

道路橋における地震応答の実測と解析

建設省土木研究所 正員 栗林栄一
同 正員 岩崎敏男

1. まえがき

最近の構造解析理論の発達ならびに電子計算機の性能向上にはめざましいものがあり、構造物の地震応答解析においては、相当複雑なモデルを設定した精密な解析が行えるようになってきた。一方応答解析の入力となるべき実構造物の振動性状ならびに解析結果の検証となるべき実際の地震時の挙動（特に強震時の挙動）に関する知識は、現在のところ必ずしも満足しうる段階にまでいない。すなわち解析モデル（設定法とその物理定数の与え方）ならびに地震力の与え方に関してあいまいな点が少ない。このため解析の範囲や焦点をしぼるのが難しく、また解析結果を道理に判断するためには高度の予備知識を必要とするのが現状といえよう。

当所ではかかる問題の解決の一助とするべく、以前から実物橋梁の振動実験を実施するとともに昭和33年以来道路橋およびその近傍地盤に強震計を設置し、橋梁の地震応答特性の究明を主たる目的とした強震観測を実施してきた。昭和39年以後は新潟地震による土木構造物の被害に鑑み建設省が立案した強震観測網の整備拡充計画にもとづき、建設省のみならず都県、土木関係の4つの公団、北海道開発庁などの機関により各種土木構造物に強震計が設置され始めた。この計画において、土木研究所の役割は観測網の穴となる地域に対する強震計の設置ならびに各機関に対する設置および観測の指導、得られた記録の収集、保管、復写記録の発行と配布ならびに解析の作業を担当することとなっている。

本報告では、まず上記観測点のうち27橋梁において実測された地盤加速度と下部構造頂部の応答加速度の関係を示し、ついで特定の橋梁について実測結果をやや詳述しさらに一部については応答解析の結果との対比を行ったものである。

2. 27橋梁における地震応答の一般的傾向

道路橋における強震観測は架橋地点の地震動および橋梁構造の応答特性を実測することを目的とし、すでに56橋において実施されている。一般に構造物に近接しかつ架設地点と同種の地盤条件をもつ地盤上に1台、地震荷重を受け持つ橋脚または橋台の頂部に1~2台の強震計を設置している。用いられている機種はSMAC型強震計が52橋と多く、他は電磁式地震計（一部土圧計もある）が7橋に設置されている。後者の7橋のうち3橋ではSMAC型強震計が並設され、集中的に地震観測が実施されている。

上記56橋のうち表Iに示す28橋においては地震応答特性を解明する上に有効な強震記録がすでに得られている。他の観測点においても多数記録が得られているが、①加速度が小さくて読取り精度が低い、②橋梁の上部構造が未加設の単独橋脚である、あるいは③地盤上と構造上との記録の対応が確実でない、などの理由のためここでは割愛されている。

表Iに示すようにこれら28橋は粘性土から軟岩までの広範囲にわたる土質条件の基礎地盤の上に架設されており、堆積時代からいえば第三紀から第四紀沖積期の間になる。また基礎構造の形式は、

表.1 橋梁の諸元と地震観測結果

No.	橋梁名	橋梁の諸元				地震観測結果(最大加速度)										備考			
		上部形式	基礎形式	土質	計器 位置	計器 種類	振動 周期 (sec)	振動 変位 (cm)	地震発生 年月日	震度	震中 距離 Δ(km)	橋軸方向 加速度 a _g (g)	橋軸垂直方向 加速度 a _g (g)	鉛直方向 加速度 a _g (g)					
1	安治川橋	箱桁	ケーソン	シルト	1	2		63 3 27	6.9	4	135	21.9	27.0 28.0	34.0	25.0 25.0	14.0	6.0	P1	
2	尾崎高梁橋	鉸桁	ケーソン	シルト	1	1	0.6	63 3 27	6.9	4	135	28.0	37.6	50.0	13.5	9.0		P1	
3	千代田橋	ワレトラス ポル RC桁	ケーソン ポル 直接	砂	1	2		67 3 12	4.5	3	95	32.5	31.3 33.8	25.0	41.3 23.8	5.3	7.5 10.6		Flux Abut.
								67 7 5	4.1	3	71	33.8	38.8 42.5	28.8	27.5 25.0	5.3	13.8 15.0		
								67 9 19	-	3	22	23.8	36.5 20.0	26.3	38.8 27.5	5.3	6.3 6.3		
								68 5 16	7.9	4	261	87.5	19.3 91.3	72.5	17.5 79.0	25.0	36.8 17.5		
68 5 16	7.5	3	172	37.5	77.5 43.8	31.3	50.0 36.3	18.8	17.5 18.8										
4	伊達橋	ワレトラス	ケーソン	砂礫	1	1	0.5	67 1 17	6.3	3	151	22.1	43.8	19.1	28.8	-	8.8		
68 7 5	6.4	4	169	23	20	18	30	5	5										
5	文巻橋	RC桁	ケーソン	砂	1	1		63 12 24	-	-	-	37.0	43.9	27.5	22.4	-	-		
67 3 19	-	3	41	15.6	25.0	17.5	16.3	10.0	-	-									
68 3 6	5.2	3	39	30	20	25	18	8	8										
68 7 1	6.1	4	52	58.13	108	48.75	6.3	30	30										
68 10 8	-	3	223	30	48	35	35	5	15										
68 5 16	7.9	5	157	68.8	72.5	51.3	90.0	23.8	36.3										
68 5 16	7.5	5	74	56.3	68.8	43.8	87.5	18.8	25.0										
68 3 6	5.2	3	46	20	40	20	50	5	10										
68 7 1	6.1	4	46	38	140	48	17.3	18	2.5										
68 10 8	-	3	39	55	120	55	12.5	13	2.8										
68 2 21	6.1	4	39	22.5	50.0	20.0	25.0	10.0	5.0										
68 3 25	5.7	3	39	22.5	50.0	22.5	35.0	10.0	5.0										
68 4 1	7.5	4	127	25.0	70.0	30.0	35.0	15.0	10.0										
68 4 1	7.5	4	52	35	83	55	65	10	2.5										
68 8 6	6.6	4	39	63	95	63	78	20	2.3										
67 1 1	4.6	2	248	27.5	18.8	17.5	28.8	-	-										
68 4 1	7.5	4	107	169.88	213	186.25	37.5	4.3	5.5										
68 4 1	6.3	3	99	34	35	36	65	10	1.3										
68 8 6	6.6	5	11	437.5	200	260.88	233	140	100										
68 8 6	4.1	3	19	55	30	55	65	10	8										
68 8 6	4.8	3	24	50	100	60	65	8	2.0										
68 3 30	5.0	4	6	80	115	70	55	8.5	2.0										
68 8 6	6.6	3	226	18	25	18	25	5	20										
68 7 1	6.1	4	41	80	-	48	-	15	10										
68 10 8	-	3	42	40	40	38	50	8	10										
68 7 1	6.1	4	32	35	48	45	17.8	15	1.5										
68 5 16	7.9	4	257	31.3	450	41.3	43.8	12.5	12.5										
69 11 28	-	2	68	16.1	23.7	10.0	8.7	-	-										
68 7 1	6.1	4	45	25	85	55	12.5	10	1.5										
67 3 2	-	3	27	15.0	38.8	21.3	28.7	-	-										
67 11 10	-	3	42	20.1	43.8	13.8	48.8	-	6.0										
68 7 1	6.1	4	47	37	50	38.63	55	10	10										
68 7 1	6.1	4	31	7.5	90	65	53	2.5	1.3										
68 7 1	6.1	3	38	30	40	25	9.8	1.8	1.3										
68 3 7	5.1	3	42	18	60	25	35	5	5										
68 7 1	6.1	4	38	50	75	50	65	1.5	8										
68 10 8	-	3	25	35	45	48	63	10	5										
68 2 26	5.4	3	44	50	23	40	35	20	10										
68 5 16	7.9	4	473	2.3	8	25	15	8	5										
68 4 1	7.5	3	271	20	118	25	75	5	20										
68 3 6	6.6	3	159	25	95	33	83	8	20										
68 5 9	5.6	3	58	30	60	23	85	8	10										
66 1 9	5.2	3	42	28.0	65.0	32.5	27.5	-	-										
66 9 8	5.1	3	5	50.0	63.0	44.0	63.0	140	130										
61 8 19	7.0	3	135	15.8	38.0 43.2	19.0	-	-	-										

直接基礎、ケーソン基礎、杭基礎と多様である。これらの橋梁は2~3の例を除いては規模は我が国における一般的のものであり、橋脚の地上高さは10m程度以下(但し、姥久保橋の18m、四徳大橋の42m、境川橋の42mを除く)、上部構造はスパン100m以下の桁橋またはトラス橋である。

表1の右半分には落合橋(次節で述べる)を除く27橋を対象として、主要な地震記録について地盤と下部構造頂部との最大加速度を各成分方向に分けて対比して示した。また図1には橋軸方向および橋軸直角方向に関して、地盤加速度と下部構造頂部の応答加速度の関係を示している。27橋の振動特性はそれぞれ異なり、最低次の固有周期は大略0.2~1.0秒の間にあるものと考えられる。従ってこれから橋梁の応答特性を一般的に議論することはできないが、一般的傾向として、①多くの場合地盤加速度より応答加速度が大きい②応答加速度の増加率は地盤加速度の増加に伴って低下するとの2点があげられる。

3. 松代地震による落合橋の地震応答

関東地方建設局および長野県の協力の基に、長野市若穂町に架かる落合橋において松代群衆地震による観測を実施してきた。本橋の観測結果についてはすでに二回の報告を行ったので、ここでは概要のみ記述することとする。

図2に代表的な18回の地震から求めた地盤加速度と橋脚頂部の応答加速度との関係を示す。これから近似的に、

$$a_R = 8.33 a_G^{0.50}$$

(=すなわち、 a_G は地盤加速度の最大値、 a_R は応答加速度の最大値とともにgal単位)なる実験式が得られている。ここから応答加速度の増加率は地盤加速度の増加に伴って低下することが判る。

本橋に関しては線型系ならびに非線型系モデルを設定し、地盤上での実測加速度波形を入力とした応答解析が実施され、その結果の一部を実測値

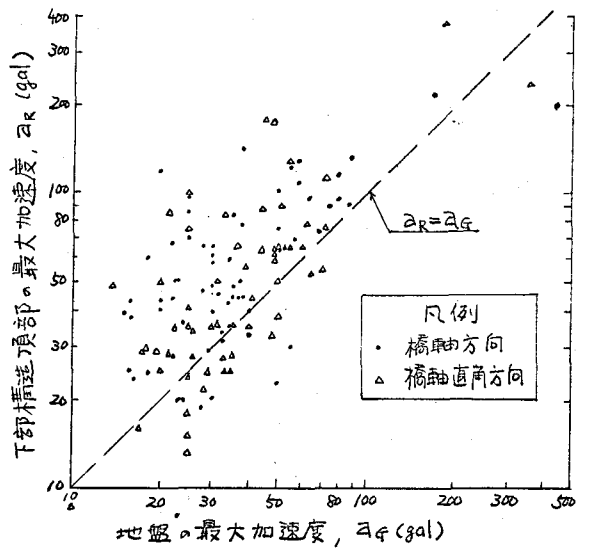


図1. 27橋における地震観測結果

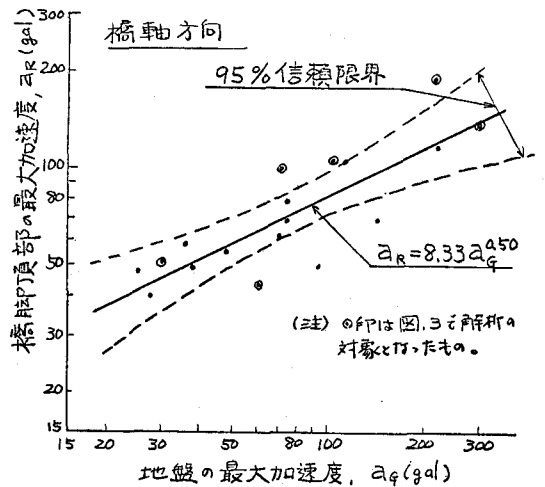


図2. 落合橋の実測結果

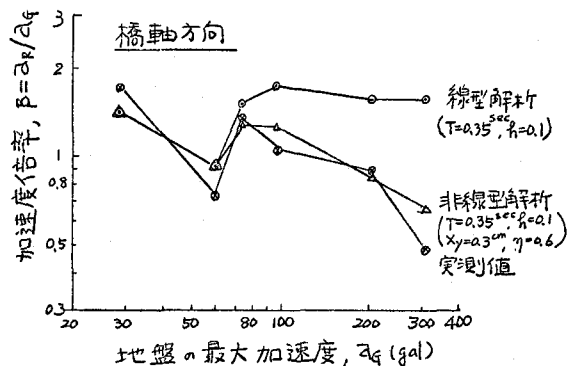


図3. 落合橋における実測と解析

と対比させて図3に示す。これらの解析から、①小加速度の地震では線形解析が良好な結果を導くこと②大加速度の地震では線形解析は過大な応答を与えるが、非線形解析がある程度良好な結果を与えることが判りてきた。

4. 新葛飾橋における井筒橋脚の地震応答

新葛飾橋については、関東地方建設局の協力を得て、工事開始の昭和37年以來耐震性に関する実験調査を行っており、38年度に井筒橋脚2基の振動実験、40年度に全橋の振動実験が行われた。本橋の概要と実験に基づく振動性状を表2に示す。本橋の完成後は、地盤および橋脚頂部に強震計2台を設置したが、井筒中にあるため埋設された加速度計および土圧計を用いた地震観測が行われている。本橋からは多数の資料が得られているが、図4にその代表例を示す。これらから本橋の地震応答特性を抽出してみると、①地表部に比べ橋脚頂部は揺れ小さいが、地中の井筒部ではかなり揺れが小さい、②振動実験から得た振動性状と地震観測結果から予想されるものは多少異なる。すなわち振動実験によれば固有周期0.36秒、動的K値 4.2 kg/cm^2 であるのに対し、地震観測では卓越周期0.50秒、動的K値 2.0 kg/cm^2 である。かかる現象が起こる要因としては地盤の影響と含み構造物の非線形性が考えられるところであるが、特に両者における井筒部の振動変位が、振動実験で片振り約 0.01 cm 、地震時 0.2 cm であること、および井筒周辺の土の挙動の相異などが考えられる。この点に関する詳細な検討は今後実施していきたいと考えている。

5. 結論

数多くの道路橋における地震応答の観測結果から下記のとおりが結論されよう。①観測資料の多くは応答加速度は地盤加速度より大きい。②比較的弱い地震に対する応答加速度は、適切な振動性状を考慮した線形系の応答解析結果と良好に一致を示す。③応答加速度の増加率は地盤加速度の増加に伴い低下していく。この主因として構造物の非線形性が挙げられ、強震時の応答加速度はbi-linearな復元力をもつ非線形系の解析結果とよく対応を示す。④地中部分の加速度は地表部に比し低下する。

表2 新葛飾橋の概要

管轄	建設省関東地方建設局	
位置	国道6号線江戸川バイパス 東京都葛飾区金町・千葉県松戸市間	
橋格	一等橋	
橋長	442m = 0.55 + 4@55 + 0.9 + 4@55 + 0.55	
巾員	17.7m = 1.85 + 14 + 1.85	
上部	鋼箱桁4径周連続2連	
下部	鉄筋コンクリート井筒橋脚7基 鋼管杭アバウト2基	
設計震度	水平0.25, 鉛直0.1	
土質条件	砂 (N>20)	
振動性状 (上部架設後)	基本固有周期	0.36秒
	振動モード	ロッキンク
	減衰定数	0.066
	動的K値	4.2 kg/cm^2

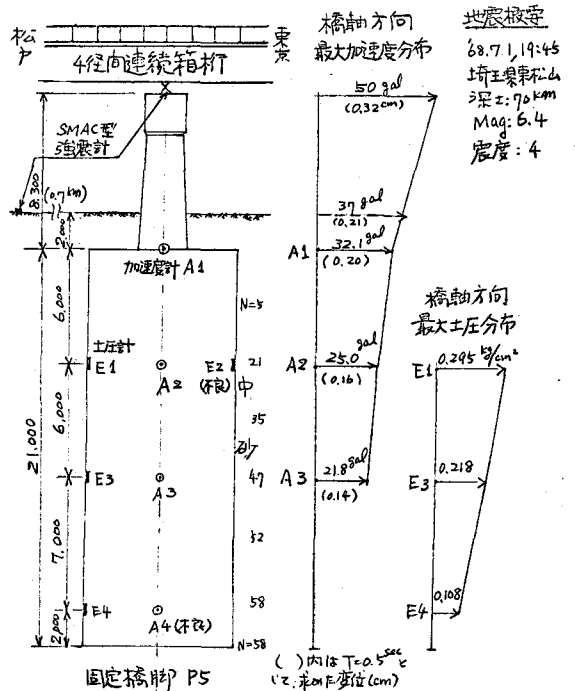


図4 新葛飾橋の地震観測結果