

3. 耐震設計技術の現状調査

3.1 概要

土木学会は、1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災で多くの犠牲者をみたことおよび土木構造物に多くの被害が発生したことの重要性を踏まえて、1995年3月に「耐震基準等基本問題検討会議」を設置した。そして、土木構造物の耐震性能の強化と地域の地震防災性を向上するための基本方針を二回に渡って発表した。一回は1995年5月23日に「土木構造物の耐震基準等に関する提言」（第一次提言）として、二回目は1996年1月10日に「土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言」として公表した。また、土木構造物の被災状況の調査やその解明が進むにつれ、各耐震設計基準の見直しの必要性が指摘されるようになってきた。これらの動きに伴い、設計技術者の意識改革や技術力の向上の必要性も指摘されるようになってきた。具体的には、地震時に寄与する重量に設計水平震度0.2~0.3という値を乗じた水平力を静的に作用させ、それによる発生応力度を許容応力度以内に収めるという震度法の耐震設計体系から、実際に生じるであろうと思われる大きな地震動を想定し、それによる損傷過程を考慮した耐震設計体系への移行である。

本章では、以上のような状況を踏まえて、次の二つの観点から耐震設計技術の現状調査を実施した。

- ①土木構造物の設計に係わる技術者が、耐震設計技術の高度化へ対応できるかどうか？
- ②土木構造物に係わる耐震設計基準は、阪神・淡路大震災を踏まえてどのように改訂されるのか？

前者に関しては、「第二次提言」で示された耐震設計技術の高度化への対応を調べるという目的で民間企業を対象とした“耐震設計技術の高度化への対応状況の調査”というアンケート調査を実施した。後者に関しては、公開されている関連資料の調査や各構造物の監督官庁への訪問調査という形で“耐震設計基準の改訂動向の調査”を行った。それぞれの調査で対象とした民間企業や、耐震設計基準は次のとおりである。

“耐震設計技術の高度化への対応状況の調査”で調査対象とした民間企業

- ①建設コンサルタント会社 108社
- ②総合建設業 28社
- ③鋼橋メーカー 17社
- ④PC橋梁施工会社 9社

“耐震設計基準の改訂動向の調査”で調査対象とした土木構造物

- ①道路橋・鉄道橋
- ②水道・下水道
- ③鉄道トンネル
- ④港湾構造物（重力式護岸）

3.2 耐震設計の高度化への対応状況の調査

アンケートは、「第二次提言」に示された耐震設計技術の高度化に備える関連企業の対応状況や発注者や土木学会に対する要望を把握するために、広くアンケート調査を行った。できるだけ具体的な対応や状況認識、課題や要請の内容を調べるために、次の項目を対象とした。

- ①当該企業の属性：資本金、技術者数、対象技術分野
- ②「第二次提言」に示された耐震設計技術の高度化への感想
- ③耐震設計技術の高度化に対する企業努力の内容
- ④動的解析の実績、生産方式、対応可能な技術者数
- ⑤発注者や土木学会に対する要望や期待など
- ⑥その他

配布先は全 162 社、その内訳は建設コンサルタント会社 108 社（構造設計に関連する建設コンサルタント各登録部門の TOP 20）、総合建設業 28 社（土木学会土木施工委員会参加 29 社の内、舗装会社 1 社を除く）、鋼橋メーカー代表 17 社及び PC 橋梁施工会社代表 9 社である。回答は上記職種、それぞれ、81 社、26 社、17 社および 4 社の合計 128 社であった。

回収率は、同じく 75%、93%、100%、44%であり、全体で 79%でこの種の調査としては高い値を示した。これは、阪神・淡路大震災における土木構造物の深刻な被害状況の衝撃の大きさを物語るものである。

主な質問事項に関するアンケート結果について、全体、設計の立場（コンサルタント会社）、施工・製作の立場（建設会社、橋梁メーカー）の三つの立場から整理を行った。

(1) 「第二次提言」に示された耐震設計技術の高度化への感想

設計の立場、施工・製作の立場ともに、耐震設計技術の差別化の進行と対応能力の相違が顕在化すると、耐震設計技術の高度化に対して何らかの対策の必要性を感じていることで全体の約 7 割を占めており、それほど大きな傾向の違いは見られない。設計、施工・製作に係わらず、耐震設計技術の高度化への対応には敏感になっていることがわかる。

耐震設計技術の差別化の進行が自社の競争力を高めるチャンスと判断するについても、両者ともほぼ同じ割合になっている。

(2) 耐震設計技術の高度化に対する企業努力の内容

設計の立場と施工・製作の立場で職種の違いが現れている。

設計の立場で目立つのは、耐震部門の新設・強化、動的解析などの解析ソフトの購入（予定を含む）および、社内勉強会の開催である。

施工・製作の立場では、耐震性向上のための新しい工法や技術開発の割合が高くなっている。動的解析などの解析ソフトの購入は、施工・製作の立場においても最も占める割合が高くなっている。

動的解析などの解析ソフトの自社開発の割合に着目すると、設計の立場よりも施工・製作の立場

の方が占める割合が大きくなっている。これは、会社の規模の違いによるものと思われる。

(3) 動的解析の実績と手法、生産方式、対応可能な技術者数

動的解析の実績と手法、生産方式について、阪神・淡路大震災以前の3ヶ年の状況と地震以降の状況について質問した。

①動的解析の実績については地震前の3ヶ年では、年間1～2件のものが全体で半分弱、次いで実績無しが25%弱、5～10件が18%余り、10件以上が10%強となっている。

設計の立場では、実績無しの比率が約30%と施工・製作会社の3倍弱になっているのに対し、年間10件以上とするものでは設計が施工・製作の約50%増となっている。年間1～2件のものでは逆に施工・製作が設計の1.5倍となっていることが注目される。

地震後については、全体、設計、施工・製作とも数十件以上とするものの割合が地震前に比べて、1.5～2倍程度増加している。また、実績無しが同じく2/3強に減少し、全般的に実施の機会が増加していることがわかる。

②動的解析の手法については、地震前は全体、業種別とも線形動的解析が約75%を示しているのに対し、地震後には非線形動的解析を何らかの形で含むものが全体、業種別とも約60%となり、線形動的解析のみが30%弱に大きく減少している。これは、「第二次提言」を受けた復旧設計や耐震補強設計の機会が増加しているからと想像される。

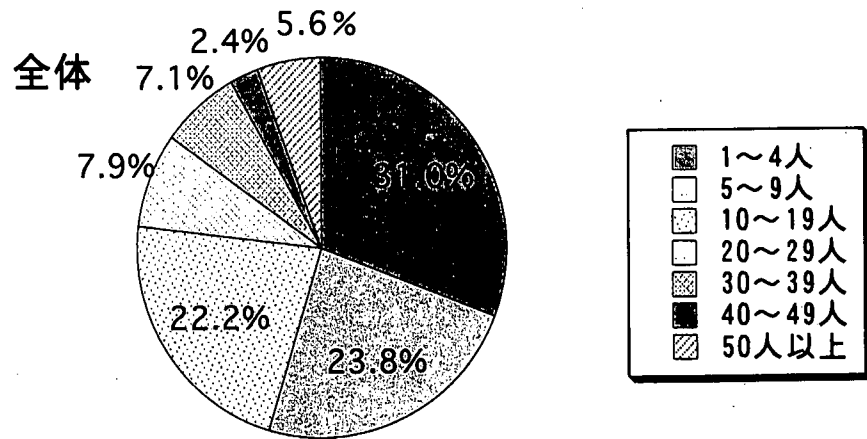
③動的解析の生産方式については、地震前後では若干、社内対応の割合が増加しているものの職種による違いが目立つ。すなわち、設計の立場では、原則社内で行うとするものが、30%強となっているのに対し、施工・製作の立場では約60%を占めている。

原則として社外に委託するとの回答が設計の立場では地震前後で20%弱から約24%に増えているのに対し、施工・製作の立場では、逆に、約22%から18%強に減少していることも注目される。

④動的解析に対応可能な技術者数については、通常的手法に対応可能な者と高度な技術力を必要とする問題に対応可能な者とに分けて整理する。図-3.2.1には、通常的手法に対応可能な技術者の数を整理した結果を示す。

通常的手法に対応しうる技術者数は、設計の立場で約60%が10人未満であるのに対し、施工・製作の立場ではその比率が50%弱となっている。また、10～19人の割合については設計で約15%、施工・製作でその二倍強の32%余りと逆の傾向になっている。

高度な技術力を有する技術者の数については、業種の違いはそれほどではなく、1～4人が60～65%強、5～9人が20%前後、となっている。但し、10～19人とするものでは、設計の立場で約10%であるのに対し、施工・製作の立場では13%余りとその違いが目立つ。これは会社の規模の違いによるものと思われる。



施工・製作の立場

設計の立場

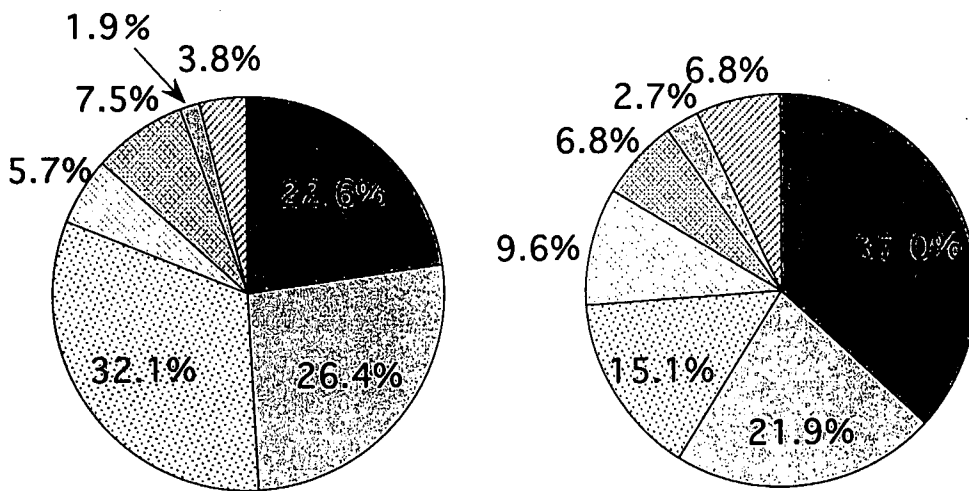


図-3.2.1 通常的手法による動的解析を行う技術者数

(4) 発注者や土木学会に対する要望や期待など

全体で眺めてみると最も高い割合を占めるものは、設計や施工技術の高度化、複雑化に対する正当な代価の要求である。次いで、土木学会に対して耐震設計の実務書の企画・出版そしてセミナーの企画・開催となっている。

設計の立場では、セミナーの企画・開催や耐震工学の教育機会の増大の要望が高く、施工・製作の立場では、フルターンキーによる発注形態への変更の要望や耐震設計基準の改訂による成果の差は小さいものが良いとする意見の割合が大きくなっている。

耐震設計基準の性格として設計者の自由度を望む意見が両業種とも8%弱と少ないことは興味深い結果である。

各質問項目毎の比率の一覧を表-3.2.1に示した。これと(1)～(4)までの調査結果を踏まえて、設計技術検討部会が本来対象としている、設計の立場についての調査結果に関するまとめと考察を行う。

表-3.2.1 耐震設計技術の高度化への対応に関するアンケート結果一覧

質問	内 容		調査結果 (%)			
			設計の立場	施工・製作の立場	全体	
会社規模	土木技術者数	100人以下	23.6	1.9	14.3	
		100~300人	43.1	31.5	38.1	
		300~500人	19.4	5.6	13.6	
		500~1000人	8.3	14.8	11.1	
		1000人以上	5.6	46.9	23.0	
	資本金	1億円以上	45.1	1.9	26.2	
		1~5億円	36.6	1.9	22.2	
		5~10億円	2.8	3.7	2.4	
		10~100億円	9.9	22.2	15.9	
		100~1000億円	5.6	64.8	31.0	
	1000億円以上	-	5.6	2.4		
やすすり不安 期待不安	自社の技術力で十分対応可能であり、何の不安もない。		6.5	7.3	6.8	
	耐震設計技術の差別化が進み、物件毎に対応できる企業とそうでない企業が出てくると感じている。		32.5	35.8	33.8	
等 対 応 能 力 の 向 上 の 自 助 努 力	耐震設計技術の差別化が進み、自社の技術力を積極的にアピールできるチャンスだと考えている。		16.9	16.5	16.7	
	耐震設計技術の高度化に対応するために、会社として何らかの対策が必要だと考えている。		39.0	33.0	36.5	
	その他		5.2	7.3	6.1	
	耐震に関する部門を新設もしくは強化した（する予定である。）		11.7	6.5	9.4	
	動的解析等の解析ツールを自社開発した（開発中である・開発する予定である。）		9.7	11.4	10.5	
	動的解析等の解析ツールを購入した（購入する予定である。）		37.7	25.2	32.1	
	社内で、耐震設計に関する勉強会等を行っている。		31.2	20.3	26.4	
	耐震性を高めるために、材料や工法の面から品質管理を徹底するようにした（徹底する予定である。）		1.3	2.4	1.8	
	耐震性を高めるために、材料や工法の面から新たな技術を開発した（開発中である・開発予定である。）		0.6	23.6	10.8	
	従来の技術で対応可能であり、特に何もしていない。		2.6	2.4	2.5	
土木学会等への要望	その他		5.2	6.1	6.5	
	耐震設計技術の高度化に対応した解説書（実務書）を刊行してもらいたい。		23.2	22.6	22.9	
	耐震設計技術に関するセミナーを開催してもらいたい。		14.7	9.1	12.6	
	大学・工業高専・工業高校等の教育機関において、耐震工学に関する講義（授業）を行ってもらいたい。		8.5	4.3	6.9	
	1995.1.17兵庫県南部地震以後に改定される耐震設計基準は、多くの事項に付いて細かく規定して、設計者間で設計成果に大きな差がでないようにしてもらいたい。		9.6	13.4	11.0	
	1995.1.17兵庫県南部地震以後に改定される耐震設計基準は、基本的な考え方（思想）について記述するだけで、設計者の自由度を大きくしてもらいたい。		7.7	7.9	7.8	
	構築のような、上部構造と下部構造を分離した発注形態（設計）では、構築システムとしての耐震性を向上できないので、プロポーザル方式の積極的利用により上部構造と株構造を一体とした発注をしてもらいたい。		8.1	9.1	8.5	
	耐震性能を向上させるために、設計と試行を分離した発注形態から、設計と試行を一体とした発注をしてもらいたい。		1.1	9.1	4.1	
	耐震設計技術の高度化に伴う、設計や施工の複雑化（作業増）に伴う、発注金額の増加をしてもらいたい。		25.4	22.0	24.1	
	その他		1.8	2.4	2.1	
対象構造物	エネルギー施設		5.2	13.3	8.2	
	構築		21.5	26.7	23.4	
	地中構造物		18.7	18.2	18.5	
	河川構造物		16.0	10.3	13.9	
	港湾・海洋構造物		13.9	14.5	14.1	
	土構造物		19.1	10.9	16.1	
動的解析の 任 務 負 担 の 実 績	地震以前	動的解析の平均件数	年間10件/年以上	12.1	8.3	10.7
			年間5~10件/年	16.2	20.0	17.6
			年間1~2件/年	41.4	60.0	48.4
			動的解析の実績なし	30.3	11.7	23.3
		動的解析の内容	線形動的解析	74.0	75.4	74.6
	非線形動的解析		24.7	21.5	23.2	
	その他		1.3	3.1	2.1	
	地震後	動的解析の生産方式	全て社内に対応している。	26.4	49.1	37.7
			特殊なものだけ社内に対応し、簡単なものは社外に委託している。	4.5	9.1	6.6
			ほとんどを社内に対応するが、特殊なものだけ社外に委託している。	47.8	20.0	35.2
ほとんどを社外に委託している。			17.9	20.0	18.9	
全てを社外に委託している。			1.5	1.8	1.6	
動的解析の件数	数10件以上	18.6	14.5	17.0		
	5~10件程	15.5	19.4	17.0		
	1~5件程	42.3	59.7	49.1		
	動的解析の実績なし	23.7	6.5	17.0		
	線形動的解析のみである。	28.2	30.0	29.0		
動的解析の内容	非線形動的解析のみである。	17.9	8.3	18.8		
	非線形動的解析の方が、線形動的解析よりも多い。	33.3	35.0	34.1		
	線形動的解析の方が、非線形動的解析よりも多い。	12.8	21.7	16.7		
	その他	7.7	5.0	6.5		
動的解析の生産方式	全て社内に対応している。	30.1	63.6	40.3		
	特殊なものだけ社内に対応し、簡単なものは社外に委託している。	4.1	8.9	6.2		
	ほとんどを社内に対応するが、特殊なものだけ社外に委託している。	43.8	19.6	33.3		
	ほとんどを社外に委託している。	20.5	14.3	17.8		
	全てを社外に委託している。	1.4	3.6	2.3		
技術者の人数	通常の手法による動的解析	1~4人	37.0	22.6	31.0	
		5~9人	21.9	26.4	23.8	
		10~19人	15.1	32.1	22.2	
		20~29人	9.6	5.7	7.9	
		30~39人	6.8	7.5	7.1	
	高度な技術力を必要とする動的解析	1~4人	6.8	3.8	5.6	
		5~9人	65.8	60.4	63.5	
		10~19人	19.2	20.8	19.8	
		20~29人	9.6	13.2	11.1	
		30~39人	5.5	5.7	5.6	
40~49人	-	-	-			
50人以上	-	-	-			

現状での対応能力であるが、阪神・淡路大震災以前の動的解析に関する調査結果をみると、年間10件以上の動的解析を実施してきた会社は12%しかないことがわかる。「第二次提言」では非線形動的解析が基本となっているが、構造物の地震応答を決定づける、構造物の固有振動特性と地震動の関係等は線形動的解析を数多く実施することにより得られるものであり、阪神・淡路大震災以前と同様な感覚で（何の自助努力もせずに）いると、耐震設計の高度化に対応できない会社が多数出てくることがわかる。このような現状は、各社においても認識されているようであり、「第二次提言」や自助努力に関する調査結果からもその様子が伺える。当然、阪神・淡路大震災以前から動的解析の実施件数が多い会社は、地震以後においてもその数は多く、耐震設計の高度化は他社との差別化のチャンスとしている会社も数社ある。

土木学会への要望としては、耐震設計に関する実務書の刊行やセミナーの実施が多く、何をどう勉強して良いかがわからない会社が多いようである。これは、阪神・淡路大震災以前の動的解析の実績を考えると当然かもしれない。

発注者への要望としては、耐震設計の高度化にともなう設計作業量の増加に伴う発注金額の増加に関する要望が最も多かった。また、上・下部構造の分離発注から橋梁としての発注への移行に関する要望も多い。

設計基準に関しては、細かく規定して欲しいが、基本的な考え方のみを規定して欲しいを上回った。

今回のアンケート結果を設計の立場を対象に総合的に評価すると、次の3点を上げることができる。

- ①従来から、動的解析の実績が多い会社は、耐震設計の高度化にも対応できるが、その数は少ない。
- ②従来、あまり動的解析を行って来なかった会社も、耐震設計の高度化に対応すべく、勉強会、プログラム開発等の自助努力を進めている最中である。
- ③自助努力を進める上で、適切かつ実用的な情報の提供を土木学会に望んでいる。

3.3 耐震設計基準の改訂動向の調査

3.3.1 調査方法

「第二次提言」後、各種土木構造物の耐震設計基準の見直しや改訂作業がどのような形で進められているかを調査した。調査は、公開されている関連資料や各構造物を所管する省庁への訪問調査を含めた形で行った。調査を実施した土木構造物の内、耐震設計基準の見直しや改訂作業を進めている代表的な、次の構造物について、「第二次提言」で示された提言内容と改訂内容との比較を行った。

- ①道路橋・鉄道橋
- ②水道・下水道
- ③鉄道トンネル

④港湾構造物（重力式護岸）

まだ、耐震設計基準の改訂に着手していないということで本報告書に記載されなかった土木構造物を含め、各構造物を所管する各省庁の方々には、貴重な時間を訪問調査のためにさいて頂いた。ここに感謝の意を示す。

3.3.2 調査結果

調査結果を表-3.3.1～3.3.6に示す。「第二次提言」と耐震設計基準の改訂内容の比較は、大きくは次の3つに着目して行った。

- ①耐震性能照査で考慮すべき地震および地震動
- ②目標とする耐震性能
- ③耐震設計法とシステムとしての対応

表に示した各構造物とも基本的には、「第二次提言」に沿って耐震設計基準の見直しや改訂作業が進められている。しかし、「第二次提言」の反映度合いは、各構造物で異なる。これは、レベル2の地震動に対しての挙動がある程度解明されている構造物と今後の研究を待たなければならない構造物の違いと解することができる。特筆すべきことは、多くの構造物が、自然の力は未知であることを認め、想定した以上の地震（地震動）に対しては、ネットワークシステムとしてのリダンダンシーを高めることを挙げている。

何れの事項とも、各構造物が持つ日常時の機能と役割、震後機能と役割、構造特性、解明されている挙動の濃淡が異なるので、単純な比較はできない。しかし、「耐震性能照査で考慮すべき地震および地震動」や「目標とする耐震性能」が何故違うのかは、それを利用する立場にある国民へ正しい情報を伝えるべきであろう。特に、土木構造物は社会基盤施設であり、それらが適切に機能して初めて日常生活が維持できる。このような観点からの議論は、今回の調査結果を踏まえて、平成9年度より土木学会の地震工学委員会に設けられる耐震基準小委員会の活動に期待したい。

今回の調査においては、現在改訂作業中の鉄道橋の耐震設計の考え方が注目される。表-3.3.2(a), (b)に示すように、鉄道橋の耐震設計基準は、「第二次提言」に忠実に沿った形で改訂作業が進められている。具体的には、次のような点が注目すべき点である。

- ①震源断層近傍の地域で発生する地震動に関しては、地震学の分野での研究成果を取り入れながら、断層パラメータが工学的基盤面で定義される地震動に与える影響を感度分析し、その応答スペクトルの形状を定める。
- ②耐震設計で考慮すべき地震動を、工学的基盤面で定義する。
- ③非線形動的解析に用いる入力地震動に関しても、プレート境界型地震や内陸直下型地震の非定常性の違いを考慮した模擬地震動を定める。
- ④地域防災計画で想定される地震動の強度が、鉄道橋の耐震設計基準で想定しているものよりも大きい場合は、地域防災計画で想定される地震動強度を鉄道橋の耐震設計にも用いる。
- ⑤地震時における列車の走行安全性や、じん性能をフルに活用して地震に耐える場合は、停止している列車重量を支持できるだけの性能は確保する等、鉄道橋の本来の機能である列車の走

行安全性を耐震設計で考慮している。

表-3.3.1 土木学会「第二次提言」と改訂された道路橋示方書の内容との対比

	土木学会「第二次提言」	改訂道路橋示方書	備考
耐震性能照査で考慮すべき地震および地震動	レベル1とレベル2を指摘。 レベル2：陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震に加え、地域ごとに脅威となる内陸の活断層を同定、その震源メカニズムを想定して定めることを基本、困難な場合、兵庫県南部地震等の断層近傍の強震記録を基に標準的な地震動を作成。 関東地震級の陸地近傍のプレート境界地震：今後の研究課題	レベル2については、従来からの1G相当のものに加えて、兵庫県南部地震の強震記録に基づき設定。このような地震動を上回る現象の発生可能性も指摘し、落橋防止システム等により安全性を確保。ただし、未知のいかなる地震動に対しても安全を確保することには現状で制約あり。道路ネットワークのレジリエンスを高めたり、早期復旧体制整備や技術開発が重要。	
目標	レベル1地震動 損傷を発生させないことを原則。このため、地震時の動的応答が弾性限界を超えない。基礎は地上部の構造の機能維持が目標。	健全性を損なわない。	
耐震性能	レベル2地震動 重要構造物：震後、早期復旧可能な程度の被害の程度に抑える。 上記以外の(一般)の構造物：全体系の崩壊を防止。このため、地震応答が終局の変形を超えない。基礎は液状化による流動が生じて、地上部の構造に重大な損傷を発生させないことが目標。	特に重要な橋：限定された損傷にとどめる。 重要度が標準的な橋：致命的な被害を防止する。 液状化の影響およびそれによる地盤の流動によって、基礎が損傷、過大な変形を生じないことを目標。	液状化による地盤流動の取り扱い：改訂示方書では基礎に加わる荷重が新たに規定。
耐震設計	レベル1地震動 線形応答スペクトルや時刻歴波形を入力させた弾性解析を適用。	震動法による(線形応答スペクトルを用いた弾性解析に相当)。	
	レベル2地震動 弾塑性時刻歴応答解析の実施が望ましいが、等価線形解析法や許容塑性率に基づく設計応答スペクトルの活用などの簡便な方法を用いることができる。不静定次数の低いもの：保有耐力の確認を厳密に実行すべき。 不静定次数の高いもの：損傷過程を考慮した終局変形性能の解析を行うことが望ましい。	地震時の挙動の複雑さの程度により、自由度系の振動モデルの適用が可能なものは地震時保有水平耐力法による設計。地震時の挙動が複雑で塑性化する部位が明確なものはそれに加えて動的解析による照査。明確でないものは非線形動的解析で設計(図-1、表-3参照)。	道路橋示方書の規定では地震時保有水平耐力法と動的解析の適用区分が明確化された。
設計法	鋼構造物に対する考え方 特に変形性能を増大させるための断面構成、あるいは断面内応力の制限についての研究を進めることが必要。	橋脚を対象に建設省土木研究所と民間との共同実験研究の成果を踏まえ、特に1章を新たに設けてコンクリート充填と中空断面方式の場合の設計上の取り扱いを明記。	
	基礎と地盤の相互作用 短周期の構造物の地震応答は基礎～地盤系の非線形領域の動的相互作用の影響を設計に取り入れるための研究を推進すべき。	基礎本体や周辺地盤に塑性化が生じる場合、液状化が生じる場合には、動的相互作用の影響を減衰の増大として考慮し、地震時保有水平耐力法に適用する設計水平震度の(低減)計数として解説文中に2/3程度を推奨している。	
免震・制震技術の適用	耐震性の向上のために新しい技術を積極的に導入すべき。	免震設計法の開発を目的とした建設省土木研究所と民間会社28社との共同研究成果を反映させた内容を新たに1章を設けて記述。制震についても14章に今後の技術開発を期待して記述。	

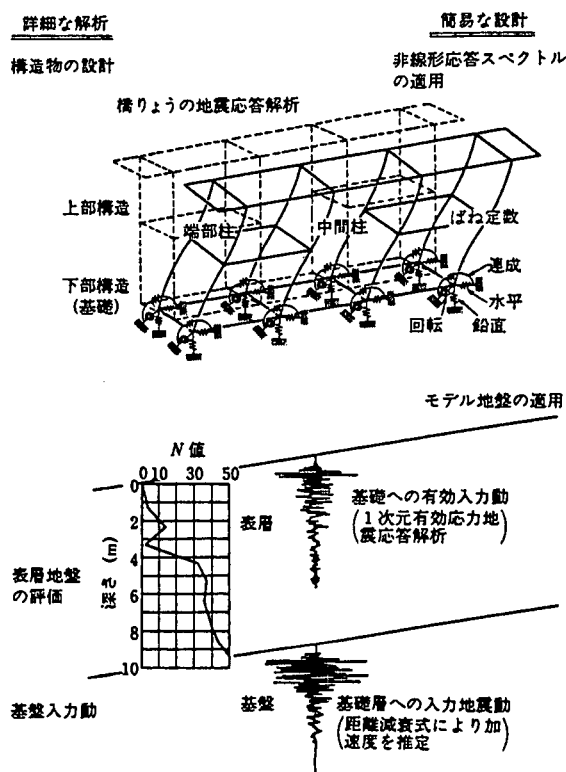
表-3.3.2(a) 土木学会「第二次提言」と改訂予定の鉄道橋に関する耐震設計法（その1）

		土木学会「第二次提言」	改訂予定の鉄道橋の耐震設計	備考
耐震性能照査で考慮すべき地震および地震動		<p>ⅠⅠとⅠⅡを指摘。</p> <p>ⅠⅡ:地域ごとに脅威となる活断層を同定。その震源メカニズムを想定して定めることを基本。困難な場合、兵庫県南部地震等の断層近傍の強震記録を基に標準的な地震動を作成。</p> <p>関東地震級の陸地近傍のプレート境界地震:今後の研究課題</p>	<p>ⅠⅡについては、従来からの1G相当(プレート境界型)のものに加えて、震源断層近傍の地域で発生する地震動を考慮する。ⅠⅡ地震動は、設計基礎($V_s=300\sim 400\text{m/s}$以上)における応答スペクトルという形で定義する。震源断層近傍の地域で発生する地震動に関しては、断層の破壊形態、伝搬方向、地震規模等がその応答スペクトルの周期特性(形状)に与える影響(ハザード等)を考慮してその形状を定め、地震動強度は平成7年兵庫県南部地震において観測された硬い地盤上($V_s=300\sim 400\text{m/s}$以上)上での地震動強度によって定める。上述の応答スペクトルに対応する動的解析用時刻歴波形は、その非定常性が非線形応答に与える影響を考慮して、プレート境界型地震や内陸直下型地震による地震動の群遅延時間の(フーリエ位相$\phi(\omega)$)の周波数に関する微分。対応する成分波の時間軸上における重心的位置を表す)特性に応じた模擬地震動を作成する。</p>	<p>地域防災計画で、左に述べた地震動よりも強度が大きな地震動が想定された場合は、当該地域の鉄道橋の耐震設計にも、その地震動を用いる。</p> <p>列車の走行安全性の検討のために地震危険度解析により、ⅠⅠという地震動は何か、設計水平震度0.2とは何かを検討中である。</p>
目標	ⅠⅠ地震動	<p>損傷を発生させないことを原則。このため、地震時の動的応答が弾性限界を超えない。基礎は地上部の構造の機能維持が目標</p>	<p>補修せずに、機能が保持できることを原則とする。このため地震時の応答が弾性限界を越えないものとする。</p>	<p>列車の走行安全性を確保する。</p>
	ⅠⅡ地震動	<p>重要構造物:震後、早期復旧可能な程度の被害の程度に抑える。</p> <p>上記以外の(一般)の構造物:全体系の崩壊を防止。このため、地震応答が終局の変形を超えない。基礎は液状化による流動が生じても地上部の構造に重大な損傷を発生させないことが目標</p>	<p>重要な構造物及び早期復旧が必要な構造物は、損傷が発生したり、塑性変形が残留しても、地震後早期に修復可能であることを原則とする。このため、最大地震応答が許容される塑性変形もしくは許容される耐力の限界を越えないように設計する。それ以外の構造物は、損傷しても早期の修復が不可能となっても、構造物全体系が崩壊しないことを原則とする。このため、最大地震応答が終局変形もしくは終局耐力を越えないように設計する。</p>	<p>じん性能をフルに活用して地震に耐える場合は、上下の変位量で制御する。具体的には、停止している列車重量は支持できるだけの性能は確保する。大地震時の列車の走行メカニズムについては研究途上にあるので、走行安全性を保持するような構造についても検討を行う。</p>
耐震設計法	ⅠⅠ地震動	<p>線形応答スペクトルや時刻歴波形を入力させた弾性解析を適用。</p>	<p>構造物は弾性として扱い、設計法は震度法を用いてよい。しかし、規模の大きい構造物あるいは複雑な形状を有する構造物は、線形応答スペクトルや時刻歴波形を用いた動的解析を行うこととする。</p>	
	ⅠⅡ地震動	<p>弾塑性時刻歴応答解析の実施が望ましいが、当価線形解析法や、許容塑性率に基づく設計応答スペクトルの活用などの簡敏な方法を用いることができる。</p> <p>不静定次数の低いもの:保有耐力の確認を厳密に実行すべき。</p> <p>不静定次数の高いもの:損傷過程を考慮した終局変形性能の解析を行うことが望ましい。</p>	<p>橋梁の耐震計算法は、非線形動的解析を基本とするが、一般的な構造物は、あらかじめ構造物の履歴性状および許容される塑性率を設定して非線形動的解析により作成した非線形応答スペクトル(所要強度スペクトル)等を基に降伏震度を求め、構造物の断面力を算定してよい。多径間連続橋や長周期の構造物、新形式の橋梁などでその挙動が1自由度系で表現できない構造物については多自由度の非線形動的解析とする。基礎構造物も動的解析を主体とするが、地盤が軟弱で地震時の地盤変位等が無視できない地盤については、基礎の設計にこれを考慮する応答変位法を採用する。</p>	<p>非線形応答スペクトルの方が、概ね安全側の解を出す。</p>

表-3.3.2(b) 土木学会「第二次提言」と改訂予定の鉄道橋に関する耐震設計法（その2）

	土木学会「第二次提言」	改訂予定の鉄道橋の耐震設計	備考
耐震設計法	鋼構造物に対する考え方	じん性等の研究が進んでいる部材以外については、その算定法の開発を早急に行う必要がある。	
	基礎と地盤の動的相互作用	レベル2地震動を設計基盤面で定義し、表層地盤の応答計算から構造物に作用する地震動を算定するため、地盤の性質については十分に検討しなければならない。	地盤の分類を固有周期で行い、各固有周期毎に幾つかのN値のパターン(地層分布)による地盤モデルを用意する。
免震・制震技術の適用	耐震性の向上のために新しい技術を積極的に導入すべき。	免震構造についても、今後取り入れる方向である。	鉄道の場合は、桁間の相対変位を大きくすることはできないので、桁位置では相対変位が生じないような免震構造の開発が望まれる。

耐震設計のイメージ図



西村：鉄道構造物に関する耐震設計法の見直し、コンクリート工学 Vol. 34, No 11, 1996. 11 より抜粋

表-3.3.3 土木学会「第二次提案」と改訂指針との対比（地中構造物1）

	土木学会二次提案	改訂水道施設耐震工法指針・解説	備考	
耐震性の照査で考慮すべき地震および地震動	<p>レベル1とレベル2を指摘</p> <p>レベル2：地域ごとに脅威となる活断層を同定、その震源メカニズムを想定して定めることを基本。困難な場合、兵庫県南部地震の断層近傍の強震記録を基に標準的な地震動を作成。</p> <p>関東地震級の陸地近傍のプレート境界地震：今後の研究課題</p>	<p>耐震設計では、施設の供用期間中に1~2回発生する確率を有する地震動レベル1 および発生確率は低いが大きな地震動レベル2 を考慮する。なお、地震動レベル2 は地域ごとに活断層の位置や地震動予測のための各種断層パラメータが同定されている場合は、活断層より直接設計用の地震動を評価することが出来る。活断層の同定が困難な場合や、地震動予測のための情報が不十分な場合には、1995年兵庫県南部地震等による観測記録や数値解析による地震動の評価報告書を基に標準的な地震動レベル2 を定めるものとし、設計地震動（震度、スペクトル波形）を設定している。</p>		
目標耐震性能	レベル1地震動	<p>重要度により目標水準を設定</p> <p>標準的：個々の施設に軽微な被害が生じて、その機能保持が可能であること。</p> <p>重要度高い：無被害であること。</p>		
	レベル2地震動	<p>標準的：個々の施設には構造的損傷があっても、水道システム全体としての機能を図れ、また、早期の復旧が可能なこと。</p> <p>重要度高い：個々の施設に軽微な被害が生じて、その機能保持が可能であること。人命に重大な影響を与えないこと。</p>		
耐震設計	設計法	<p>シールドトンネルや開削トンネルなどの大断面を有する地中構造物の耐震設計では、周辺地盤の地震時の変位の平面のみならず深さ方向を含めた三次元的分布、小断面の埋設管では管路線上の地震時の変位分布が重要である。したがって、表層地盤の地震応答を十分に把握することが必要である。また、地盤の液状化やこれに起因して発生する地盤の側方流動は地中構造物の耐震性に大きな影響を与えるため、耐震設計に当たっては地盤の安定性を十分検討しなければならない。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・地震動レベル1とレベル2で計算法照査法を設定 ・底面幅の広い池状構造物は自重等に起因する慣性力に加え、周辺地盤の変形に起因する土圧、せん断力を考慮する。 ・埋設管路は原則応答変位法によるが、地盤急変等の複雑な挙動が予想される部分は必要に応じて動的解析により安全性を照査するとしている。 ・地盤の液状化に対しては、浮上りと側方流動による地盤変位あるいは地盤ひずみを考慮するとし、その具体的な計算法、設定値を規定している。 	
	可撓性構造等の採用	<p>レベル2地震動に対しても地中構造物が所要の耐震性能を保持するため、可撓性を高めるための構造および材料を積極的に採用することが望ましい。また、構造部材の脆性的な破壊を防ぐための適切な構造細目を採用して一部の構造部材の破壊が全体的な破壊に繋がることのないようにしなければならない。</p>	<p>主要な水道施設では、必要な箇所に耐震性の高い材料を使うものとする。また、水密性の保持が必要な場合には、地震により相対変位を生じる構造物の連結部分に伸縮可撓性を持つ耐震継手を設ける等、変位の吸収や応力の緩和が可能でなければならない。</p>	
システム面で対応	システムの計画	<p>レベル2地震動に対し、当該地域の地形・地盤条件および都市計画等を考慮して、幹線ラインについては機能を維持するよう計画し、適切な構造を選択する必要がある。経済性、地盤状況等よりこれが困難である場合、災害時に必要な機能を維持し、早急な復旧を可能とするよう、幹線の設定、多ルート化、ブロック化の推進、代替手段の採用等システム面からの対策を取り入れる必要がある。</p>	<p>水道システムの設計にあたっては、以下の事項に留意しなければならない。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 震害が出来るだけ局所に限定されるようなシステムとすること。 2) 震害部の復旧が容易に出来るように考慮すること。 3) 震害による二次的被害を防止する対策を講じておくこと。 <p>そのため、重要施設の二重化、系統間の連絡およびグループ化、管路網のブロック化、緊急遮断弁の設置等の対策を出来る限り取り入れるものとする。</p>	
	地震断層を横切る場合の対応	<p>活断層の位置が明確に知らされている場合には、その位置での地中構造物の大断面化、二重化、可撓性、構造物と内部施設の絶縁化などの対策が考えられるが、技術的に困難な場合があるので、システムとしての代替性などのリテラ面からの対策も併せて考慮する必要がある。</p>	<p>特にこの対応は記述されていないが、システムの計画での対応を図るものと考えられる</p>	

表-3.3.4 土木学会「第二次提案」と改訂指針との対比（地中構造物2）

		土木学会二次提案	下水道の地震対策についての最終提言 H8.8.30	備考
耐震性の照査で考慮すべき地震および地震動		<p>レベル1とレベル2を指摘</p> <p>レベル2:地域ごとに脅威となる活断層を同定、その震源メカニズムを想定して定めることを基本。困難な場合、兵庫県南部地震の断層近傍の強震記録を基に標準的な地震動を作成。</p> <p>関東地震級の陸地近傍のプレート境界地震：今後の研究課題</p>	<p>施設の供用期間内に1~2度発生する確率を有する地震動(レベル1地震動)、及び直下型地震等のように供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動(レベル2地震動)の、二段階を考えるものとする。</p> <p>地震動としては当面兵庫県南部地震相当の大きさを対象とするが、それぞれの地点において影響を受ける活断層を同定して地震規模を想定し、地震動の大きさを推定することが可能な場合には、その大きさを用いる。</p>	
目標耐震性能	レベル1地震動	構造物の機能が維持されるものとする。	レベル1地震動は、それが作用しても構造物の機能が維持されるものとする。	
	レベル2地震動	構造物が損傷しても機能に重大な支障が発生せず、かつ短期間での復旧が可能な範囲内での損傷に留めることとする。	レベル2地震動は、極めてまれであるが非常に強い地震動を定式化したものであり、構造物が損傷したり塑性変形が残留しても、比較的早期に復旧が可能であることを原則とする。	
耐震設計	設計法	シールドトンネルや開削トンネルなどの大断面を有する地中構造物の耐震設計では、周辺地盤の地震時の変位の平面のみならず深さ方向を含めた三次元的分布、小断面の埋設管では管路上の地震時の変位分布が重要である。したがって、表層地盤の地震応答を十分に把握することが必要である。また、地盤の液状化やこれに起因して発生する地盤の側方流動は地中構造物の耐震性に大きな影響を与えるため、耐震設計に当たっては地盤の安定性を十分検討しなければならない。	レベル1地震動での耐震設計は、原則として応答変位法を用いる。レベル2地震動での耐震設計には、兵庫県南部地震を基に設計外力を求める。レベル2地震動による対策は、従来地中構造物で一般的に用いられている応答変位法を準用することとし、レベル2地震動に対応した速度応答スペクトルを設定する。また、レベル2地震動に対応した地盤の永久ひずみは、兵庫県南部地震に見舞われた地区の永久ひずみの測量結果より、ひずみ量を設定する。	
	可撓性構造等の採用	レベル2地震動に対しても地中構造物が所要の耐震性能を保持するため、可撓性を高めるための構造および材料を積極的に採用することが望ましい。また、構造部材の脆性的な破壊を防ぐための適切な構造細目を採用して一部の構造部材の破壊が全体的な破壊に繋がることのないようにしなければならない。	構造物との取合部および地盤急変箇所の管路では積極的に可撓性継手を採用する。また、一般管路部の継手構造は、差し込み長の長大化や屈曲可能な構造の採用などの対応を図る。	
	システムの計画	レベル2地震動に対し、当該地域の地形・地盤条件および都市計画等を考慮して、幹線ライフラインについては機能を維持するよう計画し、適切な構造を選択する必要がある。経済性、地盤状況等よりこれが困難である場合、災害時に必要な機能を維持し、早急な復旧を可能とするよう、幹線の設定、多ルート化、ブロック化の推進、代替手段の採用等システム面からの対策を取り入れる必要がある。	構造物での耐震性の確保とともに、万が一被害を受けた場合にも機能を確保できるよう、処理場のネットワーク化、管路施設の複数ルートの確保等、システム的な対応により耐震性の向上を図る。また、構造物での対応が困難な場合にも、最終的に構造物で耐震性を確保するまでの補完的手段としてシステム的な対応を考慮する。	
対応	地震断層を横切る場合の対応	活断層の位置が明確に知らされている場合には、その位置での地中構造物の大断面化、二重化、可撓化、構造物と内部施設の絶縁化などの対策が考えられるが、技術的に困難な場合があるので、システムとしての代替性などのリフト面からの対策も併せて考慮する必要がある。	特にこの対応は記述されていないが、システムの計画での対応を図るものと考えられる	

表-3.3.5 土木学会「第二次提言」と鉄道トンネルの耐震設計に係わる当面の措置の比較

		土木学会二次提案	鉄道新設構造物の耐震設計に係わる措置	備考
耐震性の照査で考慮すべき地震および地震動		<p>Ⅰ、ⅡとⅠ、Ⅱを指摘</p> <p>Ⅰ、Ⅱ：地域ごとに脅威となる活断層を同定、その震源メカニズムを想定して定めることを基本。困難な場合、兵庫県南部地震の断層近傍の強震記録を基に標準的な地震動を作成。</p> <p>関東地震級の陸地近傍のプレート境界地震：今後の研究課題</p>	<p>Ⅰ、Ⅱに相当する現行設計標準等による耐震設計と、Ⅰ、Ⅱに相当する兵庫県南部地震規模の地震に対する検討を行う。</p> <p>Ⅰ、Ⅱに相当する地震動は、「設計想定地震」と呼ばれる。動的解析には、兵庫県南部地震で観測された記録を基に定めた設計スペクトルに適合した波形で、高架橋等の耐震設計と同じものが用いられる。応答変位法には、設計速度応答スペクトルに基づく、慣性力と地盤変位を考慮する。設計応答速度スペクトルの値は、1秒以上の周期で100kine (h=0.2)である。</p>	
	目標耐震性能	<p>Ⅰ、Ⅱ地震動 構造物の機能が維持されるものとする。</p> <p>Ⅰ、Ⅱ地震動 構造物が損傷しても機能に重大な支障が発生せず、かつ短期間での復旧が可能な範囲内の損傷に留めることとする。</p>	<p>従来通り。</p> <p>所要の耐震性能を有すること。地上の構造に比べて、被災後の復旧作業が困難な場合が多いので、大きな損傷を許容するのは必ずしも合理的でないとする。</p>	
耐震設計法及びシステム面での対応	設計法	<p>シールドトンネルや開削トンネルなどの大断面を有する地中構造物の耐震設計では、周辺地盤の地震時の変位の平面のみならず深さ方向を含めた3次元の分布、小断面の埋設管では管路上の地震時の変位分布が重要である。したがって、表層地盤の地震応答を十分に把握することが必要である。また、地盤の液状化やこれに起因して発生する地盤の側方流動は地中構造物の耐震性に大きな影響を与えるため、耐震設計に当たっては地盤の安定性を十分検討しなければならない。</p>	<p>開削トンネルの横断方向の耐震設計のみについて規定している。断面を単位奥行きにモデル化し、深さ方向の地盤変位と慣性力を考慮して、応答変位法により設計する。</p> <p>3次元の周辺地盤の変位分布、軸方向の変形、側方流動に関する規定はない。ただし、液状化が生じる可能性がある場合は、有効応力解析法を用いることが望ましいとしている。</p>	
	可撓性構造等及びシステム	<p>Ⅰ、Ⅱ地震動に対しても地中構造物が所要の耐震性能を保持するため、可撓性を高めるための構造および材料を積極的に採用することが望ましい。また、構造部材の脆性的な破壊を防ぐための適切な構造細目を採用して一部の構造部材の破壊が全体的な破壊に繋がることのないようにしなければならない。</p>	<p>断面のみに限定しているため、可撓構造に関する規定はない。</p>	
	システムの計画	<p>Ⅰ、Ⅱ地震動に対し、当該地域の地形・地盤条件および都市計画等を考慮して、幹線ラインについては機能を維持するよう計画し、適切な構造を選択する必要がある。経済性、地盤状況等よりこれが困難である場合、災害時に必要な機能を維持し、早急な復旧を可能とするよう、幹線の設定、多ルート化、ブロック化の推進、代替手段の採用等システム面からの対策を取り入れる必要がある。</p>	<p>パイプ系のライフラインのようなシステム的な対応は取りにくい。計画に関する規定はない。ただし、被災した場合に、地上の構造物に比べ、復旧が困難な場合が多いので、大きな損傷を許すことが必ずしも得策でないことを解説で述べている。</p>	
地震断層を横切る場合の対応	<p>活断層の位置が明確に知らされている場合には、その位置での地中構造物の大断面化、二重化、可撓化、構造物と内部施設の絶縁化などの対策が考えられるが、技術的に困難な場合があるので、システムとしての代替性などのシステム面からの対策も併せて考慮する必要がある。</p>	<p>規定および解説なし。</p>		