

コンクリート充填鋼管柱を用いた多柱式合成橋脚の耐震性能に関する解析的検討

Analytical Study on Seismic Characteristics of Multi-Column Composite Bridge Piers Using Concrete Filled Tubular Columns

日野伸一*, 李重桓**, 太田俊昭***, 松田泰治****, 唐嘉琳*****

Shinichi Hino, Junghowan Lee, Toshiaki Ohta, Taiji Mazda and Jialin Tang

*工博 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

**工修 第一復建(株) 技術統括本部 技術開発室 (〒812-0016 福岡市博多区博多駅南 3-5-28)

***工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

****工博 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

*****博士(工) 第一復建(株) 技術第1本部 構造部 課長 (〒812-0016 福岡市博多区博多駅南 3-5-28)

This paper presents the usage of multi-column composite piers for bridges in mountain regions. Based on the currently available studies the structure of the multi-column composite piers is selected taking into consideration the expected high seismic characteristics. The elasto-plastic behaviors of the selected composite piers are examined by F.E.M. Also the seismic characteristics of the composite piers are discussed on the basis of dynamic response analysis, comparing with the equivalent RC. From the result, it is clearly concluded that the proposed composite piers retain more superior seismic performance to the RC pier.

Key Words: Concrete Filled Tubular Columns, Multi-Column Composite Bridge Piers, Seismic Characteristics, Dynamic behavior

キーワード：コンクリート充填鋼管柱, 多柱式合成高橋脚, 耐震性能, 動的挙動

1. まえがき

新しい高速道路や新幹線整備の路線として、地形が複雑でない場所を選定することが望ましいが、地質および地形の制約上、または周辺条件の問題上、急峻な山岳部を選ばざるをえない場合が多々ある。このような場合、非常に高い橋脚を有する橋梁形式が必要となる。

一方、近年の建設業界では、熟練工および労働力の不足問題や、社会的ニーズによる建設コストの削減、作業環境の改善やその安全性の向上などの問題に直面しており、その解決策として、施工性および安全性に優れ、さらには工期の短縮化を図れる構造形式の開発が重要視されつつある。また、平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、橋梁においても甚大な被害をもたらしたことにより、鉄筋コンクリート構造ではせん断破壊・曲げ圧縮破壊などの脆性破壊を防ぎ、鋼構造では局部座屈を抑え、耐力と変形性能の適切な均衡によって耐震性能を向上させることが大きな課題となっている。

このような背景から、現場施工の急速化・省力化・機械化やその安全性の向上とともに、優れた耐震性能を有する合理的な構造形式の開発を目的とした研究が建設業界を含めた各方面で盛んに行われている。

本研究では、橋梁の下部工に着目し、省力化施工および耐震性能の向上を目的とする新しい構造形式として、

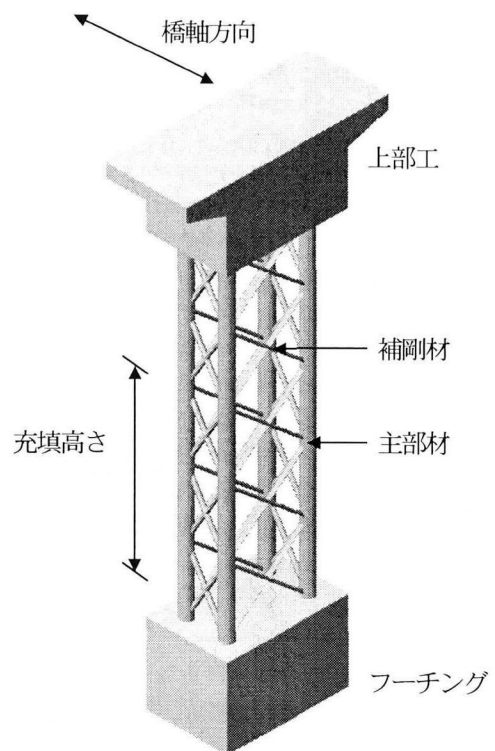


図-1 多柱式合成橋脚の概念図

図-1 のようなコンクリート充填鋼管を用いた多柱式合成橋脚を提案し、本構造の終局耐力や変形性能に関する解析的検討を行ってきた。提案する多柱式合成橋脚は、コンクリートを部分充填した主部材を、非充填の補剛材を介して立体的に接合した骨組構造である。このような構造は、施工における機械化および簡略化が図れ、橋脚を含めた橋梁全体の軽量化が可能になる。また、力学的にも充填コンクリートの拘束効果による耐力の向上、局部座屈の防止などの利点があり、耐震性能の向上が期待できる構造形式である。

本論文は、これまでの研究成果を踏まえたうえで^{1),2),3)}、山岳地域の橋梁形式に多柱式合成橋脚を用いる場合を想定し、より高い耐震性能が期待できる構造形式を選定するために、いくつかのパラメータを変化させた静的弾塑性解析および動的応答解析を行い、終局耐力、変形性能および動的挙動について検討を行うとともに、鉄筋コンクリート橋脚(以下、RC 橋脚と略称する。)との比較検討を試み、多柱式合成橋脚の耐震性能に関する解析的一考察を行ったものである。

2. 多柱式合成橋脚の形状

本検討では、適用対象の一例として、3 径間連続鋼トラス橋を取りあげ、RC 橋脚の代わりに多柱式合成橋脚を用いる場合を想定して検討を行った。

多柱式合成橋脚の断面を決定する際に用いた反力を表-1 に、また、検討対象とした多柱式合成橋脚および RC 橋脚の断面を図-2 に示す。

多柱式合成橋脚の断面は、今まで行ってきた試設計の計算結果に基づいたものであり¹⁾、その構成は、橋脚高さが 50m の場合には、4 本の主部材($\phi 1800$, $t=20\text{mm}$)と 5 組の斜め補剛材(10m 間隔で総本数は 40 本)とし、橋脚高さが 110m の場合には、9 本の主部材($\phi 2000$, $t=30\text{mm}$)と 11 組の斜め補剛材(10m 間隔で総本数は 264 本)とした。なお、鋼管内のコンクリートの拘束効果および輸送上の制約条件を考慮し、主部材の最大径は 2.50m、主部材の間隔は最大 6.0m とした。主部材および補剛材の材質は、それぞれ STK490 および STK400 とし、充填するコンクリートの設計基準強度は 30N/mm^2 とした。

2.1 検討パラメータ

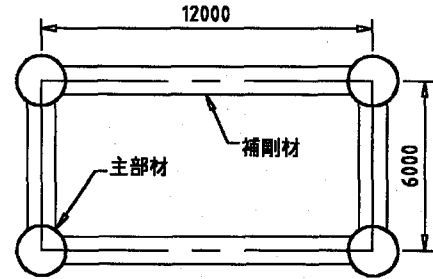
多柱式合成橋脚は、前述したように、立体的に構成された骨組構造であるので、その力学的性状は多くの構造諸元の影響を受ける。したがって、構造諸元の適切な組合せにより、優れた変形性能を有する新しい橋脚形式として多柱式合成橋脚が提案できると思われる。その構造諸元は、主部材の径厚比、主部材内に充填するコンクリートの充填高さおよび設計基準強度、主部材間を連結する補剛材の径厚比および補剛材形式などがある。

本論文では、これらのなかでコンクリートの充填高さ、補剛材の径厚比および補剛材の間隔が多柱式合成橋脚の終局耐力や変形性能に及ぼす影響を調べるとともに、そ

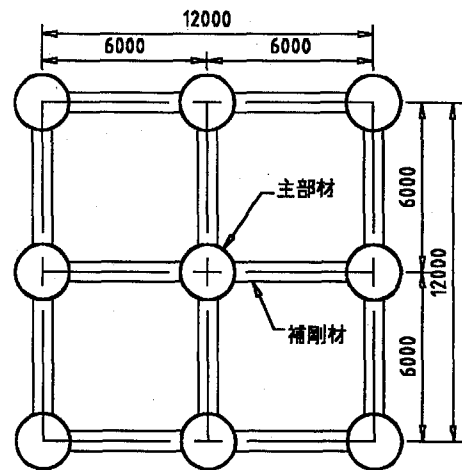
表-1 断面決定時に用いた上部工反力

橋脚高 (m)	支間長 (m)	上部工反力 (橋脚 1 基)	支持上部工重量 (橋脚 1 基)
50	95+120+95	26180	36020
110	110+200+110	53110	68840

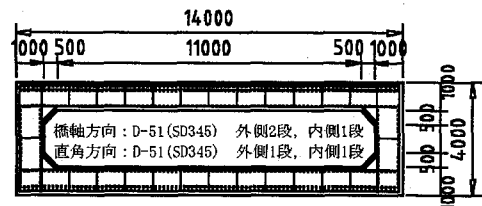
(単位: kN)



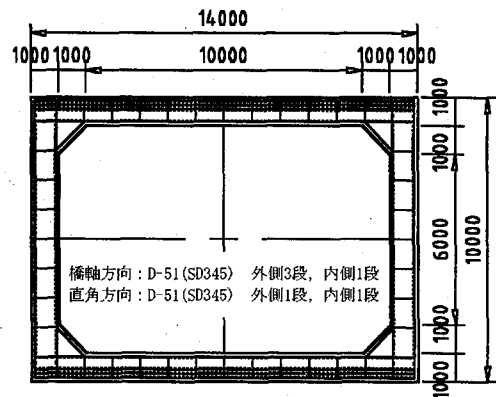
(a)多柱式合成橋脚(H=50m)の断面



(b)多柱式合成橋脚(H=110m)の断面



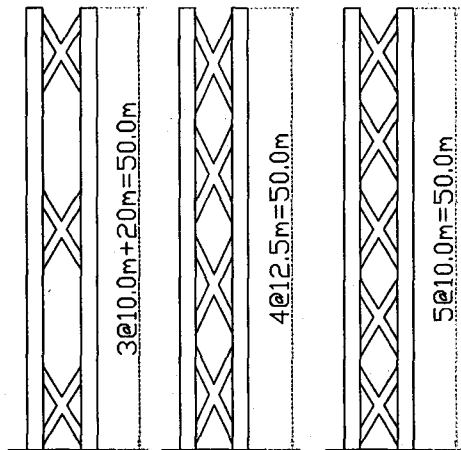
(c)RC 橋脚(H=50m)の断面



(d)RC 橋脚(H=110m)の断面

図-2 多柱式および RC 橋脚の断面諸元(単位: mm)

これらの変化によって異なる動的挙動について検討を行った。なお、補剛材形式として斜め補剛材の他に、水平補剛材形式についても先に検討したが、斜め補剛材が効果的であるとの結果より¹⁾、ここでは斜め補剛材形式に限定して検討した。



(a)C50-30-14-3 (b)C50-30-14-4 (c)C50-30-14-5

図-3 補剛材組数の変化

表-2 検討ケースおよびその諸元

検討ケース	H	H'	D	t	D'	t'
C50-00-14	50.0	0.0	1.8	0.02	1.0	0.014
C50-30-14	50.0	30.0	1.8	0.02	1.0	0.014
C50-50-14	50.0	50.0	1.8	0.02	1.0	0.014
C50-30-10	50.0	30.0	1.8	0.02	1.0	0.010
C50-30-14 ^{*1}	50.0	30.0	1.8	0.02	1.0	0.014
C50-30-20	50.0	30.0	1.8	0.02	1.0	0.020
C50-30-14-3	50.0	30.0	1.8	0.02	1.0	0.014
C50-30-14-4	50.0	30.0	1.8	0.02	1.0	0.014
C50-30-14-5 ^{*2}	50.0	30.0	1.8	0.02	1.0	0.014
C110-40-10	110.0	40.0	2.0	0.03	0.7	0.010
C110-40-12	110.0	40.0	2.0	0.03	0.7	0.012
C110-40-14	110.0	40.0	2.0	0.03	0.7	0.014
C110-60-10	110.0	60.0	2.0	0.03	0.7	0.010
C110-60-12	110.0	60.0	2.0	0.03	0.7	0.012
C110-60-14	110.0	60.0	2.0	0.03	0.7	0.014
C110-110-10	110.0	110.0	2.0	0.03	0.7	0.010
C110-110-12	110.0	110.0	2.0	0.03	0.7	0.012
C110-110-14	110.0	110.0	2.0	0.03	0.7	0.014
RC50-4	50.0	4.0	-	-	-	-
RC110-10	110.0	10.0	-	-	-	-

(単位：m)

(1) コンクリートの充填高さ

最適な充填高さは、充填効果による耐荷力の増加および変形性能の向上や、死荷重が及ぼす動的挙動を考慮して決定する必要がある。本検討では、既往の検討結果に基づき¹⁾²⁾、橋脚高さの約40~60%までコンクリートを充填した部分充填、非充填および全充填のケースについて検討を行った。

(2) 補剛材の径厚比

補剛材の直径は一定とし、厚さを変化することで補剛材の径厚比を変化させた。橋脚高さ50mの場合は直径1000mmで肉厚を10,14,20mm、橋脚高さ110mの場合には直径700mmで肉厚を10,12,14mmと変化させたケースについて検討を行った。

(3) 補剛材の組数

図-3に示すように、橋脚高さ50mの場合について補剛材の本数を変化させた検討を行った。同じ高さに配置した8本の補剛材を1組として、5組配置したC50-30-14-5、基部から2段目および4段目を省略して3組配置したC50-30-14-3、補剛材の長さを変えて4組配置したC50-30-14-4の3つのケースについて検討を行った。

これらの検討ケースおよび諸元を表-2に示す。表中の H は橋脚の高さ、 H' は主部材に充填するコンクリート充填高さである。また、 D および t は主部材の直径および肉厚、 D' および t' は、補剛材の直径および肉厚である。なお、C50-30-14^{*1}およびC50-30-14-5^{*2}はC50-30-14と同一のものである。

2.2 比較用のRC橋脚

高橋脚としてRC構造を用いる場合、鉄筋およびコンクリートともに高強度とする最近の実例もあるが⁴⁾、ここでは通常の材質および強度を用いて検討を行うこととし、SD345の鉄筋および設計基準強度30N/mm²のコンクリートを用いて設計を行った。

RC橋脚については、後述する静的弾塑性解析による照査の代わりに、道路橋示方書で規定されている地震時保有水平耐力法によって耐震性能の照査を行った⁵⁾。その結果、橋脚高さ50mでは基部から4mまでの充実断面と、橋軸方向および橋軸直角方向に1mの厚さを有する中空の断面となり、必要鉄筋は橋軸方向の外側および内側にそれぞれD51の2段および1段、橋軸直角方向の外側および内側にD51の1段ずつの配筋となった。また、橋脚高さ110mでは基部から10mまでの充実断面、橋軸方向の外側および内側にそれぞれD51の3段および1段、橋軸直角方向の外側および内側にD51の1段ずつの配筋となった。その断面諸元を図-2に示す。

3. 静的弾塑性解析

3.1 解析概要

主部材ははり要素、補剛材はトラス要素とし、その連結はボルト摩擦接合を仮定しているため、ヒンジとしてモデル化を行った。なお、本解析に先行して主部材と補

剛材の結合条件について比較検討を行ったが、剛結ヒンジによる顕著な差異は認められなかった。また、基礎形式はⅠ種地盤の直接基礎と仮定し、剛結としてモデル化を行った。

はり要素としてモデル化した主部材の曲げモーメントと曲率の関係は、平面保持則および von Mises の降伏条件のもとに、断面分割と変位増分法により求めた。しかし

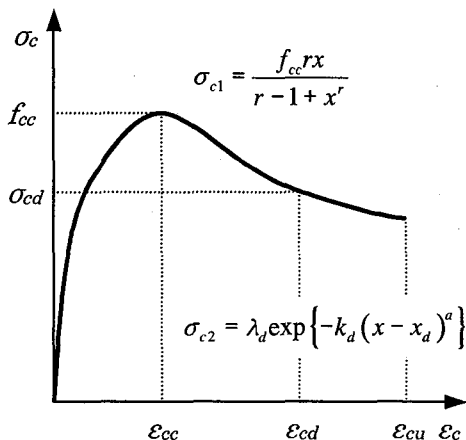


図-4 コンクリートの応力-ひずみ関係

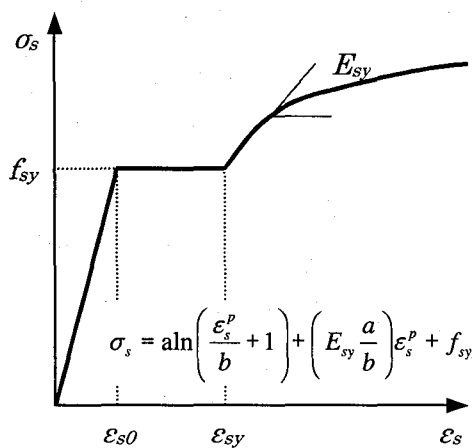


図-5 鋼管の応力-ひずみ関係

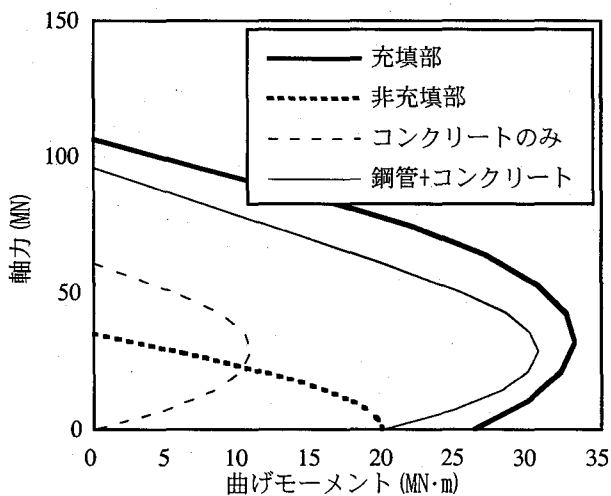


図-6 主部材鋼管の M-N 関係(φ1800, t=20mm)

ながら、4 本および 9 本の主部材から成る多柱式合成橋脚は立体的な骨組構造としているため、軸力変動により曲げモーメントと曲率の関係が変化する。本解析ではこの影響を考慮する方法として、予め求めておいた曲げモーメントと曲率の関係から、軸力変動による曲げ剛性の変化を考慮した²⁾。さらに、最大曲げ耐力に達した個所では塑性ヒンジの発生が予想されるので、塑性ヒンジ長を考慮した塑性ヒンジ要素を設けた。

このようなモデル化を行い、最大耐力に達するまでは荷重増分法、その以降は変位増分法を用いて 2 次元有限要素法による静的弾塑性解析を行った。

3.2 応力-ひずみ曲線

軸力を受けるコンクリート充填鋼管は鋼管の拘束効果によってコンクリートの圧縮強度が増すため、鋼管とコンクリートの圧縮強度を単純に累加したものより、大きな耐力と高いエネルギー吸収性能が期待できることが一般的に知られている。しかしながら、既存の設計基準で鋼管による拘束効果、終局耐力および許容塑性率について十分に評価することは困難である。

したがって、本解析では、コンクリートにおいては軟化域を含めた拘束効果を考慮し、また鋼管においてはより正確な解析を行うためにひずみ硬化や、非充填の主部材および補剛材には局部座屈をも考慮して定量的なモデル化を行った図-4 および図-5 の応力-ひずみ関係を用いた⁶⁾。このような応力-ひずみ関係を用いて図-6 に示すような主部材に用いる M-N 関係を算出した。参考のために鋼管、コンクリートのそれぞれのもと、単純累加したものも合わせて図中に示す。

3.3 解析結果および考察

静的弾塑性解析で得られた結果を表-3 に、水平荷重と水平変位の関係を図-7~12 に示す。図中の記号(○, △, □)は主部材の引張降伏および圧縮降伏である。

表-3 の降伏荷重(P_y)および降伏変位(δ_y)は、すべての主部材のうち、いずれかの主部材が最初に降伏に達したときの水平荷重および水平変位であり、最大水平荷重(P_u)は解析結果での最大値である。また、 $P_{0.95}$ および $\delta_{0.95}$ は最大荷重に対する 95% 時の水平荷重およびその荷重に対する水平変位である。変形能力を測る指標として用いた塑性率($\mu_{0.95}$)は、95% 時に対する水平荷重と水平変位を用いて算出した。これは、最大荷重時の水平変位の勾配が緩やかで、塑性率が正確に求められない場合や、最大荷重後のエネルギー吸収能力が見込める場合があるなど、最大荷重時の水平変位による塑性率の評価が適切ではないという既往の文献を参考にしたものである⁷⁾。

(1) コンクリートの充填高さ

コンクリートの充填高さを変化させたときの水平荷重と水平変位の関係を図-7 および図-8 に示す。なお、比較のために地震時保有水平耐力法により算出した RC 橋脚の水平荷重と水平変位の関係も合わせて示す。

橋脚高さが 50m の場合では、部分充填(30m 充填)また

は全充填が、非充填のものに比べ、最大耐力および変形性能が向上する結果となった。

部分充填と全充填の比較は、最大耐力やそれに至るまでの挙動はほぼ同じであるが、最大耐力以後の耐力低下や変形性能において全充填の方が相対的に劣る結果となった。その破壊過程を調べてみると、部分充填の場合に

は主部材の引張降伏が先行し、次に補剛材の降伏および破断が生じ、最大耐力を保持したまま変位が増加し、最終的には補剛材の破断による耐力低下がみられた。一方、全充填の場合には最大耐力に達した直後、圧縮側の主部材が降伏し、それと同時に引張側の主部材の破断とともに急激な耐力低下がみられた。また、橋脚天端における

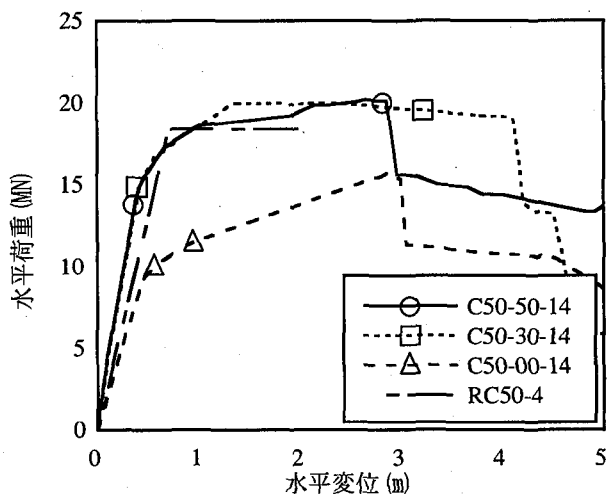


図-7 荷重と変位の関係(50m 充填高さ比較)

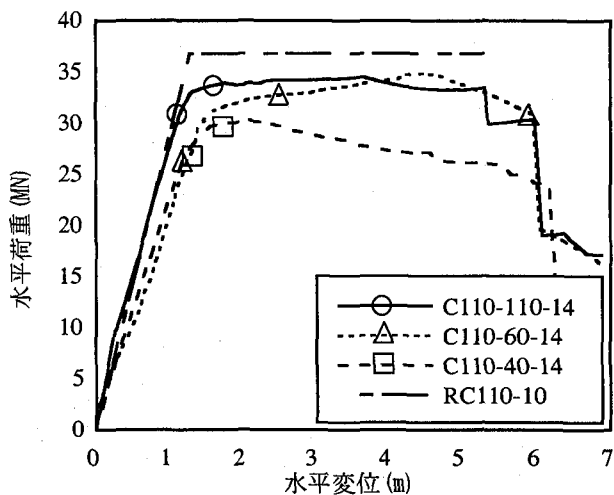


図-8 荷重と変位の関係(110m 充填高さ比較)

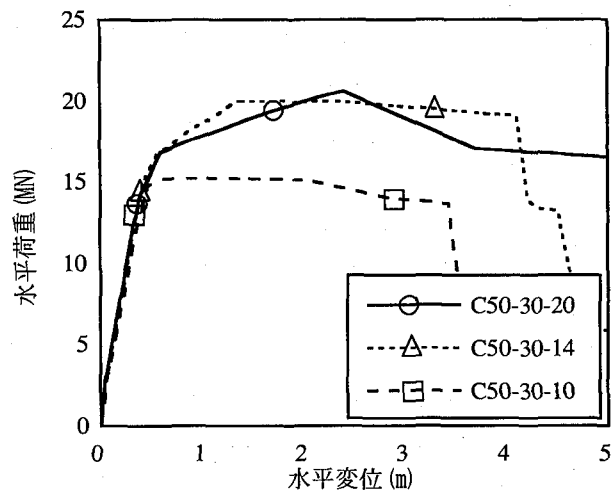


図-9 荷重と変位の関係(50m 径厚比比較)

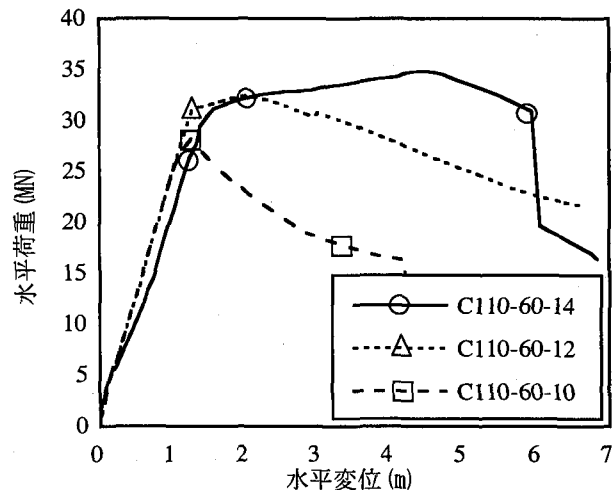


図-10 荷重と変位の関係(110m 径厚比比較)

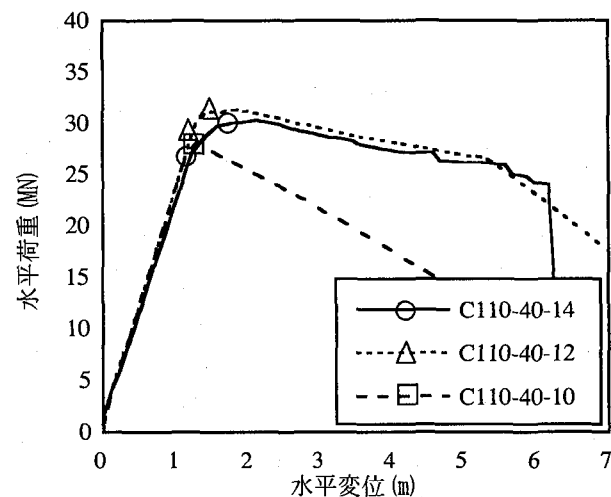


図-11 荷重と変位の関係(110m 径厚比比較)

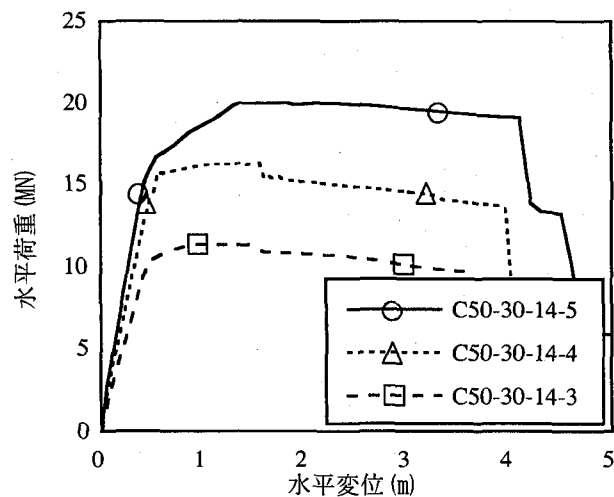


図-12 荷重と変位の関係(50m 補剛材組数比較)

表-3 静的弾塑性解析の解析結果

検討ケース	P_y	P_u	$P_{u0.95}$	δ_y	δ_u	$\delta_{u0.95}$	$\mu_{0.95}$
C50-00-14	10.13	15.70	14.92	0.57	2.85	3.22	5.65
C50-30-14	14.95	20.00	19.00	0.42	2.31	4.21	10.02
C50-50-14	14.03	20.21	19.21	0.38	2.66	2.96	7.79
C50-30-10	14.05	15.23	14.46	0.43	1.23	2.75	6.40
C50-30-14	14.95	20.00	19.00	0.42	2.31	4.21	10.02
C50-30-20	14.17	20.63	19.60	0.38	2.40	2.78	7.32
C50-30-14-3	10.31	11.37	10.80	0.47	1.06	2.41	5.13
C50-30-14-4	14.54	16.19	15.39	0.52	1.52	3.27	6.29
C50-30-14-5	14.95	20.00	19.00	0.42	2.31	4.21	10.02
C110-40-10	22.41	28.16	26.75	0.94	1.45	1.64	1.74
C110-40-12	25.85	31.32	29.75	1.09	1.84	2.89	2.65
C110-40-14	27.07	30.32	28.80	1.22	2.12	3.04	2.49
C110-60-10	24.06	28.22	26.81	0.97	1.37	1.43	1.47
C110-60-12	27.73	32.41	30.79	1.13	2.03	2.83	2.50
C110-60-14	26.37	34.87	33.13	1.25	4.45	5.95	4.76
C110-110-10	26.10	27.83	26.44	0.94	1.23	2.20	2.34
C110-110-12	29.72	33.38	31.71	1.12	1.56	3.22	2.88
C110-110-14	30.87	34.55	32.82	1.15	3.67	5.37	4.67
RC50-4	18.40	18.40	-	0.69	2.08	2.08	3.01
RC110-10	36.81	36.81	-	1.29	5.31	5.31	4.11

(単位：MN, m)

同一変位時の比較は、部分充填の境界部の変位が全充填より小さく、補剛材への作用力は部分充填の場合が大きくなる結果となった。その理由としては、部分充填したことにより、曲げ剛性が不連続となったため、主部材から補剛材への荷重再分配が全充填の場合よりもスムーズに行われた結果、大きな変形性能が得られたと考えられる。

(2) 補剛材の径厚比

補剛材の肉厚を変化させたときの水平荷重と水平変位の関係を図-9、図-10 および図-11 に示す。

補剛材の肉厚が増せば増すほど、最大耐力および変形性能ともに向上する結果となった。しかしながら、図-9 および図-11 に示すように、橋脚高さが 50m(充填高さ 30m)では 14mm、橋脚高さ 110m(充填高さ 40m)では 12mm で頭打ちとなるような傾向を示し、それ以上に補剛材の肉厚を上げると、降伏後の変形性能が逆に低下する結果となった。これは、補剛材の肉厚が比較的に大きくなると、補剛材の剛性が高くなって、トラス構造のように軸力が卓越する構造となり、早い段階で主部材が降伏に至ることがその原因であると考えられる。

(3) 補剛材の組数

橋脚高さ 50m の場合の補剛材の組数を変化させたとき

表-4 保有水平震度の比較

検討ケース	W	P_a	k_{ha}
C50-30-14	41.16	17.65	0.43
RC50-4	57.94	18.40	0.32
C110-60-14	97.88	30.88	0.32
RC110-10	136.83	36.81	0.27

(単位：MN)

の水平荷重と水平変位の関係を図-12 に示す。

補剛材の組数が少なくなればなるほど、著しい耐力減少を示すような結果となった。特に、補剛材が3組の場合には主部材の降伏よりも、コンクリート充填端部の不連続部に近接した補剛材の降伏が先行するような傾向がみられ、耐荷性能が著しく低下する結果となった。

このような静的弾塑性解析の結果から判断すると、主部材および補剛材の剛性の均衡は、橋脚全体の終局耐力および変形性能を決定する重要なパラメータであることが明らかであり、適切な充填高さ、補剛材の径厚比および補剛材の組数により、終局耐力および変形性能が向上できると考えられる。

(4) RC 橋脚との比較

橋脚高さ 50m の場合には、表-3 および図-7 に示すように、最大耐力についてはそれほど差がみられないが、塑性率については大きな差が生じる結果となった。多柱式合成橋脚の検討ケースのなかでの C50-30-14 の結果と比較すると、RC 橋脚に比べて 3.3 倍程度、多柱式合成橋脚の変形性能が優れている結果となった。

一方、橋脚高さ 110m の場合には、終局耐力は若干 RC 橋脚が高くなる結果となった。しかし、地震時保有水平耐力法の考え方に基づいた式(1)による保有水平震度を比較すると、表-4 のようになり、多柱式合成橋脚は RC 橋脚に比べて等価重量が比較的少ないので、保有水平震度の評価からも多柱式合成橋脚が高い耐震性能を有する結果となった。なお、多柱式合成橋脚の P_a は道路橋示方書のコンクリートを充填した鋼製橋脚とし、対象とする地震動は Type II(安全係数=1.5)として算出した⁹⁾。

$$k_{ha} = P_a / W \dots\dots\dots (1)$$

k_{ha} : 保有水平震度

P_a : 地震時保有水平耐力(MN)

W : 橋脚の重量を含めた等価重量(MN)

4. 動的応答解析

4.1 解析概要

コンクリートの充填高さ、補剛材の径厚比および補剛材の組数を変化させたときの動的挙動を把握するため、表-5 に示すような全 14 ケースについて動的応答解析を行った。各検討ケースの諸元は静的弾塑性解析と同じである。

通常、動的応答解析は、部材の非線形性および復元力

表一5 動的解析の検討ケースおよび固有値解析結果

分類および検討ケース		1次		2次	
		T	m'	T	m'
充填高さの比較 (50m)	C50-00-14	2.809	96.00	0.166	2.00
	C50-30-14	1.834	87.00	0.204	9.00
	C50-50-14	1.666	88.00	0.203	8.00
補剛材径厚比の比較 (50m)	C50-30-10	1.913	88.00	0.216	8.00
	C50-30-14	1.834	87.00	0.204	9.00
	C50-30-20	1.772	86.00	0.193	9.00
補剛材組数の比較 (50m)	C50-30-14-3	2.281	88.00	0.280	7.00
	C50-30-14-4	1.874	88.00	0.217	8.00
	C50-50-14-5	1.834	87.00	0.204	9.00
補剛材径厚比の比較 (110m)	C110-60-10	2.903	73.00	0.516	18.00
	C110-60-12	2.836	73.00	0.492	18.00
	C110-60-14	2.788	72.00	0.474	19.00
RC 橋脚	RC50-4	2.016	74.00	0.204	13.00
	RC110-10	2.926	63.00	0.341	14.00

T: 固有周期(sec), m': 有効質量比(%)

特性を考慮した非線形動的応答解析を行うことが望ましいが、多柱式合成橋脚の地震時の挙動を精度よく表現できる復元力モデルが未だ確立されていないこともあり、本解析では線形による動的応答解析を用いた。

解析モデルは線形の3次元とし、主部材にはり要素、補剛材にトラス要素を用いた。また、静的弾塑性解析と同じように、主部材と補剛材の結合部はヒンジとして、地盤と基礎の結合部は剛結としてモデル化を行った。また、全体モデルの初期状態として死荷重による影響を考慮した。

要素別減衰定数は道路橋示方書を参考にし、コンクリート充填部ではコンクリート構造と考え5%、非充填部および補剛材では3%とした。また、動的応答解析での減衰は、Rayleigh 減衰で考慮することとし、ひずみエネルギー比例型によって算出された減衰定数より Rayleigh 減衰の α および β を決定した。

動的応答解析の積分手法は Newmark β 法($\beta=0.25$)を用い、時間刻みは0.01secとした。入力地震動はI種地盤に用いる開北橋 LG 地震動(TYPE I)と神戸海洋気象台 NS 地震動(TYPE II)を用いた。それぞれの最大加速度は318.84gal および812.02gal である。

4.2 解析結果および考察

固有値解析の結果を表一5に示す。

表一6には、前述したように平面保持則および von Mises の降伏条件のもとに、断面分割と変位増分法を用いて求めた主部材の最大曲げ耐力(M_u)、最大圧縮耐力(N_{u1})および最大引張耐力(N_{u2})を示す。また、表一7にそれぞれの

表一6 主部材の最大耐力

	M_u	N_{u1}	N_{u2}
充填部($\phi 1800, t=20\text{mm}$)	33.19	106.35	35.07
非充填部($\phi 1800, t=20\text{mm}$)	19.88	35.07	35.07
充填部($\phi 2000, t=30\text{mm}$)	57.03	155.79	58.23
RC 橋脚(50m)の基部	874.00	1680.00	—
RC 橋脚(110m)の基部	3903.00	4200.00	—

(単位: MN, m)

地震動に対する最大応答値の結果を示す。表中の最大水平変位(x_{max})および最大加速度(g_{max})は橋脚天端での応答値であり、最大曲げモーメント(M_{max})、最大圧縮力(N_{u1max})および最大引張力(N_{u2max})は橋脚基部での応答値である。なお、()内の数値は最大耐力との比である。

(1) 固有周期

充填高さを変化させたときの固有周期は、非充填の場合が最も長くなる結果となった。通常、同じ条件の下で、自重のみが増えると固有周期は長くなり、剛性が高くなると固有周期は短くなる。多柱式合成橋脚の場合、鋼管内にコンクリートを充填することによって自重も増えるが剛性も高くなる。本解析でのコンクリート充填効果は、自重を増加させる影響よりも橋脚全体の剛性を高くする影響の方が大きくなり、固有周期が短くなる結果となった。

補剛材の径厚比を変化させたときの固有周期は、若干ではあるが、補剛材の肉厚が増せば増すほど、橋脚全体の剛性が高くなり、短くなる結果となった。同様に、補剛材の組数を変化させたときも、組数が多くなればなるほど、橋脚全体の剛性が高くなり、固有周期は短くなる結果となった。

(2) コンクリートの充填高さ

充填高さが高くなればなるほど、橋脚天端で発生する水平変位を抑えることができ、橋脚全体の剛性を高め、橋脚天端での最大水平変位の応答値は小さくなる結果となった。一方、橋脚基部で発生した最大曲げモーメント、最大圧縮力および最大引張力は、橋脚全体の剛性が高くなればなるほど、大きな応答値を示す結果となった。特に、最大引張力の応答値は、最大引張耐力を超えるような傾向がみられ、鋼管内にコンクリートを充填することは、橋脚全体の剛性を高める効果がある反面、地震時の慣性力が大きくなる結果となった。

(3) 補剛材の径厚比

最大水平変位については、コンクリート充填の場合と同様に、橋脚全体の剛性が高くなればなるほど、その応答値は小さくなる結果となった。しかし、最大曲げモーメントの応答値は、コンクリート充填の場合とは逆に、小さくなる結果となった。このような結果から判断すると、補剛材の肉厚によって橋脚全体の剛性を高める方法は死荷重を増加させずに多柱式合成橋脚の剛性を高める有効な方法の1つであると考えられる。

表-7 最大応答値の結果

検討ケース	開北橋 LG 地震動(Type I)					神戸海洋気象台 NS 地震動(Type II)				
	x_{max}	g_{max}	M_{max}	N_{ulmax}	N_{u2max}	x_{max}	g_{max}	M_{max}	N_{ulmax}	N_{u2max}
C50-00-14	0.57	287.28	9.56(0.48)	43.15(0.41)	30.18(0.86)	0.31	156.28	5.67(0.29)	26.21(0.25)	13.24(0.38)
C50-30-14	0.36	420.74	15.46(0.47)	63.78(0.60)	47.22(1.35)	0.26	316.06	12.65(0.38)	50.15(0.47)	33.57(0.96)
C50-50-14	0.29	478.35	18.58(0.56)	75.10(0.71)	56.27(1.60)	0.25	379.71	14.63(0.44)	60.36(0.57)	41.54(1.18)
C50-30-10	0.38	415.74	16.95(0.51)	61.95(0.58)	45.38(1.29)	0.26	289.34	14.68(0.44)	45.18(0.42)	28.61(0.82)
C50-30-14	0.36	420.74	15.46(0.47)	63.78(0.60)	47.22(1.35)	0.26	316.06	12.65(0.38)	50.15(0.47)	33.57(0.96)
C50-30-20	0.35	449.07	13.88(0.42)	67.60(0.64)	50.95(1.45)	0.26	336.26	11.23(0.34)	52.96(0.50)	36.32(1.04)
C50-30-14-3	0.49	370.22	20.63(0.62)	55.10(0.52)	38.74(1.10)	0.26	222.27	12.50(0.38)	32.64(0.31)	16.27(0.46)
C50-30-14-4	0.37	423.17	15.37(0.46)	60.97(0.57)	44.94(1.28)	0.26	304.25	13.57(0.41)	45.64(0.43)	29.61(0.84)
C50-30-14-5	0.36	420.74	15.46(0.47)	63.78(0.60)	47.22(1.35)	0.26	316.06	12.65(0.38)	50.15(0.47)	33.57(0.96)
C110-60-10	0.59	305.56	20.28(0.36)	70.07(0.45)	47.11(0.81)	0.32	251.07	24.15(0.42)	43.72(0.28)	20.75(0.36)
C110-60-12	0.57	320.77	19.16(0.34)	72.89(0.47)	49.81(0.86)	0.30	265.76	23.95(0.42)	49.30(0.32)	26.23(0.45)
C110-60-14	0.56	316.29	18.15(0.32)	74.00(0.47)	50.82(0.87)	0.30	270.28	22.86(0.40)	52.76(0.34)	29.58(0.51)
RC50-4	0.39	400.48	927.48(1.06)	68.65(0.04)	—	0.29	352.94	712.70(0.82)	68.65(0.04)	—
RC110-10	0.59	298.92	3223.15(0.83)	196.78(0.05)	—	0.34	350.72	1997.81(0.51)	196.78(0.05)	—

単位：(m, sec, MN)

一方、最大圧縮力および最大引張力の応答値は、橋脚全体の剛性が高くなればなるほど、大きくなる傾向がみられた。

(4) 補剛材の組数

補剛材の径厚比を変化させた場合とほぼ同様な傾向がみられた。しかし、C50-30-14-3 の最大曲げモーメントの応答値は他のケースに比べて大きい結果となったが、これは補剛材の組数が3組であるC50-30-14-3の最大曲げモーメントの発生位置が橋脚基部ではなく、第1段目の補剛材の上側と主部材の接合部(橋脚基部から10m)のところであり、補剛材が相対的に少ないため、主部材への負担が大きかったことが原因であると思われる。

一方、死荷重の影響を顕著に表わす橋脚基部での最大引張力は、組数が少ないほどその応答値が小さくなる結果となり、適切な補剛材の組数によっては、橋脚全体の剛性および変形性能の均衡が図れる構造形式に近づけることが可能であると考えられる。

(5) 入力地震動

入力地震動の違いによる応答値を比較してみると、Type IIの神戸海洋気象台 NS 地震動よりも、Type Iの開北橋 LG 地震動での応答値が大きくなる結果となった。これは、固有値解析の結果から予測できることでもあるが、内陸直下型地震動のような最大加速度は大きいとその多くの成分が短周期である Type IIの地震動に対しては、系の固有周期が長周期領域であり、結果として免震効果が働いたことがその理由であると考えられる。

図-13 に道路橋示方書で規定している水平震度と固有周期の関係を示す。この関係は Type I および Type II とともに、今まで観測された強震記録をもとに加速度応答スペ

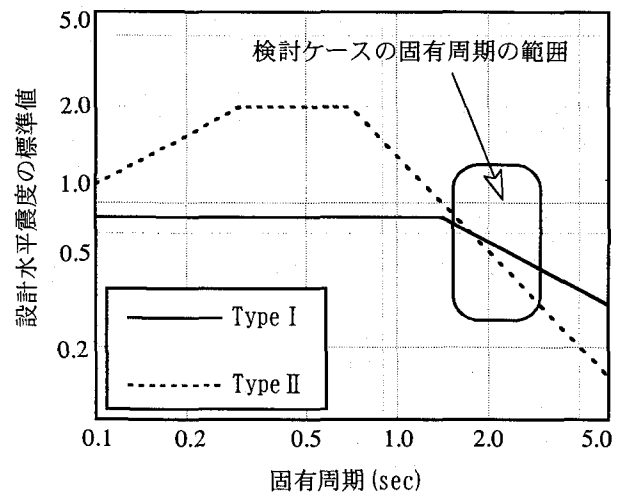


図-13 固有周期と設計水平震度の関係

クトルを計算し、固有周期ごとの補正を行ったものである。すなわち、ある固有周期を持っている構造物が弾性挙動をするときの地震動の大きさを表している。本検討ケースの固有周期は、図中に示すように Type Iの地震動に対する応答値が大きくなる範囲であり、解析の結果とほぼ一致するような結果となった。

一方、多柱式合成橋脚の橋脚高さが110mの場合の橋脚基部での曲げモーメントの応答値は Type IIの地震動で大きくなる結果となった。これは、表-5に示すように、2次モードの周期が0.5sec程度と他のケースに比べて長く、かつ有効質量比が大きく含まれており、それが応答に寄与したためであると考えられる。

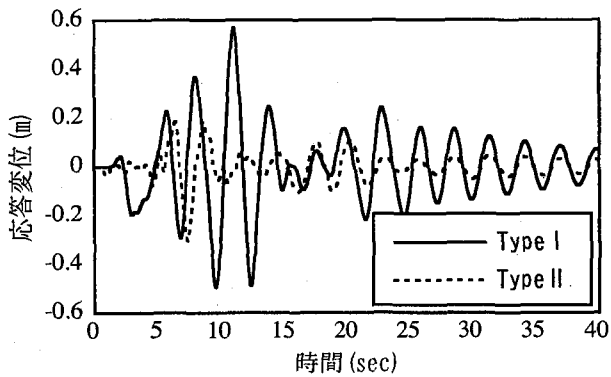


図-14 C50-00-14 の応答変位

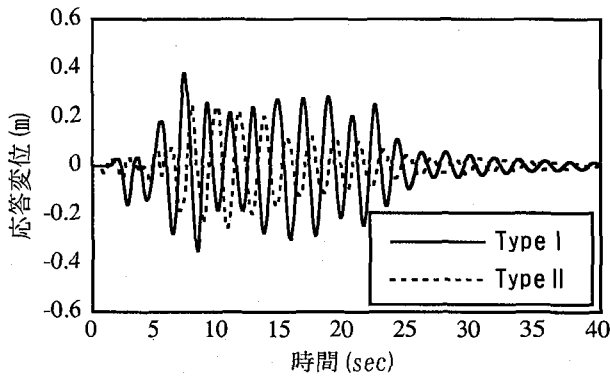


図-15 C50-30-10 の応答変位

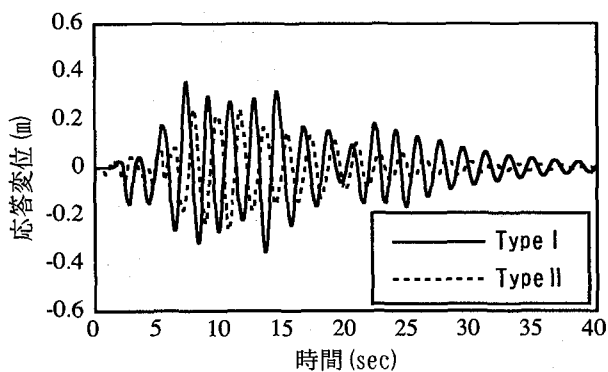


図-16 C50-30-14 の応答変位

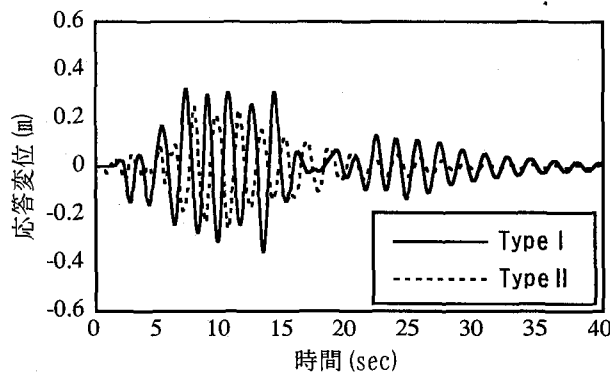


図-17 C50-30-20 の応答変位

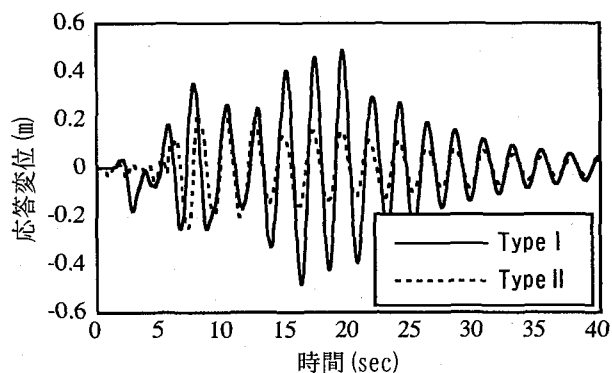


図-18 C50-30-14-3 の応答変位

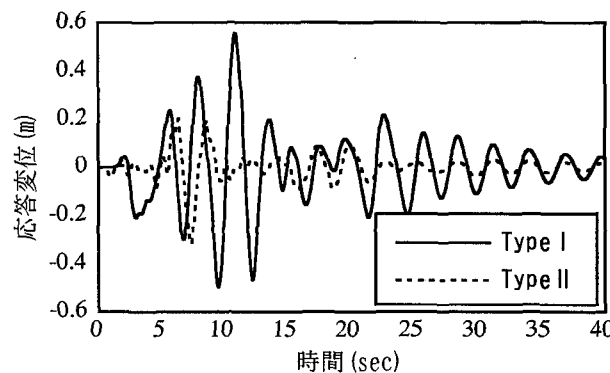


図-19 C110-60-14 の応答変位

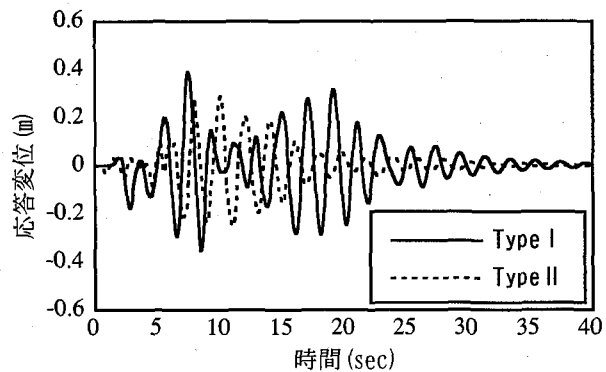


図-20 RC50-4 の応答変位

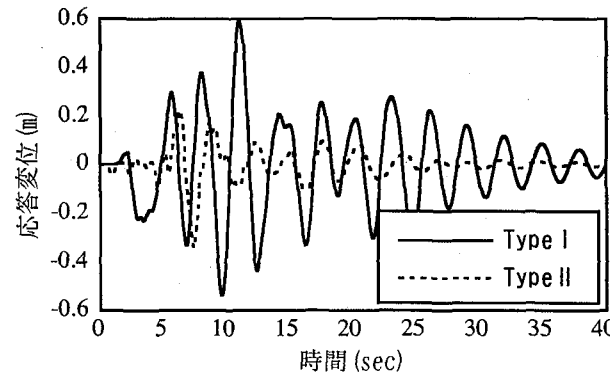


図-21 RC110-10 の応答変位

また、Type IIの地震動での最大応答変位の応答値は、補剛材の径厚比および補剛材の組数の違いによる変化はほとんどみられない結果となった。

図-14~21に橋脚天端における水平変位の時刻歴を示す。すべてのケースにおいてType IIの地震動より、Type Iの地震動で最大振幅が大きくなる結果となった。特に、橋脚全体の剛性が小さいケースではこのような現象が顕著にみられ、C50-00-14(図-14)およびC50-30-14-3(図-18)の場合には、大きな振幅を示し、地震動が終わったあとも揺れ続ける傾向がみられた。同様に、C110-60-14(図-19)およびRC110-10(図-21)も比較的長い固有周期であるため、入力地震動による最大振幅の差が大きくみられた。

(5) RC橋脚との比較

表-7の橋脚高さ50mの多柱式合成橋脚(C50-30-14)とRC橋脚(RC50-4)との応答値を比較してみると、最大応答変位および最大加速度はそれほどの違いがみられない結果となったが、Type Iの地震動での最大曲げモーメントの応答値と最大曲げ耐力との比は最大曲げ耐力の42~62%の範囲内に対しRC橋脚は106%となり、最大曲げ耐力を超える結果となった。しかしながら、多柱式合成橋脚の場合、最大引張力の応答値が最大耐力を超える傾向にあるので、より詳細な検討を行うためには、引張時をも考慮した主部材のM-N関係に基づいた復元力特性を定義し、それによる非線形動的解析が必要であると思われる。

一方、橋脚高さ110mの最大曲げモーメントの応答値と最大曲げ耐力との比は、多柱式合成橋脚が最大36%に対し、RC橋脚が83%と高い応答値を示す結果となった。

5. まとめ

本論文では、高橋脚として多柱式合成橋脚を用いる場合を想定し、静的弾塑性解析および動的応答解析を行い、コンクリートの充填高さ、補剛材の径厚比および補剛材の組数を変化させた場合の終局耐力、変形性能や耐震性能についての検討とともに、同じ高さでのRC橋脚との比較検討を行った。これらの解析結果に基づいた多柱式合成橋脚の耐震性能およびRC橋脚との比較検討について得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 静的弾塑性解析により、多柱式合成橋脚の耐荷力および変形性能は、主部材および補剛材の剛性の均衡や、適切な充填高さが重要な要因となることがわかった。橋脚高さ50mの場合にはC50-30-14-5(充填高さ30m, 補剛材の肉厚14mm, 補剛材の組数5組)が、橋脚高さ110mの場合にはC110-60-14(充填高さ60m, 補剛材の肉厚14mm)が検討ケースのなかで最も優れた耐荷力および変形性能を有する結果となった。
- (2) 主部材へのコンクリート充填は、橋脚全体の剛性を

高め、橋脚天端に生じる応答変位を抑える効果がある反面、地震時の慣性力を大きくする効果がある。

- (3) 補剛材の径厚比および組数によって多柱式合成橋脚の剛性を高める方法は、橋脚の自重をそれほど増やさずに橋脚全体の剛性を高める有効な手段である。
- (4) 橋脚高さが非常に高い多柱式合成橋脚は、長い固有周期を有していることから、長周期の成分が多く含まれている開北橋LG地震動(Type I)での応答値が大きくなる傾向がみられた。
- (5) 多柱式合成橋脚とRC橋脚を比較した場合、橋脚自重の増加や保有水平震度から判断して、橋脚はもちろん、橋梁全体の耐震性能の向上に多柱式合成橋脚の方が適していると考えられる。

本論文では、動的応答解析が非線形の復元力特性を考慮していない線形解析であったことや、用いた入力地震動の数も限られたため、詳細な動的挙動の把握までには至らなかった。したがって、今後は、曲げ、圧縮および引張に対する主部材の非線形性を考慮するとともに、コンクリート充填高さや補剛材との剛性比などの構造諸元に関する詳細な影響も考慮した動的挙動からの耐震性能の検討を行い、合理的な多柱式合成橋脚の構造形式の選定に寄与していく予定である。

参考文献

- 1) 太田俊昭・日野伸一・黒田一郎・唐嘉琳・奥田秀樹・志々田武幸：コンクリート充填鋼管を用いた多柱式合成高橋脚の力学特性，九州大学工学集報，Vol.69，No.1，pp. 35-42. 1996
- 2) 黒田一郎・唐嘉琳・日野伸一・太田俊昭：CFT柱を用いた多柱式合成構造橋脚の終局耐力・変形性能の解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.3，pp. 1021-1031. 1999
- 3) 松田泰治・日野伸一・太田俊昭・山根立行：コンクリート充填鋼管を用いた多柱式合成橋脚の動的応答解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp. 1033-1038. 2000
- 4) 日経コンストラクション：土木の風景，岐阜県高鷺村鷺見橋，pp. 97-100. 2000.1.14
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，pp. 58-70 および pp. 119-176. 1996
- 6) 唐嘉琳・日野伸一・黒田一郎・太田俊昭：コンクリート充填円形鋼管柱を対象とした鋼管とコンクリートの応力ひずみ関係のモデル化，鋼構造論文集，第3巻第11号，pp. 35-46. 1996
- 7) 葛漢彬・宇佐美勉・戸谷和彦：繰り返し荷重を受けるコンクリート充填鋼柱の強度と変形能に関する研究，構造工学論文集，Vol.40A，pp. 163-176. 1994

(2000年9月14日 受付)