

論文 RC橋脚模型基部に衝撃的加速度が作用する場合の動的応答性状に関する実験研究

吉田 紘一*¹ 佐藤 昌志*² 谷本 俊充*³ 今野 久志*⁴

要旨 : 8m/s^2 を超える大地震によるRC橋脚の耐震・耐衝撃性を把握することを目的として、リニアアウエーおよび高張力ゴムを用いた基部衝撃入力装置を製作し、実RC橋脚の1/3模型を用いた実験を行なった。模型は昭和55年と平成7年の2種類の仕様に準拠して製作し、耐震・耐衝撃性に関する評価検討を行なった。その結果、(1) H7仕様とS55仕様の動的応答を比較すると、入力加速度が 15m/s^2 程度になると、S55仕様は段落とし部付近が破損し応答倍率が低下すること、(2) 橋脚の設計は一般的に絶対加速度を用いた設計となるが、衝撃的な荷重載荷での強制変位のモード状態では、相対加速度による設計も考えられる。等が明らかとなった。

キーワード : RC柱, 橋脚, 動的挙動, 衝撃的地震動, 相対加速度

1. はじめに

近年わが国においては、平成5年の北海道釧路沖地震を契機に同年の北海道南西沖地震、北海道東方沖地震、三陸はるか沖地震、さらには平成7年の兵庫県南部地震が発生し社会資本はおろか尊い人命が奪われている。

このような状況下の中で、特に橋梁の損傷または落橋に関してみれば、

- ① 北海道の地震においては公表値ではないが釧路沖地震時に大柴毛で地盤の加速度が 9.30m/s^2 を記録しているほか、国道44号温根沼大橋で地盤の速度が 1.12m/s 、変位の両振幅で 88cm を記録しているが落橋に至るまでの損傷はない。
- ② 一方、兵庫県南部地震における神戸海洋気象台で記録した地震波では地盤の速度・変位の振幅とも温根沼大橋で記録した値よりも小さいものの公表最大加速度が 8.16m/s^2 で、橋梁に、落橋を初めとし多大な損害を与えた。

等のことが客観的事実として認められる。

また、兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で記録された波形と、釧路沖地震時に温根沼大橋で記

録された波形との比較から¹⁾、兵庫県南部地震の波形の特徴は、衝撃的地震動(パルス的に立ち上りの早い地震動)であると考えられる。

これらのことから、著者らは、

- ① 簡易に 10m/s^2 程度の衝撃的加速度を橋脚模型基部に入力できる載荷試験装置を製作し、橋脚模型の動的応答特性を把握すること。
- ② RC橋脚の補強に関する基礎的資料を得ることから、昭和55年の道路橋示方書(以下、S55仕様という)に準じ主鉄筋に段落としを設けた供試体と、兵庫県南部地震後に出された「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」(以下、H7仕様という)で設計した橋脚模型との耐震比較を行うこと。

等が重要と考えその実験を行った。

2 実験の概要

2.1 実験装置

急激に加速度を加える実験方法としては図-1に示すようにリニアアウエーに台車を乗せ、その上に供試体を設置し、台車を高張力ゴム2本(最

*1 社団法人 北海道開発技術センター 常任参与 工修(正会員)

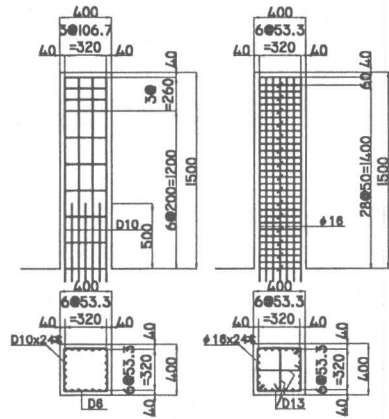
*2 北海道開発局開発土木研究所構造研究室長 工博(正会員)

*3 北海道開発局開発土木研究所構造研究室研究員(正会員)

*4 北海道開発局開発土木研究所構造研究室研究員(正会員)

大引張り力合計39kN)で引張り反力壁に衝突させ加振させる方法を用いた。なお、台車が反力壁にあたった場合、台車を含む供試体全体がロッキング振動を起こさないよう転倒防止用の車輪をつけているほか、死荷重としての98kNの鉛のロッキング振動で供試体の頭上部分が損傷を受けないよう鉄板で補強した。

供試体基部への入力加速度の半波の継続時間は、事前に反力壁に発砲スチロールを設置し、その厚さを変えて0.2sec程度になるようにキャリブレーションしている。



S55仕様

H7仕様

図-2 供試体

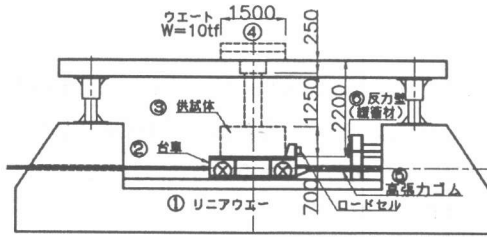


図-1 実験装置

2.2 実験に用いた供試体

供試体の形状と配筋図を図-2に示した。本実験は衝撃的地震動に対して、S55仕様(曲げに対してじん性設計されたもの)と、H7仕様で設計されたものの耐震性の比較を一つの目的としていることから、2種類について実験を行った。2種類とも断面形状は40cm×40cmで、S55仕様はD10を主鉄筋としフーチング上面から50cmすなわち橋脚高さの1/3で段落としを行っている。この供試体の場合、段落とし筋の定着長をどのようにとるかが問題となるが、より厳しい実験を行うことから定着長を設けていない。H7仕様は、D13の帯鉄筋を5cm間隔で配置し、かつ中間拘束筋を施している。一方S55仕様は、帯鉄筋としてD6を20cm間隔で配置したのみである。

鉄筋はいずれもSD295Aで、用いたコンクリートは粗骨材が15mmで設計基準強度は20.6N/mm²であるが、実験時の強度は平均圧縮強度で26.1N/mm²(弾性係数25,970N/mm²)であった。

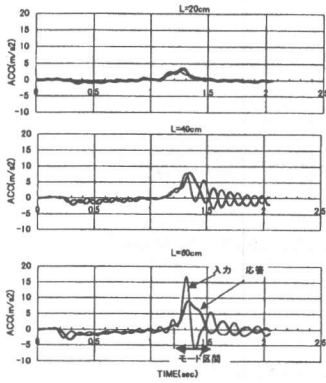
2.3 実験方法と計測項目

実験は、①橋脚模型供試体の上に上部工重量に相当する98kNの重錘をセットし台車に設置する。②次に台車の先端に高張力ゴムを取り付け後方に台車を引きリリースすることで前方の反力壁にあてて加速度を加えている。台車の移動距離は、10cm~80cmまで10cmごととした。測定項目は、台車に取り付けた加速度計による入力加速度、反力壁に設置したロードセル荷重、橋脚柱に取り付けた加速度計の加速度およびレーザー変位計による変位、および重錘重心位置の加速度と変位である。A/D変換時のサンプリング周波数は1KHzである。

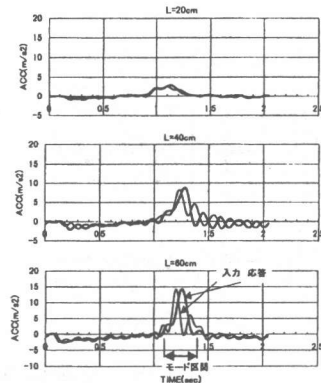
3 実験結果と考察

3.1 入力加速度波形と重錘の応答加速度波形

図-3(a)にS55仕様の供試体の移動距離20cm、40cm、および60cmの場合の入力加速度波形と重錘の応答波形を、図-3(b)にH7仕様の供試体の結果を示した。移動距離70cm以降は、S55仕様の供試体の段落とし部に大きな曲げひび割れが生じたことから評価しないこととした。なお、図示した波形にはリニアウエーを挟む車輪が微少に浮き上がる時の高周波波形が含まれていることからFFTで周波数20Hz以上はカットしてい



(a) S55仕様



(b) H7仕様

図-3 入力加速度と応答加速度

る。

重錘の加速度波形を見るとリリースと同時に負の加速度が働き、その加速度が減衰した時点で反力壁に衝突し立ち上がりの大きい加速度が励起されている。

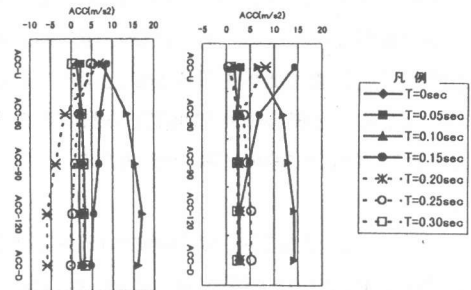
いづれの図中においても、細線が入力加速度、太線が重錘の応答加速度である。S55仕様の供試体もH7仕様供試体も、台車の移動距離が40cmまでは同様な応答加速度を示しているが、60cmの場合はS55供試体について見ると段落とし部による大きなひび割れが入ったため橋脚柱の剛性が低下し、応答加速度が低下するとともに応答時間は0.25secと長くなっている。一方、H7仕様の供試体は、剛性が高いため位相は0.05sec程度ずれるものの入力加速度波形とほぼ同様な挙動を示している。

また、最大入力加速度に対する重錘の最大応答加速度は、台車が反力壁にあたる時間に左右されるが、表-1のとおりとなっている。S55仕様の供試体においては台車の移動距離が大きくなれば、すなわち供試体の損傷が大きくなれば応答加速度は低下していく一方、H7仕様の供試体は損傷とともに加速度は低下していくもののその割合は小さく移動距離60cmでも剛体的運動となっている。

なお、S55仕様の供試体で計測した主鉄筋のひずみは、重錘の応答加速度が 9m/s^2 程度(台車移動距離40cm程度)までは、段落とし部および基

表-1 台車の最大入力加速度と重錘の最大応答加速度

台車移動距離 (cm)	S55仕様		
	台車入力加速度 (m/s^2)	重錘応答加速度 (m/s^2)	応答/入力
20	2.84	4.21	1.48
40	8.23	8.72	1.06
60	16.95	9.41	0.55
台車移動距離 (cm)	S55仕様		
	台車入力加速度 (m/s^2)	重錘応答加速度 (m/s^2)	応答/入力
20	2.55	3.14	1.23
40	8.23	9.02	1.10
60	14.41	14.6	1.01



(a) S55仕様 (b) H7仕様

図-4 振動モード

部とも同程度の値(2000μ)を示していたが、それ以降は段落とし部の損傷形態が曲げによるひび割れからせん断ひび割れに移行し急激に鉄筋ひずみが大きくなる結果となっている。

3.2 橋脚の振動モード

図-4 (a) および図-4 (b) は、台車移動距離60cmの場合において台車が反力壁に衝突してからの振動モードを供試体各部の加速度を用いて

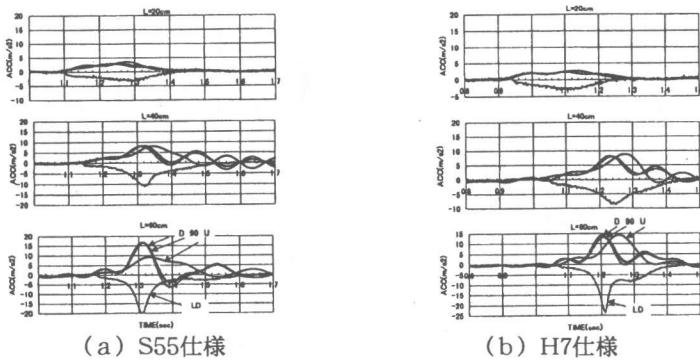


図-5 橋脚模型の応答加速度と緩衝材の荷重

示したものである。台車をリリースしてから反力壁に衝突するまでの時間は供試体ごとで若干異なることから表示は、反力壁の衝撃材 (EPS) に衝突してから0.05secごとのモードを示している。従って図-3に示した波形の最大加速度とは一致しないことに注意を要する。図よりS55仕様の供試体もH7仕様の供試体も0.10secまでは緩衝材を押しつぶしている状況であることから同様の加速度およびモードとなっている。

0.10sec以降で特に0.15sec時には、S55仕様の供試体もH7仕様の供試体も、重錘の供試体進行方向の加速度が最大となる一方、台車は相対的に進行方向とは逆の加速度が生じる挙動となっている。しかしながら、台車の絶対加速度でみればこの時点でも進行方向の加速度で減少傾向にあるのみである。

また、0.10secと0.15secの挙動では、S55仕様の供試体の重錘加速度は 7m/s^2 から 8m/s^2 とほぼ同じであるが、H7仕様の供試体の重錘加速度は 6m/s^2 から 15m/s^2 へと急激に変化している。

上記に対して0.20sec時には、S55仕様の供試体では重錘の加速度が0.15sec時とほぼ同じ 8m/s^2 であるのに対して、台車の加速度は -6m/s^2 (減速) となり相対加速度は 14m/s^2 と最大を示している。このときのH7仕様の供試体は台車の加速度が減少傾向にあり、その値が 3m/s^2 程度になっている一方で、供試体の剛性が大きいことから復元力も大きく重錘の加速度も減少傾向にあり 8m/s^2 程度となっている。この時点でのH7仕様の供試体

の相対加速度は、おおよそ 5m/s^2 である。

以上の事柄を図-3 (a) (b) の時刻歴波形で見ると以下ようになる。

①S55仕様の重錘の絶対最大加速度は 9.4m/s^2 で、重錘と台車との相対最大加速度は、 13.5m/s^2 ($t=1.40\text{sec}$) となる。

②H7仕様の重錘の絶対最大加速度は 14.4m/s^2 で、重錘と台車との相対最大加速度は、 12.8m/s^2 ($t=1.25\text{sec}$) となる。

ここで橋脚の設計という観点に立った場合、一般的には加速度応答スペクトルを用いた応答加速度、すなわち質点に作用する絶対加速度を用いて設計を行うが、図-4で示したとおり、衝撃的加速度が作用した場合にはS55仕様のように相対加速度、すなわち重錘に作用する加速度から基部に作用した加速度を引かなければならないことも考えられる。

これを説明するにおいて図-5 (a) (b) に緩衝材に衝突した場合の橋脚模型の応答加速度と、反力壁に取り付けたロードセルを用いて計測した荷重を同時に示した。また、表-2には図-5を用いて入力加速度が最大になる時の応答加速度を用いてロードセル荷重と比較したケース、および応答加速度が最大になる時の入力加速度を用いてロードセル荷重と比較したケースを示した。

図-5において、Uとは重錘の重心点に取り付けた加速度計の加速度、90とは、重錘の重心位置から90cm下部の加速度、Dとは橋脚基部に取り付けた加速度計の加速度であり、LDとはロードセル

表-2 基部入力加速度の慣性力とロードセル

case1 基部入力加速度が最大の場合

L=40cm	質量	S55仕様		H7仕様	
		加速度 (m/s^2)	慣性力 (kN)	加速度 (m/s^2)	慣性力 (kN)
基部(台車+重錘)	6.10	8.23	50.20	8.23	50.20
上部(重錘+柱)	10.50	7.55	79.28	4.61	48.41
上・基部絶対加速度合計	16.60		129.48		98.61
ロードセル反力			119.58		80.36
慣性力-ロードセル反力			9.92		18.25

L=60cm	質量	S55仕様		H7仕様	
		加速度 (m/s^2)	慣性力 (kN)	加速度 (m/s^2)	慣性力 (kN)
基部(台車+重錘)	6.10	16.95	103.40	14.41	87.90
上部(重錘+柱)	10.50	9.02	94.71	7.45	78.23
上・基部絶対加速度合計	16.60		198.11		166.13
ロードセル反力			207.76		185.22
慣性力-ロードセル反力			-9.65		-19.09

case2 重錘の応答加速度が最大の場合

L=40cm	質量	S55仕様		H7仕様	
		加速度 (m/s^2)	慣性力 (kN)	加速度 (m/s^2)	慣性力 (kN)
基部(台車+重錘)	6.10	3.04	18.54	3.82	23.30
上部(重錘+柱)	10.50	8.72	91.56	9.02	94.71
上・基部絶対加速度合計	16.60		110.10		118.01
上・基部相対加速度差	10.50	5.68	59.64	5.20	54.60
ロードセル反力			60.27		60.66
絶対加速度-ロードセル			49.83		57.35

L=60cm	質量	S55仕様		H7仕様	
		加速度 (m/s^2)	慣性力 (kN)	加速度 (m/s^2)	慣性力 (kN)
基部(台車+重錘)	6.10	13.52	82.47	1.76	10.74
上部(重錘+柱)	10.50	9.41	98.81	14.60	153.30
上・基部絶対加速度合計	16.60		181.28		164.04
上・基部相対加速度差	10.50	-4.11	-43.16	12.84	134.82
ロードセル反力			105.55		100.16
絶対加速度-ロードセル			75.73		63.88

荷重である。

また、LDとはロードセル荷重で図中では加速度と比較しやすいよう10で除したものを示している。

図より、ロードセルが最大値を示す時刻はH7仕様のL=60cmを除き台車移動距離、さらには供試体によらずほぼ入力加速度波形の最大値と応答加速度波形の最大値の中央となっている。また、重錘の応答は、S55仕様のL=60cmを除き入力加速度波形の最大値から0.02~0.05sec遅れてはいるが、ほぼ剛体運動のように入力加速度の最大値と応答加速度の最大値がほぼ等しいことがこの図からもわかる。なお、90の加速度は入力波形とほぼ同じであることから応答は供試体の上部のみでなされていることが見て取れる。

一方前述したとおり、図-5から基部入力加速度が最大の場合の応答値および応答加速度が最大を示す時間の基部入力加速度を読みとり慣性力に換算したもとのロードセル荷重と比較したものが表-2である。

表-2のcase1より、台車移動距離40cm、60cmにおいてS55仕様およびH7仕様とも上部重錘に作用した慣性力に台車と基礎(基部)に作用した慣性力をたしたものがロードセルの反力にほぼ

等しくなっている。このことから、基部に作用した入力加速度が最大となる時点では、供試体と台車は一体となって運動していることから剛体として成り立っているものと推察される。従って、柱下端に作用するモーメントは重錘×応答加速度×アーム長でよいと考えられる。

しかしながら、重錘の応答加速度が最大となった時点では上部重錘に作用した慣性力に台車と基礎(基部)に作用した慣性力をたしたものはロードセルの反力と異なることがわかる。これは、図-4のモード図でも示したように重錘の加速度応答が最大になる時にはすでに基部の台車は相対的に供試体の進行方向とは逆に動こうとしている(緩衝材にあたった後にロードセルの荷重が抜ける方向)ためと推察される。この場合、S55仕様のL=60cmを除き、供試体には応答加速度から基部の加速度を引いた相対加速度が作用したと推察できる。従って、重錘の応答加速度から基部の加速度を引いた加速度に重錘の重量を掛けたものがロードセルの反力にほぼ合致しており、柱下端に作用するモーメントは重錘×(応答加速度-基部入力加速度)×アーム長でよいと考えられる。

S55仕様の供試体に関してL=60cmの場合は、段落とし部の損傷が大きくなり剛性が相当程度低下していることから $9m/s^2$ 程度の応答加速度が約0.1sec続いている。表-2中、上部重錘の応答加速度が $9.4m/s^2$ になる時点での基部の加速度は $13.5m/s^2$ であるが、図-5(a)の波形で見れば1.36secの時点で応答加速度と基部加速度が同じになっていることから剛体運動時にあり、約 $9.3m/s^2$ に重錘重量を掛けたものが慣性力となると考えられる。

主鉄筋のひずみから断面保持の仮定でモーメントを求め、応答加速度から算出した荷重Pと比較すると、供試体の損傷がない健全な状態の台車移動距離L=40cmにおいて、S55仕様の基部でひずみからの荷重P=52.4kNに対し、相対加速度から求めた荷重P=59.7kNとなり近似した値となる。

仕様においては基部で、ひずみからの荷重P=99.3kNに対し、相対加速度から求めた荷重P=

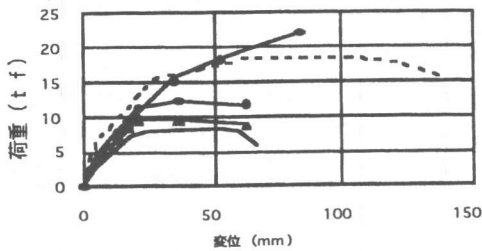


図-6 荷重変位曲線

54.6kNとなり2倍近い差が生じる。

このように、断面保持の仮定でモーメントから求めた荷重と、相対加速度から求めた荷重との相関は一概にあるとは言えない。

3.3 荷重変位曲線

台車移動距離 $L=10\sim 80\text{cm}$ の時の上部重錘の応答加速度に重錘重量を乗じた値を荷重 P (tf)、実測の重錘応答変位を変位 δ (mm)とした荷重変位曲線を図-6に示す。図中の $P-\delta$ 曲線の定義は以下の通りである。

- - - : H7仕様の静的交番載荷試験の包絡線
- ◆—◆ : H7仕様の動的実験 (荷重=絶対加速度×重り)
- : S55仕様の静的交番載荷試験の包絡線
- : S55仕様の動的実験 (荷重=絶対加速度×重り)
- ▲—▲ : S55仕様の動的実験 (荷重=相対加速度×重り)

図-6より、静的交番載荷試験の $P-\delta$ 曲線と動的実験の $P-\delta$ 曲線はほぼ近似した値となっているが、荷重の評価方法として応答加速度に重錘重量を乗じて荷重を求めるとき、その加速度を供試体衝突時の時刻歴で考えると、最大入力加速度と最大応答加速度の間には時間の遅れが生じる。

最大絶対応答加速度の時間軸における応答加速度から、入力加速度を差し引いた値を相対応答加速度として絶対応答加速度と比較すると、S55仕様は、相対加速度から求めた $P-\delta$ 曲線が、絶対加速度から求めたものより静的交番試験の包絡線に近い値となる。

衝突時の供試体の振動モードにおいて、剛体運

動時は、絶対加速度により荷重を評価し、強制変位のような振動モード時には、相対加速度により荷重を評価する方法が考えられる。

つまり、水平耐力の動的実験方法として本研究は加速度変化率が大きい衝撃的地震動の実験方法として十分評価が可能であると考えられる。

4. まとめ

研究により衝撃的加速度が作用したRC橋脚の動的応答について得られた結果を以下に示す。

- (1) 精度の高いリニアウエーに台車と供試体を乗せ衝突時間制御のもとで衝撃的加速度を基部に作用させる方法は、橋脚の動的応答特性を把握するのに有用な方法であり、時刻歴での振動モードが評価できると考える。
- (2) H7仕様とS55仕様の動的応答を比較すると、入力加速度が 8m/s^2 程度まではどちらの供試体も損傷がないことから、入力加速度と応答加速度の比である応答倍率は1程度以上となり、入力加速度が 15m/s^2 程度になると、S55仕様は段落とし部付近が破損することから応答倍率は低下する。
- (3) 供試体衝突時の振動モードから、衝突直後から入力加速度が最大値を迎えるまでは、供試体は剛体運動の挙動を示し、その後重錘部の加速度がやや時間の遅れを生じながら最大応答となり台車が急激に減速する強制変位のモードになると思われる。
- (4) 橋脚の設計という観点に立った場合、一般的には絶対加速度を用いた設計となるが、本実験のように応答を許さない、衝撃的な荷重載荷での強制変位のモード状態では相対加速度による設計も考えられる。

参考文献

- 1) 佐藤昌志, 小山田欣裕, 谷本俊充, 岸徳光: 衝撃的載荷重を受けるRC柱の動的挙動に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集Vol.19, pp969~974, 1997.7