と斜線で示される増厚部に分けられる。試験体上部中央のスリットを境にして, 右側は試験区間, 左側は非試験区間である。埋設された D25 の鉄筋は, 試験区間において上部半周が増厚部と, 下部半周が母体と付着してい

*1 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)
 *2 豊橋技術科学大学助手 建設工学系 Ph.D. (正会員)
 *3 豊橋技術科学大学教授 建設工学系 工博 (正会員)

る。非試験区間においてD25の鉄筋は直径32mmの鋼管内に設置され、周囲のコンクリートとの付着が絶縁状態にあり、ここでは水平方向の動きに対して抵抗がない。

実験変数は表-1に示す通り、コンクリート強度及び打継ぎ面の処理の有無である。母体と増厚部のコンクリート強度の組み合わせには8種類、さらに打継ぎ面の処理の有無が2種類ある。また、母体と増厚部の強度が同じものに関しては、打継ぎ面のない一体打ちを作製した。それぞれの実験変数の組み合わせで基本的に3体ずつ、計57体の試験を行った。増厚コンクリート強度は、母体コンクリート強度以上となっている。

これはコンクリート構造物を補修する場合、一般に母体(旧コンクリート)よりも増厚部(新コンクリート)の強度を高くすることが多いからである。試験体は、まず母体コンクリートを打設し、その後水中養生を行った。4週間後、打継ぎ面の処理ありのJPタイプのみ、打継ぎ面のレイタンスをワイヤーブラシで除去し平均2mmの凹凸を作り、表面洗い出しを行った。この時、打継ぎ面の処理なしのJNタイプは何の処理も行わなかった。次に増厚コンクリートを打設し、さらに4週間の水中養生を行った。一体打ちのMタイプに関しては、コンクリート打設後、8週間の水中養生を行った。実験に用いられたコンクリートの材料特性を表-2に、鉄筋の材料特性を表-3に示す。

載荷方法は図-3に示すように、センターホールジャッキを用いてD25の鉄筋に引張力を与える一方方向単調載荷である。試験体は下部の2点をローラー支持し、非試験区間側のコンクリート側面で反力をとった。鉄筋とコンクリートとの相対水平変位を計測するため、試験区間側端部(図-3、A位置)には変位計を設置した。

表-1 試験体の実験変数と実験結果

試験体名	実験変数		打継ぎ面の処理	実験結果				
	コンクリート目標強度 (MPa)			接着強度 (MPa)				一体打ちに対する割合 (%)
	母体	増厚部		No.1	No.2	No.3	平均	
30-30M	30	30	一体打ち	3.36	3.35	3.38	3.36	100
30-30JN			なし	2.33	2.25	*	2.29	68
30-30JP			あり	2.44	2.81	3.31	2.85	85
30-45JN		45	なし	2.38	2.37	2.07	2.27	68
30-45JP			あり	2.73	2.80	3.02	2.85	85
45-45M			45	一体打ち	3.75	4.50	4.09	4.11
45-45JN	なし	2.38		2.31	*	2.35	57	
45-45JP	あり	3.44		2.95	4.03	3.47	84	
45-70JN	70	なし		2.01	1.68	1.71	1.80	44
45-70JP		あり		3.69	3.70	2.90	3.43	83
45-100JN		100		なし	2.73	2.03	2.20	2.32
45-100JP	あり		4.34	3.43	2.99	3.59	87	
70-70M	70		一体打ち	7.32	7.49	*	7.41	100
70-70JN		なし	3.50	2.19	2.65	2.78	38	
70-70JP		あり	3.92	4.40	3.72	4.01	54	
70-100JN		100	なし	2.57	2.84	*	2.71	32
70-100JP			あり	4.50	4.04	4.25	4.26	57
100-100M			100	一体打ち	7.76	7.08	8.31	7.72
100-100JN	なし	*		-	-	-	-	
100-100JP	あり	*		*	-	-	-	

*は試験区間外における破壊などの理由で、接着強度が真の値より低く出ていると考えられる

表-2 コンクリートの材料特性

目標強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 ^{*1} (MPa)	弾性係数 ^{*2} (GPa)	
母体	30	26.8	2.81	24.9
	45	44.0	3.66	29.2
	70	76.5	4.86	33.5
	100	100.6	6.63	37.0
増厚部	30	29.5	2.77	22.5
	45	47.2	3.57	31.7
	70	71.6	4.20	33.7
	100	101.0	5.96	39.3

*1 引張強度は割裂試験より算出

*2 弾性係数は1/3割線弾性係数

表-3 鉄筋の材料特性

鉄筋の種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
D25	1000	1080	203
D10	347	507	186

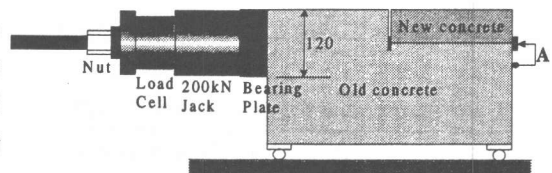


図-3 載荷方法

3. 実験結果

試験体のひび割れ性状を図-4に示す。ひび割れ性状は定性的に見て一体打ちと打継ぎ面があるものの2種類に分けられる。それぞれの代表例として、70-70Mと70-100JPの試験体を取り上げた。打継ぎ面のある場合、打継ぎ面に沿ってひび割れが発生している。しかし、一体打ちの場合は、ひび割れが多少蛇行し、場所によって複数観察される。

すべての試験体において、図-3, A位置に設置した変位計の相対水平変位量はほぼ0であったため、有用な荷重-変位曲線を得ることはできなかった。式(1)で示す付着応力は、本試験体における接着性能を示す指標であると考え、以後 τ を接着応力として議論を進める。

$$\tau = \frac{T}{(\phi \times l)} \quad (1)$$

τ : 接着応力 (MPa) T : 引張力 (N)

ϕ : 鉄筋周長=80mm l : 付着長さ=200mm

本実験における接着強度を表-1に示す。各接着強度は、平均接着強度の20%の範囲内に分布し、試験結果のばらつきは比較的大きい。これは材料強度そのもののばらつきと破壊形式の2つに起因すると考えられる。本試験体と同時に打設したシリンダーの圧縮試験結果は、平均強度の15%の範囲に分布した。さらに、Schmidt-Thrö型試験体の破壊形式は引張とせん断の混合モードであり、シリンダー試験における圧縮モードに比べて破壊がより局所化した為、圧縮試験よりもさらに試験結果がばらついたと考えられる。なお、表-1において同種類の3体中、破壊形式が他の2体と異なったものは*印で表わし、考察から除外した。表中最終列「一体打ちに対する割合」は、母体コンクリート強度と等しいコンクリート強度を持つ一体打ち試験体の平均接着強度に対する各タイプの平均接着強度の割合を示したものである。

図-5は、母体と増厚部のコンクリート強度が同一の試験体について、母体コンクリート強度と平均接着強度の関係を示している。母体が同一の強度であれば、平均接着強度は打継ぎ面の処理なし、処理あり、一体打ちの順に高くなる。また、打継ぎ面の処理が同じタイプの場合、母体強度が

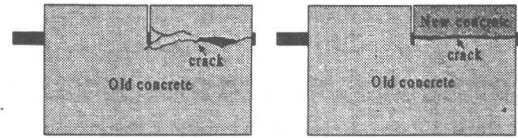


図-4 代表的なひび割れ性状

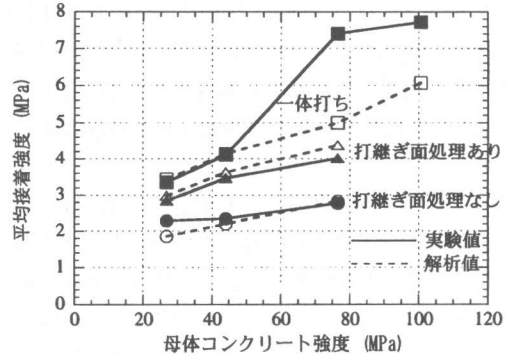


図-5 母体と増厚部のコンクリート強度が同一の場合の平均接着強度と母体コンクリート強度の関係

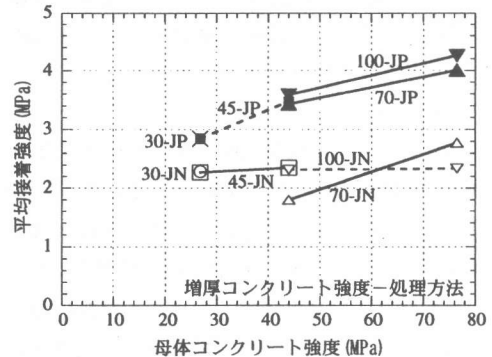


図-6 平均接着強度と母体コンクリート強度の関係

高くなるに従って、平均接着強度は高くなっている。しかし母体強度が高くなると、一体打ちの平均接着強度に対する打継ぎ面のある試験体の平均接着強度の比は小さくなっているが、この原因は次のように説明できる。コンクリート強度が高くなると混和剤などの影響で流動化が増し、打継ぎ面の凹凸が減少する。本実験では打継ぎ面が破壊面になるため、高強度コンクリートの破壊面面積が減少することになる。接着強度は破壊エネルギー

ギー G_F と破壊面面積の積の関数である。従って高強度コンクリートにおいて、打継ぎ面を持つ試験体の接着強度の一体打ちの接着強度に対する比は、普通コンクリートのそれに比べより小さくなる。

図-6は、母体コンクリート強度と平均接着強度の関係を示している。図中に表記している数字は増厚コンクリート強度、ハイフン後の記号は打継ぎ面の処理を示す。増厚部強度100MPaで打継ぎ面の処理をしていない試験体以外、増厚部強度が同一であれば母体強度の増加とともに接着強度が増加している。図-7は、増厚部コンクリート強度と平均接着強度の関係を示している。図中の数字は母体コンクリート強度を示す。増厚部強度が増加しても接着強度はほとんど増加していないか、もしくは低下している。本実験では、母体コンクリート強度を増厚コンクリート強度と等しいか、もしくは低く設定しており、この場合接着強度は母体強度に依存し、母体よりも高い強度を持つ増厚部には依存しないという結果が得られた。図-6及び図-7から、JPタイプで一番弱い試験体でもJNタイプで一番強い試験体より接着強度が大きく、処理の有無が接着性能に大きく影響することがわかる。

既存の研究では、Schmidt-Thró型試験体の実験結果は、実際のRC部材に適用できないことが指摘されている。そこで、梁、柱部材の付着強度算定式を用いて本試験体の接着強度を予想し、その値が実験値とどれだけ違っているかを確かめることにした。予想では、付着強度を求める藤井・森田式⁴⁾においてサイドスプリット型破壊を想定し、本試験体の付着耐力 τ_{cal} を求めた。一方、実験で得られた接着強度を τ_{exp} とし、二つの比 $\gamma = \tau_{exp} / \tau_{cal}$ とコンクリート強度との関係を、一体打ちの試験体について示したのが図-8である。図から γ の値は1.5~2.2倍であることがわかる。試験体数は少ないが、11体の点について最小二乗法を用いて直線近似すると次の式が得られた。

$$\gamma = 0.0062f'_c + 1.5 \quad (2)$$

ここで、 f'_c はコンクリート圧縮強度(MPa)であり、相関係数は0.72であった。この関係を用いれば、Schmidt-Thró型簡易付着試験法から得られた接着

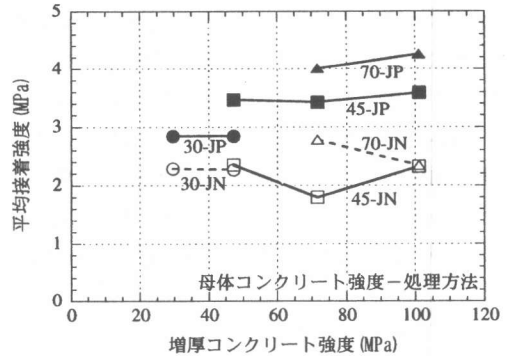


図-7 平均接着強度と増厚コンクリート強度の関係

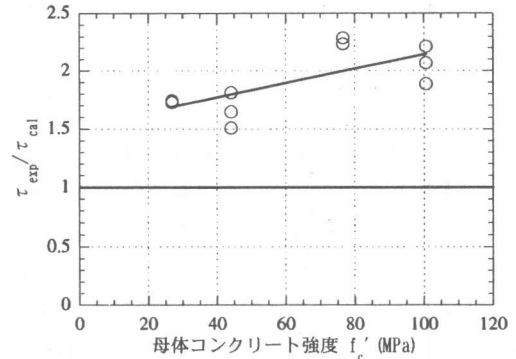


図-8 一体打ち試験体の接着強度実験値と予想値の比

強度を上式で求められる割合に応じて減ずること、柱、はりの付着割裂強度を予想することができる。

4. 解析

4.1 モデル化

次に、実験における破壊の進行状況を、コンクリートの引張軟化特性を用いて説明することにした。コンクリートのモデルには、内田ら⁵⁾による仮想ひび割れモデルを組み込んだ分布ひび割れモデルを用いた。引張軟化曲線には、図-9に示す1/4モデルを用いた。本解析では、用いた引張軟化曲線の w の値を固定しながら、破壊エネルギー G_F を打継ぎ面の処理方法に応じて一定の割合で低減させ、コンクリート強度の違う試験体の接着強度を予想することにした。さらに、実験では観察できなかった鉄筋の滑りやひび割れの進行状況

を把握するものとする。

解析では、 w は0.2mmで固定し、 σ_t と G_F の値は表-4に示す。本解析で打継ぎ面以外のコンクリートの σ_t の値は表-2に示すシリンダー割裂強度の2倍である。これは、試験体において3次元的に作用している抵抗機構を2次元モデルに置き換えることで、要素の抵抗力を上げなければ、

一体打ち試験体の最大耐力を無理なく予想できなかったためである。コンクリート部分の要素分割を図-10に示す。図中、鉄筋と同位置のコンクリートは、厚みが64mm、他の部分は88mmとした。用いた要素は三角形定ひずみ要素であり、打継ぎ面近傍の要素寸法は鉄筋リブ間隔と等しくなっている。実際の鉄筋リブ間隔は12mmであるが簡略化のため10mmとした。打継ぎ面は、同位置に存在する一層分のコンクリート要素で表現した。ただし、この部分の要素の G_F を打継ぎ面の処理状況に応じて一定の割合で減じてある。低減率は、表-4に示す12体の試験体における予想接着強度を、最も実験結果に近づけるようにして定められた。この結果 G_F の値は、一体打ちの G_F に比べ打継ぎ面の処理ありで20%減、処理無しで60%減であった。なお、 w の値を固定したので、 σ_t の値も G_F と同じ低減率で変化させたことになる。(表-4参照)

鉄筋からコンクリートへの力の伝達は、図-11(a)に示すように、コンクリートに対する鉄筋リブ部分のかみ合いを主にして、鉄筋とコンクリートとの化学的結合および摩擦などが要因と考えられる。これらを図-11(b)に示すような梁要素とトラス部材を組み合わせることで表わすことにした。鉄筋の中心軸位置に、D25鉄筋の軸方向引張りと曲げに関して等価な剛性を持つ梁要素を配置し、これらの梁要素の節点を、剛なトラス部材を用いて鉄筋の最上縁及び最下縁位置の節点(図-10中の黒丸)と結合する。本解析では、トラスの角度を既往の研究⁶⁾に基づき、1:2.5で固定した。こうすることで、鉄筋の滑りにより発生

表-4 解析に用いた変数と解析結果

試験体名	打継ぎ面以外のコンクリート		打継ぎ面部分のコンクリート		τ_{FEM} (MPa)	τ_{exp} (MPa)	τ_{FEM}/τ_{exp}
	σ_t (MPa)	G_F (N/mm)	σ_t (MPa)	G_F (N/mm)			
30-30M	5.62	0.225	-	-	3.44	3.36	1.02
30-30JN	5.62	0.225	2.25	0.090	1.86	2.29	0.18
30-30JP	5.62	0.225	4.50	0.180	2.99	2.85	1.05
45-45M	7.32	0.293	-	-	4.14	4.11	1.01
45-45JN	7.32	0.293	2.93	0.117	2.20	2.35	0.94
45-45JP	7.32	0.293	5.86	0.234	3.63	3.47	1.05
70-70M	9.72	0.389	-	-	5.00	7.41	0.67
70-70JN	9.72	0.389	3.89	0.156	2.84	2.78	1.02
70-70JP	9.72	0.389	7.78	0.311	4.38	4.01	1.09
100-100M	13.26	0.530	-	-	6.07	7.72	0.79
100-100JN	13.26	0.530	5.30	0.212	3.53	-	-
100-100JP	13.26	0.530	10.61	0.424	5.36	-	-

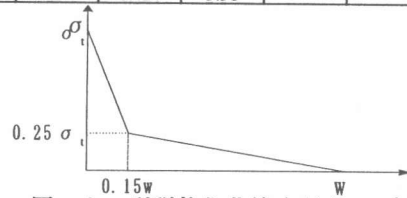


図-9 引張軟化曲線 (1/4モデル)

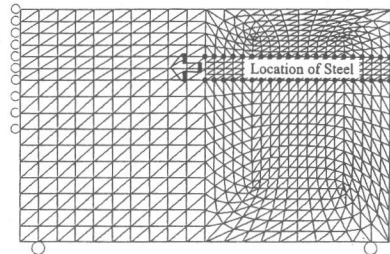


図-10 有限要素法で用いた要素分割

するせん断力と割裂力を表わした。実際は、こうした応力伝達が3次元で行われている。鉄筋のアンボンド部分が、打継ぎ面の応力伝達に与える影響は小さいと考え、この部分の鉄筋のモデル化は行っていない。同位置では、鉄筋の代わりに周囲と同じコンクリートが連続して存在しているものとしてモデル化した。つまり、鉄筋は試験区間のみ配置した。そこで、加力は図-10における試験区間の鉄筋の左側(矢印位置)に強制変位を与えることで代用した。

4.2 解析結果

本論文では、母体と増厚部のコンクリート強度が等しい試験体で、打継ぎ面の処理方法が異なる12体についての解析結果を報告する。解析で得られた接着強度とスリット位置での鉄筋の滑り量の関係を、コンクリート強度が30MPaの試験体について図-12に示す。打継ぎ面の処理に関わらず、滑りの増加とともに剛性が低下し、滑りが0.1mm

に達する前に最大耐力に到達する様子がわかる。

最大耐力を12種類の試験体について計算した結果が表-4と図-5に示されている。30-30JN, 70-70M, 100-100Mの3タイプを除くと計算値の誤差は10%以内であり、全体的には良好な結果であると考えられる。ただし、図-5からも明らかなように、高強度コンクリートを用いた一体打ちの実験結果は、残りの実験結果から類推される以上に接着強度が高いと考えられ、モデルはこの現象を表わし得なかった。この領域については、破壊のメカニズムを見直すなどの改良の余地がある。

5. 結論

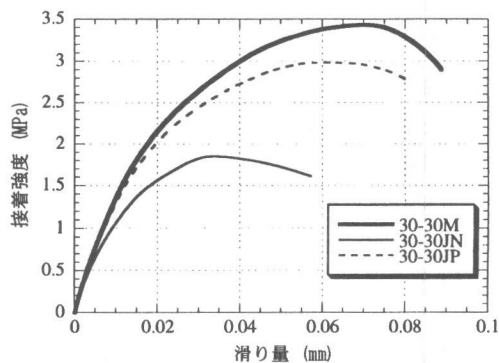
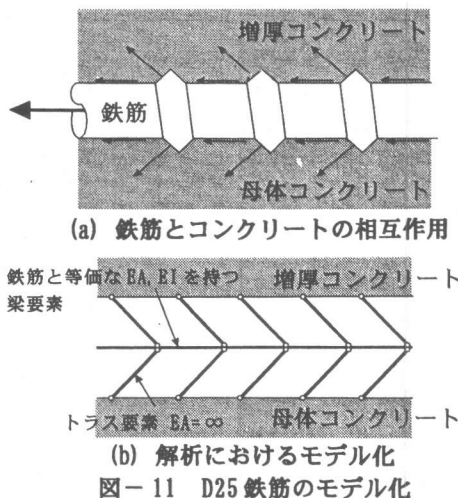
本研究から次の結論を得た。

- (1) 新旧コンクリート間の接着強度は、強度の低い方のコンクリートに依存し、母体コンクリート強度が同一であれば接着強度は打継ぎ面の処理なし、処理あり、一体打ちの順に大きくなる。
- (2) Schmidt-Thrö型簡易付着試験は、梁や柱部材を用いた試験より作製や実験装置が大幅に簡素化できる。このようにして得られた接着強度は、式(2)で求められる割合に応じて減ずることで、柱や梁部材の付着割裂強度を予想できる。
- (3) 分布ひび割れモデルを用いた有限要素法により、Schmidt-Thrö型試験体の接着強度の予想がコンクリート強度45MPaまでの試験体では可能である。コンクリート強度が45MPaより高い試験体については、予想が実験値を下回る傾向がありモデル改良の余地がある。

【謝辞】本研究で用いた有限要素法プログラムは、岐阜大学工学部土木工学科の内田裕市氏に提供して頂きました。また、数値解析の過程において辻本義伸氏(株)清水建設)と磯脇龍作君(本学学生)には多大な助力を得ました。ここに深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 角 徹三ほか: 付着割裂試験法による増厚コンクリートの付着性能評価, 日本建築学会東海支部研究報告, pp.153-156, 1990.2
- 2) 角 徹三: 付着割裂試験法によるコンクリー



ト打継ぎ面の接着性能評価, 日本建築学会学術講演梗概集(東海), pp.651-652, 1994.9

3) 辻本義伸ほか: 付着割裂試験法によるコンクリート打継ぎ面の接着性能評価(その2), 日本建築学会学術講演梗概集(近畿), pp.609-610, 1996.9

4) 藤井 栄ほか: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究-第2報 付着割裂強度算定式の提案-, 日本建築学会論文報告集, pp.45-52, 1983.2

5) 内田裕市ほか: 仮想ひびわれモデルを組込んだ分布ひびわれモデルによるコンクリートひびわれの有限要素解析, 土木学会論文集No.466 V-19, pp.79-88, 1993.5

6) 鶴田真一ほか: コンクリート打継ぎ面における接着性能のモデル化, 日本建築学会東海支部研究報告, pp.253-256, 1998.2