

論文 中層はりの破壊性状が RC2 層ラーメン高架橋の崩壊挙動に及ぼす影響に関する一考察

小林 薫*1・桑木野 耕介*2・宇留賀 大成*3

要旨：本検討は、中層はりの破壊性状が RC2 層ラーメン高架橋の橋軸直角方向の崩壊挙動に及ぼす影響について検討を行ったものである。構造系の崩壊は、復元力が喪失した状態と定義し、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。検討対象の RC2 層ラーメン高架橋では、中層はりの破壊性状を曲げ破壊、せん断破壊とした静的な変位漸増解析、一定加速度領域を有する台形状の加速度入力による動的解析を実施した。その結果、構造全体系の崩壊挙動は、中層はりがせん断破壊性状でも曲げ破壊性状と大差ない結果を示した。

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

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 層ラーメン構造とする場合がある。中層はりは、柱部材の発生曲げモーメントを低減し、柱断面の縮小に寄与している。

RC2 層ラーメン高架橋については、これまで多くの研究報告(例えば 1)~4) がある。中層はりの存在は、構造物を構成する部材数は増えるものの構造系の不静定次数を高め、ひとつの部材の終局が構造全体系の崩壊につながりにくいので、耐震性能を考えると好ましいと考えられる。

中層はりの破壊性状に関しては、曲げ破壊、せん断破壊がある。RC2 層ラーメン高架橋を新設する場合は、曲げ破壊を選択するが、既設の RC2 層ラーメン高架橋ではせん断破壊が先行する中層はりを有する高架橋も存在する。

本論文は、中層はりの破壊性状として、曲げ破壊、せん断破壊とした場合の RC2 層ラーメン高架橋の崩壊挙動に着目した検討を行ったものである。中層はりが曲げ破壊する場合の崩壊挙動に関しては、参考文献 5) で報告しているが、同様な手法を用いて、今回新たにせん断破壊を追加して検討を行った。すなわち、RC2 層ラーメン高架橋の 3 次元 FEM モデルを構築し、材料非線形と幾何学的非線形(以下「P-Δ 効果」という)を考慮した大変形を対象とした解析を実施した。解析内容としては、静的変位漸増解析と台形状の時刻歴加速度波形入力による動的解析である。

検討対象とした RC2 層ラーメン高架橋は、フーチングからスラブ上面までの高さが 12m の標準設計された東北新幹線用のものである。

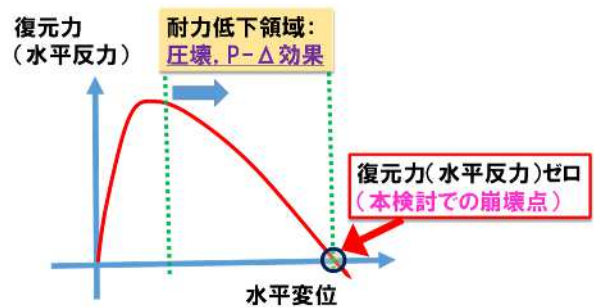


図-1 崩壊の定義

既往の研究では建築分野で、例えば、山崎ら⁶⁾、秋山らによる一連の研究⁷⁾⁸⁾⁹⁾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¹⁰⁾が行われている。

2. 本論文における構造物の崩壊の定義

構造物の崩壊の定義に関しては、著者らの既往研究⁵⁾と同様とし、参考文献 5) を引用し概要を記述する。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⁶⁾、秋山らの一連の研究⁷⁾⁸⁾⁹⁾も同様である。

3. 検討対象 RC2 層ラーメン高架橋の概要⁵⁾

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

*1 JR 東日本コンサルタンツ (株) 鋼構造設計部部長 博士 (工) (正会員)

*2 JR 東日本コンサルタンツ (株) 特殊解析室次長 修士 (工)

*3 JR 東日本コンサルタンツ (株) 特殊解析室副主任

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。主筋配置は、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。本検討において、橋軸直角方向の中層はりは、せん断破壊先行の破壊性状となっている。既往研究⁵⁾では、中層はりを曲げ破壊性状とするため、梁中央部に高強度領域（レジコンクリート相当）⁵⁾¹¹⁾を配置した場合、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している。本論文では、既往研究結果⁵⁾もあわせた3ケースを検討対象とした。

4. 解析概要

4.1 解析モデル概要

解析モデルに関しては、著者らの既往研究⁵⁾で構築した解析モデルに中層はりがせん断破壊するモデルを追加設定した。図-3に、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、スラブ上面に板状のソリッド要素を配置して模擬した。中層はりのせん断破壊の解析モデルの材料特性は、設計時の値($f'_{ck}=27\text{N/mm}^2$)を入力した。

4.2 解析手法の概要

本検討に用いた解析手法¹²⁾¹³⁾は、東京大学コンクリート研究室で開発された任意の載荷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としている。材料非線形性とP- Δ 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、参考文献10)

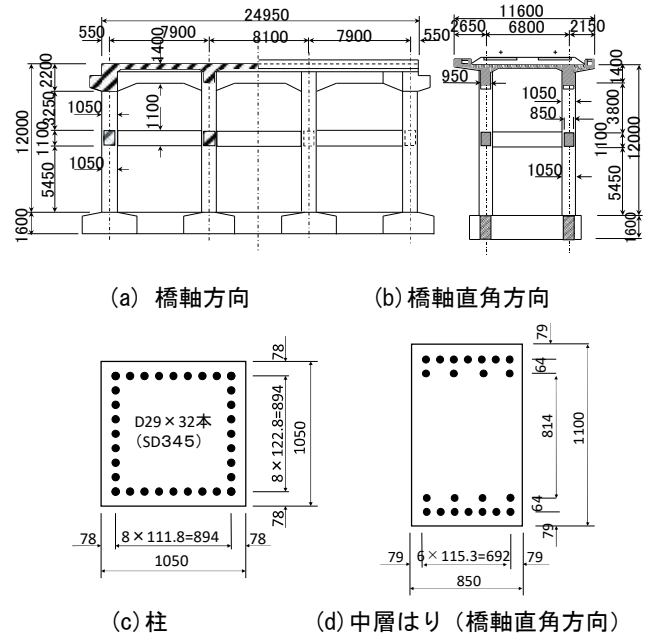


図-2 RC2層ラーメン高架橋の一般図・部材断面 (単位: mm)

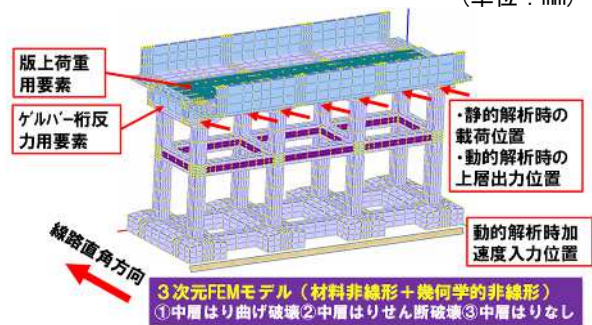


図-3 解析モデル

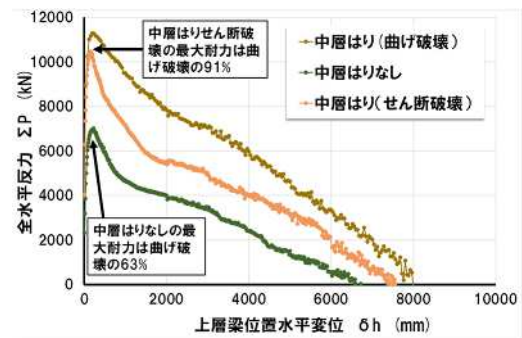


図-4 静的変位漸増解析結果

で実施されている。

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)と載荷点位置の水平変位との関係を示す。表-1に、各解析ケースの復元

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。静的解析時の載荷点位置に関しては、図-3の解析モデル図に図示している。

図-4において、橋軸直角方向全体系の最大復元力を中層はりが曲げ破壊するケースと比較すると、中層はりがせん断破壊する場合で91%、中層はりがない場合で63%であった。

復元力が喪失する時点の水平変位を中層はりが曲げ破壊するケースと比較すると、せん断破壊の場合で95%、中層はりがない場合で83%であった。中層はりがせん断破壊する場合でも、復元力や復元力喪失変位の維持に貢献しており、曲げ破壊する場合よりは構造性能が若干低下するものの、極端な低下とはなっていない。このことは、中層はりがせん断破壊性状であってもRC2層ラーメン高架橋における中層はりの存在意義を示すものであると考える。

(2) 復元力喪失に至る橋軸直角方向の変位挙動

図-5(a)(b)は、X軸に橋軸直角方向の水平変位、Y軸に鉛直変位で解析3ケースを図化したもので、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。図-5(b)は、水平変位が4000mm程度までを拡大表示したものであるが、中層はりがせん断破壊する場合、荷重初期段階は曲げ破壊と同様な軌跡で推移するが、水平変位が2000mmを超えるあたりから、変位の軌道が曲げ破壊から離れ、中層はりがないケースの軌道に擦りついていく。中層はりのせん断破壊の進行にともない2層ラーメン構造から1層ラーメン構造に遷移していく状況が確認される。

図-6は、中層はりがせん断破壊する場合を対象に、復元力が喪失した時点の変形状態を示したものである。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0.63h程度(曲げ破壊で0.66h)、鉛直変位は0.25h程度(曲げ破壊で0.25h)であった。

5.2 動的解析の概要⁵⁾

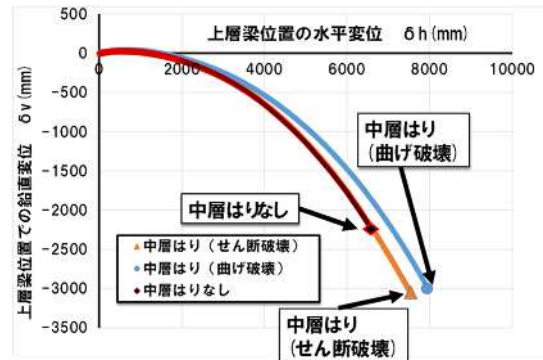
(1) 入力加速度波形

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。

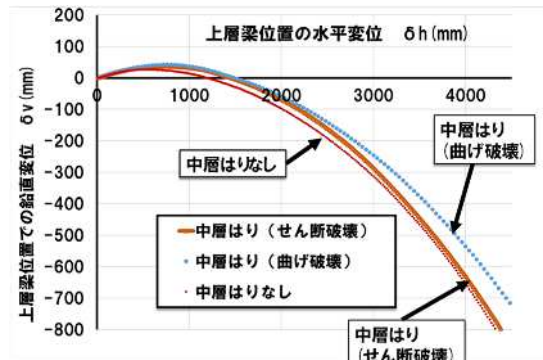
このような入力加速度波形としたねらいは、構造物の応答変位が加速度ゼロ区間でも増加している場合、P-Δ効果により崩壊過程(メカニズムの状態)に入っている

表-1 復元力喪失時の水平変位および鉛直変位

対象	水平変位 δh (mm)	鉛直変位 δv (mm)
構造タイプ		
中層はり (曲げ破壊)	7960	-2999
中層はり (せん断破壊)	7560	-3050
中層はりなし	6600	-2555



(a) 復元力喪失までの変位軌跡



(b) 水平変位 4000mm 程度までの軌跡

図-5 復元力喪失に至るまでの上層位置の変位軌跡

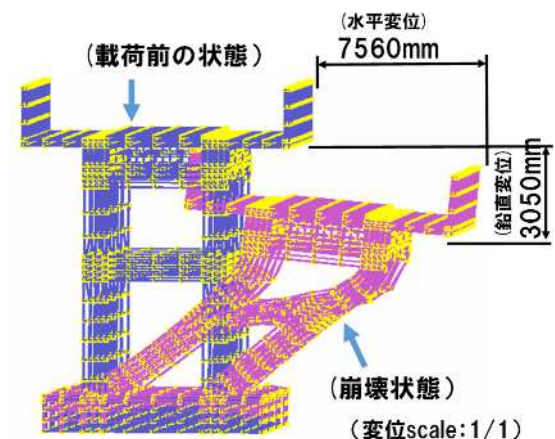


図-6 復元力喪失時の変形(中層はりせん断破壊)

と判断可能となるからである。図-8は、入力加速度波形の加速度応答スペクトル(h=5%)を示す。

(2) 入力加速度波形の最終ステップ時変形状態

図-9(a)~(c)に、中層はりがせん断破壊する場合の1000~1700gal (cm/s²) 時の入力加速度波形最終ステップの変形状態を荷重前の状態と比較して示す。入力最大加

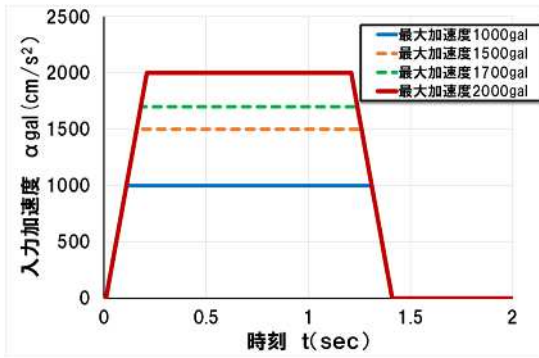


図-7 動的解析時の台形形状の加速度入力波形

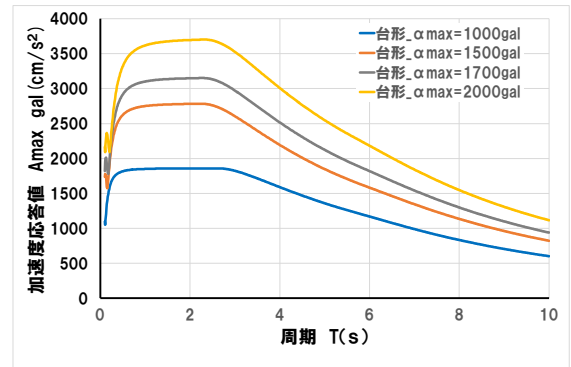


図-8 動的解析時の台形形状の加速度入力波形の加速度応答スペクトル (h=5%)

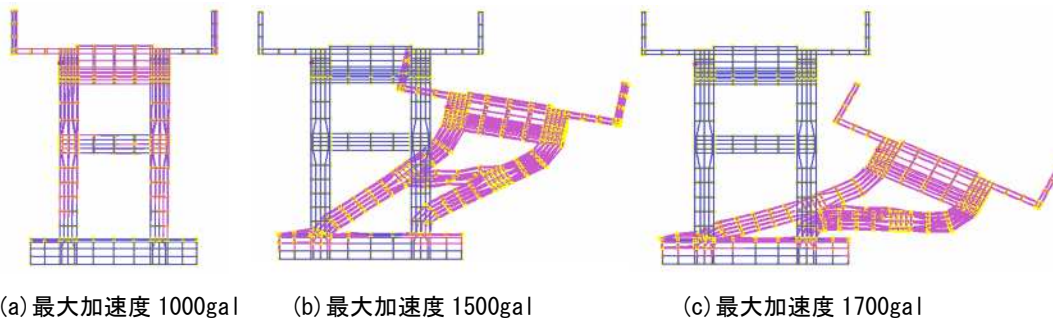


図-9 中層はりせん断破壊時の台形形状の加速度入力波形の最終ステップの変形状態 (変位 scale : 1/1)

速度が 1000gal (cm/s²) 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、加速度入力の作用で応答はするものの復元力によって、ほぼ載荷前の状態に戻るからである。入力最大加速度 1500 gal (cm/s²) の場合は、静的変位漸増解析時での復元力が喪失する水平変位、鉛直変位と同程度となっていたが、超過はしていなかった。入力最大加速度 1700 gal (cm/s²) の場合は、復元力が喪失する水平変位を超過しており崩壊と判定された。なお、中層はりが曲げ破壊する場合の崩壊判定は、入力最大加速度 2000gal (cm/s²) であった。中層はりの破壊性状によって、構造系の崩壊に対する挙動は変化することになる。

(3) 上層位置における橋軸直角方向の水平方向の応答加速度

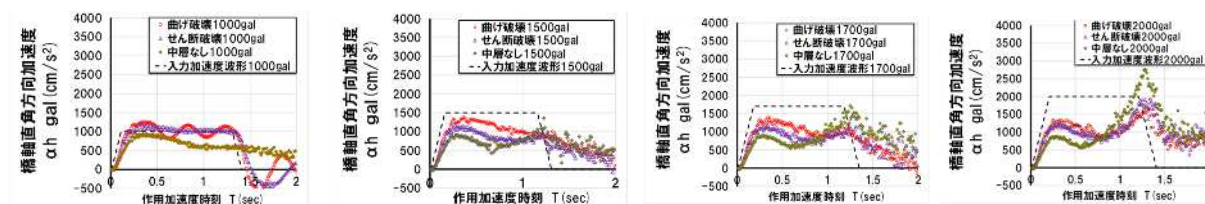
図-10 (a)～(d) は、解析を実施した 3 ケースにおける橋軸直角方向上層位置の水平方向応答加速度波形を入力加速度の最大値毎に示したものである。なお、上層での加速度出力位置は、静的解析時の載荷点と同じ位置とした。本検討では入力最大加速度 2000gal (cm/s²) 時に 3 ケースの解析モデルで明確な崩壊と判定されている。

入力最大加速度 1000gal (cm/s²) で中層はりが曲げ破壊する場合は、時刻 0.5 秒から 1.3 秒間で応答加速度 1000 gal (cm/s²) を中心に 150gal (cm/s²) 程度の振幅で振動していた。せん断破壊の場合は、入力加速度値と同程度の水平方向の応答加速度が発生していた。中層はりが無い場合は、時刻 0.3 秒付近で応答加速度が 940gal (cm/s²)

の最大値を示したあと、時刻 2.0 秒で約 500gal (cm/s²) まで低下した。

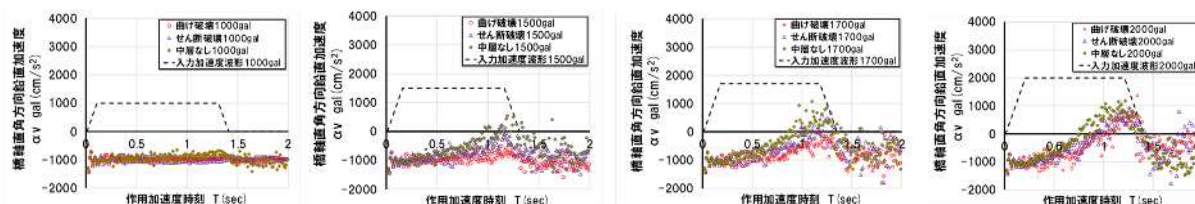
入力最大加速度 1500gal (cm/s²) で中層はりが曲げ破壊する場合は、時刻 0.35 秒で 1340gal (cm/s²) の最大加速度発生後、時刻 2.0 秒で 500gal (cm/s²) 程度まで徐々に低下する挙動を示した。せん断破壊する場合は、時刻 0.27 秒時に 1170gal (cm/s²) の最大加速度を示した以降徐々に低下し、時刻 2.0 秒で 500gal (cm/s²) 程度まで低下した。中層はりが無い場合は、時刻 0.28 秒で 930gal (cm/s²) の最大値以降徐々に低下し、時刻 0.66 秒時に 430gal (cm/s²) 程度まで低下した以降、応答加速度が若干大きくなった。入力加速度波形がゼロとなる直前の時刻 1.27 秒付近で 1710gal (cm/s²) の最大加速度が発生するが、それ以降では水平方向の加速度が徐々に低下する。本ケースでの最大加速度の出現は、復元力喪失水平変位付近まで応答水平変位が大きくなるため、上層位置が揺れやすい状況となっているためと想定される。

入力最大加速度 1700gal (cm/s²) で中層はりが曲げ破壊する場合は、時刻 0.34 秒で 1390gal (cm/s²) の最大値を示した以降、時刻 2.0 秒では水平方向加速度がゼロ付近まで低下した。せん断破壊する場合は、時刻 0.34 秒で 1170gal (cm/s²) の最大値を示したあと、水平方向加速度は徐々に低下するが、時刻 0.9 秒付近以降のばらつきはあるが曲げ破壊する場合と類似した加速度応答を示した。中層はりが無い場合は、時刻 0.28 秒で 910gal (cm/s²) の最大値を示したあと徐々に低下し、時刻 0.7 秒付近から



(a) 最大加速度 1000gal (b) 最大加速度 1500gal (c) 最大加速度 1700gal (d) 最大加速度 2000gal

図-10 RC2 層ラーメン高架橋上層位置の橋軸直角方向の水平方向応答加速度



(a) 最大加速度 1000gal (b) 最大加速度 1500gal (c) 最大加速度 1700gal (d) 最大加速度 2000gal

図-11 RC2 層ラーメン高架橋上層位置の橋軸直角方向の鉛直方向応答加速度

水平方向加速度が増加し、時刻 1.25 秒で 1715gal (cm/s²) の最大値を記録し、時刻 2.0 秒で 500gal (cm/s²) 程度まで低下した。

入力最大加速度 2000gal (cm/s²) で中層はりが曲げ破壊する場合は、時刻 0.25 秒で 1340gal (cm/s²) の加速度を示した以降、時刻 0.8 秒付近で 880gal (cm/s²) 程度まで低下し、時刻 1.34 秒で 1914gal の最大値を記録したあと時刻 2.0 秒まで 500~1000gal (cm/s²) の加速度が発生した。せん断破壊する場合は、時刻 0.31 秒で 1325gal (cm/s²) の加速度を示したあと曲げ破壊と同様に、時刻 0.8 秒付近で 880gal (cm/s²) 程度まで低下し、時刻 1.28 秒で 1920gal (cm/s²) の最大値を示したあと時刻 2.0 秒まで 370~1200gal (cm/s²) の加速度が発生した。中層はりが曲げ破壊する場合とせん断破壊する場合を比較すると完全に復元力を喪失する変位を超過する状況までの上層位置で橋軸直角方向の水平方向の加速度応答に大差ない結果となった。中層はりが無い場合は、時刻 0.24 秒で 864gal (cm/s²) の加速度を示したあと時刻 0.58 秒付近で 554gal (cm/s²) まで低下し、それ以降加速度が増加した。時刻 1.28 秒 2760gal (cm/s²) の最大値を示したあと時刻 2.0 秒まで 670~1500gal (cm/s²) の加速度が発生した。中層はりが無い場合は、曲げ破壊する場合より復元力喪失変位が 17%程度小さい。このため、加速度作用時間が短い段階で構造系の崩壊メカニズムに入りやすいことが水平方向の応答加速度が大きくなったものと考えられる。

(4) 上層位置における橋軸直角方向の鉛直方向の応答加速度

図-11 (a)~(d) に、橋軸直角方向上層位置の鉛直方向の応答加速度波形を示す。鉛直方向応答加速度の出力

点は、縦梁高さの中央位置で、図-3 の解析モデル中に図示している。鉛直方向応答加速度出力点は、水平変位の増加に伴い、上層位置は回転挙動が卓越するようになる。回転挙動に伴い出力点は上側に挙動するようになり、重力加速度と反対方向の加速度が生じるようになる。鉛直方向の加速度応答は、3 つの解析モデルで同様な挙動を示した。

水平方向の入力加速度が 1000gal (cm/s²) の場合は、水平変位が大きくならないため、鉛直方向の応答加速度も重力加速度とほぼ同程度の -1000 gal (cm/s²) で大きな変動はない。特に、水平方向の入力加速度が 2000gal (cm/s²) の場合は、すべての解析ケースで崩壊となるが、鉛直方向の応答加速度は、時刻が 0.7~0.9 秒程度でゼロ付近となり、そのあと時刻が 1.4 秒付近まで正側の鉛直加速度が発生する。それ以降の時刻では、再び負側にもどる。水平方向の加速度入力波形が時刻 1.4 秒以降は加速度値がゼロとなるため、自由振動状態になる。時刻 1.5 秒以上では、再び正側に向かうような傾向を示した。

図-12 は、上層部の角速度の各時刻の差分 $\Delta \omega$ (rad/s) の時刻歴を示したものである。上層位置の角速度 ω (rad/s) は、回転中心を柱間隔の中心と仮定し、鉛直変位を回転半径で除して回転角を算出し、回転角を積分の時間間隔で除して角速度 ω (rad/s) を算定した。角速度の各時刻の差分 $\Delta \omega$ (rad/s) は、ひとつ前の時刻との角速度の差を取ったものである。図-12 からは、時刻 1.2 秒付近で $\Delta \omega$ (rad/s) が最大となり、時刻 1.5 秒付近でゼロ付近の値となる。 $\Delta \omega$ (rad/s) が最大以降減少に転じ、ほぼゼロ程度になるということは上層位置の回転挙動がなくな

なることを意味する。構造系の崩壊挙動において、回転挙動から自由落下挙動へ遷移したものと考えられる。

6. まとめ

本検討は、中層はりの破壊性状を変化させた 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、中層はりがせん断破壊する場合 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 0.63h (曲げ破壊は 0.66h)、鉛直変位で 0.25h (曲げ破壊で 0.25h)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。中層はりがせん断破壊する場合は、曲げ破壊の軌跡から中層はりが無い軌跡に遷移する状況が確認された。
- (3) 構造系が崩壊と判定された場合において、橋軸直角方向上層位置での水平方向加速度応答値を中層はりが曲げ破壊する場合とせん断破壊する場合を比較すると水平方向の加速度応答に大差ない結果となった。
- (4) 橋軸直角方向上層位置での角速度の時間差分 $\Delta \omega$ の時刻歴からは、時刻 1.2 秒付近で最大を示すが時刻 1.5 秒付近でゼロ付近となり、回転挙動から自由落下挙動へ遷移したものと考えられる。

参考文献

- 1) 鈴木基行, 秋山允良, 田中慎介, 丸中孝通: 降伏過程を考慮した RC2 層ラーメン高架橋の合理的耐震設計法の提案, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.269-278, 1999.11
- 2) 田中慎介, 武田篤史, 井林康, 鈴木基行: RC2 層ラーメン構造の耐震性能に及ぼす中層はりの力学的特性の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.2, pp.435-440, 1997
- 3) 丸中孝通, 田中慎介, 鈴木基行: RC2 層ラーメン構造物の耐震性に及ぼす部材の降伏過程の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.3, pp.1033-1038, 1998
- 4) 秋山充良, 田中慎介, 丸中孝通, 鈴木基行: RC2 層ラーメン構造物の合理的耐震設計法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.3, pp.1255-1260, 1999

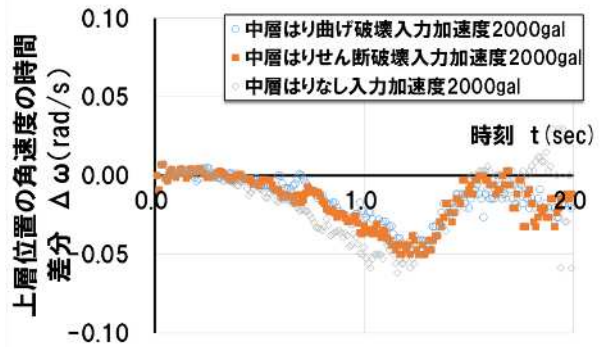


図-12 橋軸直角方向上層部角速度の時間差分

- 5) 小林薫, 井比亨, 山本忠: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.2, 2024.7
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 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