論文　コンクリート凝結・硬化中に振動を受けた後の鉄筋とコンクリートの付着特性に関する一実験

貞末　和史[*1]・佐藤　立美[*2]

要旨：コンクリート打設直後に RC 構造建物が地震動を受けた場合，地震によって建物が倒壊しなかった場合でも，鉄筋とコンクリートの一体性が失われ，建物の耐震性能が乏しくなることが推測される。本研究では，コンクリート打設直後に地震動を受けた後硬化した RC 部材と，地震動を受けずに硬化した RC 部材の力学特性を比較する実験を行い，コンクリートが凝結を開始する前に地震動を受けて硬化した場合と比較して，凝結が終結した後に地震動を受けて硬化した場合は主筋の付着特性が大きく劣化することを明らかにした。

キーワード：付着強度，凝結硬化，地震動

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造は，通常，レディミクストコンクリートという半製品を建設現場に運搬し，コンクリート打設後，必要な養生期間を経て硬化した後，初めて構造体として機能する。また，鉄筋コンクリート造建物の構造設計は，コンクリート強度が所要の強度に達しているものとして構造安全性が検討される。しかしながら，鉄筋コンクリート造建物は時として建設工事中に地震や強風による振動を受けることがあり，コンクリート打設直後，あるいはコンクリートが十分に硬化する前に地震等の外乱を受けた場合，ひび割れを生じて初期剛性が低下したり，鉄筋とコンクリートの一体性が失われ，付着劣化や定着劣化を生じて強度や靭性が低下することが懸念され，これらの振動の影響を無視して，その後の建設工事を進めてよいものか判断に悩むことがある。

建設工事中に振動を受けるコンクリート系構造物に関して，土木構造物では既存のコンクリート道路橋の拡幅工事における自動車等の走行振動を想定して，コンクリート硬化中に継続的な微小振動を受ける鉄筋コンクリート部材の力学挙動について検討した実験が行われており，鉄筋を固定しコンクリート部分のみ振動させることで鉄筋とコンクリートに相対変位を生じさせた場合は付着強度が大きく低下することが報告されている[1)]。

建築物では，コンクリート打設工事中に火山活動に伴う継続的な地震動を受けた鉄筋コンクリート建物の実例があり，コンクリートのひび割れ発生や鉄筋の付着強度の低下が懸念されたため，建設現場での計測振動を基に付着強度について検討する実験が行われている。この実験は最大加速度 80 ガル程度の地震動に対して，鉄筋とコンクリートの相対変位を 0.4mm 程度と推定し，地震動による相対変位を全て鉄筋とコンクリートのずれとして静的に与えた後でコンクリートブロック中の鉄筋の引き抜き試験を行い，地震動を受けない場合と比べて付着強度が 10%程度低下したことが報告されている[2)]。

さらに，コンクリート打設直後に地震動を受けることによって，コンクリートの材料特性がどのように変化するか確かめた実験も行われており，凝結を開始する前の流動性が高い状態でコンクリートが地震動を受けると骨材が移動し，局部的な材料分離や空隙を生じて，コンクリートの圧縮強度および弾性係数が低下する場合があると報告されている[3)]。

以上に挙げた主として個別の事例について検証された研究を鑑みると，コンクリートが十分に硬化する前に強い地震動を受けると，その地震によって建物が倒壊しなかった場合でも，鉄筋の付着劣化あるいはコンクリートそのものの強度低下によって建物の耐震性能が乏しくなることが推測されるが，コンクリート打設後，どのぐらいの経過時間で，どのぐらいの地震動を受けると，どれ程建物の耐震性能が低下するのか明らかにされていない。そこで，本研究では，鉄筋コンクリート部材がコンクリート打設直後に地震動を受ける場合と受けない場合，あるいは地震動を受けるまでの経過時間の違い，さらに地震動を受けて生じる鉄筋とコンクリートの相対変位の大きさの違いによって，コンクリートの硬化が進んだ後の鉄筋コンクリート部材の力学特性がどのように変わるのかを調べるために，2 シリーズの実験を行って検討する。

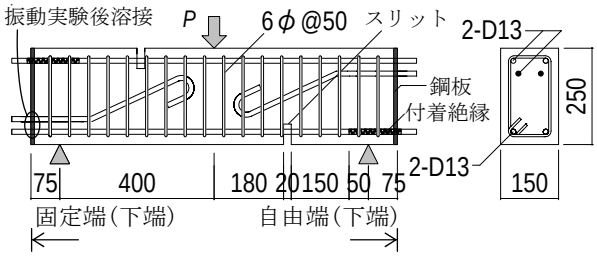
2. 実験シリーズⅠ

2.1 試験体

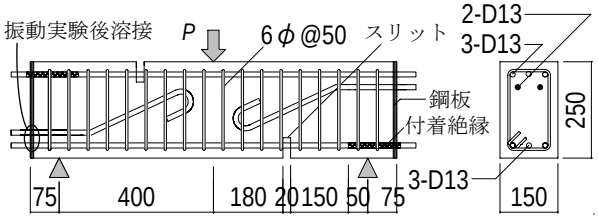
試験体形状を**図－1**，試験体計画を**表－1** に示す。全ての試験体において，断面は 150mm×250mm，コンクリート設計基準強度 F_c=30N/mm^2 とし，主筋は D13，せん断補強筋は 6φを 50mm ピッチで配筋した。試験体の一部に幅 20mm のスリットを設け，自由端側端部では付着を

*1 広島工業大学　工学部建築工学科准教授　博士(工学)　(正会員)
*2 広島工業大学　工学部建築工学科教授　工博　(正会員)

絶縁し，せん断スパン a=400mm として，梁の中央に 1 点集中荷重 P を載荷した際のスリットと付着絶縁部の間の主筋の付着特性を調べる梁型試験体としており，スリットコーナーからのひび割れの急激な進展を抑制するためにスリット部に折り曲げ筋 D13 を配した。**図－1(a)**の試験体は上下端の主筋を各 2 本，**図－1(b)**の試験体は上下端の主筋を各 3 本配筋しており，コンクリート打設直後に地震動を受けずに硬化した場合に「付着強度に余裕がある梁」と「付着強度に余裕がない梁」として計画した。コンクリート打設直後に地震動を受けずに硬化した場合の終局曲げ耐力 P_m，終局せん断耐力 P_s，付着割裂破壊で決まる耐力 P_b を**表－1** に示す。各耐力は既往の文献[4),5)]に示される算定式に従い，材料試験結果を用いて算定した。試験体に使用したコンクリートおよび鋼材の材料試験結果を**表－2**，**表－3** にそれぞれ示す。



(a) 付着強度余裕あり（M000，M030，M010）



(b) 付着強度余裕なし（m000，m030，m010）

図－1 試験体形状

表－1 試験体計画

試験体	P_m (kN)	P_s (kN)	P_b (kN)	加振	主筋とｺﾝｸﾘｰﾄの相対変位 δ_p (mm)
M000	83.5	138	166	なし	0
M030				3時間後	±3.0
M010				6時間後	±1.0
m000	125	145	152	振動なし	0
m030				3時間後	±3.0
m010				6時間後	±1.0

表－2 コンクリートの材料強度

圧縮（N/mm^2）	割裂（N/mm^2）
30.9	2.76

表－3 鋼材の材料強度

使用箇所	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	伸び (%)
D13(SD295A)	348	488	15.4
6φ(SR295)	303	466	19.5

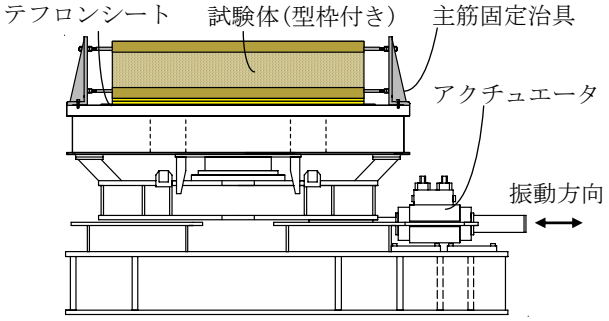
コンクリート打設直後に地震動を受ける影響について検討するために，コンクリート打設直後に地震動を受けるまでの経過時間を実験変数とし，全試験体ともコンクリート硬化後は，静的な載荷実験を行なうものとした。**表－1** に示した主筋とコンクリートの相対変位 δ_p に関しては，2.2 項で詳しく述べる。

2.2 実験方法と変位計測

本実験は，コンクリート打設直後に地震動を受けて，主筋とコンクリートに相対変位を生じることが，コンクリート硬化後の部材の力学特性に与える影響について調べることを意図している。試験体に与える地震動は，コンクリートを打設した 3 時間後および 6 時間後に，それぞれ 2 体の試験体を**図－2** に示すように型枠を取り付けた状態で振動台に設置し，梁両端から外側に抜け出ている全ての主筋の両端（ネジ加工）を主筋固定治具にナット締めした後，加振するものとした。なお，型枠底面と振動台の間には厚さ 3mm のテフロンシート 2 枚を挟んでおり，型枠は振動台に固定されていない状態となっている。計測項目は，主筋とコンクリートの相対変位 δ_p（梁側面に対する主筋の抜け出し量），振動台および試験体上端部の加速度とした。

コンクリート打設 3 時間後の加振に関しては，最大加速度 3m/s^2，振動数 5.0Hz の正弦波としたが，主筋とコンクリートの相対変位を生じなかったため加振を中断し，主筋固定治具と試験体側面鋼板の間に油圧ジャッキを設置して，δ_p=±3mm の静的な強制変位を 2 サイクル与えた後，再度，同じ正弦波加振を 30 秒間行なった。

コンクリート打設 6 時間後の加振に関しては，コンク



図－2 振動台

写真－1 静的載荷実験

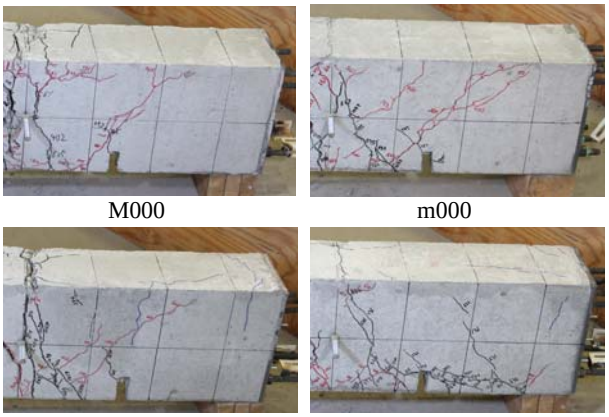
リートの流動性が低下して，主筋とコンクリートの相対変位が生じにくいことを想定して，δ_p=±1mm の静的な強制変位を与えた後，最大加速度 3m/s^2，振動数 5.0Hz の正弦波加振を 30 秒間行なった。

実構造物においては，地震動レベルに応じてどの程度のδ_pを生じるか定かではないが，本研究では，既往の研究[2)]によるδ_p=0.4mm を大きく上回る値として，δ_p=±1mm およびδ_p=±3mm 設定し，静的に主筋とコンクリートの相対変位を生じさせた直後に加振することで，地震動を受けて主筋とコンクリートの相対変位を生じている状態と等価なものと考えた。

コンクリート硬化後の静的載荷実験は，**写真－1** に示すように梁の中央に 1 点集中荷重を加える単純梁型載荷を梁の上下を反転させて 2 方向(正荷重を下向きとする)について行なった。変位の計測は，梁中央の鉛直たわみδ_vを計測し，変形角 R（$=\delta_v/a$）を算定するものとした。

2.3 破壊状況

最終破壊状況の一例を**写真－2** に示す。正方向載荷時のひび割れ発生状況について着目すると，M000 と m000 は共に曲げひび割れの発生が確認されたが付着割裂ひび割れは生じていないため，いずれの試験体とも曲げ破壊したものと思われる。一方，コンクリート打設直後に地震動を受けている M010 と m010 に関して，M010 は付着割裂ひび割れを生じていないのに対して，m010 は付着割裂ひび割れを生じていることがわかり，付着強度に余裕がない梁に関しては，コンクリート打設直後に地震動を受けて主筋とコンクリートの相対変位を生じていることがコンクリートの硬化が進行した後の梁の破壊性状に影響を与えていることが確認された。なお，M030 と m030 は M010 と m010 と同様な破壊状況であった。



(a) 付着強度余裕あり　(b) 付着強度余裕なし

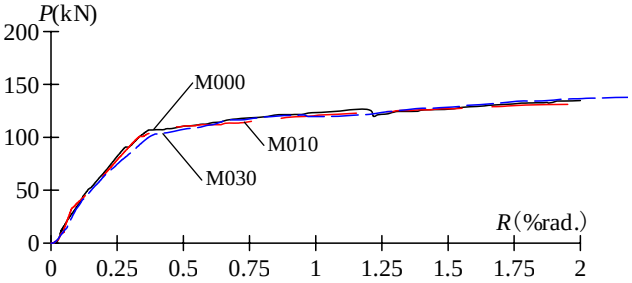
写真－2 最終破壊状況

2.4 荷重－変形関係

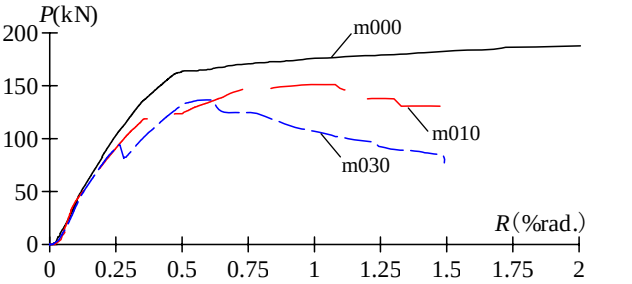
梁型試験体の荷重 P と変形角 R の関係を**図－3**，最大耐力 ${}_bP_{max}$ および R=0.25%rad.における初期剛性 ${}_bK$ を**表－4** に示す。

付着強度に余裕がある梁，付着強度に余裕がない梁共に，コンクリート打設直後に地震動を受け主筋とコンクリートの相対変位を生じていることで初期剛性が低下しており，主筋量が多い試験体（付着強度に余裕がない梁）ほど剛性低下が大きいことが確認された。

P-R 関係を見ると，付着強度に余裕がある梁に関しては，コンクリート打設直後の地震動の影響が最大耐力や靭性に与える影響は明瞭ではないが，付着強度に余裕がない梁がコンクリート打設直後に地震動を受けている場合は，**写真－2** に示したように付着割裂破壊を生じることで最大耐力が小さくなり，さらに最大耐力以降の耐力低下も大きくなっていることがわかる。



(a) 付着強度余裕あり



(b) 付着強度余裕なし

図－3 荷重－変形角関係

表－4 最大耐力と初期剛性

試験体	${}_bP_{max}$（kN）	${}_bP_{max}/{}_{b0}P_{max}$	${}_bK$（kN/mm）	${}_bK/{}_{b0}K$
M000	135	1.00	82.0	1.00
M030	137	1.01	78.9	0.96
M010	132	0.98	74.6	0.91
m000	188	1.00	103	1.00
m030	151	0.80	91.0	0.88
m010	137	0.73	91.3	0.89

注）${}_{b0}P_{max}$ と ${}_{b0}K$ は M000 および m000 の最大耐力と初期剛性

3. 実験シリーズⅡ

前章では，コンクリート打設直後に地震動を受けて主筋とコンクリートの相対変位を生じている梁に関して，特に，付着強度に余裕がない梁は付着劣化を生じて最大耐力と靭性が大きく低下することが明らかとなった。本

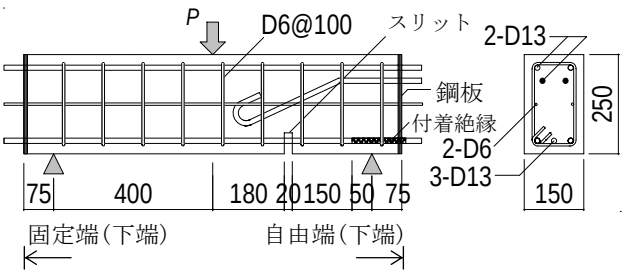
章では，コンクリート打設直後に地震動を受けずに硬化した場合に「曲げ破壊に対して付着割裂破壊が先行する鉄筋コンクリート部材」を対象として，コンクリート打設後に地震動を受けるまでの経過時間および地震動を受けて生じる主筋とコンクリートの相対変位の大きさの違いが主筋の付着特性に与える影響を明らかにする。試験体は実験シリーズⅠと同様の梁型試験体に加えて付着要素試験体を製作し，（ⅰ）コンクリート打設直後に地震動を受けない場合，（ⅱ）コンクリート凝結始発前に地震動を受ける場合，（ⅲ）コンクリート凝結中に地震動を受ける場合，（ⅳ）コンクリート凝結終結後に地震動を受ける場合のそれぞれについて検討する。

3.1 試験体

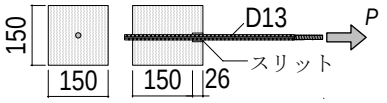
梁型試験体は**図－4** に示すように実験シリーズⅠと同形状であるが，実験シリーズⅠで用いた試験体と比較してせん断補強筋比を小さくし，さらに，降伏強度の大きな主筋に変更することで，曲げ破壊に対して付着割裂破壊が先行する梁としている。なお，実験シリーズⅠでは梁の上下を反転させて 2 方向の載荷を行なったが，実験シリーズⅡでは 1 方向の載荷のみ行なうものとし，それに伴い，折り曲げ筋とスリットは試験体の片側だけに設けるものに変更した。また，実験シリーズⅡの試験体では，上端主筋，組み立て筋およびせん断補強筋はそれぞれ結束線を用いて結束し，上端主筋，組み立て筋および折り曲げ筋の端部はコンクリート打設前に梁端の鋼板に溶接して，地震動を受けた時に下端主筋のみがコンクリートに対して相対変位を生じるものとした。

付着要素試験体を**図－5** に示す。付着要素試験体は，梁型試験体と同一のコンクリート F_c=30N/mm^2 と主筋に用いた鉄筋 D13 を用いて引き抜き力 P を加えた。

試験体計画を**表－5**，**表－6** に示す。梁型試験体と付着要素試験体のそれぞれについて，コンクリート打設後に振動を受けるまでの時間および主筋とコンクリートの相対変位の大きさを実験変数とした。付着要素試験体の P_y と P_u は鉄筋の降伏強度と引張強度である。試験体に使用したコンクリートおよび鋼材の材料試験結果を**表－7**, **表－8** にそれぞれ示す。



図－4 試験体形状（梁型試験体）



図－5 試験体形状（付着要素試験体）

表－5 試験体計画（梁型試験体）

試験体	P_m (kN)	P_s (kN)	P_b (kN)	加振	主筋とｺﾝｸﾘｰﾄの相対変位 δ_p (mm)
BN000	133	128	106	なし	0
BP010				凝結始発前	±1.0
BP030					±3.0
BA010				凝結終結後	±1.0
BA030					±3.0

表－6 試験体計画（付着要素試験体）

試験体	P_y (kN)	P_u (kN)	加振	主筋とｺﾝｸﾘｰﾄの相対変位 δ_p (mm)
EN000	49.3	70.6	なし	0
EP000			凝結始発前（4時間後）	0
EP005				±0.5
EP010				±1.0
EP030				±3.0
EM010			凝結中（9時間後）	0
EM030				±0.5
EM050				±1.0
EM100				±3.0
EA000			凝結終結後（11時間後）	0
EA005				±0.5
EA010				±1.0
EA030				±3.0

注）各2体実験

表－7 コンクリートの材料強度

圧縮（N/mm^2）	割裂（N/mm^2）
30.3	2.76

表－8 鋼材の材料強度

使用箇所	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	伸び (%)
D13（SD345） 梁型試験体	369	541	16.8
D13（SD345） 付着要素試験体	389	557	16.1
D6（SD295）	322	505	15.0

3.2 実験方法と変位計測

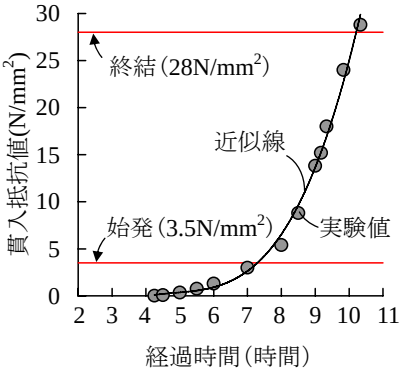
試験体に与える地震動は，コンクリートを打設した後の凝結開始前，凝結中，凝結終結後のそれぞれにおいて最大加速度 9.8m/s^2，振動数 5.0Hz の正弦波を 30 秒間与えた。なお，下端主筋とコンクリートの相対変位は，加振する直前にハンマーで主筋端部を打ちつけ相対変位δ_pを生じさせ，振動台に固定した試験体を加振する際には下端主筋の固定端側を梁端の鋼板に点溶接して，加振中は下端主筋とコンクリートの相対変位は生じさせないものとした。

凝結の進行状況は，試験体のコンクリート打設後，プロテクター貫入試験を行って確認した。試験結果を**図－6** に示す。貫入抵抗値が 3.5N/mm^2 に達する時を凝結始発，

28 N/mm^2 に達する時を凝結終結とすると，始発は 7 時間 15 分，終結は 10 時間 10 分であった。そこで，本実験では，コンクリート打設後に地震動を受けるまでの経過時間を，凝結開始前はコンクリート打設 4 時間後，凝結中は 9 時間後，凝結終了後は 11 時間後とした。

梁型試験体の静的載荷実験は，**写真－1** に示した方法と同様であり，計測項目は梁中央の鉛直たわみδ，下端主筋の抜け出し量δ，主筋のひずみ度εとした。

付着要素試験体の静的載荷実験は**写真－3** に示すようにセンターホールジャッキを用いて鉄筋の引き抜き試験を行い，鉄筋下端において主筋抜け出し量δを計測した。



図－6 プロテクター貫入試験　写真－3 付着要素実験

3.3 破壊状況

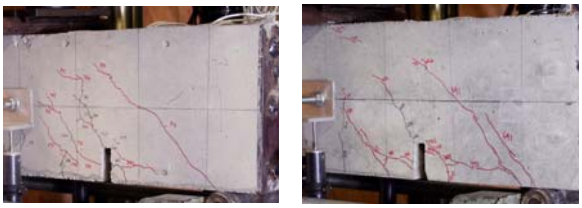
梁型試験体が最大耐力に達した直後である変形角 R=1.0%rad.時の破壊状況の一例を**写真－4** に示す。いずれの試験体とも付着割裂ひび割れの発生と拡大によって最大耐力に達した。以下に各試験体のひび割れの発生・進展状況について述べる。

コンクリート打設直後に地震動を受けずに硬化した梁型試験体 BN000 は，①スリット端からの斜めひび割れ発生，②その他の斜めひび割れ発生，③付着割裂ひび割れ発生の順でひび割れが発生・進展し，実験終了後の最終破壊状態においても曲げひび割れは確認されなかった。

コンクリート凝結始発前に地震動を受けて硬化した BP010 と BP030 のひび割れ発生・進展状況は，BN000 と同様であった。

コンクリート凝結終結後に地震動を受けて硬化した BA010 と BA030 は，①スリット端からの斜めひび割れと梁中央の曲げひび割れがほぼ同時に発生，②その他の斜めひび割れ発生，③付着割裂ひび割れ発生の順でひび割れが発生・進展した。

付着要素試験体の破壊状況に関して，EN000 と EP005 のそれぞれ 1 体については鉄筋が破断したが，その他の試験体に関しては鉄筋の破断あるいは付着割裂破壊を生じておらず，鉄筋がコンクリートから抜け出しを生じることで最大耐力に達した。



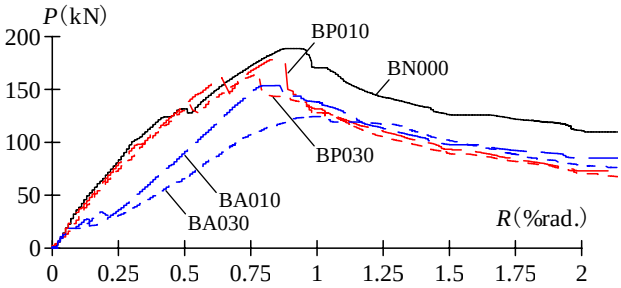
BN000　　BP030

写真－4 最終破壊状況

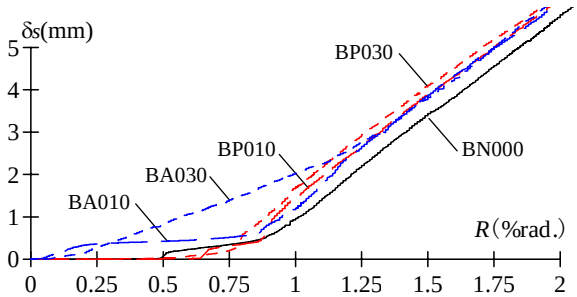
3.4 梁型試験体の荷重－変形関係

梁型試験体の荷重 P と変形角 R の関係を**図－7**，最大耐力 ${}_bP_{max}$ および R=0.25%rad.における初期剛性 ${}_bK$ を**表－9** に示す。BA030 を除く試験体は曲げ耐力の計算値 P_m を上回っているが，いずれの試験体とも最大耐力に達した後は急激に耐力低下を生じているため，曲げ破壊する前に付着割裂破壊を生じて最大耐力に達したものと推察される。**図－8** に示す主筋の抜け出し量δと R の関係より，いずれの試験体とも最大耐力に達する時の R 以前に主筋の抜け出しが始まっていることが確認できる。

実験変数による影響を確認すると，コンクリート打設直後地震動を受けていない試験体に比べて，地震動を受けて主筋とコンクリートの相対変位を生じている試験体は初期剛性と最大耐力が低下しており，δ_p が大きい場合



図－7 荷重－変形角関係



図－8 抜け出し量－変形角関係

表－9 最大耐力と初期剛性

試験体	${}_bP_{max}$ (kN)	${}_bP_{max}/{}_{b0}P_{max}$	${}_bK$ (kN/mm)	${}_bK/{}_{b0}K$
BN000	188	1.00	82.1	1.00
BP010	178	0.94	79.0	0.96
BP030	165	0.87	74.0	0.90
BA010	154	0.82	35.7	0.43
BA030	124	0.66	30.7	0.37

注）${}_{b0}P_{max}$ と ${}_{b0}K$ は BN000 の最大耐力と初期剛性

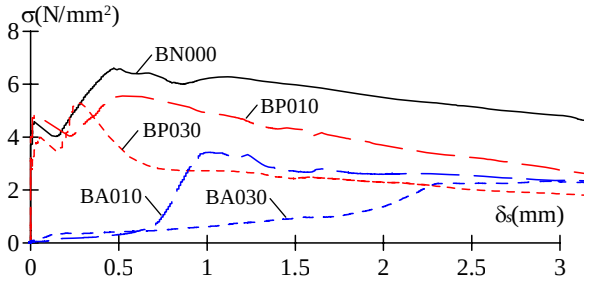
ほど初期剛性と最大耐力の低下が顕著であることが確認された。しかしながら，BA010 および BA030 に比べて BP010 および BP030 の初期剛性と最大耐力の低下の程度は小さいため，コンクリートの凝結が始まる前の流動性の高い状態で地震動を受けた場合は，主筋とコンクリートに相対変位を生じた場合でも，その後の地震動によって主筋とコンクリートの間隙は埋まるものと推測され，振動時の相対変位が小さければ，コンクリート打設直後に地震動を受けることがコンクリートの硬化が進行した後の梁の力学特性に与える影響も小さいものと思われる。

下端主筋の付着応力度σと抜け出し量δ_sの関係を**図－9** に示す。σは下式を用いて算定した。

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \cdot A / A_s \qquad (1)$$

ここに，εはスリット位置の主筋に貼り付けたひずみゲージによるひずみ度の計測値，E は主筋のヤング係数(=205000N/mm^2)，A は主筋の断面積，A_sはスリットと付着絶縁区間の主筋の表面積である。

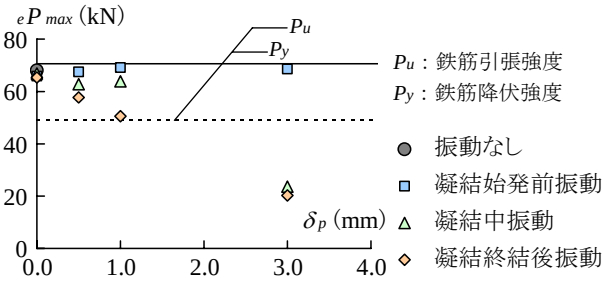
コンクリート凝結終結後に地震動を受けて硬化した BA010，BA030 は主筋が抜け出しを生じてからσが上昇しているが，凝結始発前に地震動を受けて硬化した BP010，BP030 は載荷初期時に主筋が抜け出さずにσが上昇し，抜け出しを生じる時の付着応力度は地震動を受けていない BN000 に近い値に達していることがわかる。



図－9 付着応力度－抜け出し量関係

3.5 付着要素試験体の最大耐力

付着要素試験体の最大耐力 $_eP_{max}$ とδ_p の関係を**図－10**，実験結果一覧を**表－10** に示す。凝結終結後に地震動を受けて硬化した試験体はδ_p の増大と共に $_eP_{max}$ が小さくなっているが，凝結始発前に地震動を受けて硬化した試験体の $_eP_{max}$ はδ_pに関わらず P_u に近い値に達しており，梁型試験体と同様に，主筋とコンクリートの相対変位によって生じた間隙は埋まっているものと思われる。



図－10 最大耐力と δp の関係

表－10 付着要素実験結果一覧

試験体	$_eP_{max}$ (kN)	$_eP_{max}/_{e0}P_{max}$
EN000	68.1	1.00
EP000	65.8	0.97
EP005	67.5	0.99
EP010	69.2	1.02
EP030	68.5	1.01
EM000	66.8	0.98
EM005	62.7	0.92
EM010	63.9	0.94
EM030	23.6	0.35
EA000	65.3	0.96
EA005	57.7	0.85
EA010	50.5	0.74
EA030	20.3	0.30

注）$_{e0}P_{max}$ は EN000 の最大耐力

4. まとめ

本研究によって，以下の結論を得た。

1) コンクリート打設直後に地震動を受けずに硬化した場合は曲げ破壊が先行する梁でも，付着強度に余裕がない梁に関しては，コンクリート打設直後に地震動を受けて主筋とコンクリートに相対変位を生じていればコンクリート硬化後の梁の破壊モードが変化し，初期剛性，最大耐力および靭性が低下する。

2) コンクリート打設直後に地震動を受けるまでの経過時間が長く，地震動を受けることによる主筋とコンクリートの相対変位が大きい場合ほどコンクリート硬化後の主筋の付着劣化の程度は大きくなるが，コンクリートが凝結を開始する前の流動性の高い状態で地震動を受けた場合には，コンクリート硬化後の主筋の付着劣化に与える影響は小さい。

参考文献

1) 山下宣博，平野　実，塚山隆一，神垣則明：養生中に継続振動をうけるコンクリートの諸性質について，セメント・コンクリート，No.287，1971.1

2) 川瀬克己，今村栄一，勝木政善，本康　久，室山秀夫：打込後に断続的地震動を受けたコンクリートの付着強度 その 2 室内実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.459-460，1978.9

3) 梶山　毅，住学，平　弘毅：打込み直後に地震動を受けたコンクリートの強度性状に関する実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.571-572，2005.9

4) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990.11

5) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靭性保証型耐震設計指針・同解説，1999.8