

아스팔트 혼합물의 동탄성계수 마스터곡선

Master Curve of Dynamic Modulus for Hot Mix Asphalt

김현오*, 이관호**, 김준기***

Kim, Hyun-Oh, Lee, Kwan-Ho, Kim, Joon-Ki

1. 서론

현재의 국내의 도로설계는 미국의 AASHTO 설계법과 일본의 TA 설계법을 혼용하여 사용하고 있다. 이들의 설계법은 자국의 시험도로로부터 얻어진 각종 자료를 기초로 하여 개발된 설계법이기 때문에 국내의 지역적 특성과는 매우 다른 경우가 많다. 그래서 우리나라의 경우에도 최근 중부고속도로에 시험도로를 만들어 향후에 나오는 다양한 데이터를 바탕으로 국내의 실정에 맞는 도로설계 데이터를 수집하는 중이다. 이와 함께 국내에서도 경험적이고, 역학적인 설계법 개발을 위해 “한국형 도로포장설계법”을 개발 중에 있다. 포장체의 성능은 다양한 요소에 의해서 영향을 받게 되고, 이중 하나가 도로포장재료이다. 이 재료의 물성치 중 최근에 많이 제시되고 있고, 제안하는 방법이 동탄성계수이다(건설교통부, 2002). 동탄성계수는 다양한 온도조건, 하중, 속도를 이용하여 다양한 교통조건을 묘사할 수 있으며, 사용된 골재의 입도, 아스팔트 바인더에 따라서 변화하며, 특히 아스팔트 혼합물의 점탄성적인 특성을 잘 묘사할 수 있는 물성치 평가방법이라고 할 수 있다. 본 연구는 한국형포장설계법 개발을 위한 아스팔트 혼합물의 재료물성정량화의 1단계 연구결과를 정리한 것으로, 주 목적은 전이함수의 종류에 따른 동탄성계수 마스터곡선의 비교 및 평가이다. 사용된 전이함수는 Arrhenius, 2002 AASHTO Guide, Experimental method 등의 3가지 다른 방법을 적용하였다.

2. 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 및 전이함수

아스팔트 혼합물의 점탄성 거동특성은 사인과 하중을 휴지기 없이 연속재하한 상태에서 측정된 변형특성과 하중과의 상관관계로부터 규명이 가능하며, 이때 이용하는 파라미터를 복합탄성계수(complex modulus, E^*)로 정의한다. 시험에 이용되는 하중과 측정된 변형, 및 복합탄성계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma = \sigma_o \sin(\omega t), \quad \varepsilon = \varepsilon_o \sin(\omega t - \phi), \quad E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \frac{e^{i\omega t}}{e^{i(\omega t - \phi)}}$$

동탄성계수는 복합탄성계수의 절대값을 의미하며, $|E^*| = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o}$ 같이 표현된다.

시험으로부터 결정되는 동탄성계수는 시험온도 및 하중의 조합에 따라 각각의 값을 얻을 수 있다. 이것을 하중시간과 온도의 중첩(Superposition Principle)원리를 적용하여 <그림 1>과 같은 마스터곡선 및 전이함수를 작성할 수 있다. 마스터곡선은 특정 아스팔트 혼합물의 하중과 온도와의 상관관계를 규명할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 세 가지 방법을 이용하여 마스터곡선을 만들었다. 하중주파수와 온도의 상관관계를 이용하는 Arrhenius 방법, 아스팔트 바인더의 점도와 하중재하시간과의 상관관계를 이용하는 AASHTO 2002 방법, 실험적인 방법(Experimental Method)등이 있다. 이외에도 다른 연구자들이 제안한 다양한 방법이 있는데, 모든 전이함수 결정법의 근간은 다중함수를 이용한 마스터곡선 결정과정이다.

아리니우스(Arrhenius) 방법은 reduced frequency (f_r)를 이용하여 각각의 하중주파수(f)를 나누어주면 된

* 정희원, 경성대학교 건설환경공학부 공학석사 051-620-4756 (E-mail : shyun100@hanmail.net)

** 정희원, 경성대학교 건설환경공학부 부교수 051-620-4756 (E-mail : khlee@ks.ac.kr)

*** 정희원, 서울특별시 도로관리과 공학박사 (E-mail : kimjoonk@hotmail.com)

다. 여기서 $a(T)$ 는 주어진 온도로의 변환에 필요한 변환량을 의미한다(Pellinen 2002).

아리니우스 방법은 식에서 표현하듯이 분자 상호간의 이동에서 생기는 화학반응으로 생기는 활성화에너지 (ΔE_a)를 이용하여, 기준온도로 변환하여서 전이함수를 결정하는 방법이다(Kaloush, 2001). ΔE_a 는 각 혼합물의 온도 별로 따로 측정을 하여야하나 본 연구에서 기준으로 잡은 21°C에서는 210 J/mol을 이용하였다.

2002 AASHTO에서 추천하는 방법은 아스팔트 바인더의 점도특성을 이용한 것으로, 점도의 감온성 (Viscosity Temperature Susceptibility)방법이라고 불리며, 절대온도의 변화에 따른 대수 그래프상의 점도 값의 기울기이다. 이 값은 일반적으로 3.36-3.98의 값을 가진다. 점도와 감온성 관계는 $\log(\log(\eta)) = A + VTS(\log(T_R))$ 로 표현된다. 여기서, η 은 점도(cPoise), T_R 은 온도(°R). A는 점도-감온성 곡선에서의 절편, VTS는 점도와 감온성 관계에서의 기울기를 나타낸다.

실험적(Experimental) 방법은 컴퓨터프로그램이 가지는 통계적인 처리방법으로, 본 연구에서는 마이크로소프트사의 엑셀(EXCEL)의 해 찾기 기능을 이용하여 전이함수를 결정하였다. 위의 전이함수를 바탕으로 Pellinen(2001)에 의해 제안된 sigmoidal function을 이용하여 마스터곡선을 결정했다. MS사의 EXCELL의 Solver function을 이용하여 방정식에 사용된 파라미터(그림 2)를 결정하였다.

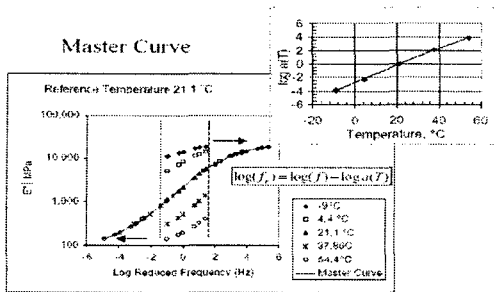


그림 1. 마스터곡선 및 변환함수

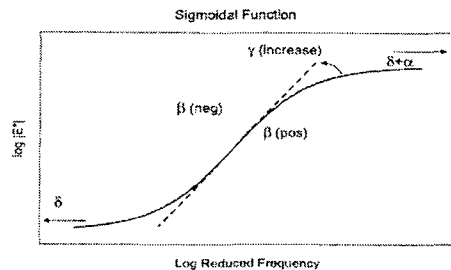


그림 2. Shape parameter의 정의

3. 실험재료 및 시험방법

3.1 실험재료 및 배합설계

실험에 이용된 골재는 국내에서 보편적으로 이용 가능한 화강암골재를 이용하였고, 아스팔트는 AP-3와 AP-5등급을 이용하였다. 성능등급시험결과로부터 AP-3는 PG58-22, AP-5는 PG64-22로 확인되었다. 아스팔트 혼합물은 기층용 밀입도 25mm를 적용하였다.

아스팔트 혼합물의 배합설계는 Superpave Level 1 방법을 준용하였고, 선회다짐기의 다짐횟수에 따른 밀도변화 및 공극률의 변화를 측정하여 4% 공극율을 가지는 아스팔트 함량을 <표 1>과 같이 결정하였다. 결정된 최적아스팔트 함량을 이용하여 실험에 필요한 공극률을 가진 시편을 제작하였다. 시험에 이용된 시편은 선회다짐기를 이용하여 직경 150mm, 높이 160mm 원통형 시편을 제작한 후, 코어링(coring)하여 직경 100mm, 높이 150mm 원통형 공시체를 시험용 시편으로 이용하였다.

3.2 동탄성계수시험

본 연구에 적용된 동탄성계수 평가용 시험항목과 시험항목별 구체적인 시험조건은 Pellinen 등(2001)에 의해 수행된 Simple Performance Test(SPT) 연구에 적용된 내용을 국내의 시험기기 여건 등을 고려하여 수정하여 이용하였다. 동탄성계수시험은 <표 2>와 같은 시험온도, 하중조건 및 변형률을 적용하였다. 시험에 이용된 시편은 각각의 혼합물별로 최적아스팔트함량에서 공극률(2%, 4%, 6%)의 변화를 주어 각각 3개의 시편을 제작하였고, 또한, 4%공극률에서 최적아스팔트 함량±1%의 아스팔트함량을 조정하여 각각 3개 제작하여 시험에 이용하였다. 이는 최적아스팔트 함량에서 공극률의 변화 및 동일한 공극률에서 아스팔트 함량



의 변화에 따른 동탄성계수의 변화특성을 평가하기 위함이다.

동탄성계수는 비파괴시험이므로 고온에서의 특별한 상태가 아니면 같은 시편을 이용하여 일련의 시험을 순차적으로 수행한다. 시험은 저온에서 고온으로, 높은 하중주파수에서 낮은 하중주파수의 형태로 변환하여 수행한다. 이러한 온도-하중주파수 변이시험은 시험중 발생하는 시험시편의 손상을 최소화할 수 있는 시험순서이다. 저온 및 상온 (-10°C, 5°C, 20°C)에서는 138kPa(20psi)에서 965kPa(140psi) 정도의 압축하중을 이용하였고, 여기서 965kPa 하중수준은 대형트레일러의 차량하중을 모사한 것이다. 고온, 40°C의 경우 하중수준을 46-68kPa (7-10psi), 55°C에서는 21kPa (3psi)를 적용하였다. 주어진 시험온도에서 하중주파수의 변환은 다음 단계의 하중주파수를 적용하기까지 약 60초 정도의 휴지기 시간을 적용한 후 시험한다. <표 3>은 시험에 이용된 하중주파수 및 시험결과측정범위를 보여주고 있다.

표 1. 기층용 혼합물 배합설계자료

혼합물	골재	밀입도 25mm	
	아스팔트	PG 58-22 (AA-1)	PG-64-22 (AB-1)
최적 아스팔트함량 (%)		4.3	4.5
G _{mm}		2.481	2.487

표 2. 동탄성계수 시험항목 및 시험조건

시험온도(°C)	하중주파수 (Hz)	응력 상태	변형량 (μstrain)
-10, 5, 20, 40, 55	25, 10, 1, 0.1, 0.05	선형	< 150

표 3. 하중주파수 및 결과측정범위

시험시료	하중조건	하중주파수	반복횟수	측정범위
채취시료 및 실내제작시편	사인파하중	25	200	95-200
		10	200	95-200
		5	100	95-100
		0.1	20	15-20
		0.05	15	10-15

4. 실험결과

만능시험기를 이용하여 나온 동탄성계수를 평가하였다. 측정된 동탄성계수의 경우 미국의 연구진에 의해 제시된 측정값보다 다소 작게 산정되었다. 이는 국내에서 사용하고 있는 밀입도 아스팔트 혼합물의 입도가 잔골재의 함유량이 높아서 값의 차이를 나타내는 것으로 판단된다.

<그림 3>은 Arrhenius방법을 이용한 기층용 혼합물의 동탄성계수를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 실험값과 시그모이달 함수를 이용해서 나타난 결과 값의 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다.

<그림 4>은 공극률에 따른 동탄성계수를 비교하기 위해, 공극률 2%, 4% 및 6%를 같은 그래프에 작성하여 비교하였다. 대체적으로 공극률이 커질수록 동탄성계수의 값이 작아짐을 알 수 있으나, 전체적인 값의 변화를 고려한다면 그렇게 큰 차이가 난다고는 할 수 없다.

<그림 5>은 공극률 4%에 최적 아스팔트함량을 ±1% 증감시킨 결과와 최적아스팔트함량을 그대로 유지한 결과를 비교해 보았다. 점탄성 이론처럼 저온영역에서는 골재의 맞물림 현상이 응력구조를 지배하기 때문에 값의 별다른 차이가 없으나, 고온 영역에서 점성성분이 매우 약해졌을 때는 아스팔트 바인더의 함량이 어느 정도는 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 그러나, 마스터커브에서는 고온영역과 저온영역 사이의 값의 차이가 매우 크기 때문에 고온영역에서의 값의 차이가 크더라도 전체적인 특성에는 별다른 영향을 끼치지 못하는 것을 알 수 있다.

<그림 6>은 공극률4%에 대하여 3가지 다른 전이함수를 이용하여 결정된 동탄성계수를 나타내었다. 전체적인 값의 차이는 그렇게 크지 않으나, 저온에서는 Arrhenius방법과 Experimental방법이 거의 유사하고, 고온에서는 Experimental방법과 AASHTO 2002 방법이 거의 유사한 결과를 보였다.

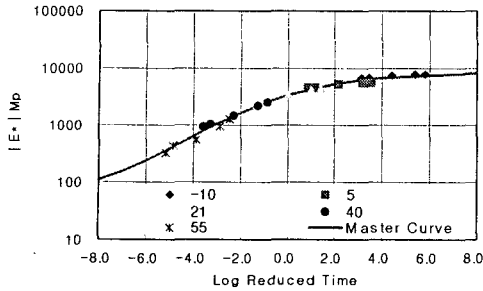


그림 3. 25mm화강암 PG58-22 공극률2%

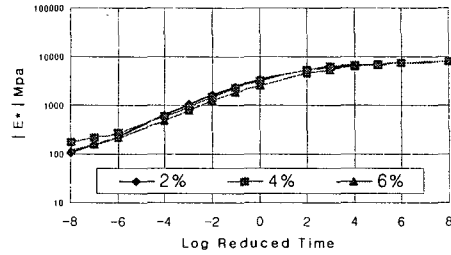


그림 4. 화강암 PG58-22 공극률별 비교

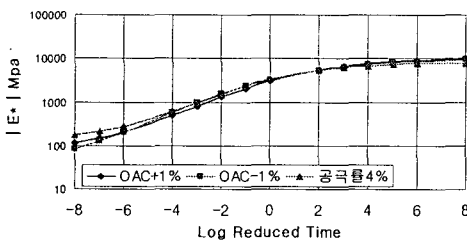


그림 5. 최적아스팔트함량±1%

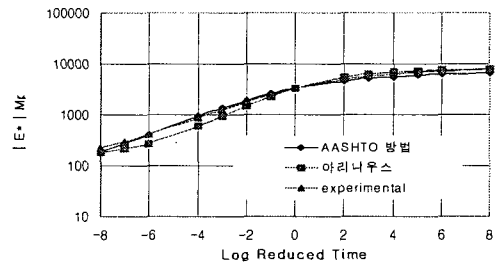


그림 6. 전이함수별 동탄성계수 비교

<표 4>는 시그모이달 함수의 파라미터 값을 결정하기 위해 사용된 전이함수(shift factor) 및 아스팔트 혼합물 활성화에너지(activated energy) 값을 정리한 것이다. <표 4>의 변환량 및 활성화에너지는 시그모이달 함수를 결정하기 위하여 필요한 항목으로, 실험적 방법을 이용하여 결정하였다. 먼저 Witczak 연구진이 제시한 혼합물 에너지 값을 초기값으로 실험 결과값을 표현하는 시그모이달 함수 파라미터를 구하고, 이를 이용하여 예측된 동탄성계수 값을 산정한다. 산정된 동탄성계수 값을 이용하여 변환량은 재산정하고, 이를 이용하여 혼합물에너지 값을 계산한다. 계산된 혼합물에너지 값을 이용하여 최종 시그모이달 함수 파라미터를 결정하였고, 이를 <표 5>에 나타내었다.

표 4-a. Shift Factor 및 활성화 에너지 (아리니우스 방법)

아스팔트		AP-3 (PG 58-22, PG 64-22)									
		shift factor : Log a(T)					Activated Energy (KJ/mol)				
골재	온도	-10	5	20	40	55	-10	5	20	40	55
기층용화강암 25mm		-4.3972	-2.1471	0	2.2645	3.8670	210	210	210	210	210
모든 기층용 아스팔트 혼합물에 동일한 값 적용됨.											

표 4-b. Shift Factor 및 활성화 에너지 (실험적 방법)

아스팔트		AP-3 (PG 58-22)									
		shift factor : Log a(T)					Activated Energy (KJ/mol)				
골재	온도	-10	5	20	40	55	-10	5	20	40	55
기층용 화강암 25mm	2%	-7.3171	-2.4276	0	2.5659	4.6774	352	237	210	238	254
	4%	-5.3853	-2.5307	0	2.6776	5.0301	257	247	210	248	273
	6%	-5.7791	-2.4830	0	2.5064	4.8945	276	243	210	232	266
	OAC-1%	-6.3180	-2.3869	0	2.4481	5.6741	302	234	210	227	308
	OAC+1%	-7.5342	-2.6241	0	2.3296	4.9120	360	256	210	216	267



아스팔트		AP-5 (PG 64-22)									
골재	온도	shift factor : Log a(T)					Activated Energy (KJ/mol)				
		-10	5	20	40	55	-10	5	20	40	55
기층용 화강암 25mm	2%	-6.6972	-2.7755	0	3.6947	6.2489	320	272	210	343	340
	4%	-4.7018	-4.7820	0	2.4264	4.4183	225	468	210	225	240
	6%	-5.2911	-2.4437	0	3.5354	6.3981	253	240	210	328	348
	OAC-1%	-7.1241	-2.2747	0	2.3396	5.8433	340	223	210	217	318
	OAC+1%	-6.0956	-2.4000	0	2.6647	5.4405	291	235	210	247	295

표 4-c. Shift Factor 및 활성화 에너지 (AASHTO 방법)

아스팔트		AP-3 (PG 58-22)									
골재	온도	shift factor : Log a(T)					Activated Energy (KJ/mol)				
		-10	5	20	40	55	-10	5	20	40	55
기층용 화강암 25mm	2%	-5.990	-3.126	0	2.412	4.269	286	306	210	222	232
	4%	-6.983	-3.644	0	2.798	4.977	333	356	210	259	270
	6%	-6.720	-3.507	0	2.692	4.789	321	343	210	249	260
	OAC-1%	-6.729	-3.512	0	2.696	4.796	321	343	210	250	260
	OAC+1%	-7.072	-3.691	0	2.833	5.046	338	361	210	263	274

아스팔트		AP-5 (PG 64-22)									
골재	온도	shift factor : Log a(T)					Activated Energy (KJ/mol)				
		-10	5	20	40	55	-10	5	20	40	55
기층용 화강암 25mm	2%	-8.073	-4.360	0	3.335	5.925	386	426	210	309	322
	4%	-6.025	-3.254	0	2.489	4.421	288	318	210	231	240
	6%	-9.012	-4.867	0	3.723	6.613	430	476	210	345	359
	OAC-1%	-8.359	-4.514	0	3.454	6.134	399	442	210	320	333
	OAC+1%	-7.401	-3.997	0	3.058	5.431	353	391	210	283	295

표 5. 시그모이달 함수를 이용한 마스터곡선의 파라미터

아스팔트		AP-3 (PG 58-22)				AP-5 (PG 64-22)			
방법	공극률	δ	α	β	γ	δ	α	β	γ
아리니우 스 방법	2%	1.5802	2.3521	-1.5748	0.3750	2.2342	1.7180	-1.3268	0.5535
	4%	2.0821	1.8339	-1.2936	0.4466	2.3748	1.4294	-1.2290	0.6103
	6%	1.7214	2.2183	-1.2001	0.3617	2.2933	1.6715	-1.1964	0.5964
	OAC-1%	1.8337	2.2066	-1.1297	0.2708	1.2613	2.1237	-1.4603	0.2568
	OAC+1%	1.9880	1.9435	-1.3267	0.3438	1.8804	2.1237	-1.1512	0.3224

아스팔트		AP-3 (PG 58-22)				AP-5 (PG 64-22)			
방법	공극률	δ	α	β	γ	δ	α	β	γ
실험적방 법	2%	1.4062	2.4954	-1.7435	0.32159	1.7153	2.2898	-1.5525	0.2842
	4%	1.9880	1.9435	-1.3267	0.34386	2.0997	1.7257	-1.2152	0.4063
	6%	1.8598	2.0466	-1.1851	0.3258	2.1303	1.8914	-1.2563	0.3440
	OAC-1%	1.8337	2.2066	-1.1297	0.2701	1.2613	2.745	-1.4603	0.2568
	OAC+1%	1.8455	2.1388	-1.1521	0.3337	1.8804	2.1237	-1.1512	0.3224

아스팔트		AP-3 (PG 58-22)				AP-5 (PG 64-22)			
방법	공극률	δ	α	β	γ	δ	α	β	γ
AASHTO	2%	2.0630	1.7762	-1.6109	0.4513	1.4890	2.4367	-1.7860	0.2914
	4%	1.6154	2.2398	-1.7174	0.3226	2.1604	1.6244	-1.3604	0.4438
	6%	1.1024	2.7384	-1.6876	0.2739	1.8463	2.0704	-1.6396	0.3144
	OAC-1%	-0.5707	4.5038	-2.2335	0.2318	-2.6227	6.5011	-2.8134	0.2043
	OAC+1%	1.0879	2.8786	-1.5473	0.2700	0.8710	3.0591	-1.7437	0.2492



5. 결론 및 향후연구과제

AP-3 및 AP-5를 이용한 기층용 화강암골재 아스팔트 혼합물(25mm)의 동탄성계수 시험을 수행하였고, 지금까지의 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 국내에서 생산되는 기층용 화강암골재(25mm)를 이용한 AP-3(PG58-22) 및 AP-5(PG64-22) 혼합물의 최적아스팔트 함량은 약 4.3%에서 4.5% 정도의 범위에서 결정되었다.
- 공극율의 변화에 따른 동탄성계수의 값은 대체적으로 공극률이 커질수록 동탄성계수의 값이 작아짐을 알 수 있으나, 전체적인 값의 변화를 고려한다면 그렇게 큰 차이가 난다고는 할 수 없다. 공극율 4%에 최적 아스팔트량을 $\pm 1\%$ 증감시킨 결과와 최적아스팔트함량을 그대로 유지한 결과를 비교해 보았다. 점탄성 이론처럼 저온영역에서는 골재의 맞물림현상이 응력구조를 지배하기 때문에 값의 별다른 차이가 없으나, 고온 영역에서 점성성분이 매우 약해졌을 때는 아스팔트 바인더의 함량이 어느 정도는 영향을 끼치는 것을 알 수 있다.
- 마스터곡선을 결정하기 위하여 3개의 다른 전이함수 결정법(아레니우스방법, AASHTO 2002, 실험적 방법)을 이용하여 마스터곡선을 결정하기 위한 변환량을 결정하였고, 이를 이용하여 시그모이드형 함수형태의 마스터곡선의 입력변수를 각각 결정하였다. 마스터곡선을 결정하기 위해 사용된 3개의 전이함수에 따른 차이는 거의 미미한 것으로 나타났고, 이는 다양한 방법의 전이함수를 동탄성계수 마스터곡선의 결정에 이용할 수 있음을 의미한다. 즉, 전이함수 결정에 이용 가능한 자료에 따라 다양한 전이함수를 동탄성계수 마스터곡선결정에 이용함을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 건설교통부 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안연구” 연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(2002), “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”, KPRP-요약-02, pp. 142
2. 김현오(2005), “기층용 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 평가 및 예측방정식개발”, 경성대학교 공학석사학위논문
3. Kaloush, K.E. (2001), “Simple Performance Test for Permanent Deformation of Asphalt Mixtures”, Ph.D Thesis, Arizona State University, pp. 413
4. Pellinen, T.K. (2001), “Investigation of the Use of Dynamic Modulus as an Indicator of Hot-Mix Asphalt Performance”, Ph.D Thesis, Arizona State University, pp. 788
5. Pellinen, T.K., Witczak, M.W., and Bonaquist, R.F. (2002), “Asphalt Mix Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with Non-Linear Least Squares Optimazation”, 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, June 2-5