

論文 引張軟化曲線によるコンクリート打継ぎ部の付着性状の評価

栗原哲彦*¹・安藤貴宏*²・内田裕市*³・六郷恵哲*⁴

要旨：コンクリートの打継ぎ部の性能を評価するために、従来の曲げ強度による評価法に加え、コンクリートの引張軟化曲線および破壊エネルギーを用いた新たな評価法を試み、この両者の評価方法について比較検討を行なった。その結果、打継ぎ部の引張軟化曲線の初期の応力低下の度合に付着性状の差が明確に現れた。また、曲げ強度のみからでは判断しにくい場合でも破壊エネルギーを用いることにより、付着性状を評価できることが分かった。

キーワード：打継ぎ部、付着性状、引張軟化曲線、多曲線近似解析

1. はじめに

コンクリート構造物を建設する場合には、一般に打継ぎ部が設けられている。打継ぎ部は、打継ぎ部を有さないものと同程度の性能を有していることが望ましく、これまで打継ぎ部に関する多くの研究が行われてきた[1]。コンクリートの打継ぎ部の付着性能を評価するためには打継ぎ部の直接引張試験を行なえばよいが、一般に試験が困難であり、通常は曲げ試験により評価されている。一方、コンクリートのひび割れの進展に伴う破壊現象は、引張軟化曲線（ひび割れ幅とそのひび割れ間で伝達される引張応力との関係）や破壊エネルギー（単位面積あたりのひび割れを形成するのに必要なエネルギー）で表わされるコンクリートの引張軟化特性を数値解析に組み込むことにより、解析的に説明されるようになってきた。

本研究では、打継ぎ部の付着性状について曲げ強度による評価法に加え、コンクリートの引張軟化曲線および破壊エネルギーを用いた新たな評価法を試み、この両者の評価方法について比較検討を行なった。

2. 実験概要

普通コンクリートを用い、供試体中央部に打継ぎ部を設けた供試体を、比較のため打継ぎのない供試体を含め、表-1に示すように計22体作製した。各はり供試体は、表-1に示した配合番号のコンクリートにより作製した。表-2にコンクリートの示方配合を示す。セメントには比重3.12の早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材には最大骨材寸法15mmの玉砕石（表乾比重：2.63、粗粒率：6.53）を使用した。はり供試体の寸法は、幅10×高さ20×長さ120cmとした。打継ぎ方向は、図-1に示すように打設方向に鉛直のもの（水平）と平行のもの（鉛直）の2種類とした。打継ぎ面の種類としては、ワイヤーブラシによる洗出し処理を行なったものと処理してないもの、および打継ぎ部を持たないはりの曲げ載荷試験後の破断面にそのまま打継ぐものの計3種類とした。以下、供試体は表-1に示したシリーズ名で呼ぶこととする。また、配合①、②、③の試験時材齢における強度試験結果を表-3に示す。

* 1 岐阜大学助手 工学部土木工学科、工修（正会員）

* 2 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

* 3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

* 4 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

表-1 はり供試体

シリーズ名	コンクリート 旧&新*	打継ぎ 方向	表面 処理法	供試体寸法 (cm) 幅×高さ×長さ	本数
NJ	②	-	-	10×20×120	4
HJ	② & ③	水平	破断面		4
HW	① & ②	水平	洗出し		4
VW	① & ②	鉛直	洗出し		5
HNW	① & ②	水平	無処理		5

*1: 表-2 に示す番号の配合で打設した

表-2 コンクリートの示方配合

配合 番号	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad.
①	2.0	50.4	173	343	789	1031	1.026
②	2.5	50.4	172	341	787	1029	1.024
③	2.2	50.6	172	340	785	1026	1.021

Ad: AE 減水剤

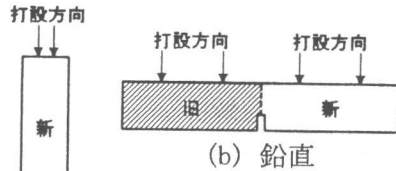


図-1 打継ぎ方向と打設方向

(a) 水平

表-3 強度試験結果

配合 番号	強度 (kgf/cm ²)			弾性係数 (kgf/cm ²)	材齢 (日)
	圧縮	引張	曲げ		
①	464	35.9	41.7	2.84×10^5	13
②	436	39.3	44.0	3.18×10^5	12
③	426	35.5	42.1	3.24×10^5	14

荷重方法は図-2 に示すような4点曲げ荷重 (せん断スパン: 40cm、モーメントスパン: 20 cm) とした。供試体中央の打継ぎ部には、供試体の破断が打継ぎ部で生じるようにするために、コンクリートカッターによりはり高さの1/3の切欠きを設けた。荷重試験は材齢12~14日の間に行ない、荷重、荷重点変位、供試体下面の切欠き口の開口変位 (CMOD) をそれぞれロードセル(容量 10tonf)、高感度変位計 (感度 1/1000mm)、クリップゲージ (感度 1/400mm) により測定した。

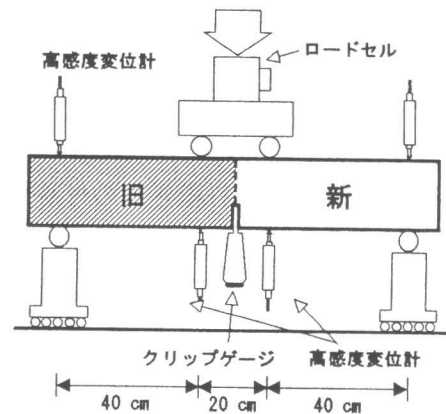


図-2 荷重方法

3. 解析概要

筆者ら[2]は、曲げ荷重試験から引張軟化曲線を推定する橋高らの提案した多直線近似解析手法[3]に基づき、供試体中央に仮想ひび割れモデルを組み込んだFEM解析を用いた引張軟化曲線の自動推定プログラムを作成し報告している。この推定法は、ひび割れ発生後、ひび割れが1節点ずつ進展するごとに逐次引張軟化曲線を仮定し、解析値と実験値とが一致するように引張軟化曲線を推定するものである。コンクリートは線形弾性体 (ポアソン比: 0.2) とし、弾性係数は、供試体の両側のコンクリートの実測値の平均を用いた。引張軟化曲線の推定には、荷重- (荷重点) 変位曲線および荷重-CMOD曲線を用いた。

4. 実験結果および考察

図-3~7の(a)、(b)に実験により得られた荷重-変位曲線と荷重-CMOD曲線 (ともに、細かい実線) を示す。なお、図中には、荷重-変位曲線と荷重-CMOD曲線の平均曲線 (太い実線) も示す。なお、曲げ最大荷重点までしか実験値が計測されていないものについては、平均化の

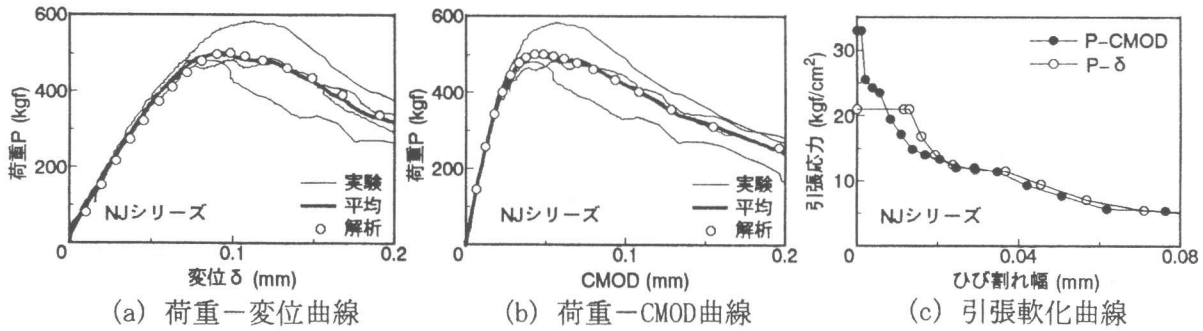


図-3 NJシリーズの実験および解析結果

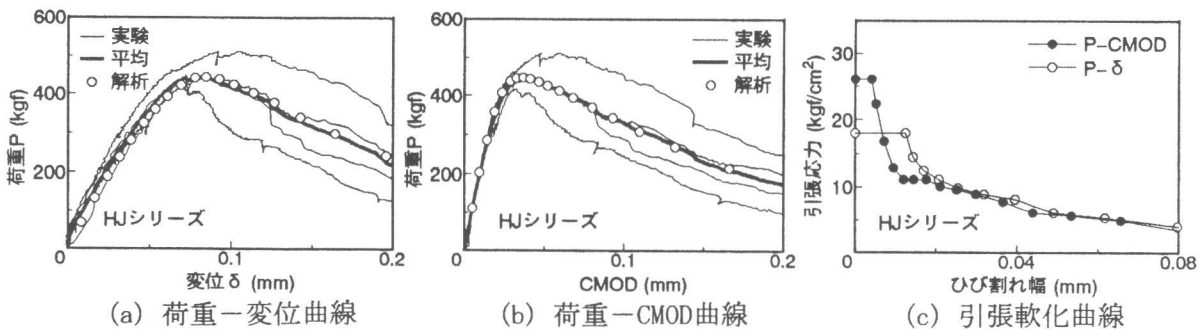


図-4 HJシリーズの実験および解析結果

処理から除外した。曲げ最大荷重点以降も計測されているものについては、実験値が存在する区間までは平均化の処理に含め、それ以降は除外して平均した。また、HNWシリーズについては、曲げ最大荷重点以降の実験値が一つしかないため、平均化の処理は行わず、計測された1本を後述する解析用の平均曲線とした。なお、図-7においては、便宜上計測された1本を平均(1本)と表現する。計測結果は、ばらつきの大きな結果となった。

各シリーズの曲げ強度と、打継ぎ部を持たないNJシリーズを基準としたそれらの比を表-4に示す。なお、表に示す数値は、ロードセル、載荷ビーム等の重量と供試体の自重を考慮して修正したものある。曲げ強度は、NJシリーズが 37.4 kgf/cm^2 と最も高く、HJ、HW、VWシリーズの順に低くなり、HNWシリーズでは 16.5 kgf/cm^2 と最も低くなった。HJシリーズは、NJシリー

表-4 実験および解析結果

シリーズ名	曲げ強度 1* ¹ (kgf/cm ²)	曲げ強度 2* ² (kgf/cm ²)	破壊エネルギー-(kgf/cm)		曲げ強度比 1* ⁵	曲げ強度比 2* ⁵	破壊エネルギー-比* ⁵	
			P-δ* ³	P-CMOD* ⁴			P-δ	P-CMOD
NJ	37.4	36.8	0.0420	0.0377	1.00	1.00	1.00	1.00
HJ	32.4	31.6	0.0360	0.0303	0.866	0.859	0.857	0.804
HW	24.7	25.4	0.0280	0.0260	0.660	0.690	0.667	0.690
VW	22.4	19.8	0.0128	0.0154	0.599	0.538	0.305	0.408
HNW	16.5	12.1	0.00696	0.00611	0.441	0.329	0.166	0.162

*1: すべての供試体の実験値の最大荷重から算出したもの

*2: 平均曲線の最大荷重から算出したもの

*3: 荷重-変位曲線から推定した引張軟化曲線のひび割れ幅 0.02 mm までの面積

*4: 荷重-CMOD 変位曲線から推定した引張軟化曲線のひび割れ幅 0.02 mm までの面積

*5: 各シリーズの曲げ強度 1、2 および破壊エネルギーを NJ シリーズの値で除したもの

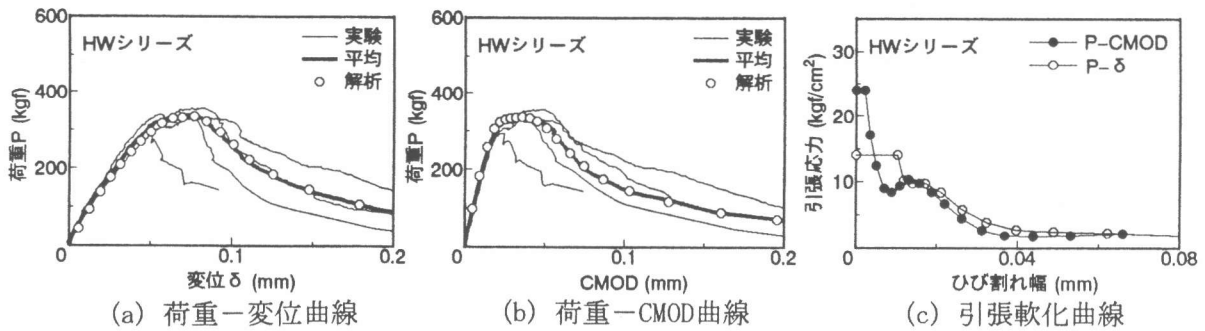


図-5 HWシリーズの実験および解析結果

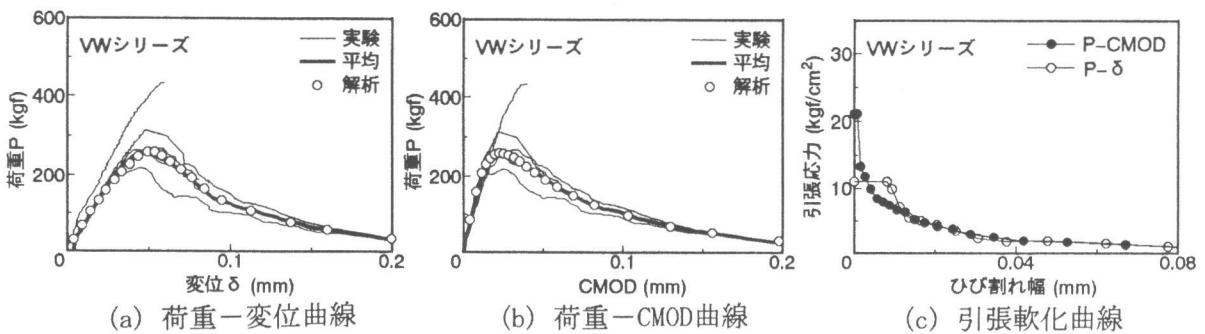


図-6 VWシリーズの実験および解析結果

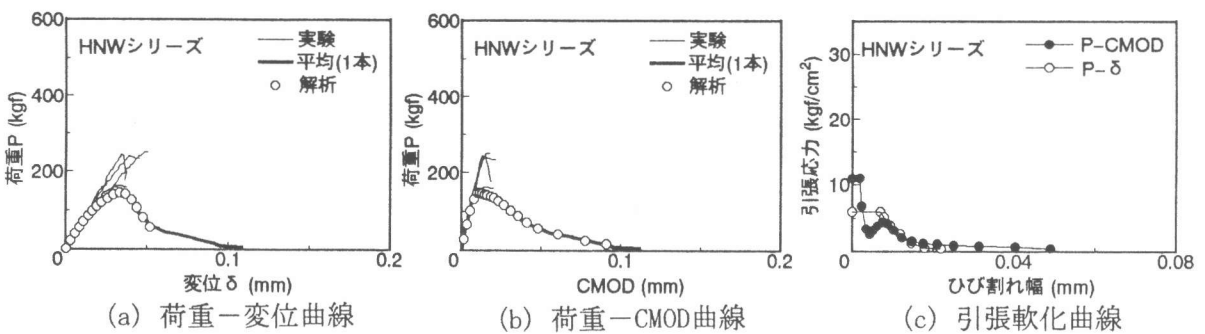


図-7 HNWシリーズの実験および解析結果

ズの曲げ載荷試験後の破断面が打継ぎ面であり最も荒かったことが、曲げ強度が高くなった理由であると考えられる。HWおよびVWシリーズは、ワイヤブラシで洗い出しを行なったが、HJシリーズ程の面の荒さがないことからNJシリーズの7割程度の曲げ強度となった。つまり、打継ぎ部に打継ぎ部を有さないものと同程度の性能を保持させるには、打継がれる面を破断面に近い荒さにする必要があると考えられる。HWとVWシリーズについては、それぞれ 24.7、22.4kgf/cm² となり、試験結果のばらつきを考慮すると曲げ強度からは明確な差は認められなかった。

5. 解析結果および考察

各平均曲線を用いて推定した引張軟化曲線を図-3～7の(c)に示す。なお、曲げ最大荷重点以降の実験値が一つしかないHNWシリーズでは、計測された1本を引張軟化曲線推定用に用いた。推定された引張軟化曲線を見ると、実験値が一つしかないHNWシリーズを除いて、荷重-変位曲線および荷重-CMOD曲線から推定された2つの引張軟化曲線は、軟化開始初期では差がある

ものの、概形はおよそ同じものが得られた。

各シリーズの荷重-CMOD曲線から推定された引張軟化曲線を比較したものを図-8に示す。図から分かるように、各シリーズごとに引張軟化曲線に打継ぎ部の附着性状の違いが現れている。また、同図においてひび割れ幅の増大に伴う応力低下が小さいほどひび割れ抵抗性が優れていることになり、NJシリーズが最もひび割れ抵抗性に優れ、HNWシリーズは、ほとんどひび割れ抵抗性を有していないことが分かる。

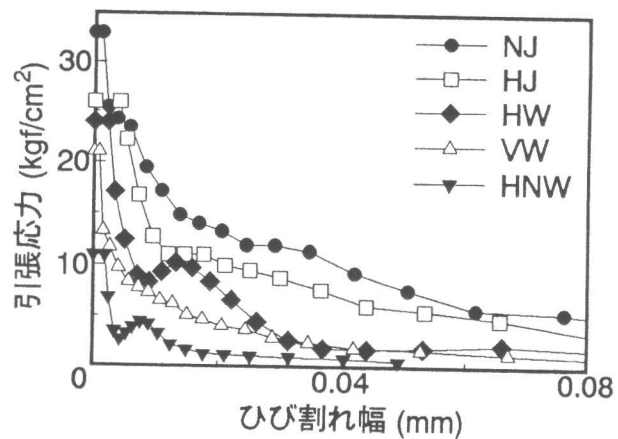


図-8 引張軟化曲線の比較

荷重-変位曲線および荷重-CMOD曲線から得られたそれぞれの引張軟化曲線において、ひび割れ幅 0.02 mmまでの引張軟化曲線下の面積（破壊エネルギー）を算定し、NJシリーズを基準とした破壊エネルギー比を表-4に併記する。引張軟化曲線の縦軸に近い領域の面積が大きいほど最大荷重が大きくなることが知られており[4]、ここでは便宜上 0.02 mmのひび割れ幅までの面積で比較した。破壊エネルギーの大小関係は、曲げ強度の場合と同じとなり、HNWシリーズが最も小さくなった。HWおよびVWシリーズを比較すると、曲げ強度では明確な差は認められなかったが、破壊エネルギー比ではそれ以上の差が現れ、VWシリーズの方が明らかに小さくなった。他のシリーズについても曲げ強度比以上の差が破壊エネルギー比に現れている。これより、附着性状を評価するうえでは、破壊エネルギー比の方が、曲げ強度比より敏感であると考えられる。

6. 強度の寸法効果の予測

荷重-CMOD曲線から推定された引張軟化曲線を用いて、供試体の寸法が変化したときの曲げ強度の寸法効果について解析的に検討した。解析対象をはり高さが変化する正方形断面を有するはりとし、スパンをはり高さの3倍とし、3等分点載荷されたものと仮定した。図-9に解析で得られた曲げ耐力から算出した曲げ強度とはり高さとの関係を示す。なお、図中には、最も一般的な普通コンクリート（引張強度：30 kgf/cm²、破壊エネルギー：0.1 kgf/cm）を対象に、筆者らが提案している曲げ強度の寸法効果式[5]より算出した結果（○）もあわせて示す。

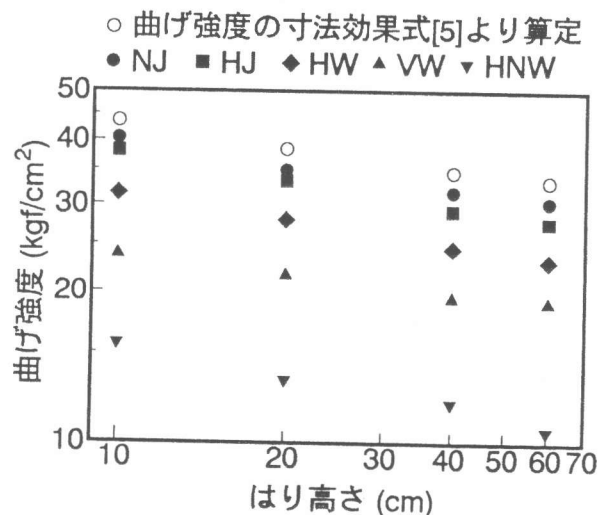


図-9 曲げ強度とはり高さ

図-9より、すべてのシリーズで強度の寸法効果が解析的に認められ、打継ぎ部を持たないNJシリーズ（●）は、曲げ

強度の寸法効果式から得られた一般的な普通コンクリートの強度の寸法効果とほぼ同じ傾きで減少した。その他のシリーズでも、若干傾きが緩やかなものもあるが、互いにほぼ平行に曲げ強度が減少している。ただし、HNWシリーズでは、若干傾きが大きくなり、はり高さ 60 cmで曲げ強度が 10 kgf/cm²程度まで低下した。このように引張軟化曲線を用いることにより、実際には、実験が困難な寸法の大きい部材に対しても強度予測が容易となり、この点からも引張軟化曲線を推定する有効性が認められる。

7. まとめ

コンクリート打継ぎ部の付着性状について、曲げ強度による評価と、引張軟化曲線を用いた評価の2つの評価方法で検討を行なった。以下に、本研究で得られた結果をまとめる。

- (1) 打継ぎ部を持たないものまで曲げ強度を向上させることは困難であるが、本実験の範囲では、打継ぎ部のある供試体の中で曲げ載荷試験後の破断面をそのまま打ち継いだ供試体が最も曲げ強度が高かった。
- (2) 推定された打継ぎ部の引張軟化曲線に、打継ぎ部の付着性状の違いが現れることが分かった。
- (3) 打継ぎ方向の異なるHWおよびVWシリーズでは、ばらつきを考慮した場合、曲げ強度比では、その値に大きな差が認められず、明確に付着性状の違いを説明することができなかった。しかし、引張軟化曲線や破壊エネルギーを用いることにより、両者に曲げ強度比以上の差が現れ、VWシリーズの方が付着性状が劣っていることが明らかとなり、引張軟化曲線を用いることの有効性が確認された。
- (4) 引張軟化曲線を用いれば、供試体の寸法が変化した場合の強度予測が容易であり、本研究で行った強度の寸法効果の予測は、一般的な普通コンクリートとほぼ同じ傾きで減少することが明らかとなった。

参考文献

- [1] 例えば、辻 幸和、田中浩一、古澤政夫、森脇貴志：鉛直・水平打継目をもつRCはりの力学的性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 2、No. 2、pp. 209-214、1990.
- [2] 栗原哲彦、安藤貴宏、国枝 稔、内田裕市、六郷恵哲：多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状、土木学会論文集、No. 532/ V-30、pp. 119-129、1996. 2.
- [3] 橘高義典、上村克郎、中村成春：コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析、日本建築学会構造系論文集、第453号、pp. 15-25、1993.
- [4] Alvaredo, A. M. and Torrent, R. J. : The effect of the shape of the strain-softening diagram on the bearing capacity of concrete beams, Mater. Struct., Vol. 20, pp. 448-454, 1987.
- [5] 内田裕市、六郷恵哲、小柳 洽：コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討、土木学会論文集、No. 442/V-16、pp. 101-107、1992.