

# 論文 RC2 層ラーメン高架橋を対象に静的解析と台形型加速度波形入力での動的解析による崩壊挙動に関する一考察

小林 薫\*1・井比 亨\*2・山本 忠\*3

**要旨**：本検討は、RC2 層ラーメン高架橋の橋軸直角方向を対象に崩壊挙動に関する検討を行ったものである。本検討では、崩壊を復元力が喪失した状態と定義した。材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した解析を実施した。静的な変位漸増解析では、復元力を喪失する上層位置の水平変位、鉛直変位は、水平変位で高架橋高さ (h) の約 (2/3)h、鉛直変位で約 (1/4)h であった。また、崩壊挙動としては円曲線となる軌跡を示した。台形形状の加速度入力による動的解析では、上層位置の応答加速度が崩壊と判定される場合、加速度入力がゼロ付近の時刻で最大となり、このときの水平変位は復元力が喪失する水平変位の 80% 程度以上となっていた。

**キーワード**：RC2 層ラーメン、FEM 解析、崩壊、幾何学的非線形

## 1. はじめに

地震時において、構造物の損傷のうち、最も重大な損傷は崩壊であり、発生を回避しなければならない事象である。

1995 年の兵庫県南部地震では、多くの構造物に倒壊等の崩壊にいたる被害が発生した。崩壊した多くの RC 構造物は、せん断性能不足や軸方向鉄筋の継手不良などであった。

兵庫県南部地震の被害を契機として、既設構造物では耐震補強が実施され、新設構造物への対応として耐震基準の見直しが行われた。その結果、大規模地震に対する構造性能の向上が図られ、兵庫県南部地震以降の大規模地震に対して、効果を発揮してきたものと考えられる。

兵庫県南部地震以降の鉄道構造物の耐震基準<sup>1)</sup>の要求性能に関する記述では、地震時における構造物の構造体としての安全性を L2 地震動に対して、構造物全体系が破壊しない性能を要求性能としている。この性能を満足するため、安全側の措置として、部材の集合体である構造物において、いずれか一つの部材が破壊に至る状態とした場合の照査方法が規定されている。この照査方法は、構造物を構成する多くの部材のうちの一つの部材の破壊を構造物全体系の破壊と安全側に近似しているが、構造物全体系の破壊や崩壊に関する安全性は、一つの部材だけでなく構造物を構成している多くの部材の相互作用として関連する。構造物全体系の破壊や崩壊の安全性の議論をさらに進めるためには、構造物全体系を破壊や崩壊する構造系と捉え、構造物全体系での破壊や崩壊に至る挙動の検討が必要と考える。

本検討は、3 径間連続 RC2 層ラーメン高架橋（以下「RC2 層ラーメン高架橋」という）を対象に崩壊挙動に

着目し、解析的な検討を行ったものである。構造物の崩壊は、自重を支持する部材、例えば柱部材や橋脚く体などが復元力を喪失することで発生すると考えられる。復元力の喪失は、部材のせん断破壊によっても生じるが、既設構造物でせん断破壊先行型の構造物が耐震補強により順次解消されている。新設構造物でも棒部材を主体とする構造物では所定のじん性を付与する耐震設計がおこなわれている。このようなことから、本検討では、曲げ破壊する部材で構成される構造物を対象に、せん断破壊型の部材を有する構造物は対象外とした。

構造物の大変形領域での復元力の喪失は、一般的に材料非線形性と幾何学的非線形性（以下「P-Δ 効果」という）による。P-Δ 効果は、水平変位の増加に伴い重力の影響で付加モーメントが作用する現象で、既往の研究では建築分野で、例えば、山崎ら<sup>2)</sup>、秋山らによる一連の研究<sup>3)4)</sup>があり、せん断型多層骨組を対象に P-Δ 効果を設計に取り入れる提案も行われている。土木分野では、DHAKAL, MAEKAWA らによる RC 柱の崩壊に及ぼす P-Δ 効果の検討<sup>5)</sup>が行われている。MAEKAWA らの検討でもせん断破壊先行型は検討対象外としている。

本検討では、MAEKAWA らと同様な解析手法を用いて、材料非線形性と P-Δ 効果を考慮した静的変位漸増解析と台形形状の時刻歴加速度波形入力による動的解析を実施した。入力加速度波形を台形形状にした理由は、構造物の応答変位に応じて材料非線形性により復元力の低下が生じるが、大変形領域になると P-Δ 効果の影響もさらに加わり、復元力の低下が一段と進むことになる。台形形状の加速度波形では、加速度一定区間があり、その後入力加速度がゼロとなる。構造物の応答変位がある限界点を超え、入力加速度ゼロの区間で構造物の応答変位の増

\*1 JR 東日本コンサルタンツ（株）特殊解析室室長 博士（工）（正会員）

\*2 JR 東日本コンサルタンツ（株）特殊解析室主任 修士（工）

\*3 JR 東日本コンサルタンツ（株）特殊解析室担当部長

加がみられる場合は崩壊挙動への移行，あるいは崩壊と確認できると考えた。

本論文は，鉄道で用いられている RC2 層ラーメン高架橋を対象に，3 次元モデルによる崩壊挙動に関する解析的な検討を行ったので報告する。

## 2. 本論文における構造物の崩壊の定義

図-1 に，本検討における構造物の崩壊の定義を示す。構造物の崩壊は，構造物の応答変位に伴う材料非線形性と P-Δ 効果に伴う復元力の低下により，復元力が喪失した時点，すなわち復元力がゼロとなった場合とした。復元力の喪失を構造物の崩壊の定義としている研究は，山崎ら<sup>2)</sup>，秋山らの一連の研究<sup>3)4)5)</sup>も同様である。

構造物の復元力が喪失した時点とは，復元力がゼロとなる時点であるが，地震波の振幅特性が正負にランダムな加速度波形を用いた動的解析では必ずしも崩壊挙動に移行しない場合も想定される。これは，復元力が喪失し崩壊挙動に移行しようとするとき，入力加速度が崩壊方向と逆方向に作用すると崩壊挙動を抑制することが考えられるためである。そのようなことを回避するため，本検討では，台形状の加速度波形入力での動的解析を実施した。

## 3. 検討対象 RC2 層ラーメン高架橋の概要

RC ラーメン高架橋では，フーチング上面から上層スラブまでの高さが 10m を超えると中層はりを設けた 2 層構造とする場合がある。以下に，検討対象の RC2 層ラーメン高架橋の概要を述べる。なお，RC2 層ラーメン高架橋の解析結果の比較として，中層はりを取り除いた RC1 層ラーメン高架橋も検討対象とすることで，中層はりの構造全体系への影響を明確にできると考えた。

図-2(a)～(d)に，検討対象とした 3 径間連続 RC2 層ラーメン高架橋の一般図，各部材断面を示す。本ラーメン高架橋は，フーチング上面から軌道階のスラブ上面までの高さが 12m で，中層はりが設けられ 2 層構造となっている。耐震設計は，設計水平震度 0.25 とした震度法により行われている。柱の断面寸法は，上層・下層ともに 1050mm×1050mm で，中層はりの断面寸法は橋軸方向，橋軸直角方向ともに 850mm×1100mm である。

柱部材に配置されている軸方向鉄筋は，D29 (SD345) が 32 本で，軸方向鉄筋比は 1.9% となっている。柱部材のせん断補強鉄筋は，D13 の帯鉄筋が 2 組配置され，下層柱部材基部から 2250mm 区間は 150mm 間隔 (せん断補強鉄筋比：0.32%)，次の 1800mm 区間が 300mm 間隔で，上層柱も含んで残りの区間は 150mm 間隔となっている。

橋軸方向の中層はりは，側径間部と中央径間部で主筋

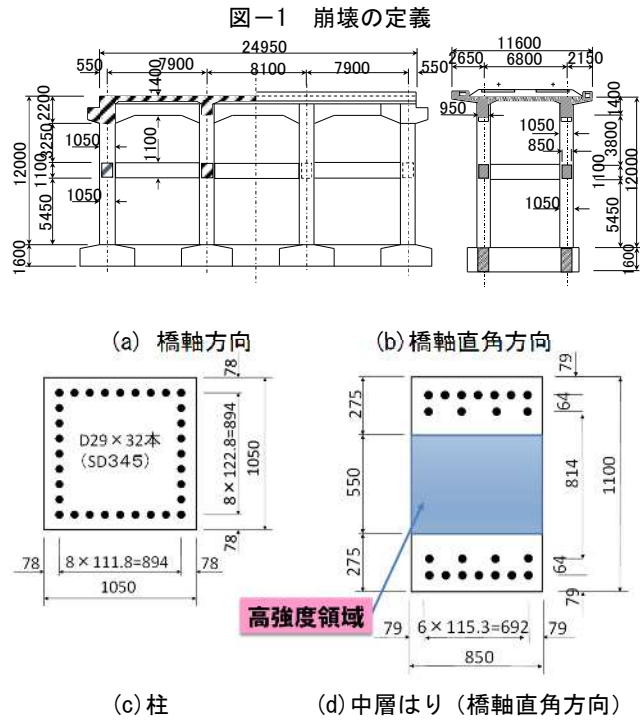
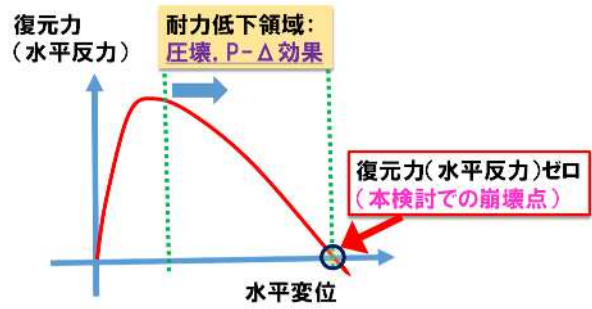


図-2 RC2 層ラーメン高架橋の一般図・部材断面 (単位：mm)

の配筋に若干の相違が見られる。側径間中層はり接合部の下側主筋は 2 段配筋で D32 (SD345) が 7 本配置され，橋軸方向の 3 本の中層はりに連続的に配置されている。側径間中層はり接合部端部下側の 2 段目は，D32 (SD345) が 4 本配置され，柱面から 4m の位置で段落しされている。側径間中層はりの中央径間側接合部では 2 段目の主筋がない。中央径間中層はり下側の主筋は D32 (SD345) が 7 本の 1 段配筋となっている。橋軸方向中層はりの上側の主筋は 2 段配筋で橋軸方向の中層はり全長に渡って配置されている。橋軸方向中層はりのせん断補強鉄筋は，D13 (SD345) 1 組が 250mm 間隔で配置されている。

橋軸直角方向の中層はりは，4 本とも全て同じ配筋となっている。上下の主筋配置は同じで，1 段目は D29 (SD345) が 7 本，2 段目は D29 (SD345) が 4 本配置されている。橋軸直角方向の中層はりのせん断補強鉄筋は，D13 (SD345) 1 組が 250mm 間隔で配置されているが，中層はりを曲げ破壊モードとするため梁中央部に高強度領域 (レジコンクリート相当)<sup>7)</sup>を配置した。

#### 4. 解析概要

##### 4.1 解析モデル概要

図-3 に、構造物全体系の解析モデルを示す。解析モデルは、フーチングから上部構造全体をモデル化した。解析対象の RC2 層ラーメン高架橋は、ゲルバー桁による接続形式となっている。ゲルバー桁部に関しては、ラーメン高架橋の桁受部に、ゲルバー桁と同じ桁高となる弾性部材を配置し、単位体積重量を調整し、ゲルバー桁の反力 (40t) を作用させた。上層位置の軌道重量 (1.8t/m) などの版上荷重は、スラブ上面にソリッド要素で板材を配置して模擬した。

解析モデルに用いた材料特性は、設計時の値 ( $f_{ck} = 27\text{N/mm}^2$ ) を入力した。境界条件は、フーチング下面を固定とした条件で設定した。

##### 4.2 解析手法の概要

本検討に用いた解析手法<sup>8)9)</sup>は、東京大学コンクリート研究室で開発された任意の荷重経路依存性を考慮可能な材料構成則に基づく RC 平面モデルを 3 次元に拡張した FEM 解析である。

本検討は、復元力の喪失に至るまでの構造物の変形領域を対象にしている。適用 FEM 解析における材料非線形性と P- $\Delta$  効果を考慮し、復元力の喪失に至る変形領域までの検討は、文献 6) で実施されている。文献 6) では、かぶりコンクリートの剥落の有無、軸方向鉄筋の座屈発生の有無、幾何学的非線形性の有無など、4 パターンの解析モデルを単調荷重した結果が掲載され、検証が行われている。

#### 5. 解析結果

##### 5.1 静的変位漸増解析結果の概要

###### (1) 橋軸直角方向の荷重-変位関係

図-4(a)(b)に、橋軸直角方向の静的変位漸増解析結果として、上層梁位置の復元力 (水平反力) と荷重点位置の水平変位との関係を示す。表-1 に、復元力が喪失する時点の橋軸直角方向の水平変位、鉛直変位を示す。静的解析時の荷重点位置に関しては、図-3 の解析モデル図に図示している。

図-4(a)と図-4(b)において、最大復元力を比較すると、RC2 層ラーメン高架橋が中層はりを取り除いた RC1 層ラーメン高架橋より約 1.6 倍向上していた。復元力が喪失する時点の水平変位で約 1.2 倍、鉛直変位で約 1.17 倍、RC2 層ラーメン高架橋の方が RC1 層ラーメンより大きくなった。これは、RC2 層ラーメン高架橋における中層はりの構造性能への貢献を示している。

###### (2) 復元力喪失に至る橋軸直角方向の変位挙動

図-5 は、X 軸に橋軸直角方向の水平変位、Y 軸に鉛直

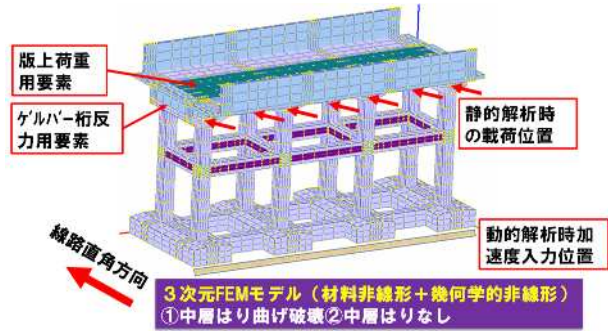
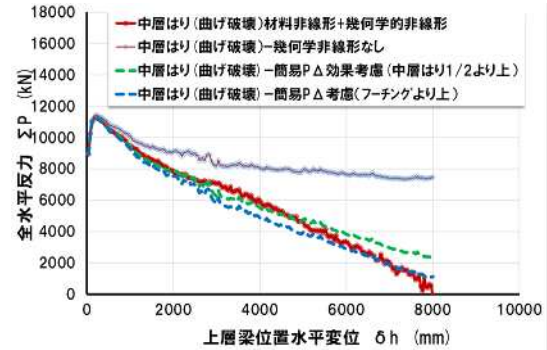
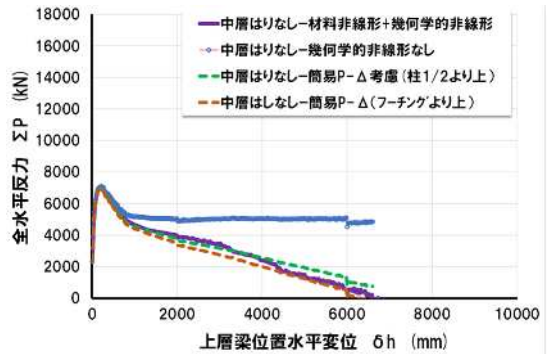


図-3 解析モデル



(a) RC2 層ラーメン高架橋



(b) 中層はりを取り除いた RC1 層ラーメン高架橋

図-4 静的変位漸増解析結果

表-1 復元力喪失時の水平変位および鉛直変位

構造タイプ	対象	水平変位 $\delta h$ (mm)	鉛直変位 $\delta v$ (mm)
中層はり (曲げ破壊)		7960	-2999
中層はりなし		6600	-2555

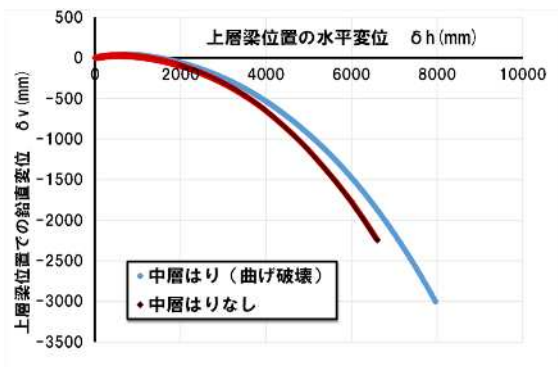


図-5 復元力喪失に至るまでの上層位置の変位軌跡

変位で図化したもので、復元力喪失までの上層位置の変位の軌跡を示したものである。復元力喪失までの上層位置の変位の軌跡は、ほぼ円曲線に近い曲線となっていた。解析結果は、柱、中層梁が曲げ破壊となった。

図-6 は、復元力がゼロとなる時点の変形状態を示したものである。検討対象の RC2 層ラーメン高架橋で、復元力がゼロとなる水平変位はフーチング上面からの高架橋高さ (h) の (2/3)h 程度、鉛直変位は (1/4)h 程度であった。ちなみに、中層はりを取り除いた RC1 層ラーメン高架橋では、水平変位で (11/20)h、鉛直変位で (1/5)h 程度となっていた。

### (3) P-Δ 効果の簡易評価法の検討概要

図-4 (a) (b) 中には、P-Δ 効果を考慮していない解析結果も表示した。さらに、P-Δ 効果を簡易に評価した結果も表示した。

P-Δ 効果の簡易な評価方法としては、P-Δ 効果を考慮していない解析結果の復元力から、P-Δ 効果の簡易算定式から求まる復元力を差し引く (1) 式で検討を行った。

$$Q_{p\Delta} = Q_M - P_v \cdot \delta / h \quad (1)$$

ここで、 $Q_{p\Delta}$  : 材料非線形性を考慮した復元力に P-Δ 効果を簡易考慮した場合の復元力

$Q_M$  : 材料非線形性を考慮したときの復元力

$P_v$  : 自重

$\delta$  : 載荷点位置の水平変位

$h$  : 載荷点高さ

P-Δ 効果の簡易計算では、重力の作用となる自重をどの範囲で見込むかが不明である。RC2 層ラーメン高架橋では、中層はりの断面高さの中心から上部の全自重を考慮した場合とフーチング上面から上部の全自重を考慮した 2 ケースについて検討を行った。中層はりを取り除いた RC1 層ラーメン高架橋の場合も RC2 層ラーメン高架橋と同様に簡易計算を行った。

その結果、仮定した二つの自重設定で大きな違いはなかったが、フーチング上面から上部の自重を考慮した方が幾何学的非線形性を考慮した解析結果との整合性がいくらか良い結果となった。これは、崩壊に至る変形形状がフーチング上面付近で柱部材が折れ曲がるようになっていたことと関係していると思われる。

## 5.2 動的解析の概要

### (1) 入力加速度波形

図-7 に、崩壊過程を動的解析でシミュレーションするための入力加速度波形を示す。入力加速度波形は、時刻歴で 0.01 秒毎のサンプリングタイムで全長 2.0 秒間となっている。振幅特性としては、加速度が一定値になるまで増加する最初の立ち上がり区間、設定最大加速度で

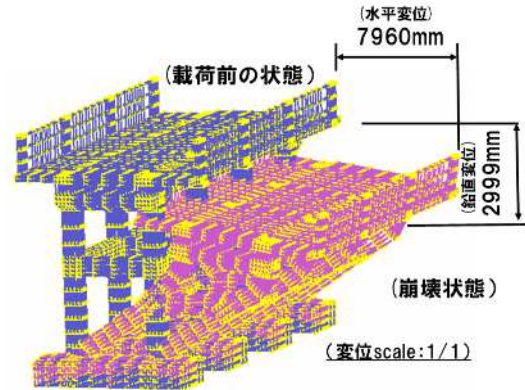


図-6 復元力喪失時の変形状態 (RC2 層ラーメン)

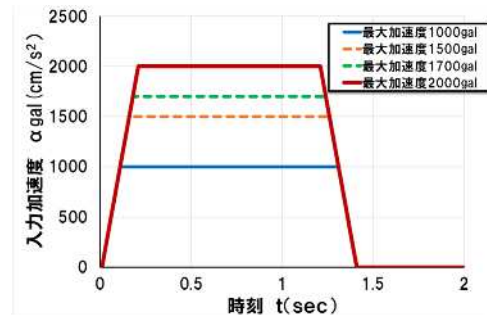


図-7 動的解析時の台形状の加速度入力波形

一定の約 1.3 秒間の区間、加速度一定区間から加速度が低減しゼロになる区間、そのあとの約 1.0 秒間は加速度がゼロとなっている。

このような入力加速度波形としたねらいは、構造物の応答変位が加速度ゼロ区間でも増加している場合、P-Δ 効果により崩壊過程 (メカニズムの状態) に入っていると容易に判断可能となるからである。

### (2) 入力加速度波形の最終ステップ時変形状態

図-8 (a) ~ (d) に、RC2 層ラーメン高架橋の各加速度波形入力最終ステップの変形状態を載荷前の状態と比較して示す。入力最大加速度が 1000gal ( $\text{cm/s}^2$ ) では、変形がほとんど残留せず載荷前状態に近い変形となっていた。これは、加速度入力作用で応答はするものの残存する復元力によって載荷前の状態に近い状態に戻るからである。入力最大加速度 1500gal ( $\text{cm/s}^2$ ) と 1700gal ( $\text{cm/s}^2$ ) の場合は、大きな水平変位、鉛直変位とはなるが、静的変位漸増解析時で復元力が喪失する水平変位、鉛直変位までは達していない。入力最大加速度 1700gal ( $\text{cm/s}^2$ ) の場合は、復元力が喪失する水平変位の 98%、鉛直変位で 87%に達したが高架橋の変形図ではかろうじて立っている状況となった。入力最大加速度 2000gal ( $\text{cm/s}^2$ ) では、静的解析時の復元力喪失変位を超えた変形が生じており、フーチング位置付近まで片持ちスラブが落ちていることから、崩壊したものと考えられる。

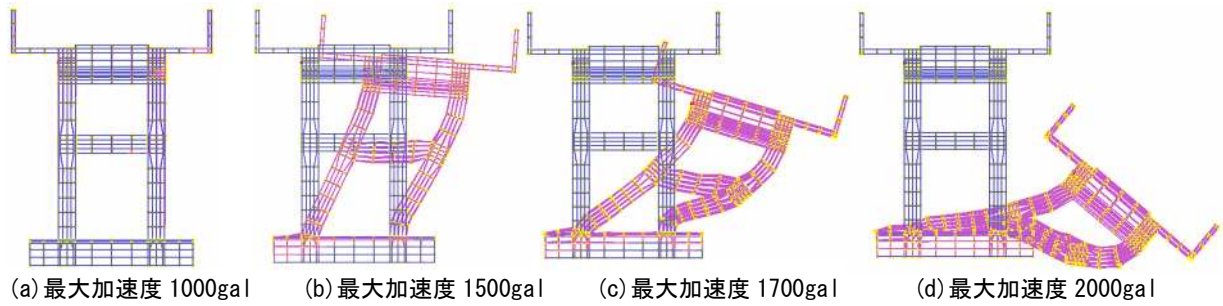


図-8 RC2層ラーメン高架橋の台形形状の加速度入力波形の最終ステップの変形状態

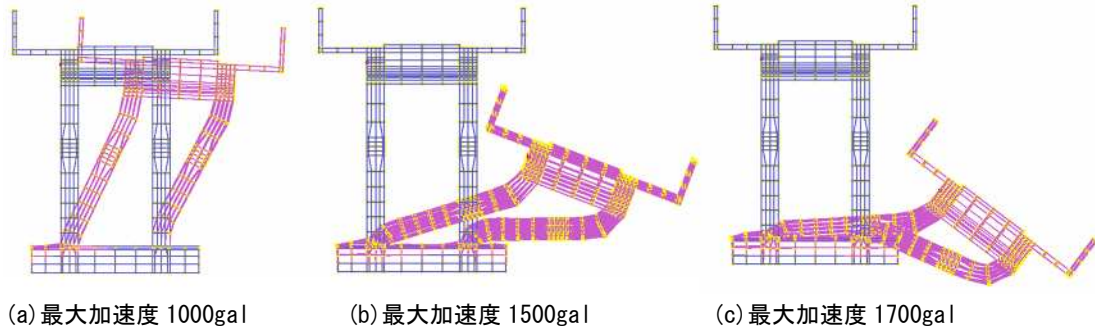


図-9 中層はりを取り除いたRC1層ラーメン高架橋の台形形状の加速度入力波形の最終ステップの変形状態

図-9(a)～(c)は、中層はりを取り除いた場合で入力最大加速度が 1000 gal ( $\text{cm/s}^2$ ), 1500 gal ( $\text{cm/s}^2$ ), 1700 gal ( $\text{cm/s}^2$ ) 時の最終ステップの変形状態を載荷前状態と比較して示す。中層はりを取り除いた場合は、入力最大加速度が 1500 gal ( $\text{cm/s}^2$ ) 以上で静的解析時の復元力を喪失する水平変位、鉛直変位を超える変形となった。中層はりの存在は、構造物全体系の復元力向上により崩壊時の入力加速度向上へも貢献している。

### (3) 上層位置における橋軸直角方向の応答加速度

図-10 は、RC2 層ラーメン高架橋の橋軸直角方向上層位置の時刻歴の応答加速度波形を示したものである。なお、上層での加速度出力位置は、静的解析時の載荷点と同じ位置とした。RC2 層ラーメン高架橋の場合、本検討では入力最大加速度 2000 gal ( $\text{cm/s}^2$ ) 時に明確な崩壊となった。

上層位置での橋軸直角方向の応答加速度は、時刻 0.5 秒程度までは入力最大加速度値によらず、ほぼ同程度の応答加速度を示した。入力最大加速度 1000 gal ( $\text{cm/s}^2$ ) では、時刻 0.5 秒から 1.3 秒間で応答加速度 1000 gal ( $\text{cm/s}^2$ ) を中心に 150 gal ( $\text{cm/s}^2$ ) 程度の振幅で振動していた。入力最大加速度 1500 gal ( $\text{cm/s}^2$ ) と 1700 gal ( $\text{cm/s}^2$ ) の場合は、時刻 0.4 秒付近で応答加速度が 1300 gal ( $\text{cm/s}^2$ ) 程度で最大となり、それ以降の時刻での応答加速度は徐々に低下し、時刻 2.0 秒で 500 gal ( $\text{cm/s}^2$ ) 程度となった。これは、応答変位の増大とともに材料非線形性と P- $\Delta$  効果により復元力も低下し、時々刻々の復元

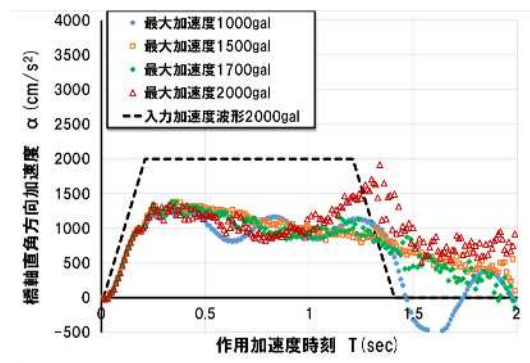


図-10 RC2層ラーメン高架橋上層位置の応答加速度

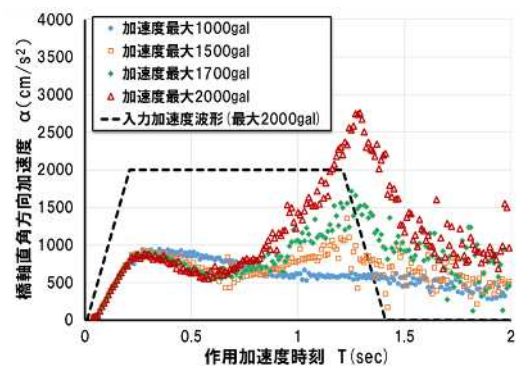


図-11 中層はりを取り除いたRC1層ラーメン高架橋上層位置の応答加速度

力に見合った上層位置の加速度が発生したものと考えられる。

入力最大加速度 2000 gal (cm/s<sup>2</sup>) 時では、時刻 1.0 秒付近から応答加速度が急激に増加し、1.34 秒で最大値 1914 gal (cm/s<sup>2</sup>) になった。時刻 1.34 秒から 1.5 秒で応答加速度が低下し、1.5 秒以降応答加速度は 500~1000 gal (cm/s<sup>2</sup>) でばらついた。時刻 1.34 秒付近で橋軸直角方向の応答加速度が最大となったのは、入力加速度波形がゼロ付近となる時刻で、その時点の橋軸直角方向の水平変位は復元力を喪失する水平変位の 84%、鉛直変位で 58% となっており、構造不安定に近い状態になったと想定される。

図-11 は、中層はりを取り除いた RC1 層ラーメンとした場合の橋軸直角方向上層位置での時刻歴応答加速度波形を示したものである。RC1 層ラーメンの場合、入力最大加速度値が 1500gal (cm/s<sup>2</sup>) 以上で復元力を喪失する水平変位、鉛直変位を超えるので解析結果は崩壊と判定される。図-11 からは、崩壊と判定された入力最大加速度値に応じて、橋軸直角方向上層位置の応答加速度の最大値は異なるが傾向は同じで、時刻 1.25 秒前後で最大値となった。

今回の解析で、入力最大加速度値 1500 gal (cm/s<sup>2</sup>) の場合で橋軸直角方向の応答加速度が最大となったのは、入力加速度波形がゼロ付近となる時刻で上層位置の水平変位が復元力を喪失する水平変位の 80%、鉛直変位で 44%となっていた。これは RC2 層ラーメン高架橋と同様に構造不安定に近い状態になったと想定される。

## 6. まとめ

本検討は、RC2 層ラーメン高架橋を対象に、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した崩壊挙動に着目した解析を実施した。以下に本検討結果のまとめを示す。

- (1) 静的変位漸増解析の結果、RC2 層ラーメン高架橋で復元力を喪失する水平変位は、高架橋高さ(h)の約 2/3、鉛直変位で約 1/4 程度であった。
- (2) RC2 層ラーメン高架橋の崩壊挙動は、円曲線の軌跡を示した。
- (3) 幾何学的非線形性を考慮しない解析結果に P-Δ 効果を簡易に考慮する場合の自重は、フーチング上面からの全重量の方が材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した解析との整合性が高い。

- (4) 台形状の加速度波形入力による動的解析で崩壊挙動に移行する場合、復元力の喪失時に応答加速度が増大するが、入力加速度が小さくなることで応答加速度も低下する。
- (5) 上層位置での応答加速度の最大値は、復元力を喪失する上層位置の水平変位の 80%程度以上となっており、構造不安定に近い状態になったためと想定される。

## 参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，鉄道総合技術研究所編，平成 24 年 9 月
- 2) 山崎真司，遠藤和明：弾塑性地震応答における P-Δ 効果と安定比，日本建築学会構造系論文集，第 527 号，pp.71-78，2000.1
- 3) 石鍋雄一郎，半貫敏夫，秋山 宏：地震下における骨組の変形応答に及ぼす P-Δ 効果の影響，日本建築学会構造系論文集，第 559 号，pp.79-83，2002.9
- 4) 秋山 宏：P-δ 効果を考慮したせん断型多層骨組の耐震設計，日本建築学会構造系論文集，第 617 号，pp.87-94，2007.7
- 5) 秋山 宏：P-δ 効果の設計への反映，日本建築学会構造系論文集，第 78 巻，第 690 号，pp.1395-1403，2013.8
- 6) Rajesh P.DHAKAL ， Koichi MAEKAWA: GEOMETRICAL NONLINEARITY ON COLLAPSE OF REINFORCED CONCRETE PIERS ， J.Materials, Conc.Struct., Pavements, JSCE, No.676/V-51,pp.135-147, 2001 May
- 7) 小林 薫，山下洋平，佐々木尚美：高強度領域を配置した中層はりを有する RC2 層ラーメン高架橋の耐荷特性に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.2，2019.7
- 8) 前川宏一，福浦尚之：多方向ひび割れを考慮した RC 構成則の部材・構造挙動からの検証，土木学会論文集 No. 634/V-45, pp.209-225, 1999. 11
- 9) 福浦尚之，前川宏一：非線形支配ひび割れ面の三次元同定と空間平均構成則の高度化，土木学会論文集 E, Vol.65 No.1, pp.118-137, 2009. 3