

破断したPC鋼材を有するPC梁の曲げ性状に関する解析的検討

埼玉大学 学生会員 工学 ○徳田 裕美
 埼玉大学 正会員 工博 睦好 宏史
 埼玉大学 正会員 工修 横田 敏広

Abstract : In Japan, many infrastructures were built during the rapid economic growth period. Therefore, the number of bridges that have been over 50 years old has increased in recent years. However, it is impossible to completely repair all of those bridges due to lack of money and people for maintenance or rebuild. For that reason, in the maintenance and management of bridges, it is required to accurately evaluate the safety of bridges and to repair effectively and efficiently. But a method to evaluate performance of deteriorated prestressed concrete (hereafter PC) bridges is not well established yet. In this research, we conducted some experiments to clarify the flexural behavior of PC beams with ruptured PC tendons and also investigated influence of insufficiently filling of grout, which is a problem in real structures. And also aimed to establish an analytical method that accurately evaluates the remaining strength of deteriorated PC beams.

Key words : Ruptured PC tendon , Insufficiently filling of grout , Fiber model analysis

1. はじめに

日本では、社会基盤インフラの多くが高度経済成長期に整備された。それらの老朽化は一斉に進み、近年、補修や架替えが必要な橋梁の数は増え続けている。しかし、費用や人材などの不足により、それらの橋梁すべてに対して完全な補修・補強を行うことは困難である。そのため、橋梁の維持管理においては、現存する橋梁の安全性を正確に評価し、効果的かつ効率的に補修・補強を進めることが求められている。とくにプレストレストコンクリート（以下PC）橋は、PC鋼材の損傷や破断が落橋につながる可能性が高く、適切に安全性を評価する必要があるが、PC鋼材が損傷・破断した場合のPC橋について、その安全性を精度良く評価する手法は確立されていない。

本研究では、PC鋼材を人為的に切断したPC梁の曲げ載荷実験を行い、破断したPC鋼材を有するPC梁の曲げ性状を定量的に明らかにした。実構造物においては、グラウト施工不良の事例が数多く確認されていることから、グラウト未充填区間の影響やグラウト再注入の有用性についても検討を行った。また、ファイバーモデル解析を用いて残存性能を評価する解析手法を検討し、PC鋼材の破断に伴うプレストレスの損失を考慮した解析手法を開発した。

2. 曲げ載荷実験

2.1 曲げ載荷実験概要

破断したPC鋼材を有するPC梁の曲げ性状を明らかにするため、図-1、図-2に示す供試体を製作し、曲げ載荷実験を行った。PC鋼材の破断が梁全体に及ぼす影響を明らかにするため、3本配置したPC鋼材を人為的に切断し、PC鋼材の破断現象を模擬した。表-1に示すように、PC鋼材の切断位置、

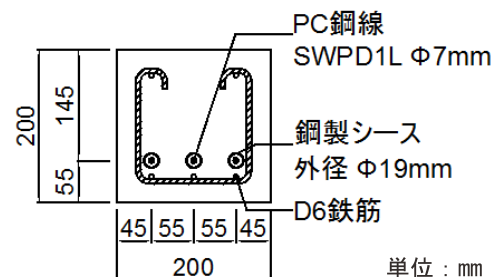


図-1 供試体断面図

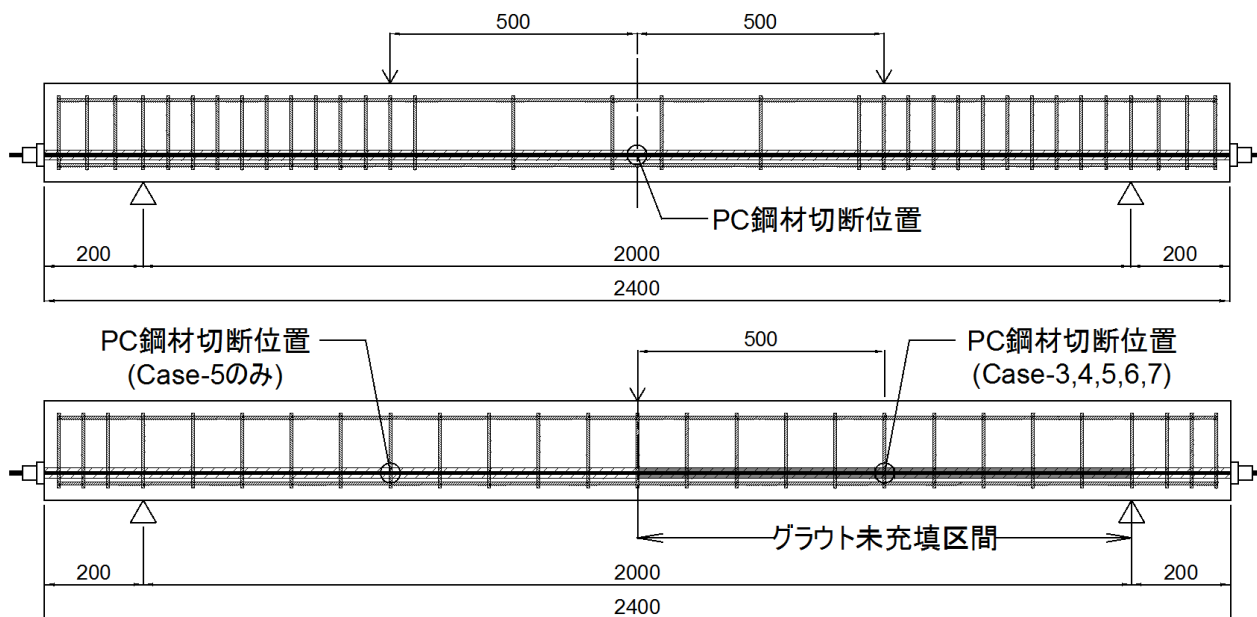


図-2 供試体側面図 (上 : Case-1, 2 , 下 : Case-3, 4, 5, 6, 7) 単位 : mm

表-1 供試体条件

	PC 鋼材切断位置	PC 鋼材切断本数	グラウト充填状況	載荷位置
Case-0	支間中央	切断なし	完全に充填	支間中央から 500mm の位置 (2 点載荷)
Case-1		1		
Case-2		2		
Case-3	支間中央から 500mm の位置	1 (2 箇所)	未充填区間あり	支間中央 (1 点載荷)
Case-4				
Case-5		2	再充填	
Case-6				
Case-7				

切断本数および載荷位置を実験要因とした。Case-0, 1, 2, 3, 4, 5は、プレストレス導入後にグラウトを充填し、Case-0を除く供試体は、グラウト硬化後に小径 (φ15mm) のコンクリートコアドリルを用いて供試体側面からPC鋼材を切断した。

また、グラウトの充填不良がPC鋼材の劣化要因となっている事例が多いことから、Case-6, 7ではグラウト未充填区間を設け、グラウト未充填区間内のPC鋼材を切断した。グラウト未充填区間は、境界面にスポンジを詰め、グラウトの流入を防ぐことにより作製した。Case-7では、PC鋼材切断後にグラウト未充填区間にグラウトを再充填し、グラウト再充填が曲げ耐力に与える影響を検討した。

表-2に、供試体の作製に用いたコンクリート、グラウト、D6鉄筋 (SD345) およびPC鋼材 (SWPD1L) の諸元および導入プレストレスを示す。使用したPC鋼材はφ7mmの単線で、付着を確保するために図-3のようなインデント付きのPC鋼材を用いた。PC鋼材の緊張は、各PC鋼材に貼り付けたひずみゲージで測定したひずみ値を基準として行い、表-2に示した各供試体の導入プレストレス力は、3本のPC鋼材に導入したプレストレス力の平均から算出したものである。



図-3 インデントPC鋼材

表-2 材料諸元・導入プレストレス力

		Case-0	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6	Case-7
コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)		54.9	56.5	56.6	57.4	56.3	57.7	42.7	42.1
グラウト圧縮強度 (N/mm ²)		74.4	91.0	89.9	93.5	94.0	89.1	64.4	65.8
鉄筋	降伏応力 (N/mm ²)	475							
	弾性係数 (kN/mm ²)	215							
PC鋼材	公称断面積 (mm ²)	38.48							
	降伏応力 (N/mm ²)	1435							
	引張強度 (N/mm ²)	1653							
	導入プレストレス (N/mm ²)	758	809	721	782	830	743	786	790

2.2 曲げ載荷実験結果

曲げ載荷実験の結果を図-4に示す。また、曲げ載荷実験時の最大作用モーメントと、PC鋼材切断断面の断面計算より算出した抵抗モーメントとの比較を表-3に示す。健全な供試体であるCase-0のモーメントを100%として比較した。作用モーメントが最大となる支間中央にPC鋼材の切断箇所があるCase-0, 1, 2では、PC鋼材切断本数の増加に伴い、1本切断したCase-1は71.4%、2本切断したCase-2は48.4%に最大作用モーメントが減少した。この減少量は、断面計算より算出した抵抗モーメントの減少量とほぼ一致している。また、PC鋼材切断位置付近で梁上縁のコンクリートが圧縮破壊に至った。これより、最大作用モーメントが作用する範囲内にPC鋼材の破断が起きたとき、PC鋼材の破断が梁の耐力低下に直結すると言える。

一方、Case-4, 5は、PC鋼材の切断箇所ではなく、切断箇所から500mm離れた荷点で上縁コンクリートの圧縮破壊に至り、最大作用モーメントは、PC鋼材の切断本数にかかわらず、健全な供試体Case-0の約90%となった。これは、断面計算により算出した抵抗モーメントよりもはるかに大きい値である。PC鋼材を切断したにもかかわらず耐力が大幅に低下しなかった理由として、PC鋼材の切断により切断位置ではPC鋼材とグラウト間の付着力が低下したが、切断位置から500mm離れた荷点付近では、健全状態に近い付着力が働いていたことが考えられる。しかし、最大作用モーメントは健全状態から約10%低下しており、終局時には、荷点付近で完全な付着が確保できていないことが分かる。これは、後述の付着試験結果からも分かることであるが、終局時にはPC鋼材の降伏応力以上の張力が働いたため、

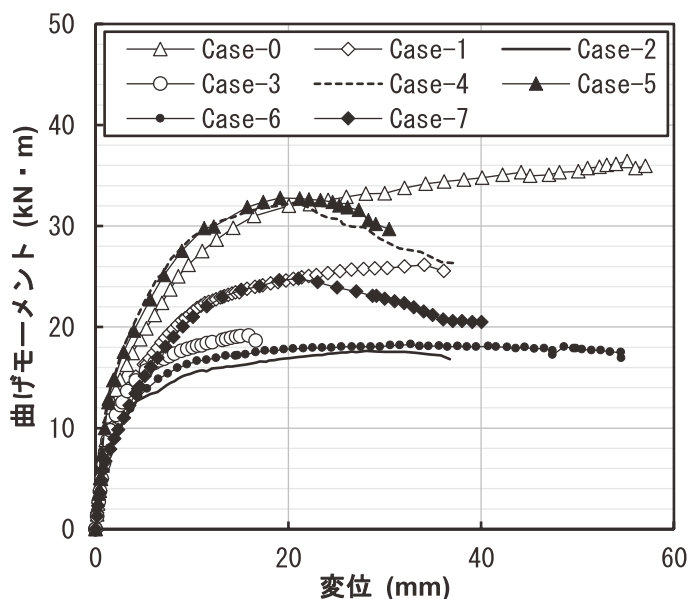
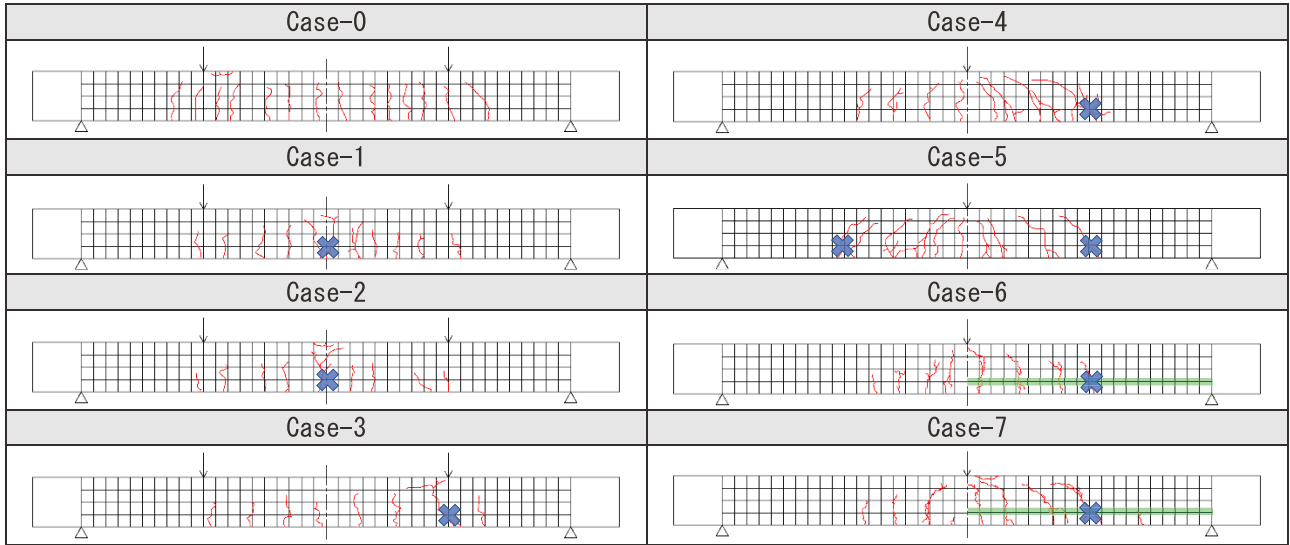


図-4 曲げモーメント-変位関係

表-3 載荷試験結果と断面計算結果の比較

	実験値		計算値	
	作用モーメント (kN・m)	(%)	抵抗モーメント (kN・m)	(%)
Case-0	36.4	(100 %)	32.6	(100 %)
Case-1	26.0	(71.4 %)	24.9	(76.4 %)
Case-2	17.6	(48.4 %)	17.0	(52.1 %)
Case-3	19.2	(52.7 %)	17.0	(52.1 %)
Case-4	32.3	(88.7 %)	17.0	(52.1 %)
Case-5	32.8	(90.1 %)	24.9	(76.4 %)
Case-6	18.3	(50.3 %)	17.0	(52.1 %)
Case-7	24.8	(68.1 %)	17.0	(52.1 %)

表-4 ひび割れ図



✳ : PC鋼材切断位置 ■ : グラウト未充填区間

十分な付着を確保するためには900mm以上の長さが必要になるためと考えられる。Case-5, 6では、載荷点からPC鋼材切断断面までの距離が500mmであり、十分な長さが確保できていない。そのため、載荷点付近では完全な付着は確保できておらず、抵抗モーメントは、健全状態からわずかに減少したものと考えられる。これより、PC鋼材の破断箇所が最大モーメントの作用箇所から十分に離れているとき、PC鋼材の破断は、梁の耐力に大きな影響を及ぼさない場合があることが明らかになった。

また、グラウト未充填区間を設けたCase-6の最大作用モーメントが50.3%であるのに対し、グラウト未充填区間にグラウトを再注入したCase-7では68.7%まで耐力が回復している。グラウトが完全に充填されている状態でPC鋼材を切断したCase-4の作用モーメントは88.7%であるため、完全には回復していないが、PC鋼材が破断した後であっても、グラウトの再充填が、ある程度の力学的な性能を回復させるために有効な手段であることが分かった。

3. PC鋼材の付着実験

PC鋼材の切断によるPC鋼材とグラウト間の付着力の低下が考えられるため、図-5のような供試体を製作し、PC鋼材の付着試験を行った。付着試験の供試体は、曲げ載荷実験の供試体と同様にシース内にPC鋼材を配置し、グラウト硬化後にセンターホールジャッキを用いてPC鋼材に引張力を与えた。PC鋼材には100mm間隔でひずみゲージを貼り付けてあり、各引張力段階でのひずみを計測した。

付着試験の結果を図-6に示す。図-6のひずみ分布より、表-2のプレストレスに相当する引張力(約30kN)を与えたときは500mm程度、PC鋼材の降伏応力に相当する引張力(約55kN)に対しては900mm程度で付着が確保できることが分かった。これより、PC鋼材の切断がPC鋼材とグラウト間の付着低下に影響を及ぼす範囲は、PC鋼材に働く引張力によって変化するため、載荷段階に応じて、それぞれに適切な影響範囲を考慮する必要があると考えられる。

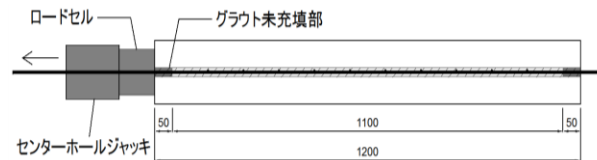


図-5 付着試験供試体 単位: mm

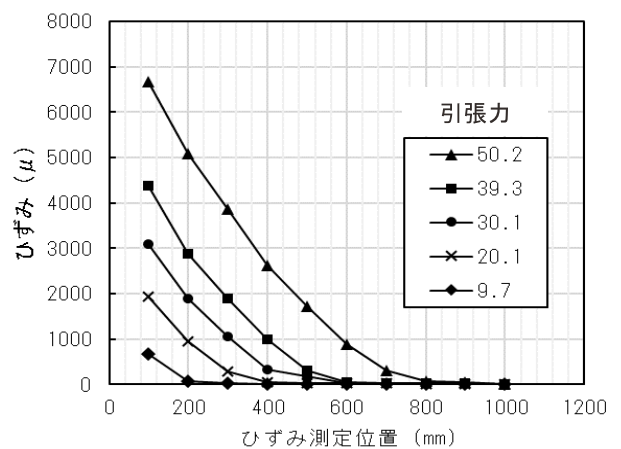


図-6 付着試験結果

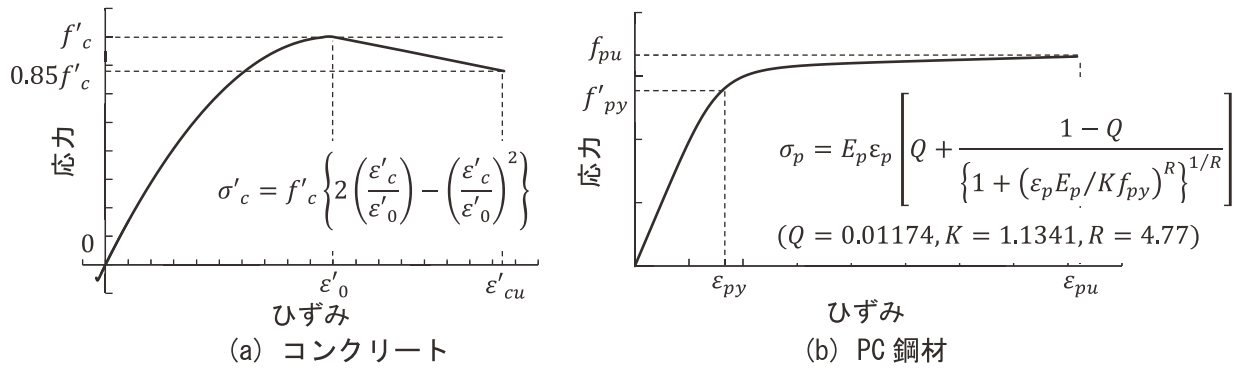


図-7 材料のモデル化

4. ファイバーモデルによる解析

4.1 PC鋼材破断に伴う付着低下

『2. 曲げ載荷実験』より、PC鋼材とグラウト間の付着力が梁の曲げ耐力に大きく影響することが明らかになったため、以下に述べる2点を考慮した解析モデルを検討した。

- ① PC鋼材の切断によって付着力が低下する。
- ② 低下した付着力はある程度の距離で回復し、PC鋼材が引張抵抗材として正常に機能する。

なお、解析にはファイバーモデルを用いており、供試体を軸方向に44の断面に分け、各断面を100のファイバー要素に分割した。コンクリートおよびPC鋼材には、図-7の応力ひずみモデルを適用した。

図-8(a)はCase-2のモデルを示しており、作用モーメントが抵抗モーメントを上回った荷重および位置で破壊に至るものとした。PC鋼材の切断断面では、PC鋼材の切断により導入したプレストレスが部分的に失われることが考えられるため、切断したPC鋼材が受け持つ力を0%とする。すなわち、PC鋼材切断断面における梁の抵抗モーメントは、切断したPC鋼材以外の要素によるものとなる。切断したPC鋼材の荷重負担は、付着力の回復により切断断面からの距離に比例して線形に増加するものと考えられ、切断箇所から付着長以上離れた断面で100%になるものとした。なお、平面保持の仮定を成立させるため、PC鋼材の断面積を減少させることにより、PC鋼材の荷重負担の減少を模擬し、付着力の低下を表現した。また、『3. PC鋼材の付着実験』より、載荷荷重の増加に伴い付着力の回復に要する付着長が長くなることが明らかとなったため、付着実験の結果をもとに、PC鋼材に働く引張力と付着長の関係をモデル化し、解析プログラムに適用した。

解析の結果、健全な供試体Case-0およびPC鋼材を切断した供試体のうちグラウトが十分に充填されているCase-1~Case-5について、解析値と実験値の最大曲げモーメントはほぼ一致しており、本解析法により、PC鋼材の切断による耐力の低下を評価することができた。図-9(a), (b), (c)に、代表してCase-1, 2, 4の解析値と曲げ載荷実験による実験値の比較を示す。

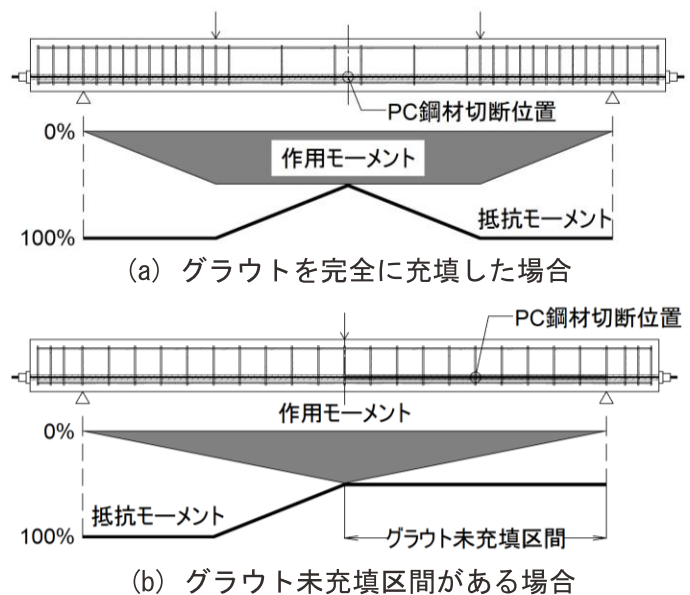


図-8 PC鋼材切断による付着力の低下

4.2 グラウト未充填区間の解析

グラウト未充填区間内のPC鋼材を切断したCase-6の場合、PC鋼材の切断と同時にグラウト未充填区間内のPC鋼材のプレストレスはすべて失われるものと考えられる。したがって、**図-8 (b)**に示すように、グラウト未充填区間内では切断したPC鋼材の受け持つ力を0%と一定とした。また、グラウト充填部と未充填部の境界断面から、グラウト充填後にPC鋼材を切断した場合と同様に付着力が回復し、PC鋼材が受け持つ引張力が増加するものと仮定した。**図-9 (d)**に示すように、曲げ耐力については実験値とほぼ一致する解析結果が得られたが、梁のじん性を評価できていない。より精度のよい曲げ性状の評価を可能とするためには、PC鋼材の滑りなどを考慮する必要があると考えられる。

一方、PC鋼材切断後にグラウトを再充填したCase-7の場合、グラウトの充填によりグラウトとPC鋼材の間に付着力が生じるため、切断したPC鋼材もある程度の引張力を負担することが考えられる。ただし、PC鋼材の切断によって導入したプレストレスは失われているため、解析では、ノンプレストレスPC鋼材として扱った。しかし、実験値と解析値の差が大きかったため、PC鋼材の切断による付着低下の影響を考慮する必要があると考えられる。

5. まとめ

破断したPC鋼材を有するPC梁の曲げ載荷実験、PC鋼材の付着実験およびファイバーモデルによる解析的検討より、以下の結論を得た。

- (1) グラウトが十分に充填されている場合、PC鋼材の破断によって付着力は低下するが、ある程度の距離で回復する。そのため、最大モーメントの作用位置とPC鋼材の破断位置が異なる場合は、付着低下の影響が軽減され、PC鋼材の破断による曲げ耐力の低下も軽減される。
- (2) PC鋼材の切断がPC鋼材とグラウト間の付着低下に影響を及ぼす範囲は、PC鋼材に働く引張力の増加とともに長くなるため、载荷段階に応じて、それぞれに適切な影響範囲を考慮する必要がある。
- (3) PC鋼材の破断による付着力の低下をPC鋼材の断面積の減少で模擬することにより、ファイバーモデル解析によって比較的精度良く曲げ性能を評価することが可能である。
- (4) グラウト充填不良部のPC鋼材が破断した場合でも、グラウトを再充填することにより、ある程度耐力の回復が見込める。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(基盤(B), 代表: 睦好宏史)により行われたものである。また、PC鋼材は、神鋼鋼線工業(株)により提供して頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

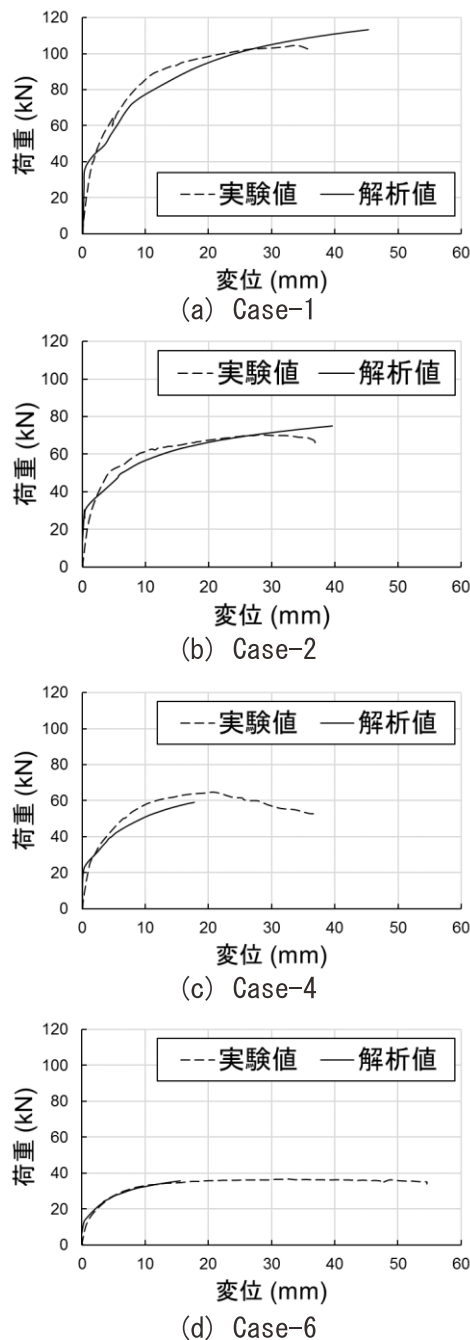


図-9 実験値と解析値の比較