

# I-57 PC 覆工の衝撃挙動への梁柱部接合方法の影響

室蘭工業大学 正員 岸 徳 光  
 開発土木研究所 正員 佐 藤 昌 志  
 日本建設 C. 正員 角 掛 久 雄  
 室蘭工業大学 学生員 山 内 昌 昭

## 1. はじめに

PC 製落石覆工 (PC 覆工) は PC プレキャスト部材である梁と柱を接合させ、場所打ちの底版及び側壁上にヒンジ結合させる逆 L 型ラーメン構造として設置するのが一般的である。柱と底版との結合はメナーゼヒンジ形式、梁と側壁の結合は PC 鋼棒により、ボルト締めされることが多いようである。これまでの種々の実験研究<sup>1)</sup>によれば、この 2 接合部は、ヒンジ結合を仮定しており、実際上もほぼヒンジ構造として機能しているものと考えられる。

一方、梁-柱の接合部は、剛結を仮定し、梁-柱一体構造になることが期待されている。現在、この梁-柱の接合方法としては、PC 鋼棒を用いてプレストレスを与え緊張締結する方法が用いられている。しかしながら、著者らの逆 L 型実規模 PC 覆工を用いた衝撃実験結果<sup>2),3)</sup>によれば、現行の接合方法による構造では必ずしもこの接合部が剛結とはならないことが示されている。

本研究は、逆 L 型 PC 覆工の梁-柱接合部の接合方法の力学的挙動特性への影響を検討するために実規模逆 L 型 PC 覆工模型を用いた重錘落下衝撃実験結果を基に数値解析的に検討を行ったものである。本研究では接合方法として PC 鋼棒をボンド/アンボンドとした場合や梁-柱の接触面を付着/無付着とした場合について三次元衝撃解析用汎用コードである LS-DYNA3D<sup>4)</sup>を用い特に断面に発生する曲げモーメント、軸力分布に限定して解析を行った。なお、各解析は緩衝材特性の著しく異なる 90cm 厚の敷砂緩衝材を用いる場合と三層緩衝構造を用いる場合の 2 ケースについて行っている。

## 2. 解析仮定

本研究で対象とした構造物は、北海道開発局開発土木研究所が江別市角山に建設した図-1に示すような実規模 PC 覆工模型である。この PC 覆工は、5本の主桁より構成され、内空断面が、幅約 10.0m、高さ約 4.7m、長さ 7.5m の逆 L 型ラーメン構造である。各骨組はフランジ幅 149cm、フランジ厚 (頂版厚) 20cm、ウェブ幅 50cm、桁高 110cm の T 型 PC 桁と、幅 50cm、主曲げ方向の厚さが 110cm の PC 柱を PC 鋼棒を用いて接合して逆 L 型としている。本実規模 PC 覆工模型に対しては、既に重錘落下実験により、断面力分布特性が実験的に求められている。本研究では、この接合方法が覆工の断面力分布に与える影響を実験結果と比較する形で解析的に検討するものである。

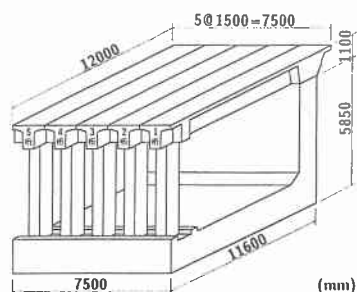


図-1 実規模 PC 覆工断面図

### 2.1 構造のモデル化

本研究では、載荷を、中央桁である 3 桁に限定することとし、三層緩衝構造を用いて重量 3tf の重錘を 30m から落下させた場合と敷厚 90cm の敷砂を緩衝材として重量 3tf の重錘を 10m から落下させた場合の 2 つのケースについて解析を行うこととした。要素分割は、横締め有りの場合には荷重載荷状態、構造系の対称性より覆工構造全体の 1/2 とし、弾性体と仮定して全て三次元固体要素を用いて行った。解析モデルの総要素数、総節点数はそれぞれ約 21000、約 30000 である。図-2には解析に用いた 1 組の主桁と柱の要素分割状態を示している。解析は、三次元衝撃解析用汎用コード LS-DYNA3D を用いることとし、横締め有りの状態では 2.5 体の各 PC 桁を主桁頂版部で連続させて一体構造

Influence of Beams-Column Connection Method on Impact Behaviour of PC Rock-shed  
 by Norimitsu KISHI, Masashi SATO and Hisao TSUNOKAKE and Masaaki YAMAUCHI

とし解析を行っている。また横締め無しの状態に対しては1体のPC桁のみを解析の対象としている。入力荷重は、実験結果で得られた最大伝達衝撃力を覆工頂版上に直接作用させている。三層緩衝構造を用いる場合は、衝撃力が緩衝構造設置領域(4m×4m)に均等に分散分布しているものと仮定し、また、敷砂単層を用いる場合は実験結果に基づき分布幅を1mとして伝達衝撃力分布を用いて入力することとした。図-3には解析に用いた各緩衝構造を用いる場合の衝撃力波形及び衝撃荷重の分布状況を示している。解析に用いた各材料定数は、コンクリートは弾性係数  $E_c = 3.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比  $\nu_c = 0.3$ 、質量  $\rho_c = 2.5 \text{ g/cm}^3$  とし、PC鋼棒は弾性係数  $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比  $\nu_s = 0.3$ 、質量  $\rho_s = 7.85 \text{ g/cm}^3$  とした。

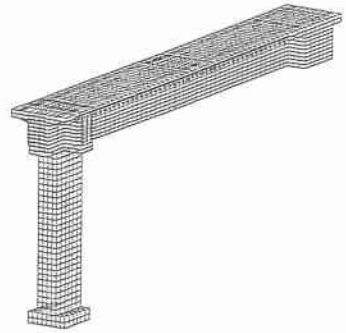
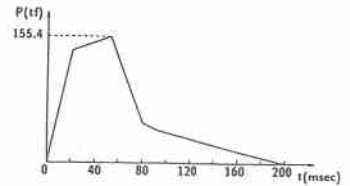
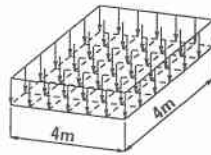


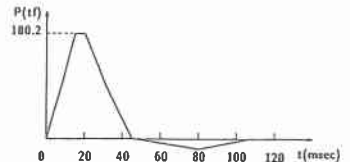
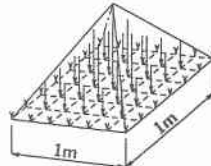
図-2 要素分割図

## 2.2. 接合部のモデル化

PC覆工の梁-柱接合は、PC鋼棒を用いて緊張力を与えて行う方法が一般的である。本実規模PC覆工では、主桁と柱の接合部がφ32の8本のPC鋼棒によって接合されている。柱に発生する負の曲げモーメントに対しても、プレストレスを有効に作用させるため、特に外側に配置された4本のPC鋼棒には45.85t/本のプレストレスを導入しているが、内側に配置されたPC鋼棒にはプレストレスを導入していない。図-4に梁-柱接合部のPC鋼棒配置位置を示している。実PC覆工は本覆工模型と同様工場内で柱部にアンボンドPC鋼棒を配置し、現場にてPC鋼棒にプレストレスを導入することによって梁-柱を一体化させている。従って、梁と柱の接触部分にはプレストレス導入以外の特別な工夫は施されていない。重錘落下衝撃実験において梁の端部曲げモーメントが柱部に十分に伝達されていない原因としては、下記のような要因が考えられる。



(a) 三層緩衝構造を緩衝材として用いた場合



(b) 敷砂単層を緩衝材として用いた場合

図-3 各緩衝構造を用いた場合の衝撃力波形及び衝撃荷重の分布状況

- 1) 梁-柱はPC鋼棒によってプレストレス力が導入されているものの、梁-柱接触面のコンクリート部はお互いに連続体となっていないことより、引張力を伝達する能力がないこと。
- 2) アンボンドPC鋼棒を用いることより、梁-柱接合部に負のモーメントが作用する場合には、鋼棒の伸び量が大きくなり、結果的に接合部に大きな相対回転が発生し、ヒンジ接合に近い状態になる。
- 3) アンボンドPC鋼棒を用いていることより、負の曲げモーメントが作用した場合には柱部材にはPC鋼棒定着位置の下方にのみ作用曲げに対する引張応力が作用するものと考えられる。

これより、本研究では以下のようなパラメーターを考え、数値計算によって検討を行うこととした。すなわち、

- 1) 梁-柱接合部の接触面の条件(完全付着状態/無付着状態)、2) PC鋼棒の付着条件(ボンド/アンボンド)である。表-1には本研究で設定した3ケースの接合部の条件を一覧にして示している。無付着状態は、圧縮力作用時には梁、柱の接触面における両要素とも同一節点を共有し、圧縮力を伝達するが、引張力作用時には両要素が分離し引張力

表-1 解析ケース

解析ケース	接触面の状態	PC鋼棒	
		梁部	柱部
アンボンド接合	無付着	アンボンド	アンボンド
ボンド接合	無付着	ボンド	ボンド
剛結接合	完全付着	ボンド	ボンド

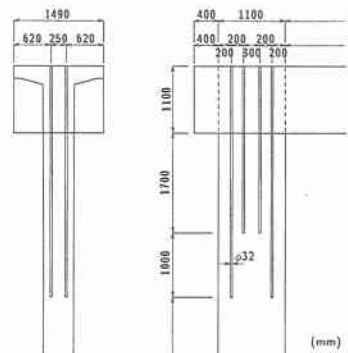


図-4 梁-柱接合部のPC鋼棒配置位置

を伝達しないようになっている。また、アンボンド PC 鋼棒の場合は PC 鋼棒の上下端部では梁及び柱の定着点の節点を共有させることとし、曲げ引張力に抵抗するようになっている。なお、PC 覆工模型は上述のように梁及び梁-柱接合部各部分にプレストレス力が導入されている。しかしながら、実験結果より PC 覆工が弾性挙動を示すことが明らかとなっていることや、接合部においては PC 鋼棒の軸剛性が PC 覆工の挙動特性に大きな影響を与えるものと判断されることより、本研究では特にプレストレス力を考慮しない状態で解析

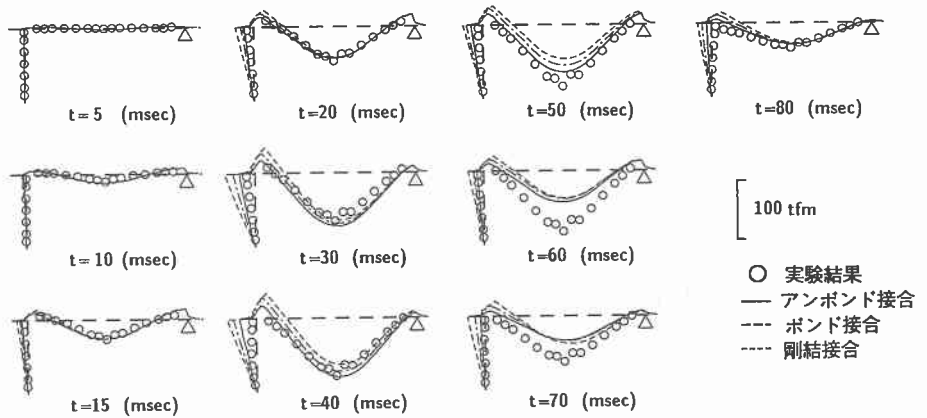


図-5 三層緩衝構造を用いた場合について 3 桁曲げモーメント分布に関する比較図

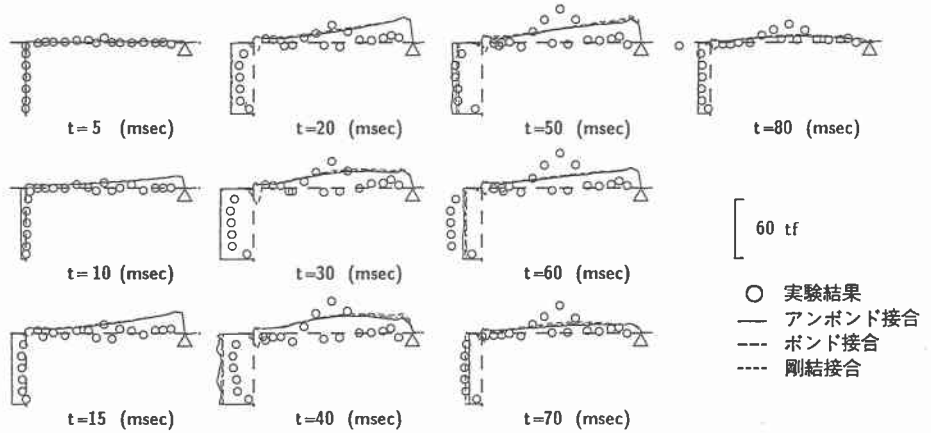


図-6 三層緩衝構造を用いた場合について 3 桁曲げ軸力分布に関する比較図

を行っている。また、アンボンド、ボンド接合の解析ケースにおいては、梁-柱接合部の接触面における断面中心点の 1 節点のみを共有させ、数値解析結果の安定を図っている。

### 3. 解析結果

#### 3.1. 三層緩衝構造を緩衝材とする場合

##### 3.1.1. 断面力分布

図-5 は全体模型の接合部に各解析ケースを適用した場合の載荷桁である 3 桁の曲げモーメント分布について、解析結果を実験結果と比較して示している。図中に示されている各時間は入力荷重の立ち上がりからの経過時間である。ここでは最大  $t=80$  msec までの結果を示している。各解析結果の主桁中央部の曲げモーメント分布を見ると、アンボンド接合の場合が最も大きい分布を示し、ボンド接合、剛結接合の順に小さなものとなっている。ボンド接合の場合は剛結接合を仮定する場合の応答結果に近い分布性状を示していることより、PC 鋼棒をボンドタイプにすることにより、アンボンドタイプを用いる場合よりも曲げモーメントを柱部に伝達できることが明らかになった。実験はアンボンド接合同一の接合方法を採用しているが、実測による曲げモーメントとアンボンド接合を仮定する場合の解析結果が最も良く近似しており、アンボンド接合仮定の解析は実験をよく再現しているものと考えられる。表-2 は桁中央部及び梁、柱の接合部の最大曲げモーメント値について実験結果と各解析結果を比較して示している。表には PC 覆工模型全体に

表-2 実験結果と各解析結果の比較

着目点	荷重の種類	解析結果			実験値
		アンボンド接合	ボンド接合	剛結接合	
主桁中央点	横締め有り (衝撃荷重)	100.4	92.4	83.2	107.8
	横締め有り (静的荷重)	79.4	73.4	68.3	
	横締め無し (静的荷重)	112.3	100.6	91.9	
主桁接合部近傍	横締め有り (衝撃荷重)	-20.8 (0.21)	-34.4 (0.37)	-43.9 (0.53)	-0.9
	横締め有り (静的荷重)	-17.2 (0.22)	-29.1 (0.40)	-36.6 (0.54)	
	横締め無し (静的荷重)	-14.2 (0.13)	-34.4 (0.34)	-46.9 (0.51)	
柱接合部近傍	横締め有り (衝撃荷重)	-27.9	-39.6	-52.6	-9.6
	横締め有り (静的荷重)	-17.4	-28.9	-40.4	
	横締め無し (静的荷重)	-24.6	-43.9	-59.9	

関する動的解析結果の他、最大衝撃荷重を静的に作用させた場合の解析結果及び設計と同様、横締りを開放した状態についての静的解析結果も示している。なお、( )内の数値は主桁中央点のモーメント値と主桁接合部近傍のモーメント値の比を表している。主桁中央点の曲げモーメント値に対する主桁接合部近傍の曲げモーメント値の比を調べると(カッコ内数値)、横締め有りの状態では衝撃荷重、静的荷重を問わず、接合方法に対してほぼ一定の割合の曲げモーメントが、接合部近傍に発生していることがわかる。これより、接合部近傍の曲げモーメントの低減は衝撃的荷重載荷による効果ではなく、接合方法の影響であることが数値的にも明らかになった。横締め開放時における接合部近傍の曲げモーメント

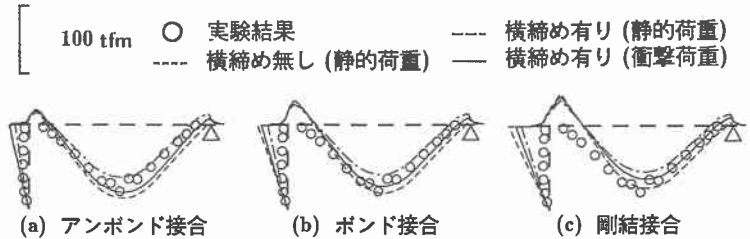


図-7 各接合方法を用いた場合の載荷桁曲げモーメント分布についての比較

の低減率は、剛結接合の場合には横締め有りの場合と同程度であるが、ボンド/アンボンド接合の場合には6~9%程度大きくなっている。剛結接合の場合、主桁中央点で実験結果よりも24.6tfm程度小さく、主桁接合部近傍で43.0tfm大きな値となっている。図-6には図-5と同様に載荷桁である3桁の軸力分布について実験結果と解析結果を比較して示している。図より、解析結果は接合方法によって大差なく同様な分布を示していることがわかる。実験結果と解析結果の分布を比較すると、主桁部に関しては両者圧縮力分布となっているが実験結果が載荷点部で大きくなる傾向を示しているのに対し、解析結果は側壁支点にかけて大きくなる傾向を示し、分布性状に差異が見られる。これは、側壁支点近傍部に取り付けられている横桁の影響によるものと考えられる。一方、柱部に関しては、実験結果と解析結果は両端を除き、類似の分布性状を示していることがわかる。

### 3.1.2. 衝撃荷重と静的荷重との比較

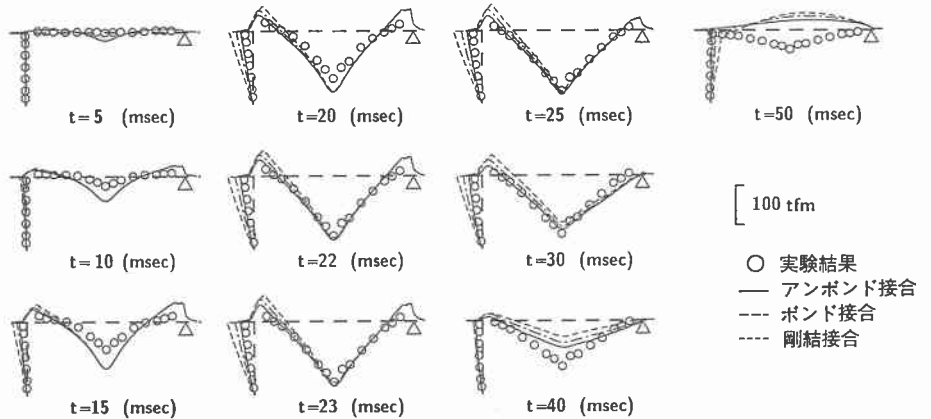
図-7には各接合方法(横締め有りの衝撃荷重、静的荷重載荷時及び横締め無しの静的荷重載荷時)を用いた場合の載荷桁の曲げモーメント分布について比較して示している。図より、曲げモーメントの大きさは異なるものの、衝撃荷重、静的荷重載荷時とも類似のなめらかな分布性状を示していることがわかる。主桁中央点及び柱接合部近傍で、横締め無しの静解析値が最も大きな分布を示し、横締め有りの衝撃荷重、静的荷重の順に小さな値を示している。アンボンド接合で横締め無しの静載荷時の解析結果が、実験結果と良く対応していることがわかる。また、横締め有りの状態においても各接合方法で、衝撃荷重載荷による動的応答倍率は表-2より最大で1.25程度(ボンド接合)、最小で1.11程度(アンボンド接合)とそれほど大きくないことがわかる。

## 3.2. 敷砂単層を緩衝材とする場合

### 3.2.1. 断面力分布

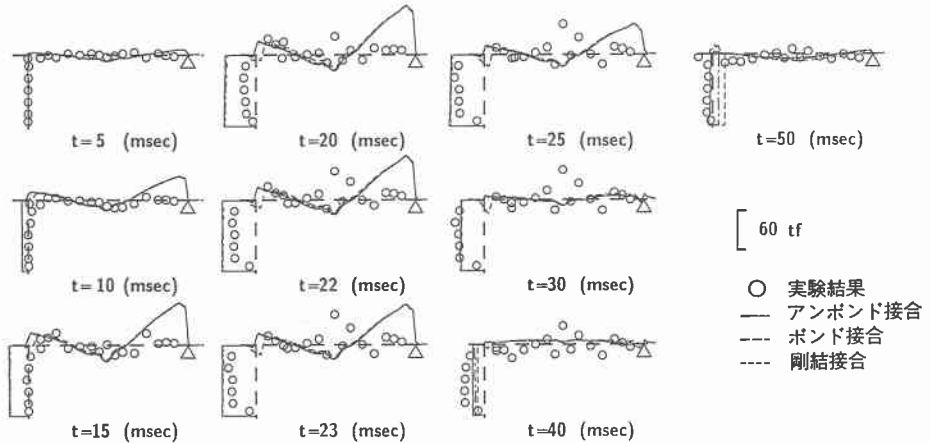
図-8には、90 cm厚の敷砂単層を緩衝材として用い、各接合方法を適用した場合における載荷桁(3桁)の曲げモーメント分布を実験結果と比較して示している。図より、敷砂緩衝材を用いた場合には三層緩衝構造を用いる場合と異なり、荷重分散性が改善されないため載荷点近傍部に衝撃荷重が集中し、静的集中荷重載荷時と同様な直線的な曲げモーメント分布になっていることがわかる。ここではt=50 msecまでの結果を示している。各解析結果の主桁の曲げモーメント分布を見ると、正曲げモーメントには接合方法による差が現れず、中央点では各ケースとも類似の値を示してい

る。主桁接合部近傍，柱接合部近傍では接合部の影響が現れアンボンド接合，ボンド接合，剛結接合の順に大きな値を示している。実験結果と各解析結果の分布を比較すると，アンボンド接合の場合が，実験結果と最も良く対応していることがわかる。表一三は実験結果と各解析結果を比較して示したものである。表中の( )内の数値は主桁中央点のモーメント値と主桁接合部近傍のモーメント値の比を表している。表より数値的にもアンボンド接合を仮定する場合は，実験結果と良く対応していることが確認できる。また，剛結接合の場合は主



図一八 敷砂単層を緩衝材とする場合について3桁曲げモーメント分布に関する比較図

桁中央点，主桁接合部で実験結果よりも2.5tfm，53.8tfm 程度大きな値となっている。主桁接合部近傍の曲げモーメント値の中央部曲げモーメント値に対する比率を調べると(表一三のカッコ内値)，敷砂単層を用いる場合にはいずれの場合も三層緩衝構造を用いる場合の結果(表一二)よりも小さくなっている。その程度は剛結接合，ボンド接合の場合が約10%小さく，接合部の負担モーメントの小さいアンボンド接合の場合は数%程度の減少となっている。図一九は図一八と同様に載荷桁である3桁の軸力分布について実験結果と解析結果を比較して示している。図より，解析結果は接合方法によって大差なく同様な分布を示していることがわかる。実験結果と解析結果の分布を比較すると，主桁部に関しては実験結果が載荷点部で大きな圧縮力を示しているのに対し，解析結果は載荷点部で引張力を示し，側壁支点にかけて大きくなる傾向を示している。一方，柱部に関しては，実験結果と解析結果は両端を除き，類似の分布性状を示していることがわかる。



図一九 敷砂単層を緩衝材とする場合について3桁軸力分布に関する比較図

### 3.2.2. 衝撃荷重と静的荷重との比較

上述のように敷砂単層を緩衝材として用いる場合には，三層緩衝構造と同様の荷重分散を期待できないことより，横締め効果は非常に大きいものとなる。図一十には横締め有りの衝撃荷重，静的荷重載荷時及び横締め無しの場合の静的荷重載荷時の載荷桁の最大応答時における曲げモーメント分布を比較して示している。図より，横締め有りにおける両解析結果はいずれの接合方法に対しても類似の分布性状を示していることがわかる(応答倍率はいずれも1.1倍程度)。一方，横締め無しの場合には横締め有りの場合に対していずれの場合も2倍以上の応答値を示しており，顕著な横締め

表-3 実験結果と各解析結果の比較

着目点	荷重の種類	解析結果			実験値
		アンボンド接合	ボンド接合	剛結接合	
主桁中央点	横締め有り(衝撃荷重)	166.2	163.0	159.4	156.9
	横締め有り(静的荷重)	155.8	148.4	142.5	
	横締め無し(静的荷重)	388.1	351.9	324.1	
主桁接合部近傍	横締め有り(衝撃荷重)	-40.2 (0.24)	-54.1 (0.33)	-66.7 (0.42)	-12.9
	横締め有り(静的荷重)	-29.8 (0.19)	-44.9 (0.30)	-55.2 (0.39)	
	横締め無し(静的荷重)	-39.9 (0.10)	-103.7 (0.30)	-143.4 (0.44)	
柱接合部近傍	横締め有り(衝撃荷重)	-34.5	-47.4	-64.9	-22.0
	横締め有り(静的荷重)	-21.2	-36.8	-52.2	
	横締め無し(静的荷重)	-71.9	-131.0	-178.9	

効果を確認することができる。横締め無しの静的荷重載荷時と横締め有りの衝撃荷重載荷時の主桁中央部曲げモーメントを用いて各接合方法に見かけ上の荷重分担率を算出するとアンボンド、ボンド、剛結接合に対してそれぞれ0.43, 0.46, 0.49 となり、接合部剛性が大きいほど分担率も大きくなっている。工学的には分担率を0.5として断面力を評価できるものと考えられる。これは衝撃荷重が集中荷重的に作用しているために、拘束度が大きいほど応答が載荷点に集中することを意味しているものと考えられる。実験結果はアンボンド接合で分担率を0.4とし、横締め無しの静的載荷により評価可能であることがわかる。

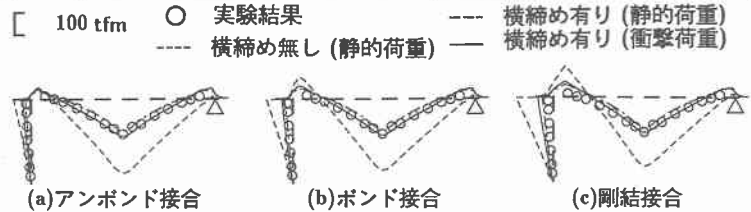


図-10 各接合方法を用いた場合の載荷桁曲げモーメント分布についての比較

4. まとめ

本研究では、逆L型PC覆工の梁-柱接合部の接合方法の覆工力学挙動への影響を検討するために、実規模逆L型PC覆工模型を用いた重錘落下実験を基に数値解析的に検討を行った。本研究では、実施工と同様にアンボンドPC鋼棒を用い梁-柱接合部の接触面を無付着とした場合(アンボンド接合)、アンボンドPC鋼棒をボンドタイプに替えた場合(ボンド接合)と梁-柱の接合部を付着させ一体化させた場合(剛結接合)の3ケースについて検討を行った。

本検討結果を整理すると、

- 1) アンボンド接合を仮定する場合の解析結果は実測値と良く対応している。
- 2) ボンド接合を仮定する場合は剛結接合を仮定する場合の解析結果に近い値となることより、ボンドタイプのPC鋼棒(アフターボンドPC鋼棒)を用いることより、接合部の剛結度を改善できる。
- 3) 剛結接合は最も効率よく梁の曲げモーメントを柱部に伝達させることができる。
- 4) 三層緩衝構造用いる場合にはいずれの接合方法に対しても横締め解放状態(PC桁単体)で最大衝撃荷重を静的に載荷することにより各PC桁の横締りを有する衝撃荷重載荷時の断面力が評価可能である。
- 5) 敷砂単層を用いる場合には、衝撃荷重が集中荷重的に作用するために横締めによって荷重分担率を改善することができる。いずれの接合方法に対しても分担率を0.5として横締め解放状態の静載荷によって横締め有りで衝撃荷重載荷時の各PC桁の断面力が評価可能である。

参考文献

- 1) 大塚久哲, 横山功一, 東久保正徳, 長尾彰洋: PC製逆L型ロックシェッドヒンジ部の静的及び衝撃試験, 第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.254~263, 199.6.
- 2) 岸徳光, 佐藤昌志, 中野修: 三層緩衝構造の緩衝性能に関する大型野外実験, 構造工学論文集, vol.41A, pp.1257~1265, 1995.3.
- 3) 西弘明, 佐藤昌志, 岸徳光, 松岡健一: 敷砂緩衝材を用いた実規模PC落石覆工の衝撃挙動, コンクリート工学年次論文報告集, vol.17, no.2, pp.691~696, 1995.6.
- 4) John O.Hallquist: LS-DYNA3D User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1993.9.