

철도교량 설계에서 사용되고 있는 내진해석 방법의 비교

Comparison of Seismic analysis methods used in railway bridge design.

박성국* · 성근열** · 이상돈***

Park, Sung Kuk · Sung, Keun Yeol · Lee, Sang Don

ABSTRACT

We come to know that recent seismic design is used in the railway bridge design by several analysis methods. The result of the analysis in each method is very different from each other, so very weak structures or very exaggerated structures are designed for earthquake. In this paper, by conducting seismic analysis of 25m PSC beam bridge mainly used in railway bridge, we compared and analyzed the difference of the result of the analysis methods. As a result, we could find that moment varies from 53% to 151% depending on geometrical shape of bridge or seismic analysis method.

1. 서론

최근 설계된 철도교량의 내진해석 기법을 보면 여러 방법에 의하여 내진해석이 수행되고 있음을 알 수 있다. 또한 각 방법에 있어서 결과값의 차이는 상당히 크며, 결과적으로 지진에 있어 상당히 취약한 구조물 또는 매우 과대한 구조물로 설계가 수행되고 있음을 알 수 있다. 현재 주로 사용되고 있는 내진해석 방법들을 살펴보면 다중모드 스펙트럼 해석법, 단일모드 스펙트럼 해석법, 진도법 등으로 구분할 수 있다. 도로교의 경우 다중모드 스펙트럼 해석이나 단일모드 스펙트럼 해석이 보편적 해석기법으로 자리잡고 있으나, 철도교의 경우 현재 진도법이 보편적 해석기법으로 적용되고 있다. 이는 대부분의 철도교의 경우 도로교와 달리 지점조건이 고정단-가동단의 반복으로 인하여 각 경간이 단순교와 같이 독립적으로 거동하므로 전체교량을 모델링할 필요없이 교각을 독립적으로 해석해도 동일한 결과가 발생할 것이라는 가정에 기인한다.

전술한 바와 같이 내진해석에 있어 여러 방법들이 혼용되고 있는 이유는, 지금까지 한반도에는 큰 피해를 입은 지진이 발생하지 않아 내진설계가 중요성을 인식하지 않고 있으며 철도교의 경우 시·제동하중 및 장대레일중하중 등 수평하중이 크기 때문에 상대적으로 상시해석이 내진해석보다 구조물의 형상을 지배하는 중요 인자라는 인식에 기인한다고 할 수 있다. 그러나 최근 고베지진 등의 발생과 더불어 한반도도 더 이상 지진에 있어 안전지대가 아니며, 따라서 내진해석의 중요성이 점점 부각되고 있으며, 또한 최근 철도교의 경우 기존의 수많은 지장물로 인하여 장대교량 및 고교각의 발생이 빈번함에 따라 상시설계보다는 내진설계에 의하여 구조물이 결정되고 있는 실정이다.

이와 같은 이유로 내진해석에 있어서 보다 세밀하고 정밀한 해석이 요구되는 바, 기존의 여러 내진해석 기법을 비교, 분석하여 각 방법들의 장단점 및 철도교에 적합한 최적의 내진해석 기법을 찾고자 한다.

* 정회원·(주)한국철도기술공사 구조설계부 전무·토목구조기술사·skpark@krtc.co.kr

** 정회원·(주)한국철도기술공사 구조설계부 부장·토목구조기술사·kysung@krtc.co.kr

*** 정회원·(주)한국철도기술공사 구조설계부 대리·sdlee@krtc.co.kr

2. 단면가정

내진해석 기법별 결과차를 살펴보기 위하여 철도교 계획시 발생될 수 있는 다음의 2가지 경우를 산정하여 해석하기로 한다.

- Case 1 : 25m PSC BEAM 6경간 교량으로 ①교각의 높이가 상이한 경우 ②교각의 높이가 동일한 경우
- Case 2 : 25m PSC BEAM 교량으로 교각의 높이가 동일한 ①6경간 교량 ②10경간 교량 ③20경간 교량

Case 1에서는 교량의 기하학적 형상이 동일한 경우와, 동일하지 않은 경우에 대하여 각각 내진해석을 수행하여 철도교에 가장 적합한 내진해석 기법을 찾고자 한다. Case 2에서는 앞에서 구한 최적의 내진해석 기법을 적용하였을 경우 연장이 상이한 교량에 대하여 내진해석 결과를 비교하여 어떠한 분포를 가지고 있는지를 알아보하고자 한다.

1) 설계단면 결정

(1) 종평면도

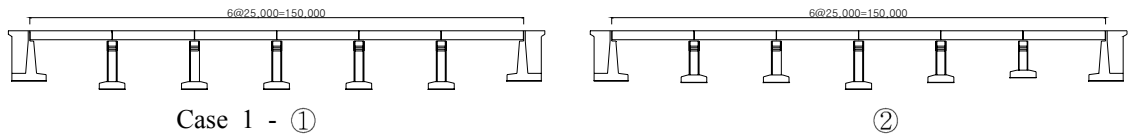


그림 1. Case 1 해석모델

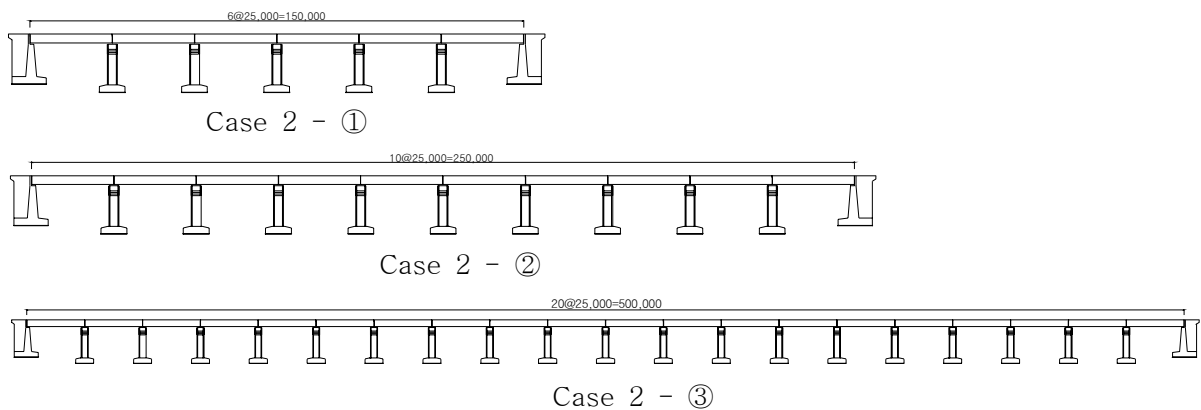
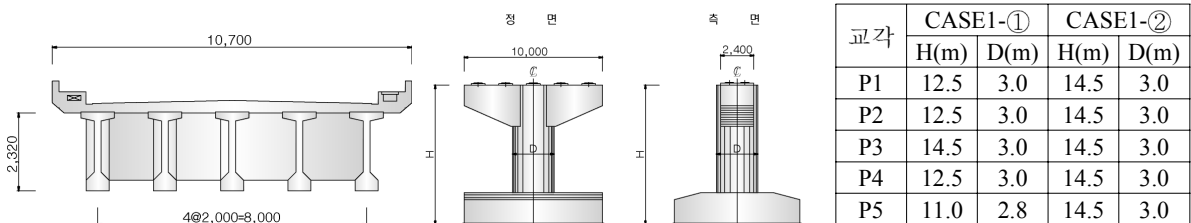


그림 2. Case 2 해석모델

(2) 상하부 단면도



* CASE2의 교각 제원은 H=14.5m, D=3.0m로 일정하고, 각 경간이 6, 10, 20 SPAN으로 구성됨.

그림 3. 상하부 단면도

2) 내진기준검토

- 내진등급 : 내진1등급교
- 가속도계수 : $0.11 \times 1.4 = 0.154$
- 지반계수 : $S=1.2$ (지반종류II)

3. 각 해석방법의 개요 및 장단점 비교

1) 다중모드 스펙트럼 해석법

응답스펙트럼 (지진파에 대한 주기와 최대응답간의 관계 그래프) 해석을 통하여 CQC 또는 SRSS 조합에 의하여 각 방향별 부재력 및 변위를 산정하는 내진해석기법으로 교량의 기하학적 형상이 불규칙 하거나, 정밀한 해석이 요구되는 내진해석에 주로 사용되는 방법이다. 과거에는 해석과정이 매우 복잡하여 사용하기가 어려웠으나 근래에는 구조해석프로그램의 발전으로 대부분 해석과정이 자동화되어 실무에의 적용이 보편화 되고 있다.

2) 단일모드 스펙트럼 해석법

구조물에 단위하중을 재하하여 정적처짐을 구하여, 이에 의한 등가정적 지진하중을 재하하여 내진해석을 수행하는 내진해석기법으로 교량의 기하학적 형상이 규칙적이거나, 대칭구조물에 적합한 방법으로 별도의 프로그램 없이 간단한 Frame해석 프로그램이나, 수계산에 의하여 계산이 가능하므로 프로그램에 대한 의존도가 낮고 검산이 가능한 장점이 있다. 그러나 최근 교량이 고가화 되면서 경간수가 많아짐에 따라 기하학적으로 불규칙 형상이 많아지고, 또한 경간수가 많아짐에 따라 등가정적하중을 구하는 과정이 복잡해짐에 따라 실무적용에의 문제점이 발생하고 있다.

3) 진도법

교량의 상하부 구조물의 자중에 가속도계수 및 지반계수를 곱하여 지진하중을 재하하는 내진해석 기법으로 단경간교에서 사용되며, 철도교의 경우 대부분 연속교가 아니라 단순교의 연속인 경우가 많으므로 그 거동이 각각 단순교와 같다는 가정하에서 사용되는 내진해석 기법이다. 사용과정이 매우 간단하고 또한 수계산으로 가능하므로 현재 철도교의 내진해석에 주로 사용되고 있다.

4. 각 해석방법의 결과치 비교

앞에서 제시한 PSC BEAM교의 해석결과는 아래와 같다. 여기서 X축은 교축방향이며 Y축은 교축직각방향이다. 각 교각의 Footing 상단면을 고정점으로 하여 해석하였고 모멘트는 응답수정계수(R=3.0)로 나눈 값이며 다중모드해석 결과 값을 기준으로 비교하였다.

표 1. Case 1 - ① 해석결과 모멘트 (단위 : tonfm, %)

교각	다중모드해석		단일모드해석				진도법				상시해석					
	Mx (교축직각)		My (교축)		Mx (교축직각)		My (교축)		Mx (교축직각)		My (교축)		Mx (교축직각)		My (교축)	
	결과값	백분율	결과값	백분율	결과값	백분율	결과값	백분율	결과값	백분율	결과값	백분율	결과값	백분율	결과값	백분율
P1	1,040	1,669	1,468	141	1,714	103	920	88	882	53	1,540	148	1,498	90		
P2	1,353	1,671	1,500	111	1,714	103	920	68	882	53	1,540	114	1,498	90		
P3	2,021	1,705	1,641	81	1,725	101	1,105	55	1,043	61	1,828	90	1,622	95		
P4	1,353	1,668	1,554	115	1,714	103	920	68	882	53	1,540	114	1,498	90		
P5	861	1,437	1,240	144	1,559	108	778	90	759	53	1,324	154	1,406	98		

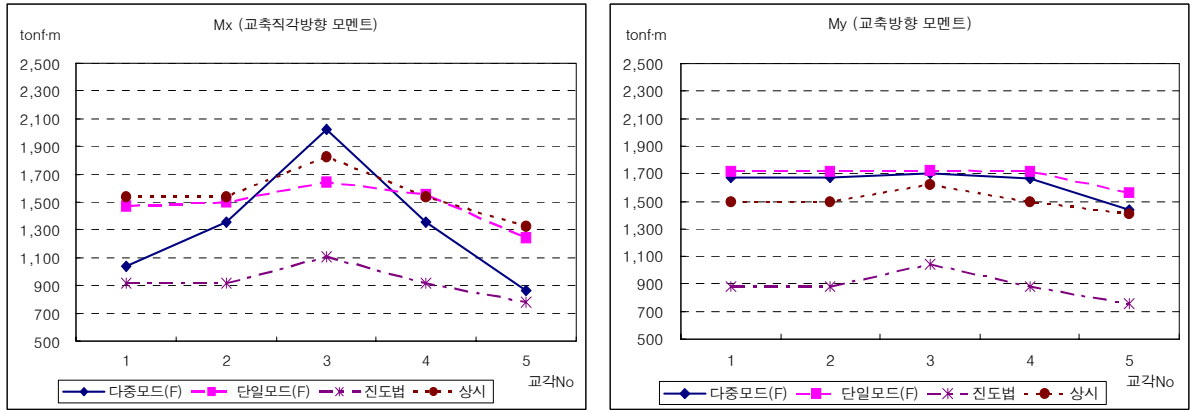


그림 4. Case 1 - ① 해석결과 모멘트 비교

표 2. Case 1 - ② 해석결과 모멘트 (단위 : tonf·m, %)

교각	다중모드해석		단일모드해석				진도법				상시해석			
	Mx (교축직각)		Mx (교축직각)		My (교축)		Mx (교축직각)		My (교축)		Mx (교축직각)		My (교축)	
	결과값	백분율	결과값	백분율	결과값	백분율	결과값	백분율	결과값	백분율	결과값	백분율	결과값	백분율
P1	1,160	1,707	1,539	133	1,751	103	1,105	95	1,043	61	1,828	158	1,622	95
P2	1,669	1,707	1,631	98	1,751	103	1,105	66	1,043	61	1,828	110	1,622	95
P3	1,907	1,709	1,642	86	1,751	103	1,105	58	1,043	61	1,828	96	1,622	95
P4	1,579	1,707	1,658	105	1,751	103	1,105	70	1,043	61	1,828	116	1,622	95
P5	986	1,705	1,482	151	1,751	103	1,105	112	1,043	61	1,828	185	1,622	95

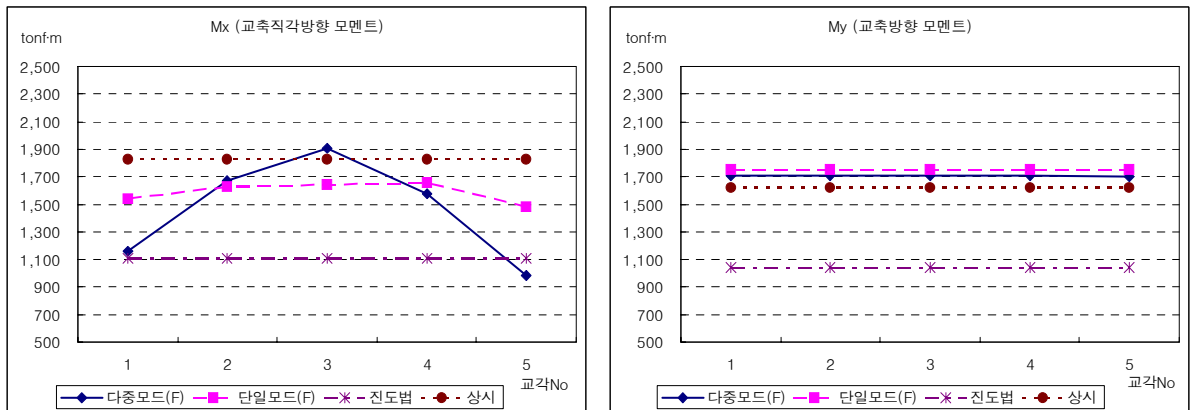


그림 5. Case 1 - ② 해석결과 모멘트 비교

표 3. Case 2 해석결과 모멘트
(단위 : tonfm)

교각	Case2-①		Case2-②		Case2-③	
	Mx	My	Mx	My	Mx	My
P1	1,160	1,707	1,052	1,707	1,035	1,711
P2	1,669	1,707	1,474	1,707	1,463	1,708
P3	1,907	1,709	1,640	1,709	1,621	1,710
P4	1,579	1,707	1,721	1,707	1,650	1,708
P5	986	1,705	1,797	1,706	1,630	1,707
P6			1,714	1,706	1,596	1,709
P7			1,632	1,706	1,567	1,708
P8			1,425	1,706	1,543	1,706
P9			911	1,705	1,530	1,709
P10					1,540	1,712
P11					1,537	1,707
P12					1,549	1,706
P13					1,569	1,712
P14					1,603	1,708
P15					1,643	1,708
P16					1,665	1,707
P17					1,619	1,708
P18					1,415	1,707
P19					895	1,705

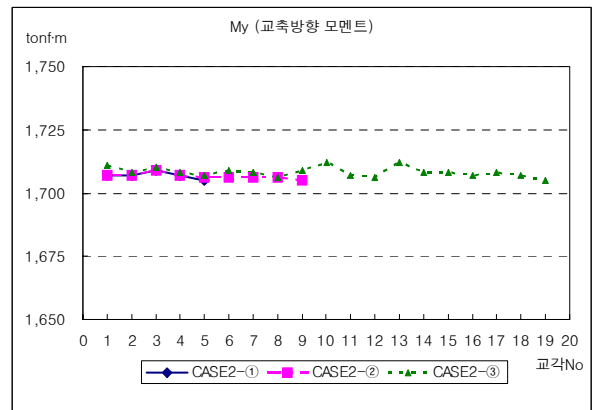
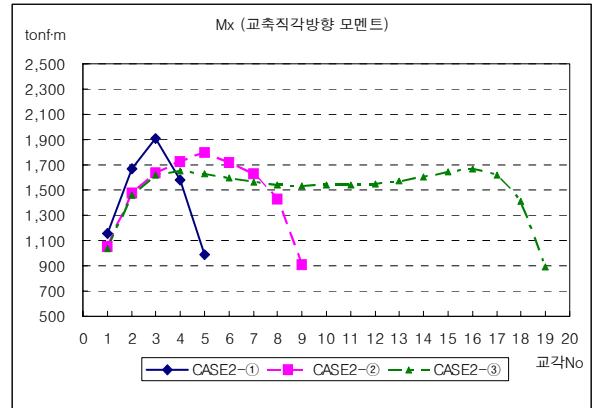


그림 6. Case 2 해석결과 모멘트 비교

표 4. Case 2 - ③ 모드별 질량참여율

Mode	Period	모드별 질량참여율		모드별 질량누가참여율	
		UX	UY	UX	UY
		1	0.599	53.00	0.00
2	0.556	0.00	76.30	53.00	76.30
3	0.351	0.00	0.05	53.00	76.35
4	0.241	0.00	2.97	53.00	79.33
5	0.232	1.85	0.00	54.85	79.33
6	0.229	2.17	0.00	57.01	79.33
7	0.155	0.00	0.06	57.01	79.38
8	0.140	0.00	0.79	57.01	80.18
9	0.134	0.00	0.00	57.01	80.18
10	0.119	0.00	0.04	57.01	80.21
11	0.106	0.00	4.24	57.01	84.45
12	0.076	25.95	0.00	82.96	84.45
13	0.069	0.00	1.86	82.96	86.30
14	0.066	0.00	0.01	82.96	86.32
15	0.064	0.00	0.16	82.96	86.48
16	0.061	0.16	0.00	83.12	86.48
17	0.060	0.00	1.17	83.12	87.65
18	0.059	0.02	0.00	83.13	87.65
19	0.055	0.00	0.00	83.13	87.65
20	0.050	0.21	0.00	83.34	87.65

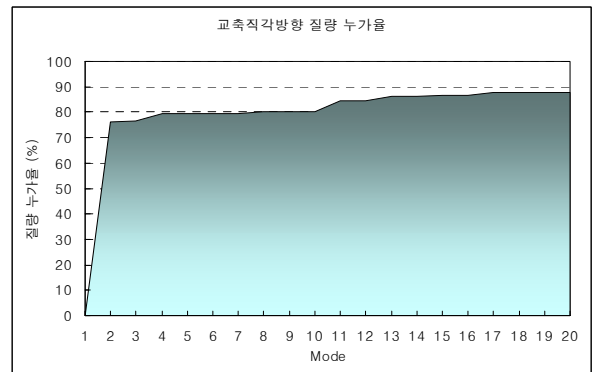
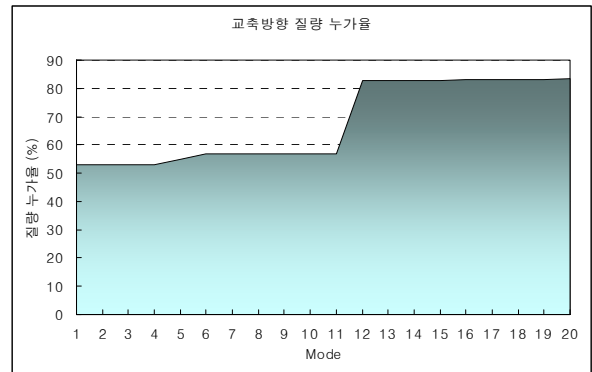


그림 7. Case 2 - ③ 모드별 누가질량참여율

5. 결론

Case 1의 결과에서 보듯이 교량의 기하학적 형상, 내진해석 방법별로 최대 151%, 최소 53%의 차이가 발생함을 알 수 있다. 이와 같이 내진해석 기법별로 큰 차이가 발생함에 따라 최적의 교량 설계를 위해서는 보다 정밀한 해석이 필요함을 의미한다.

다중모드 스펙트럼 해석결과치를 보면 하나의 진동모드에 대한 최대 질량참여율이 교축방향으로 33%, 교축직각방향으로 57%로 매우 작다. 이는 철도교의 특징인 고정-가동단의 반복으로 인하여 다수의 진동모드를 갖고 있음을 의미한다. 따라서 하나의 대표적인 진동단위를 가지고 내진해석을 수행하는 단일모드 스펙트럼 해석법으로는 다경간 교량에서 정확한 결과치를 기대하기 어렵다. 또한 본고에서는 생략하였지만 상부의 형식이 다양하거나 교각의 형상이 불규칙할 경우(즉 기하학적으로 매우 불규칙 할 경우) 다중모드 스펙트럼 해석과 단일모드 스펙트럼 해석의 결과값의 차이는 더욱 커지므로 단일모드 스펙트럼 해석법의 경우 그 적용성에 한계가 있다고 할 수 있다.

현재 철도교에서 주로 사용하고 있는 진도법의 경우 결과치가 매우 작음을 알 수 있다. 교량의 변위형상을 보면, 비록 지점조건이 고정-가동단의 반복이라 하더라도 각 경간별 독립거동을 하는 것이 아니라 복합적인 거동을 하는데, 이는 철도교의 경우 각 경간별로 독립거동을 한다는 가정이 틀렸음을 의미한다. 또한 진도법을 사용할 경우 다중모드 스펙트럼 해석의 결과에서 보는바와 같이 같은 높이의 교각이라도 위치에 따라 다른 단면력을 가지는 교량의 전체적인 기하학적 영향을 반영하지 못한다는 측면에서 올바른 내진해석 방법이라 할 수 없다.

상기와 같이 철도교 내진해석은 다중모드스펙트럼 해석법을 적용하여야 하며, 이를 적용하여 경간이 다양한 교량구조물을 해석한 Case 2의 결과를 살펴보면 다음과 같다.

경간수의 차이에도 불구하고 교축방향 모멘트는 거의 비슷한 값을 가지며 교축직각방향 모멘트의 경우 경간수가 많아짐에 따라 어느 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다. 즉 교대 근처의 교각은 단면력의 변화가 심하나 일정범위를 벗어난 교각의 경우 단면력이 일정하게 된다. 즉 장경간 교량의 경우 전체 교량을 모델링하지 않고 일정 범위 이상으로만 모델링 하여 내진해석을 수행하여도 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

이상의 결과값 들은 교각을 소성설계로 하였을 경우, 즉 교각의 탄성지진력을 응답수정계수로 나눈 값이며, 이를 상시해석과 비교하면 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 철도교의 특성상 상시하중이 매우 크기 때문이며, 만약 교각을 탄성설계 할 경우 설계단면력은 상시하중에 의한 단면력에 비하여 최대 3배 이상 차이가 발생한다. 이와 같은 경우는 절대적으로 내진해석이 구조물의 단면제원을 결정하는바 최적의 교량설계를 위해서는 보다 정밀한 내진설계가 요구된다.

참고문헌

1. 건설교통부(2004), "철도설계기준(철도교편)", 대한토목학회
2. 한국지진공학회(2002), 제10회 기술강습회, "철근콘크리트 교각의 내진설계"
3. 한국지진공학회(2005), 제17회 기술강습회, "교량의 내진과 면진의 실무"
4. Alan Williams(1998), "Seismic Design of Building and Bridges", Engineering Press
5. Ronald E. Heinz, R. J. Betsold (1987), "Seismic Design and Retrofit Manual for Highway Bridges", U.S. Department of Transportation. Federal Highway Admin.
6. SAP 2000 Analysis Reference Manual, Computers and Structures, Inc.