

ねじりの非線形性を考慮した RC 構造物の応答に関する検討

A study on responses of RC structures with nonlinearity of torsion

北武コンサルタント (株) ○正 員 阿部淳一 (Junichi ABE)

北武コンサルタント (株) 正 員 渡邊忠朋 (Tadatomo WATANABE)

1. まえがき

鉄道や道路、建物などが複雑に交差する都市部に設計される構造物は、建築限界などの種々の制約を受ける。そのため、時として異形な構造形態を余儀なくされることがある。

一方、鉄道構造物の耐震設計¹⁾では、一般的に線路方向、および線路直角方向の2方向それぞれに対して、独立に計算し耐震性能の照査を行う。しかし、上述のような異形な構造形態となる場合、地震時の挙動は線路方向と線路直角方向の2方向が支配的となるとは限らない。そのため、3次元による解析から耐震性能の照査を求められる場合が多い。

このような異形な構造形態となる構造物に対して、3次元による応答解析を行う場合、ねじりの影響が無視できなくなる。一般的なRC構造物の場合、ねじりに対しては全断面有効としたねじり剛性を用いて、線形部材として検討を行うことになる。

一方、RC部材のねじりの性能には、非線形性を考慮したものが提案されている²⁾。ねじりに非線形性を許容する場合、当然弾性とした場合とは挙動は異なることになり、柱や梁の曲げモーメントの非線形応答などに対しても影響を与えることになると考えられる。

そこで本論文では、ねじりの非線形性が構造物全体への応答に与える影響について検討を行うことを目的とし、斜角を有する鉄道RCラーメン橋台を例に、解析的な検討を試みるものである。

2. 解析モデル

検討の対象としたのは、図-1に示す実構造物を基に設定した、駅部の斜角RCラーメン橋台である。斜角は70度である。この橋台は、起点方に桁長13.6mのRCT桁、終点方に7.46mのRCスラブ桁を支持する。また駅部であるため、ホーム2面を支持する。地盤はⅢ種地盤、基礎は杭基礎で杭長16.5mとした。断面諸元を表-1、2に示す。使用材料は、コンクリート27N/m²、軸方向鉄筋SD390、帯鉄筋SD345とした。

骨組み解析モデルを図-2に示す。柱の上下端部、地中梁の左右端部には、図-3に示すようなM-θ関係として非線形性を考慮した³⁾。上層梁、および杭体は断面

表-1 断面諸元(1)

部材名称	C1ラーメン				
	柱1	柱2	柱3	柱4	杭
断面寸法 (mm)					
主鉄筋	L方向	D32-9+5	D32-9+5	D32-9	D32-9
	C方向	D32-9+2	D32-9+3	D32-9	D32-28
帯鉄筋	径・組数	D19-2組	D19-2組	D19-2組	D25-1組
	ピッチ	100(150)	100(150)	100(150)	125

部材名称	C1ラーメン				
	柱1	柱2	柱3	柱4	杭
断面寸法 (mm)					
主鉄筋	L方向	D32-9+2	D32-9+2	D32-7+2	D32-7
	C方向	D32-9+2	D32-9+2	D32-9	D32-28
帯鉄筋	径・組数	D19-2組	D19-2組	D19-2組	D25-1組
	ピッチ	100(150)	100(150)	100(150)	125

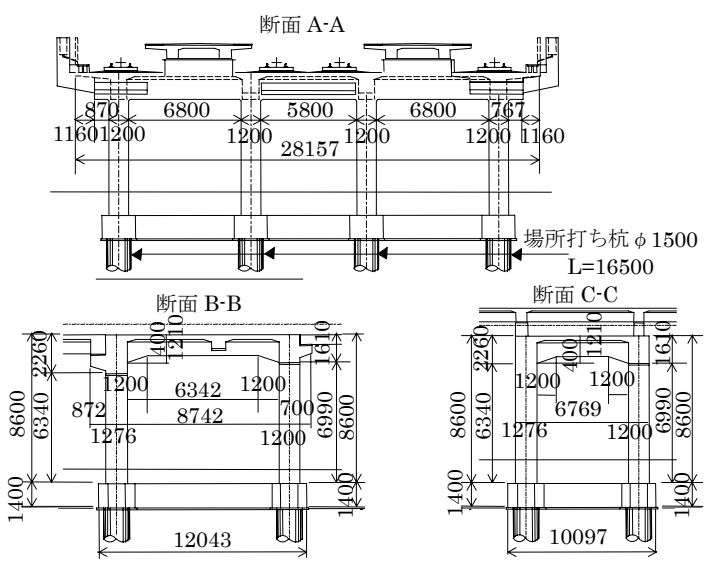
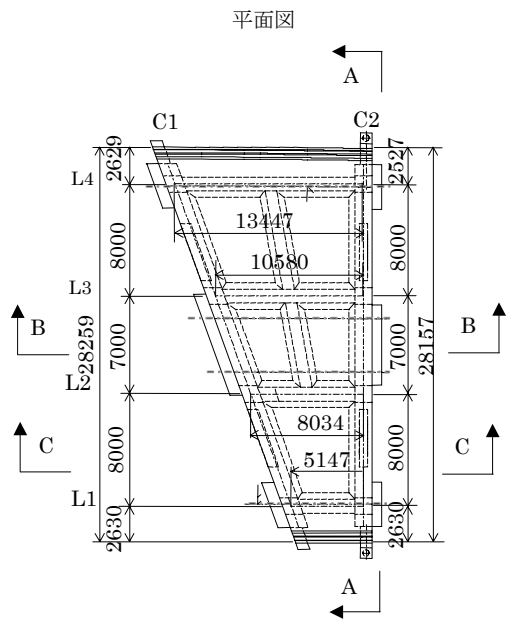


図-1 斜角ラーメン橋台一般図 (単位: mm)

高さに要素分割し、 $M-\phi$ 関係として非線形を考慮した。なお、柱部材、および杭部材の非線形性能には軸力相関を考慮している

ねじりの非線形性は、柱および地中梁部材を対象とし、図-4 に示すねじりモーメントと回転角の関係で与えた。

解析は時刻歴応答解析法とした。解析方法はニューマーク β 法として、 $\beta=0.25$ とした。減衰はひずみエネルギー比例型減衰を用いた。履歴モデルは、RC 部材は JR 総研 RC 型、基礎-地盤はクラフモデル、ねじりは最大点指向型を用いた。入力した地震波形は、図-5 に示す G3 地盤スペクトル II 地震動の地表面加速度波とした。

本研究では前述のように、ねじりの非線形性を考慮した場合の応答の違いについて検討を行う。そのため、ねじりの非線形性を考慮しない場合と、する場合の 2 ケースで検討を行った。また、入力する地震動は、線路方向、および線路直角方向とし、表-3 の計 4 ケースで検討を行った。

3. 解析結果

ここでは、検討した 4 ケースの解析結果を示す。図-6, 7 は図-2 に示す節点 1 の水平変位の履歴を平面で表示したものである。図中に青色の線で示したのはケース 1 あるいはケース 3 で、ねじりの非線形性を考慮しない場合の結果である。また橙色の線で示したのがケース 2 あるいはケース 4 で、ねじりの非線形性を考慮した場合の結果である。また表-4 には変位の最大値および最小値を示す。

まず、入力地震動の方向別に変位履歴を比較すると、線路方向、および線路直角方向ともに、変位は解析方法と斜角を持つように応答し、3 次元解析を行う必要を示した結果であると考えられる。

次に、ねじりの非線形性を考慮する場合としない場合で比較を行う。線路方向の場合、図からも明白のように、ねじりの非線形性を考慮する場合としない場合で、変位に大きな差が生じている。表-4 より、線路方向の変位が、最小値では同程度であるが、最大値は非線形性を考慮しない場合で 95.1mm に対し、考慮する場合は 151.8

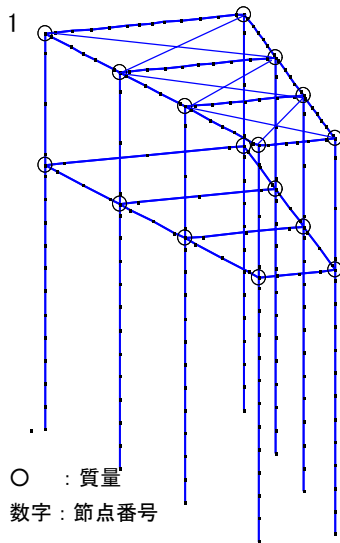


図-2 斜角ラーメン橋台の骨組み解析モデル

表-2 断面諸元(2)

部材名称	C1ラーメン				
	地中梁1	地中梁2	地中梁3	L1 地中梁	L2 地中梁
断面寸法 (mm)					
主鉄筋 L方向	—	D35-8+6	D35-8+4	D35-8+7	D32-8+8
主鉄筋 径・組数	—	D19-2組	D19-2組	D19-2組	D19-2組
帯鉄筋 ピッチ	mm	125	125	125	125

部材名称	C2ラーメン				
	地中梁1	地中梁2	地中梁3	L3 地中梁	L4 地中梁
断面寸法 (mm)					
主鉄筋 L方向	—	D35-8+4	D35-8+4	D35-8+6	D32-8+4
主鉄筋 径・組数	—	D19-2組	D19-2組	D19-2組	D19-2組
帯鉄筋 ピッチ	mm	125	125	125	125

表-3 解析ケース

解析ケース	ねじり非線形	入力方向
CASE1	なし	L
CASE2		C
CASE3	あり	L
CASE4		C

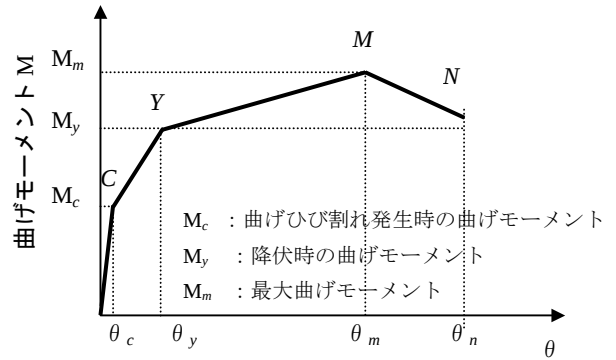


図-3 RC部材の $M-\theta$ 関係

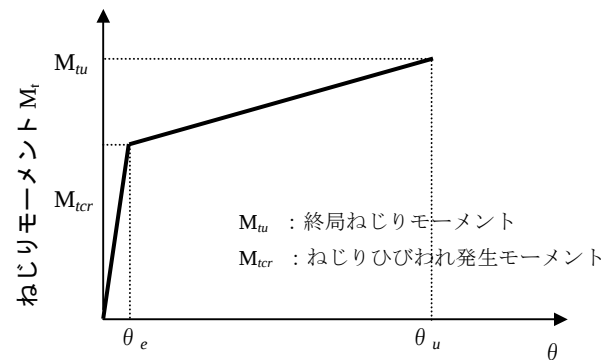


図-4 RC部材の $M_t-\theta$ 関係

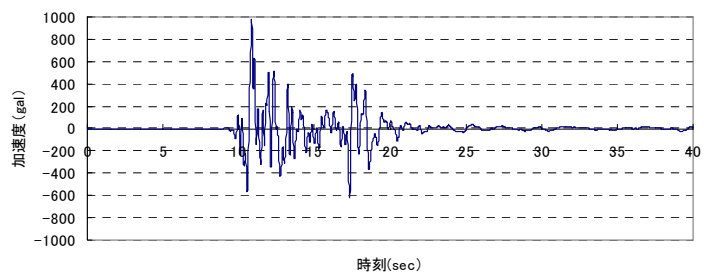


図-5 入力加速度波形

mm と約 1.6 倍になっている。一方、線路直角方向に対しては、ねじりの非線形性を考慮しない場合とする場合で、全く同一の応答となっている。これは、直角方向の場合にはねじりが非線形領域まで応答しなかったためである。

図-8 には、上述の結果より応答が大きく異なった CASE1 および CASE3 の線路方向の時刻歴変位を示す。時刻歴変位は、最大応答（300 ステップ付近）までは同様であるが、最大応答後の 400step 付近から、CASE3 では正側の振幅に移行している。この解析ステップ近傍で、いずれかの部材のねじりが非線形化したと考えられる。

そこで次に、ねじりの応答の検討を行う。図-9～11 には柱および地中梁のねじりの履歴応答をいくつか抽出し示す。地中梁は L4 ラーメン、柱は L4 ラーメンと C1 ラーメンの交差部、および L1 ラーメンと C2 ラーメンの交差部のものとした。図はいくつかの部材の履歴応答を示しているが、線路方向の解析ではねじりの非線形性を考慮したすべての部材で非線形領域に達していた。一方、線路直角方向の解析では、論文中には記載していな

いが、いずれの部材でも非線形化した部材は存在しなかった。

次に、図-8 と同様にねじりの時刻歴応答を図-12～15 に示す。図中の表記は図-8 と同様だが、赤い破線は、ねじりひび割れ発生回転角を示している。赤い破線と橙色の線が最初に交差する解析ステップが、非線形領域に達した解析ステップとなる。非線形領域に達したステップは、L4 ラーメン地中梁で 305、L4-C1 ラーメンで 359、L1-C2 ラーメンで 306 ステップとなった。これは、図-8 でねじりが線形の場合と応答が異なる結果が算出され始めた 400 ステップの手前である。

表-4 平面変位の最大値

変位抽出方向		変位(mm)			
		L方向加震		C方向加震	
		CASE1	CASE3	CASE2	CASE4
線路方向	MAX	95.1	151.8	42.8	42.8
	MIN	-324.7	-325.1	-34.3	-34.3
直角方向	MAX	86.7	89.2	65.7	65.7
	MIN	-24.3	-27.5	-215.6	-215.6

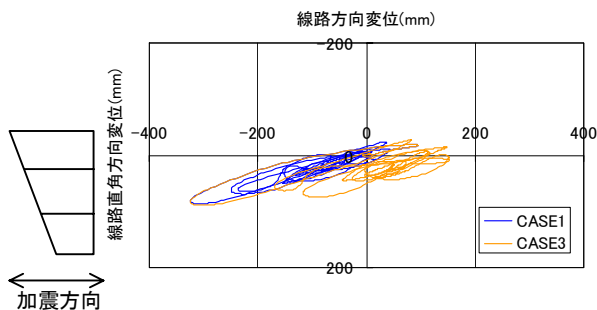


図-6 平面変位履歴応答 (L 方向加震)

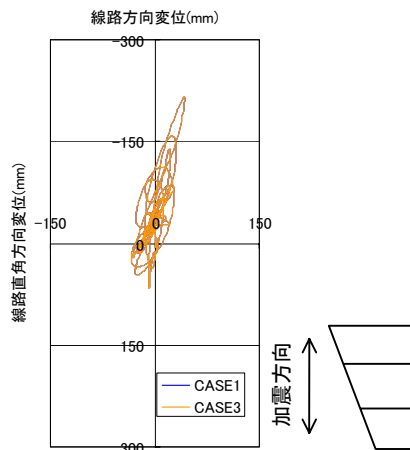


図-7 平面変位履歴応答 (C 方向加震)

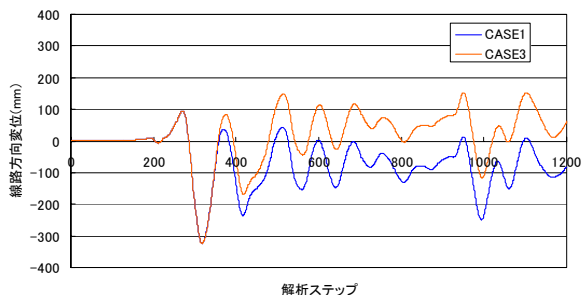
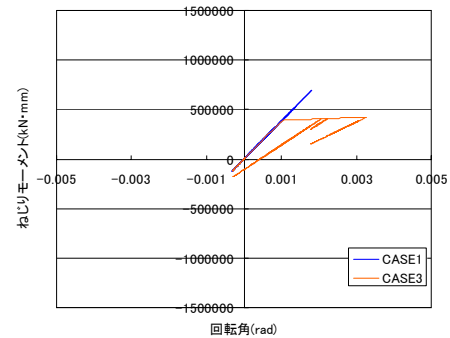
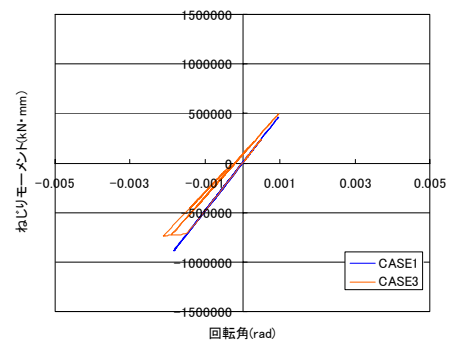
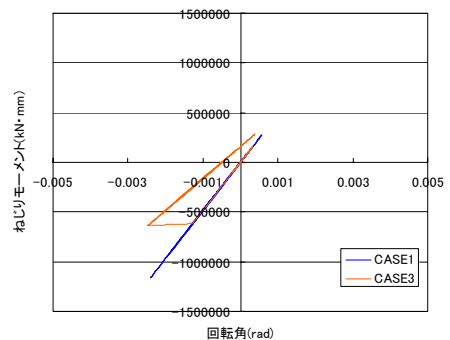


図-8 線路方向変位の時刻歴応答

図-9 L4 ラーメン地中梁の $M_t - \theta$ 関係図-10 L4-C1 ラーメン柱の $M_t - \theta$ 関係図-11 L1-C2 ラーメン柱の $M_t - \theta$ 関係

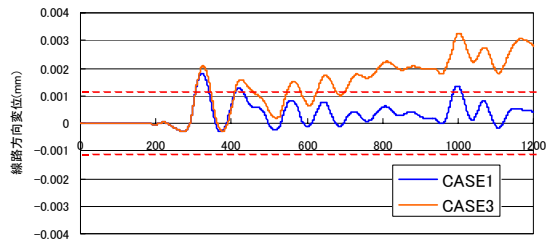


図-12 L4 ラーメン地中梁のねじり回転角の時刻歴応答

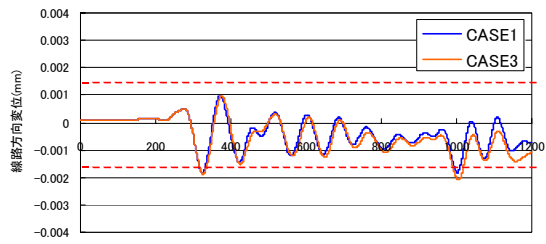


図-13 L4-C1 ラーメン柱のねじり回転角の時刻歴応答

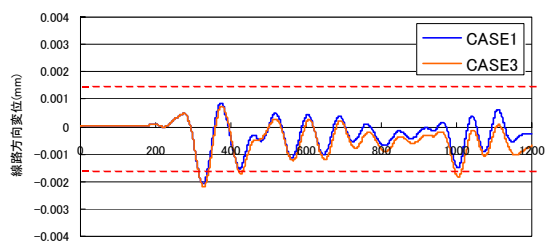


図-14 L1-C2 ラーメン柱のねじり回転角の時刻歴応答

次に、図-15、および図-16 には L4 ラーメンと C1 ラーメンの交差部、および L1 ラーメンと C2 ラーメン交差部の柱基部における $M-\theta$ 関係の履歴応答を示す。図の表記は前述までと同様である。図-15 の場合、最大応答回転角に大きさ差異はないが、負側の回転角はねじりに非線形性を考慮しない場合に比べ、考慮する場合のほうが大きくなっている。一方、図-16 では、最大応答回転角がねじりの非線形性を考慮したほうが大きな値となっている。

表-5 には、L4 ラーメンと L1 ラーメンの左右端部における柱の基部の回転角、およびせん断力の最大値を、ねじりの非線形性を考慮する場合としない場合で示す。表中の応答倍率は、ねじりの非線形性を考慮する結果をしない結果で除した値である。ねじりの非線形性を考慮する場合、対象としたモデルでは回転角が最大で 1.16 倍大きくなった。一方、せん断力に対してはねじりに非線形性を考慮する場合に、しない場合よりも同程度か若干下がる傾向となり、最小で 0.95 倍となった。

4. まとめ

異形な構造形態を有する構造物は、地震時の挙動が直角 2 方向に卓越せず、複雑な応答を示す場合がある。このような場合、柱や梁にはねじりモーメントが発生し、

表-5 柱の最大応答値

部材	応答回転角(rad)			せん断力(kN)		
	CASE1	CASE3	応答倍率	CASE1	CASE3	応答倍率
L4-C1	0.02021	0.02008	0.99	-1969.4	-1971.2	1.00
L4-C2	0.02255	0.02605	1.16	-1605.1	-1518.7	0.95
L1-C1	0.01607	0.01633	1.02	-1657.5	-1649.8	1.00
L1-C2	0.01904	0.02180	1.14	-1159.9	-1132.7	0.98

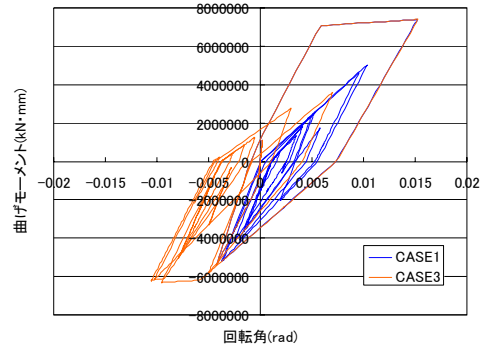


図-15 柱 (L4-C1) の履歴応答

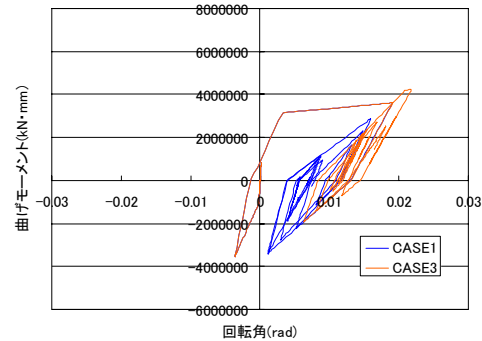


図-16 柱 (L1-C2) の履歴応答

ねじりによる回転角が、構造物全体系への挙動に影響を与えると考えられる。このような観点のもと、本論文では斜角を有する RC ラーメン橋台を例に、ねじりの非線形性を考慮した解析的検討を行った。

ねじりに非線形性を考慮した場合、水平変位は最大値では大きな違いはなかったが、最大変位後、徐々に異なる挙動を示した。また、柱の回転角は、ねじりに非線形性を考慮する場合に、しない場合よりも大きくなる傾向があり、一方せん断力は若干下がる傾向となった。

本論分では、1 つの構造を対象とした検討であり、よりねじりの非線形性が顕著に現れるモデルなどを用いて、さらに検討を行い、ねじりの非線形性を考慮する場合としない場合での最適な断面の比較なども今後行いたいと考える。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編，鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善株式会社，1999。
- 2) 土木学会，コンクリートライブラリー第 52 号 コンクリート構造物の限界状態設計法指針（案），1983。
- 3) 鉄道総合技術研究所編，鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，丸善株式会社，2004。